

KAVLI IPMU NEWS

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

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

TODIAS Today Institutes for Advanced Study

The University of Tokyo
東京大学国際高等研究所

Feature Putting the Universe on a Computer
Interview with Young-Kee Kim



27

No.

September 2014

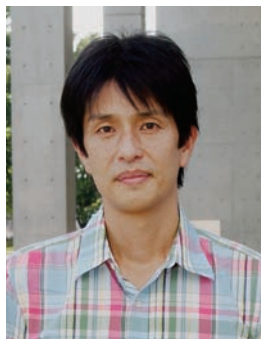
Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
Putting the Universe on a Computer
Naoki Yoshida
- 9 **Our Team** Masashi Hazumi
Song Huang
- 10 **Round Table Talk**
Peter Goddard with Hitoshi Murayama and Hiroshi Ooguri
- 16 **Interview** with Young-Kee Kim
- 23 **News**
- 28 **Highest Energy Cosmic Rays**
Masaki Fukushima

Japanese

- 29 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 30 **Feature**
宇宙の構造形成のコンピューターシミュレーション
吉田 直紀
- 35 **Our Team** 羽澄 昌史
黄 崧
- 36 **Round Table Talk**
村山斉と大栗博司、ピーター・ゴダードと語る
- 42 **Interview** ヤンキー・キム教授に聞く
- 49 **News**
- 52 **最高エネルギー宇宙線**
福島 正己



Naoki Yoshida is a Professor at the School of Science and Kavli IPMU, the University of Tokyo. He graduated from the University of Tokyo in 1996. He completed his doctoral course in the Max Planck Institute for Astrophysics in 2001. He received a Doctorate in Natural Science from Ludwig-Maximilians-Universität München in 2002. He became a postdoctoral fellow at the Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in 2001, the Japan Society for the Promotion of the Science's SPD postdoctoral fellow stationed at the Division of Theoretical Astronomy, the National Astronomical Observatory of Japan in 2003, Assistant Professor at Nagoya University in 2004, Associate Professor at the IPMU in 2008. Since April 2012, he has been a Professor at the School of Science, the University of Tokyo. In April 2014, he was also appointed as a Professor at the Kavli IPMU. He received the ASJ (Astronomical Society of Japan) Young Astronomer Award (2006) and the IUPAP Young Scientist Prize in Computational Physics (2008).

吉田直紀：東京大学理学系研究科およびKavli IPMU教授。1996年3月東京大学工学部航空宇宙工学科卒業。2001年7月マックスプランク宇宙物理学研究所博士課程修了、2002年2月ミュンヘン大学より博士の学位を取得。2001年8月米国 ハーバード・スミソニアン天体物理学センター博士研究員、2003年4月日本学術振興会特別研究員SPDとして国立天文台理論天文学研究系に所属、2004年4月名古屋大学大学院理学研究科助手、2008年9月IPMU准教授、2012年4月東京大学理学系研究科教授、2014年4月からKavli IPMU教授に併任。日本天文学会研究奨励賞(2006年)、国際純粋応用物理連合 若手科学者賞(2008年) 受賞。

Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



July 26: Lecture at “Yomiuri Techno Forum” 2014 Summer Holidays Symposium “Exploring the Mysteries of the Universe and Space-Time,” held at the Nippon Press Center in Chiyoda-ku, Tokyo. (Photos: Courtesy of The Yomiuri Shimbun)



August 18: Lecture at a H-LAB 2014 Forum held at the ARK HILLS CLUB's club room in Roppongi, Tokyo. (Photos: ©H-LAB2014 keita hanaoka)



September 4: Presentation of the overview report at the FY2014 WPI site visit.

Putting the Universe on a Computer

1. Experimental Astronomy?

My physics colleagues get very excited when they perform an experiment that proves or falsifies some theory. Such a process is typical in the natural sciences such as chemistry, biology, and physics, where an experiment in the lab is an important step to developing a general theory. Unfortunately for astronomers, however, it is often (or almost always) impossible to conduct a laboratory experiment that can test their ideas, for example “What happens if the sun spins 100 times faster?” One can come up with many intriguing ideas like this, but astronomical objects are too large to handle and so we can’t set up desk-top experiments. It is impossible to spin the sun around, and it is impossible to let two black holes collide. Appropriate materials to make the large-scale structure of the universe, we can’t find even in a Tokyu-Hands store, which sells everything but the kitchen sink.

Instead, astronomers look up at the sky. Observations using multiple wave-bands, from radio to X-ray, enable us to look closely at planets, stars and galaxies. Thanks to the advancement of modern telescope instruments, we can see the detailed three-dimensional structure of a nebula, and can catch a glimpse of a young galaxy, for example.

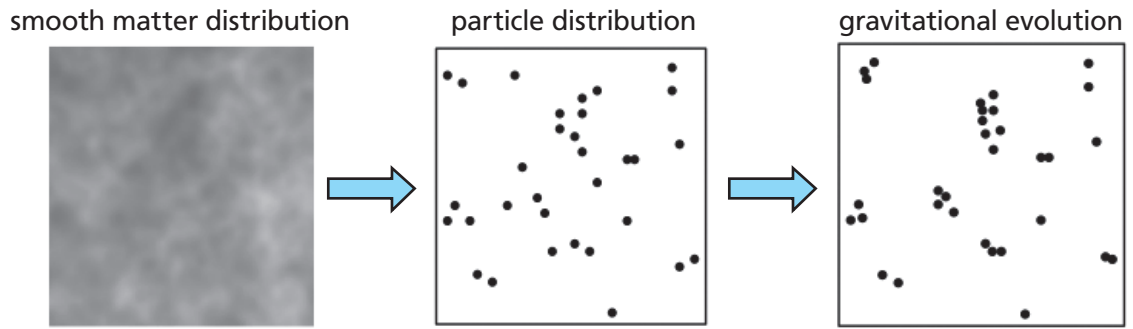
Yet, observations using a telescope do not always satisfy us. Sometimes we wish to see an object from different directions, and other times we wish to see the evolution of a galaxy over a billion years. Honestly, I often think “How nice if I could create a small galaxy in my office and look at it from any direction!”

Certainly, real experiments are impossible, but there’s actually a nice way of performing a sort of experiment, on a computer.

2. Virtual Universe

Computer simulations have been established as a powerful method in science. Not only in physics and astronomy, we see computer simulations used in a variety of situations. Most familiar are perhaps weather forecasts and earthquake simulations. Fine movies generated from computer simulations are shown on the TV news, by which we appreciate that such forecasts are based on realistic large-scale computations.

Computer simulations play different roles, depending on the research area. In astronomy and cosmology, they are used to study the formation and evolution of astronomical objects and of the universe itself. Simulations are also used when



$$\frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} G m_j \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|^3}$$

Figure 1. A schematic diagram of cosmic structure formation simulations. The initial density fluctuations (left panel) are represented by the distribution of mass elements (particles in the middle panel). The particles mutually interact via gravity, to form dense clumps (right panel).

planning a large observational program. For instance, the Kavli IPMU is leading a large sky survey using the Subaru Telescope. The so-called mock galaxy catalogs that closely resemble the real galaxy distribution are generated from structure formation simulations and are used extensively to explore a variety of scientific results to be obtained by the survey.

The reason I use computer simulations as my primary research tool is simple. In cosmology, the initial conditions are known observationally. This fact makes most of the cosmological simulations actually more than they could literally mean. It would probably be more appropriate to call them “numerical integrations” or simply “calculations.” The known initial conditions that are unambiguously described by mathematics and statistics, and the small number of physical processes involved, make the whole problem of cosmic structure formation a well-defined and actually tractable one.

One would guess that there are a number of physical processes involved in the formation of

stars and galaxies. Even the basic elements such as general relativity and nuclear physics are difficult enough to implement in a computer program. Interestingly, however, the only relevant physics to the formation of large-scale structure of the universe is gravity. Newtonian gravity that we learn about in high school or in the first year of college suffices. For very large cosmic structures, gravity dominates over other forces known in nature, including familiar electromagnetism, weak interaction and strong interaction that are important at the microscopic level. To summarize, it is expected that cosmic evolution can be realized and followed on a computer, if a fast enough computer is used.

3. From Big Bang Ripples to Large-Scale Structure

Cosmological simulations have a long history. They were pioneered nearly 40 years ago, and hence have a history as long as my own! In the early 1970’s, researchers used just a few hundred particles

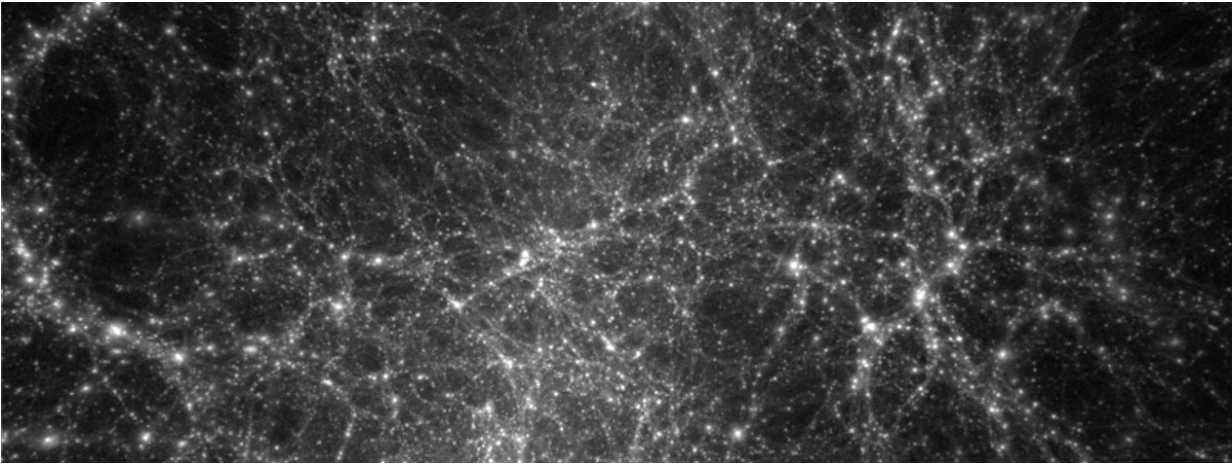


Figure 2. The distribution of dark matter in a modern cosmological simulation. Shown is a projected 100 x 300 million light-years area. The bright parts have high densities of dark matter.

(“galaxies”) to simulate the formation of galaxy clusters. It is worth mentioning that two Japanese physicists, Taro Kihara and Kazunori Miyoshi, made an important early contribution. The solid-state physics professor Kihara, then at the University of Tokyo, proposed using the two-point correlation function to describe the distribution of galaxies. The correlation function has been a primary element in statistics in cosmology since then. The most recent data from SDSS3 survey that the Kavli IPMU is participating in enabled precise measurement of the geometric structure of our universe by means of the two-point correlation function.

Simulations with a few hundred bodies (particles) were used in the early 1970’s. Rapid advancement in computer technology as well as sophisticated calculation algorithms made it possible to run simulations with larger and larger numbers of particles. Currently, the largest simulations employ nearly a trillion particles, achieving a billion times increase in 40 years (Figure 2).

The progress of such cosmological simulations

is shown in Figure 3. The simulation size has been increasing exponentially. Projecting the increase over the next 60 years, I would expect that simulations with 10^{23} particles will be performed in the year 2073, when I celebrate my 100th birthday! The number, close to the Avogadro number that is important in basic thermodynamics, also corresponds roughly to the number of stars in our observable universe. So, in about 60 years, one can represent all the stars in the universe in a computer simulation. This is something I would call “The Whole Universe Simulation.”

4. New Approach

While the idea of putting the whole universe on a computer is very exciting, I don’t think it will actually be realized, for several reasons. When one is able to follow the dynamics of the Avogadro number of particles, there should be a better way of describing the system in a macroscopic manner or in terms of a few gross quantities, just as thermodynamics

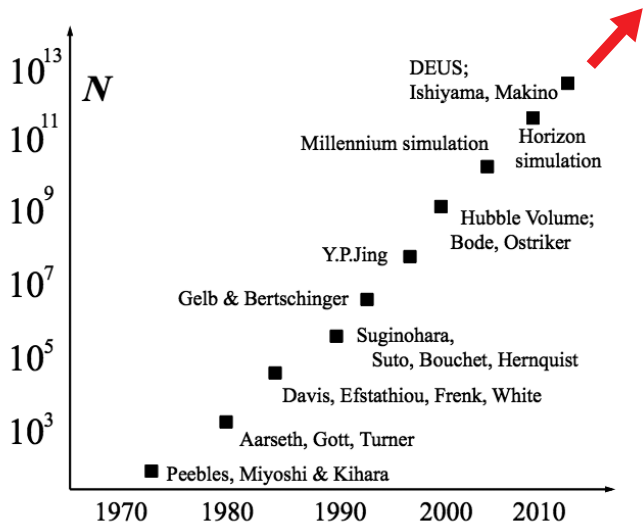


Figure 3. The evolution of cosmological simulations. We plot the number of particles used in the simulations against publication year. The names of the researchers or of the simulation projects are indicated. This author (NY) contributed to the two projects in the early 2000's.

provides a handful of quantities such as temperature and entropy that are useful and indeed quite enough to describe the state of a gas. Gravitational dynamics is peculiar and so such usual approaches do not seem to work, but still there is a better way of describing the behavior of a many-particle system.

The basic equations that govern the dynamics of matter (mostly dark matter) in the universe is given by

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \nabla \phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = 0$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho = 4\pi G \int f d^3 \vec{v}$$

Here, the so-called velocity distribution function $f=f(x, y, z, u, v, w)$ describes the number (fraction) of particles that are in an infinitesimal volume at a position (x, y, z) and have velocity (u, v, w) . Integrating f over the velocity space gives the particle number density ρ from which the gravitational field ϕ is obtained via the second equation, which is called the Poisson equation.

The time evolution of the velocity distribution function f on a six-dimensional space is completely determined by the coupled equations. A dream of computer physicists like me is to perform such a multi-dimensional integration efficiently on a massively parallel computer. Only last year (2013), our research group made a first important step toward realizing that goal. We were allowed to use about ten percent of the full capability of a supercomputer at Tsukuba University and so we performed the integration of the velocity distribution function f of dark matter particles on 64 to the power 6th grids. The results are shown in Figure 4. The spatial resolution is not impressive; in fact it is actually quite poor when compared with modern N-body particle simulations as shown in Figure 2. However, the velocity distribution is well described by a smooth function as seen in the middle panel of Figure 4. For reference, the corresponding result from a million particle simulation is shown in the right panel. Despite the impressive structure in the configuration space (x, y, z) , the overall resolution

Feature

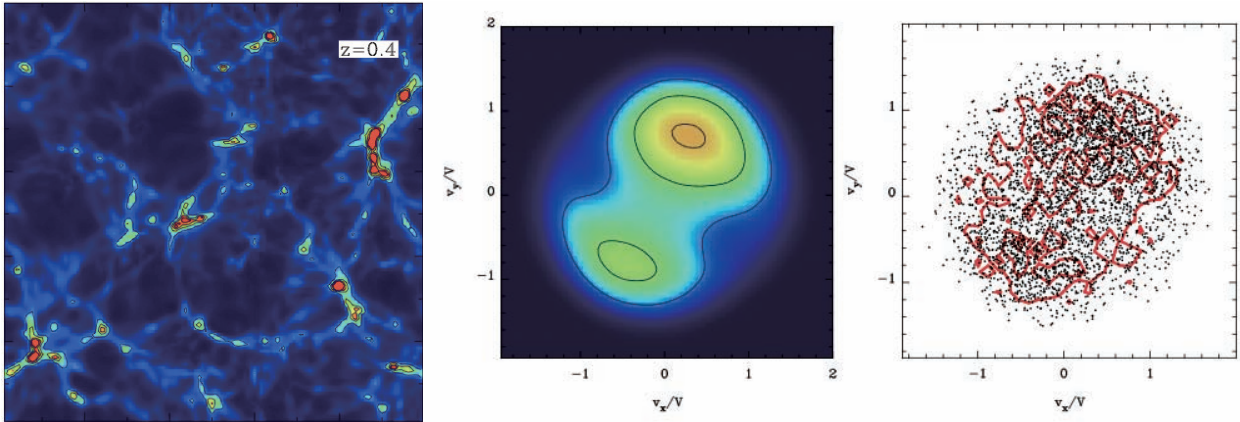


Figure 4. Large-scale structure formed in a Boltzmann simulation. Although the spatial resolution in the left panel is not as impressive as in the modern particle simulation (Figure 2), the velocity distribution function is accurately described by a smooth function (middle panel). The corresponding plot from a million particle simulation (right) shows no clear structure. The red lines show the smoothed distribution of the particles.

in the velocity space is poor, even with so many particles employed.

5. Future Prospects

The rapid progress in high performance computing makes it impossible for me to even imagine what one will be able to do in 30-50 years. My guess is that eventually cosmological simulations will become technically very simple. Computer power will be used to do integrations of the kind I explained above, or to do something similarly simple in concept. In fact, sophisticated algorithms are developed in order to overcome the shortcomings of current computers. When computers that are fast enough become available sometime in the near future, simple methods will be the best choice. Simulations will then be pure calculations, rather than sophisticated modelling with approximations. In this article, I have described an exceptionally clear problem of gravitational dynamics in cosmology. There are many other interesting phenomena in

the universe that involve more physics such as gas dynamics, chemistry, radiation transfer, and nuclear reactions. Only a small portion of such things have been explored so far by means of computational physics. It will be very exciting to put all these physical processes into a computer program and run it on a big machine. However, a crucial role of such grand-challenge simulations is, from my viewpoint, to identify some missing element in our understanding of how things work in the universe, rather than to reproduce what is already understood. I believe that there is also a vast discovery space where we can explore with telescopes *and* computer simulations. Surely I will be much more excited if I find a new telescope observation showing a structure of the universe that looks completely different from my computer simulations. I will then appreciate the breadth and the depth of the physics of the universe all over again.

Our Team

Masashi Hazumi

Professor

Research Field: **Experimental Cosmology and Particle Physics**



I am excited to start working concurrently for Kavli IPMU and KEK. I am an experimental physicist. My research focuses on fundamental laws of elementary particles and space-time. Until 2007, I worked on accelerator-based particle physics experiments, including the Belle experiment at the KEK B factory where I discovered CP violation in B decays with my colleagues. I then became interested in experimental tests of cosmic inflation. Establishing a new group at KEK, I am now working for the POLARBEAR project with researchers at UC Berkeley, San Diego and other institutions. POLARBEAR, which is deployed in Atacama, Chile, is an instrument designed to measure

polarization of the cosmic microwave background (CMB).

At Kavli IPMU, I plan to promote the LiteBIRD satellite project, which aims at CMB polarization measurements with the ultimate precision. My hope with LiteBIRD is to scrutinize cosmic inflation and shed light on quantum gravity behind it.

Song Huang

Postdoc

Research Field: **Astrophysics**



My main research interest is about the life of the massive galaxies in the Universe. As the population of galaxies that started to assemble at the dawn of Cosmic history, they carry invaluable information that can greatly help us extend our knowledge of galaxy formation and evolution. Using both photometric and spectroscopic information collected from ambitious project like the Hyper-Suprime Camera survey and

MaNGA, I will try to shed new light on the structural evolution, mass-accretion, and star-formation history of these fascinating galaxies.

Our Team

Round Table Talk (continued from No. 26, p. 21) : Peter Goddard with Hitoshi Murayama and Hiroshi Ooguri

Peter Goddard

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

Hitoshi Murayama

Kavli IPMU Director

Hiroshi Ooguri

Kavli IPMU Principal Investigator

As Governments Are More and More Dirigiste, Private Grants Are Very Important

Ooguri: You mentioned the raising of funds and you did that while in Cambridge in building this mathematical science complex in particular and then subsequently, you moved to the Institute for Advanced Study and I imagine you have been heavily involved in that. It seems to me that this kind of private philanthropy in helping basic science is very much in the Anglo-Saxon or British-American tradition.

Goddard: Yes, in recent decades, the last century or so, it's been particularly American. If you look back over the centuries, there was a long, strong tradition in the UK. That's how Oxford and Cambridge in particular had got their resources and the extent of independence that they have, through the resources that people gave to the colleges. That has become eroded as the sole method of finance.

Ooguri: In the UK, you say.

Goddard: In the UK, it has, from about the beginning of the 20th century, as a result of a combination



of the expansion and the diversification of higher education, which meant that you needed university laboratories, in particular. It was getting more expensive to teach and do research in universities because until the middle of the 19th century, people were doing the traditional curriculum or they were studying mathematics or classics. These were not expensive things. But from the middle of the 19th century, you needed laboratory facilities, the Cavendish laboratory and so on, for research. On the graduate level, you needed more and more resources and that combined also with the First World War meant there was crisis in Cambridge and Oxford at that point. And the government started giving money to the universities initially through university commissioners which separated the government from the process in the sense that the giving of money was not meant

to be an instrument of government policy with government influencing the university. That arrangement was eroded from the 70s and 80s in particular into the situation now that the government certainly takes the view that it gives money to universities in order that they should do things the government would like.

Ooguri: Are there incentives?

Goddard: Yes. From about 1990, in particular, a big emphasis started on wealth creation as an objective rather than saying that we just let universities do what they want, and they should be an independent force in society. And so, that change has meant that government financing tends to come with strings. Also because government, at least in the UK, and I think in the United States, has become more short term in its perspective. It's more responsive to public opinion. It's more concerned with getting reelected and that

means that it's looking for results on a timescale of two or three years because otherwise you can't influence the next election. All of those features influenced us when we needed new buildings and so on. We decided that we needed to raise the money for Cambridge because you just couldn't rely on the government coming up with funds.

Ooguri: Yes. It's a very interesting trend. It goes both ways. There was an article in the New York Times recently about danger of relying too much on private philanthropies, but on the other hand there are benefits of private philanthropies such as—well, I'm in a private university in the US and Berkeley is almost like a private university.

Murayama: Yes, only 10% public funds these days.

Ooguri: We do recognize, for example, that if there are new breakthroughs, sometimes we cannot wait for the government funding to follow. If you have private funding at your discretion, you can pick low-hanging fruit, which may not be easy to do if you wait for government to react. I guess it goes both ways. The Kavli IPMU is sort of unusual in Japan in that we have been successful in getting private fundings.

Murayama: Right. You wanted to, for example, start a workshop on a wall-crossing formula and then immediately, I could allocate some funds to get the workshop started, and that would produce lot of activities afterwards.

Ooguri: That's what's pretty amazing. It was a workshop that I proposed to Hitoshi because I wrote some paper with Masahito Yamazaki who is now a postdoc at the Institute for Advanced Study and that was

starting a new field, so we wanted to have a workshop quickly. I talked to Hitoshi and he immediately granted funding and then the workshop was put together within 3 months or so. Usually, those kinds of workshops take a year to prepare but, thankfully, we had the funding, we had a very talented and dedicated team of international office and so we were able to have this workshop and that was very, very helpful for my research as well as many other researchers at the IPMU. And so those kinds of things make a big difference.

Murayama: Right. Flexibility is very important indeed, yes.

Goddard: Yes. So I certainly came to the conclusion that private grants would be very important because governments, everywhere, I think, are more and more dirigiste. They're more and more trying to set agendas and these agendas are often short term. There's this other aspect that goes along with that, *managerialism*—the idea that you can address issues by managerial action: suppose, hypothetically, you have decided that the UK was weak in functional analysis, I don't know that it is, then you put in a few million for a few years and then you can turn it around. But it doesn't happen like that. That isn't the way that you build up strengths academically. You may make some short term effect but the idea that by managerial action, you can make, on a timescale of 2 or 3 years, important developments in academia, I think is just wrong. But, the bureaucrats have to believe in that because that's their *raison d'être*.

Progress of Science Is Far More Exciting Than We Could Have Anticipated

Goddard: Then the other aspect that

accompanies this is the audit culture—the idea that you have to be able to justify to the taxpayer that you have spent the money on what it was intended to be spent on. The problem with that is that it implies that, at the time you get the money, you should know what is going to be spent on, but we don't know what we're going to do. I remember just after I left the UK and went to Princeton, I was asked to report on somebody who had held a senior fellowship from one of the research councils in the UK. This gives money for five years to a senior professor to do research. What I was asked to do was to report on what this person had done. I was sent all of the details of the papers he had written and so on. And I remember that the first question was, "Has he done what he said he was going to do?"—and I said, "No," of course.

Ooguri: What was the issue?

Goddard: Of course, what he said he was going to do was interesting but as you would have hoped, he has done things that were far more interesting. I think this is something in which the bureaucratic arrangements that fund science in many countries consistently fail to be able to grasp.

Ooguri: Open-ended research ...

Goddard: Yes. The way I would put it to incoming members of institute was that if you know what you're going to do and how you're going to do it and when you're going to do it by, it is not going to be truly original research. We are finding out things we couldn't imagine. The excitement is that we may have fertile imaginations, but what happens is far more miraculous than we could have anticipated. If you look at the great writers of science fiction, Jules Verne and H. G. Wells, they were writing

these marvelous stories at the end of the 19th, and the beginning of the 20th century. And if you think of what actually happened in science compared to what they wrote about, it's far more exciting.

Ooguri: Right. The progress of science surpassed their imagination. So, you cannot plan those fundamental researches ahead, especially the goal of the research.

Goddard: Right. If you look at the development of string theory at any stage, it was never what people would...

Ooguri: On the other hand, there are lots of unintended applications of the results that you obtained by wandering through this process.

Goddard: Yes. It even goes for practical results, I mean, if you think about one of the things that has changed, more than anything else, the way we live our lives, or many of us live our lives, and it's made more commercial possibilities available than anything else, is the worldwide web, and that was not the result of some R&D department in some company sitting down and thinking: we have the Internet now; how can we make this a commercial possibility or how can we make it more useful! It was the result of scientific challenges.

Relationship between Mathematics and Fundamental Physics

Ooguri: I also wanted to ask you about your view on interdisciplinary research between mathematics and physics. I guess in the UK, the division between physics and mathematics is somewhat different from that in the continental mathematics. Has that influenced your view on the interdisciplinary activities? In the UK, the interaction between physics and mathematics is tighter in the sense

that some of the physicists are even regarded as mathematicians.

Goddard: I think always the boundary is artificial and determined by the local culture. It has been a tradition in the UK that you can approach physics in various ways, particularly in Cambridge. You can trace it back into the history of the organization of the university which was, say, different in Cambridge from Oxford and other places. In Cambridge, the dominant subject from the 18th century onwards was not actually classics but mathematics. The first honours examinations in Cambridge were in mathematics.

Ooguri: Is that for all students you mean?

Goddard: Yes. From the 18th century onwards, they developed special examinations in mathematics, and so if you wished to obtain the highest honours, you would have to take mathematics. That was true up until about 1820 when classics became available as a first honours subject to study alongside mathematics. It meant that people like William Wordsworth, the poet, studied mathematics. He didn't do very well, even though he came to Cambridge with a scholarship in mathematics. But then it meant that great figures in the later part of the 19th century came out of mathematics and went into the Cavendish; from James Clerk Maxwell onwards. Then even people like Maynard Keynes, the economist, started off in mathematics at the very beginning of the 20th century. That tradition was always there in the background. Now you have to dig down to find it but it has influenced the way that things have grown up.

Ooguri: That's very interesting.

Goddard: That's a Cambridge phenomenon but within the

mathematics framework, then, people split off in various ways. I think the main thing that has changed over time, viewed internationally, is that the relationship between mathematics and fundamental physics has changed just enormously, clearly.

Ooguri: What's your view? How has it changed?

Goddard: I think if in the 1960s, there were very few people who knew very much mathematics of the sort that is now taken for granted in your seminar, for example.

In Early 70s. Marriage between Mathematics and Physics Ended in Divorce?

Ooguri: Right. Well, I guess I remember there was an article written by Freeman Dyson. That was written probably in early 70s...

Goddard: *Missed opportunities?*

Ooguri: Yes, *Missed Opportunities*, where he says, "the marriage between mathematics and physics, which was so enormously fruitful in past centuries, has recently ended in divorce."

Murayama: Yes, that's right. Did it elaborate on what the cause of the divorce was?

Ooguri: It was partly because elementary particle physics was chaotic. That was before the standard model of particle physics was established and the gauge theory became the main stream.

Murayama: That's interesting.

Goddard: It was odd timing because I would say that the time when ...

Ooguri: It was just about the time when gauge theory actually started to fly.

Goddard: Well, the triumph of gauge theory came along with Gerard 't Hooft in the 70s, 71 or 72. Then it

went on from there to the building of the standard model, but the dominant influences that really, I think, started changing things here were the work in the mid-1970s of Michael Atiyah and others, and then the sort of growing influence of Edward Witten. I think that that really changed how people perceived what is regarded as a reasonable amount of mathematics for a physicist to learn. For example, when I was a graduate student, the initial problem that I studied was the singularities of the scattering matrix in the complex plane. It was thought that there was a reasonable grasp of the singularities and their discontinuities in the physical region, but attempts within the context of perturbation theory to get a handle on complex singularities had been limited and so it was suggested that I should think about singularities outside the physical region and complex singularities. There was work on this using homological techniques and so on, but very few people knew about it and when you spoke about it, you really had to, in some sense, translate all of that.

Ooguri: That was not a standard language?

Goddard: It was not a standard language at all. In fact, it was slightly suspect. At various times, people have worked things out in one language and then translated them into another. There's argument about to what extent this is true in Newton. He wrote everything in classical geometry, the geometry of the Greeks—Apollonius and so on—and didn't write it using calculus. But, that's how he had worked things out. He suppressed the calculus because what people spoke was classical geometry.

Then, Dirac at some point says

that he used geometry in his work. And there's an argument there about exactly how did he use geometry. He used geometry to think about space and time, to think about with the relativistic equations, and so on. Did he also use it in the context of the Hilbert space? Probably it was the former rather than the latter. Anyway, he does say at some point that he thought geometrically but translated that into algebra because that's what ...

Ooguri: That's what people understand.

Goddard: ...understand. These processes go on at various points but, now...

Ooguri: Now, we don't have to hide.

Goddard: No, we don't have to. It is no longer terribly suspect. So what do you think about the relationship of mathematics and physics?

Ooguri: Clearly, it has been very, very productive in both ways. I think that, as you've said, modern mathematics has very much strengthened our understanding of gauge theory and string theory and other areas for fundamental physics, but I think the insight from physics has also influenced mathematics in a positive way and provided them, for example, conjectures to prove or a new way to think about geometry. Especially the quantum nature of geometry is something that the mathematician, of course, didn't know about but now very much in the common trend in the forefront of mathematics, especially in the area of geometry and representation theory. So it has been very, very beneficial for both I think. It's quite natural that, whenever we try to understand more and more fundamental laws of nature, which is one of the things we are doing at this institute, the existing mathematics

is often not useful. Newton had to invent calculus, Maxwell had to use the partial differential equations, and Einstein had to use Riemannian geometry.

Goddard: But that existed already.

Ooguri: It existed already, but at that time it was quite modern mathematics. It is very natural that when we try to push the boundary of human knowledge in that way, there is no guarantee that the existing mathematics could be useful. So, interactions between physicists and mathematicians can be useful for both. For mathematicians, it's going to give them a new problem to work on and open new areas and also connect the different areas of mathematics.

Now Mathematics and Physics Have Areas Developing Simultaneously

Goddard: You have areas developing in mathematics and in physics now simultaneously. In some sense, it seems fortuitous that they are developing at the same time. For example, the theory of infinite dimensional Lie algebras and how that related to ideas in physics and vertex operators and so on. These developments happened in parallel, but they started completely independently of one another in a completely unrelated way, but at the same time. I always find it fascinating to wonder whether those things are really accidents, or there is something you don't understand. What would have been true in the 70s and perhaps the 80s is that people who were interested in the more mathematical questions would be prepared to use it in talking about physics but people interested in more phenomenological questions would

not, tending to create a certain gulf. But, now, that seems to have eroded because many of the people who—like you, Hitoshi, who are also interested in phenomenological questions and are also very prepared to talk in ways that relate to mathematics. So things really have changed in that sense, I think.

Ooguri: I think for people, like Hitoshi, who built a model of elementary particle which you hope to actually test experimentally—maybe I'm putting words into your mouth—but it seems that the ideas and the mathematics that come out from this kind of development have been useful in building models that you had not thought about before, like large extra dimensions and ...



Murayama: Going back in history, for example, when Gell-Mann came up with the quark model then that's the first time people started using bigger group than $SU(2)$. That was the first time, right? People complained about group theory fever. Apparently that was the people who would not be able to catch up with this level of group theory. And then language was felt to be left out, but that actually turned out to be the right language, not just for the quark flavor symmetry, but also for the gauge symmetry, and so forth. Without that, I don't think particle physics would have existed the way we know now.



Goddard: That's true, but I think also the other side of that. I think, somewhere in the 1950s, when Gell-Mann realized that having introduced

strangeness and so on, you needed a bigger group than $SU(2)$, some people started talking about $SU(2) \times SU(2)$, and so on. They didn't know of this to be compact Lie groups. They didn't immediately go and ask—they didn't know who to ask, I guess. Gell-Mann, at one point, said that he sat there trying to work it out himself. I think he gave up when he got seven generators.

So, it's amazing when you think back to that. Now, you only have to say something and you go and look at Borel's work or whatever on the classification, the spaces and so on. We immediately plug in to the mathematical literature.

Ooguri: Yes. So we got remarried.

Goddard: No, I think the divorce didn't ...

Ooguri: ...didn't happen?

Goddard: No, I think it was a trial separation.

Ooguri: It was kind of a probation for a while, then.

Goddard: I think that, of course, is a very good argument for your institute. I mean this is now not just some esoteric or small group interest. It's part of the culture that's generally accepted by people of various inclinations. Whether they want to think about very theoretical problems or whether they want to really understand the latest results from the LHC, everybody has more of a common culture.

Murayama: How do you think we can protect this kind of area which doesn't have an immediate impact on the society?

Basic Science Has a Valuable Cultural Impact Though Not Having an Immediate Practical One

Goddard: It doesn't have an immediate practical impact in terms

of producing what might be a cure for some disease but it obviously does have a valuable cultural impact. I am conscious of it talking to my friends who are not academics. They now know more about what is happening in basic science. It's very much more than it would have been 30 years ago. Look at the interest in the discovery of the Higgs, it is absolutely enormous compared with, say, what arguably had more importance in conceptual terms, the discovery of the W and the Z. I mean, we'd all have had a collective mental breakdown if they hadn't been there. I think that was partly because we were decades waiting for this event, the discovery of the Higgs.

Murayama: Yes, that's right. So, a historic event.

Goddard: I think also that places like CERN and the people concerned with funding them in the various countries had realized that they had to do more in explaining to the taxpayers and others what was going on. So they couldn't just let this be the press office putting out some press release. It had to be a whole process of getting people to understand what was about to happen. That all feeds in to, I think, the position of institutes like ours in the public perception, in that they're much more likely to understand what we are about. The attitude that existed many years ago, 50 years ago or 80 years ago, was that you really needed to have ivory towers. If you look at the history of the institute in Princeton, I think in the early decades, people in the institute felt that there wasn't anything wrong with practical applications but this was not what



happened here and in order to make sure this was an environment in which people stayed pure, so to speak, you had to have an ivory tower with polished walls and people couldn't come in.

Now the attitude is everywhere, I think, different. That is to say, it is important to protect the academic environment in that we need to give space to people and not ask them all the time to produce a practical result tomorrow. But that is completely compatible with our explaining what we do to people outside, inviting them in, giving them talks, and discussing what we do with them, because we don't have to isolate ourselves into some monastic community that has no contact with the outside world. It's actually good for us and it's good for the outside world to have this contact.

Murayama: But that's in the UK, right? The science café—that was actually a British invention?

Goddard: Yes. But it has to go along with explaining to people that it's important that opportunity is given to people to do things where you don't know what the outcome is going to be, where you can't imagine that outcome. That is what will change our understanding of the universe and will change in the end the practical aspects of lives. But there's no easy prescription for this, I think. But I think it is incumbent on all of us who feel any ability or any inclination to do it to engage in that. So at the institute in Princeton, I'm sure Robbert (Dijkgraaf, Director) will continue this even more, putting increasing effort into our publications and our public dissemination of research. In fact, compared to the institute I went to in '74, which was a marvelous place, but there wasn't very much of this going

on, now it's going on all the time. It's not the case that at the institute you can't go and be quiet, you can't go into a room, you can't walk in the woods and have those peaceful and inspiring experiences. But at the same time, the institute is interacting more or less continuously with the outside world.

Murayama: That's an important point. Maybe the last question I would like to ask. Now that you oversaw the founding of a new institution in the Newton Institute and oversaw the progress of the Institute for Advanced Study in Princeton, you gained some insight on what should not be done to run a truly tremendous academic institute. I'd like to hear your lessons about that. Maybe you never fell in any pitfalls?

A Truly Academic Institute Should Stay Focused within a Defined Mission

Goddard: No, I've been there. Probably, there've been lots of pitfalls but I think that, along with what I just said, it's possible to have these interactions with the outside world but still to make sure that priority is given to having an environment where science can happen. I see here that you made great efforts, very successful efforts, to make sure that the bureaucracy that surrounds any institution doesn't intrude because it can have a major impact particularly on people coming for a few months somewhere. I think the other aspect is that in funding, when seeking support—this is in the American and UK context—you have to be very careful about sticking to the mission because one thing that happens, when you try to raise money is that you have objectives and then somebody comes along and offers

money which is only partly for what you want. Maybe it isn't really even for what you want, but you want to make your fundraising target and so you accept money to do things which weren't your main objective. These may be very good things to do. But, in the end, I think in an institution like this, there are only a limited number of things that you can do. There may be excellent things that people suggest, but they aren't part of what the institute is for, and I think then one has to say, "Well, let's try and find someone else for you to do that."

Murayama: That's important.

Goddard: I think it is important to have a defined mission and not just do everything that's good.

Ooguri: Yes. There can be opportunity cost.

Goddard: Yes. Now, I think somebody can come along and say, "Well, I'll pay for your time," but they can't pay for your time, and you can't be duplicated. I mean, everything that happens in the end impinges on the administration. It impinges on the director. It impinges on the institute. I think it's very important to be broad but to stay focused within that mission but not to do arbitrary things.

Murayama: That's a profound advice I would say. Thank you.

Ooguri: Thank you very much.

Goddard: Thank you for the discussion and I'm really, really impressed with this place. It's a great development, I think, for Tokyo, for Japan, and for the world, actually. Each of these institutes makes a statement about what is important, and so together, the network is really saying something about what the important ideals are. Thank you.

Murayama, Ooguri: Thank you, Peter.



Interview with Young-Kee Kim

Interviewer: Hitoshi Murayama

Luck Doesn't Come to You Unless You Are Ready to Catch It

Murayama: The last time you were here, you were still in that little prefab building?

Kim: Yes.

Murayama: This is a huge change, right?

Kim: I saw it being constructed and coming up. I have to look at it. I hear that this is a one-floor concept.

Murayama: That's right. It seems to be working very well. People get all mixed up from one field to another and we have the central interaction area. So, people can naturally flow into that.

Kim: That's great. What do you think about the yesterday's External Advisory Committee meeting?

Young Kee Kim is Louis Block Professor at the University of Chicago and former Deputy Director of Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab). She received her Ph.D. from the University of Rochester in 1990. She became Assistant Professor in 1996, Associate Professor in 2000, and Professor in 2002 at the University of California, Berkeley. Since 2003, she has been Professor at the University of Chicago. She served as Deputy Director of Fermilab from July 2006 to June 2013. She received the Ho-Am Prize in Science in 2005. She has also received many other distinguished awards.

Murayama: It was very helpful. You gave me lots of ideas on how to present ourselves better and what we should argue for the 5-year extension. Of course we have to digest them—we have to chew on them and come up with a better presentation, come up with a better write-up. Nonetheless, it was extremely helpful. So, I really thank you for that.

Kim: Right. Everybody was so impressed about what you have achieved.

Murayama: Oh, good.

Kim: I remember your talk—you included the animated movie "Mr. Incredible." I was thinking that what you have done is "mission impossible" and you made it possible.

Murayama: Certainly, even looking back now, it seems like just a series of miracles.

Kim: Well, some say the miracles are simply luck but luck doesn't just come to you. Certainly luck would be good, but it won't work if you are not ready to take it.

Murayama: That's what Koshiha says all the time.

Kim: Oh really?

Murayama: He discovered the neutrinos from Supernova 1987A. Just a month before

then, the background was still so high that he should have missed it, but the month after that, he had a mandatory retirement. So, there was only a 2-month window, and exactly 160,000 years before this 2-month window the supernova exploded.

Kim: Just luck is not enough. You have to be ready and prepared.

Murayama: To be prepared—that's true.

You are now back to a regular professor at Chicago, stepping down from a Deputy Director of Fermilab. So, if you reflect on those days being a Deputy Director of Fermilab, what is your feeling? What was the most challenging thing for you, what was the most rewarding thing for you, and what's the change now?

Time of Transitions at Fermilab

Kim: Okey, I think the most challenging thing was the fact that we had to face many changes.

Murayama: Time of transitions.

Kim: In 2006 when I became Deputy Director of Fermilab, we knew the Tevatron would be shut down soon after the

LHC turns on, and we would need to prepare a flagship program for the future.

The U.S. particle physics community then reached a consensus, moving forward with the International Linear Collider at Fermilab. This resulted in cancelling other projects such as BTeV. NOvA was also on the verge of being cancelled. The situation upset some folks in our field. Not everybody has agreed on the ILC direction.

Murayama: Oh, that is impossible.

Kim: Majority of the community wanted to focus on the ILC. DOE was supportive of the ILC and EPP2010¹ also strongly supported it. However, it was realized that the price tag was much too high for the U.S. to host the ILC. We had to come up with another plan, Plan B. One of my first tasks as Deputy Director was to help developing the plan.

Murayama: That is Project X.

Kim: It is more than Project X. Project X was part of it. The plan included neutrino, muon and kaon programs.

Hitoshi Murayama is Director of Kavli IPMU. He is also Professor at the University of California, Berkeley.



Incidentally, Pier² managed to keep the NOvA project alive. Without him, NOvA might have died. In any case, NOvA and short-baseline neutrino experiments were in the plan. The plan also included a muon program with Muon g-2 and Mu2e experiments. These were new directions of the lab. However, these are programs for the relatively near future, and we also needed a longer-term plan. The long-baseline neutrino experiment LBNE and a multi-megawatt proton source Project X were longer-term flagship projects in our plan. LBNE is an experiment with a 1,300 km baseline and a huge detector in South Dakota. This is not enough. We also need to have...

Murayama: High intensity.

Kim: High intensity, yes. That was Project X. This would

be the accelerator for future neutrino and muon programs, and various other programs. In our strategy, improving the accelerator, thus providing higher intensity beams was a higher priority than LBNE which was supposed to be installed in DUSEL.³ We thought that DUSEL, a really large, complex, and multi-purpose beyond physics project, would take a long time before it would become a reality.

Murayama: That's right. So, the idea was to go for the accelerator upgrade first, before going into a new detector.

After Tevatron Shutdown, Fermilab Aimed at an Intensity Frontier

Kim: Right. Neutrino and muon programs and accelerator improvements were the recommendations by the Steering Committee for a Fermilab strategic plan that I led in 2007. Pier accepted the recommendation from the Steering Committee and the Intensity Frontier became the primary focus for Fermilab. The U.S. based facilities would then be primarily for the Intensity Frontier program and this will likely be the case for the next couple of decades. In any case, after the Steering Committee's report, the U.S. went through the national project prioritization process P5⁴ in 2008. P5 endorsed our plan of the intensity frontier focus with neutrinos and muons. However, they

swapped the order between LBNE and the multi-megawatt proton source Project X, that is, they recommended to do LBNE first before the accelerator upgrade. Overall, P5 and we agreed on the idea of having both a very large neutrino detector and a very powerful accelerator. This is still the case as shown by the 2014 P5 report. DOE's thinking at that time was that Project X could start its construction about one year after LBNE construction begins. But in reality these are two very large expensive projects and it has been extremely difficult to execute simultaneously. Phased approaches were needed and international partnerships are crucial.

Murayama: That's right.

Kim: The muon program that we have launched a few years ago is well supported by the 2014 P5. The neutrino program has been going well. NOvA has been taking data. MicroBooNE construction is nearly complete and will start running in the near future. The next step is the LBNE and the accelerator improvement. I am very glad that overall the original plan has been well supported by the community and the 2014 P5.

Murayama: It's stretched out into the future years, but the overall plan is still the same.

Kim: Yes. Projects tend to be large and it takes a long time to execute any project. Only 5-6 years have passed from the last P5 to this P5.

So, we did not expect any big changes in the 2014 P5 report regarding the overall strategy unless we have been going on a wrong path. I was glad that we have been on the right direction. However, there are many important messages in the current P5 report including science drivers, priorities, and execution strategies.

Murayama: That's true, but slightly getting into more details, LBNE of course has a lot of changes on the way. Initially, you wanted to have a big detector underground and the community actually favored water Cherenkov. And then there was an overturn to liquid argon; they went to surface. Now they say they have to go underground again. So what was sort of the succession in this story?

LBNE Chose Liquid Argon Technology

Kim: That is correct. Certainly water versus liquid argon, that was an important technology choice. The water technology is very advanced because Japan has this wonderful Super-Kamiokande detector which has been operating extremely well. So, the water technology is a proven and safe choice although the detector has to be much bigger and there are associated engineering challenges. Liquid argon is a relatively new and more promising technology, but it has not been proven to work until recently.

Murayama: Especially, on

¹ EPP2010 means "Elementary Particle Physics in the 21st Century." The U.S. National Academy of Sciences surveys all branches of Physics every 10 years. It charged EPP2010 committee, a group of scientists, to recommend priorities for the U.S. particle physics program for the next 15 years. The final report was released in 2006.

² Pier Oddone was Director of Fermilab at that time.

³ DUSEL means "Deep Underground Science and Engineering Laboratory," which was once a U.S. DOE's project. The Sanford Underground Laboratory at Homestake, where some physics experiments are sited, and also LBNE far detector is planned to be located, was initially planned to be part of DUSEL.

⁴ P5 (Particle Physics Project Prioritization Panel) is a subpanel of the High Energy Physics Advisory Panel (HEPAP) that serves both DOE's Office of High Energy Physics and the NSF, charged with developing an updated strategic plan for the U.S., under various budget scenarios, that can be executed over a ten-year timescale, in the context of a twenty-year global vision for the field.

that scale.

Kim: Right. The ICARUS, although it took a long time, eventually became a very successful liquid argon detector. That was the effort and experiment initiated in Italy. On the U.S. side there has been a lot of R&D effort going on in the recent years and a lot of progress has been made. MicroBooNE, the short-baseline experiment I mentioned earlier, is based on the liquid argon technology. The ICARUS experience and recent U.S. efforts provided high confidence in the liquid argon technology by the time when the final technology choice for LBNE was made. At Fermilab a small liquid argon detector called ArgoNeUT was put into a test beam and beautiful results came out.

Murayama: I see. How big was it?

Kim: Liquid argon mass was less than a ton.

Murayama: Very small.

Kim: Yes. For the same sensitivity, a liquid argon detector could be much smaller than a water Cherenkov detector. This was another attractive element. It does not mean that the liquid argon detector will be cheaper. In fact, they cost about the same. But the liquid argon technology is new and future technology, and people get more excited about this. This can be used for not only neutrino experiments but also dark matter experiments and other areas.

Murayama: That's right and

you have to be excited about that.

Kim: It was pretty much a close call, but in the end there had to be a decision and the liquid argon technology was chosen. That was a big change on the way. After that there was another change because of the project cost. The overall cost for a 34-kton liquid argon detector was estimated to be very high, too high for DOE to swallow. We were asked to come up with a two-phase strategy. We were then asked to go through the DOE review process with the Phase-1 project. The DOE system uses a process called critical decisions or CDs, and it ranges from the CD-0 science case stage to the CD-4 construction completion stage. We already had the CD-0 approval. CD-1 was the next step with a conceptual design of the project. For us to go through the DOE CD-1 review and approval process, we had to assume no other contributions than DOE even though in reality we would likely get contributions from collaborating countries and institutions. It is because the amount of contributions is uncertain. Other countries won't commit any significant contributions until the U.S. takes this project seriously and makes their commitment first, in other words until the CD-1 is approved. The problem is then that the scope of the project for the CD-1 approval is smaller than that of the final, most-likely project with

other contributions, thus it looks less attractive to the international community. In any case, our thinking was that if we get the CD-1 approval from DOE, other countries might join us and together we could make a bigger and better, thus scientifically more powerful detector.

Murayama: That's right. To some extent, it's a gamble.

With CD-1 Approval, LBNE Seeks More International Collaboration

Kim: Gamble? Right. Seeing the CD-1 approval they have more confidence in the U.S. commitment and thus would make their commitment to make a better project. So, this was a tactic. In the CD-1 process, we were asked to look at alternative options beyond the option that we proposed, a detector in South Dakota with a baseline of 1,300 km. We considered an alternative location such as Ash River where the NOvA detector is located or the Soudan mine where the MINOS detector is located. These are about 800 kilometers from Fermilab. We demonstrated that the proposed 1,300 km baseline option has stronger physics sensitivities. With a longer baseline, there would be more matter effects and the longer baseline option provides a better sensitivity to new physics beyond the three-generation standard model paradigm in the oscillation

pattern. The minimum detector mass of 10 kton is required for any initial physics. DOE's budget given to us was not sufficient enough to put this detector underground, thus the project reviewed for the CD-1 approval was a 10 kton detector on surface. The plan was that after receiving the CD-1 approval, we would be able to attract the international community to this project and with their contributions, we would be able to put the detector underground and increase the total mass. I know that some misunderstood this plan and a serious concern was raised by the community regarding the surface detector which would not be sensitive to proton decay and other non-accelerator based sciences.

We received the CD-1 approval from DOE. With this in our hands, we met many physicists and funding agencies from other countries, including Italy, Japan, U.K., CERN, and Brazil. We discussed stronger involvements from them in the project and their potential contributions. The liquid argon technology has been an attractive element for many from other countries, although the European community has been developing a slightly different version of a liquid argon technology.

Murayama: Yes, two-phase.

Kim: Right. The two-phase is the technology that they desire to use. This is a bit more advanced than the



U.S. option, thus requires a longer R&D time period. We wanted to give flexibility and freedom for the international community. So, we thought about a modular design of the detector, each module with 5 kton to 10 kton mass. We would construct a long underground tunnel, leaving places for modular detectors which could be built and instrumented later. Neutrino detectors are different from collider detectors in a sense that we do not have to make the entire detector at once, but detectors can be added while taking data. In this concept, Europeans or others, if they like, could build a detector with their own design.

Murayama: Just keep adding it.

Kim: Yes, keep adding as time goes. Detector modules that come later could use even an improved design. Of course, if we could build a 34 kton detector at once, that will be the best scientifically,

but we thought the modular design would be less risky, technically and financially. Making one big detector has more technical risks. The ICARUS and MicroBooNE are only a few hundred ton scale detectors. A 34 kton detector is about two orders of magnitude larger than them.

Murayama: It's a big jump.

Kim: Yes. The modular design is technically safer. While you are building one, you can probably improve the design for the next one and in that way Europeans can build a modular detector with their own design. This can be true for other countries. India and Brazil have been interested in designing and building a near detector. There have been many conversations in the past about this, but having the CD-1 approval, we have a much better position to discuss with foreign participants. The plan was to design and build a near detector primarily by India, the underground facility and

the beamline by the U.S. and a far detector with multiple modules by the U.S., Europe, South American countries et cetera. Each country or region can be a primary driver for each module. Say, a U.S. module, a European module, and a South American module. Japan could build one, too.

Murayama: Yes, that's right.

Kim: The new P5 stated the importance of an underground detector with large mass. The P5 report emphasized the international organization and governance of the project. I think that this would really help the U.S. start making discussions with other countries in a more formal manner, and making more formal steps.

Murayama: Yes, I believe that's the right thing to do. So, given that how globally everything is these days, you want to start global, rather than having one country just studying and going down the line and say "Well, we don't have enough money, why don't you join?" That's actually not an equal partner. So, this way hopefully things will work better.

Kim: Right. If you look at our previous particle physics experiments, we were pretty good at international collaboration. CDF is one such case that I know the best. This was back in 70s and 80s. The design was done together. Italy and Japan were big contributors from the beginning. Their ideas

were implemented in the design. A good example was the projecting tower concept which has been successfully used in CDF and it has widely been used in calorimeters in particle physics experiments.

Murayama: Yes, that is what's great about being part of this community.

Kim: Yes. Going back to LBNE, the reason why we had to get the CD-1 approval by DOE in the very U.S. centric way first was because the international community has been very concerned whether the U.S. would stick to their plan and they would like to see the U.S. commitment at some level before they can seriously consider joining the project. As you know, the U.S. cancelled a number of projects and has a bad reputation. The recent U.S. situation is quite different from what it was during the CDF time. In addition, the U.S. based facilities have shifted their focus from the Tevatron or the Energy Frontier to the Intensity Frontier. This is a huge change and change makes people very nervous because it comes with uncertainties. For Fermilab's non-scientific staff, this is tough. Scientists at least know the nature of uncertainties. This is what research is about.

Murayama: Nothing is guaranteed. You would not know until you do it.

Kim: Exactly. If you are certain, why do you do research? Research by construction is an uncertain thing. At Fermilab, there are

many more non-scientists than scientists. Engineers, technicians, computer specialists and administrative staff. Uncertainty is a hard thing to take, especially for them. Fermilab staff was used to see the Tevatron operating for about three decades. Of course, a lot of other things were going during that period, but the Tevatron was the symbol of the lab.

Murayama: The dominant activity.

Kim: And the Tevatron ring is out. I mean it stopped operations. I think this has been a huge impact on staff psychologically.

Murayama: I am sure, yes.

Kim: Also changing directions required reduction in workforce, which no one wants to hear. We had to spend more money to build new facilities and experiments to build the future. Money had to shift from Tevatron operations, which is people dominant, to materials and equipment. This was a real impact on people at the lab. Managing this complex situation was a huge challenge. It was very very painful. But this was inevitable to build the future.

Murayama: You made it happen.

Kim: Yes, we did that. I hope no more reduction in workforce would be necessary in the future. When I left the lab last Summer, the muon g-2 ring was on the way from Brookhaven to Fermilab. That was very nice.

Murayama: Oh yes, that was a dramatic event.

Back to Normal: Doing Something Real

Kim: By then the building for the muon g-2 ring was under construction, the Mu2e project made good progress, NOVA construction was nearly completed, and MicroBooNE was well under construction. Also a new building called the Illinois Accelerator Research Center was well under construction. A lot of implementation for our initial strategy plan was on its way. Going back to the university as full time faculty was relatively easy...

Murayama: It was, I see.

Kim: ...because I continued to have my research group with postdocs and students at Chicago even though I didn't have a lot of time for them. I used to meet them either evenings or weekends. My students understood my situation and accommodated my tight schedule. Having students made a huge difference in transitioning. The Chicago high energy physics group has been supported by NSF and last Fall was the time to renew our 3-year NSF grant. So, my last Summer was occupied by working on the proposal as PI. This also helped me for the transition. Good timing. Last Fall I spent 3 months at CERN and worked on hardware in the pit with one of Chicago graduate students. We installed and tested some of the electronics



boards for the trigger upgrade. We went down to the pit, unplugged cables, removed existing boards, installed new boards, plugged cables, and tested boards. Very physical work! And labor work makes you feel that you've done something useful. Great feeling.

Murayama: I am sure that felt great. You are doing something real.

Kim: Yes. I like to touch things. But when you are doing an administrator job, you spend most of your time meeting people, lots of people. This is stimulating in some ways, thinking about budget and safety, figuring out how to overcome budget and safety issues, and making sure that everything is operating smoothly. Many interesting challenges since there are always hiccups here and there. But the job does not require much of hands-on work. It is an intense and somewhat stressful job. By

working on hardware last Fall, I felt toxic has been removed from my body. After 3 months at CERN I came back to Chicago and organized a conference for undergraduate women in physics.

Murayama: Oh, I see.

Kim: This conference was held at eight universities in the U.S. simultaneously during the Martin Luther King holiday weekend. I believe they were Chicago, Berkeley, Florida, Maryland, Stony Brook, Louisiana, Pennsylvania and Utah. About 1,000 girls altogether. Can you imagine?

Murayama: Wow, 1,000!

Kim: Ours was the biggest one. We had about 220 girls. Eight universities organized together so that students could attend the closest location from where they were. Anyhow this was a lot of work but it was really good to see so many women students majoring physics at the same time. We had one keynote speaker for every participant. For that

we were all connected via video. Everyone was able to see 1,000 girls all at once. I think for them to see these many girls doing physics is a big encouragement. They usually see only a few women in their physics classes and they feel somewhat isolated, questioning whether they are in the right place.

Murayama: I'm sure that is very encouraging.

Kim: Yes, it was. Of course they heard wonderful talks at the conference, but just seeing so many of them together is very exciting and encouraging. That was in January and Spring this year I was fully occupied with teaching. As soon as the Spring quarter was over, I went to CERN for work related to the trigger upgrade. I am now enjoying and having more time with students and postdocs. At CERN two students, two postdocs, and I are sharing one office. This is great. Just sharing the office with them itself is great. I do not know how to explain, but it just feels great.

Murayama: I am sure it does. I can see it. What do you see as your future? I understand that you are also involved in science policy in Korea.

Kim: Korea launched the Institute for Basic Science a couple of years ago. Under IBS, there will be 50 research centers, covering all areas of basic sciences. So far, about twenty centers were established. Under IBS, there is also a rare isotope

accelerator project. This is primarily for nuclear physics research but also for many applications ranging from medical to materials. Particle physics experiments with very low energy muons can also be done at this accelerator facility. Hopefully a lot of great scientific results will come out from those centers and the accelerator. We cannot predict what they are, but if you put excellent people together, good things will come out.

Murayama: Yes, that's right. Can Korea and Japan work better together?

Kim: They would be great. I thought Kavli IPMU has some Korean connections.

Murayama: We have some connection with KIAS, not very strong, but we send people back and forth.

Kim: Yes. I know there is a large Korean community working at Japanese facilities. I heard that there were about 200 participants in the J-PARC session of the Korean Physical Society meeting a few years ago. I am not sure if this is a correct number, but certainly I had an impression that there are quite a few Koreans whose research is associated with the J-PARC facilities, primarily from the nuclear physics community. There is also a continuous effort with Belle 2 at KEK. What else? Super K. So there are quite a few. However, I don't know whether Japanese and Koreans have ever got together to see if we could do something together

coherently. That kind of exercise could be useful, but scientists do things based on their own interests.

Murayama: Exactly. You can't force things on them.

Kim: Right. In any case I think there are a lot of opportunities and possibilities.

Murayama: Very good.

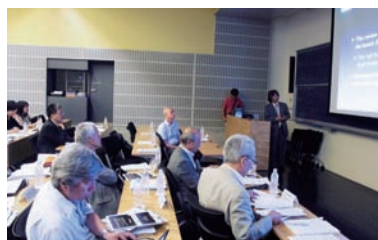
News

FY2014 WPI Site Visit Focused on the Screening of Extension Application

An FY2014 WPI site visit was conducted on September 4 and 5. As the Kavli IPMU had submitted a proposal in June this year in response to the MEXT's call for a five-year extension application of the WPI funding, this time the purpose of the site-visit delegation was to evaluate the progress achieved by the Kavli IPMU as a WPI center since its launch and its progress plan during the extension period as well as the host institution's effort toward its sustainability. The delegation of observers consisted of WPI Program Director (PD) Toshio Kuroki, Deputy PD Akira Ukawa, Program Officer (PO) in charge of the Kavli IPMU Ichiro Sanda, PO in charge of Tokyo Institute of Technology's Earth-Life Science Institute (ELSI) Shoken Miyama, members of the Working Group in charge of the Kavli IPMU (Hiraku Nakajima, Yutaka Hosotani, Tetsuji Miwa, Matthias Staudacher, Ian Shipsey, and Anthony Tyson), some of the WPI Program Committee members (Hiroto Ishida and Michiharu Nakamura), MEXT and JSPS officers, Hideki Iwabuchi (Director, Office for the Promotion of Basic Research, the Basic Research Promotion Division, Research

Promotion Bureau) and others.

The first day was devoted to the overview report by the Kavli IPMU Director Murayama and presentations by Kavli IPMU researchers on research accomplishments in various fields studied at the Kavli IPMU, and finally the presentation of the progress plan by Director Murayama. In this final session, The University of Tokyo's President Junichi Hamada, Executive Vice President for Research Yoichiro Matsumoto, and Executive Vice President Hiroaki Aihara, who is also the Kavli IPMU's Deputy Director, joined the discussion and answered various questions from the site-visit delegation. In the morning of the second day, PD, POs, and members of the Working Group expressed their comments, and the site visit was adjourned.



Kavli IPMU Director Murayama's overview report

The Hermann Weyl Prize 2014 to Yuji Tachikawa

Yuji Tachikawa, an Associate Professor at the School of Science, the University of Tokyo, and a Scientist at the Kavli IPMU has won the Hermann Weyl Prize 2014 for his outstanding contributions to the understanding of supersymmetric quantum field theories; in particular, the discovery of the Alday-Gaiotto-Tachikawa correspondence that has led to spectacular advances in both mathematics and quantum physics.



Yuji Tachikawa

He is the first Japanese awardee of the Hermann Weyl Prize, which was established in 2000 for the purpose of providing recognition for young scientists who have performed original, significant work in furthering the understanding of physics through symmetries. The candidate should either be under thirty-five years of age, or within five years of having received the doctoral degree.

The Kodansha Science Book Prize Awarded to Hiroshi Ooguri

Hiroshi Ooguri, Principal Investigator of the Kavli IPMU (He is also Fred Kavli Professor of Theoretical Physics and Mathematics at the California Institute of Technology (Caltech) as well as the Founding Director of the Caltech's Burke Institute) has won the 30th Kodansha Prize for Science Books for publishing a Japanese popular science book on superstring theory (*大栗先生の超弦理論入門 九次元世界にあった究極の理論*—Professor Ooguri's Introductory Lecture: *Ultimate Theory Is Found in the Nine Dimensional World*, Kodansha Blue Backs, 2013). Established in 1985, it is the only major prize for books written with the theme of mainly natural science but also including S&T, for the general reader in Japan. The 30th prize is given to the best book published in Japan from April 1, 2013 to March 31, 2014. In his book, he introduces Superstring Theory attempting to explain the difficult and challenging theory in easy language, but without compromising its accuracy.

The joint award ceremony of the Kodansha Science Book Prize, the Kodansha Nonfiction Prize, and the



Hiroshi Ooguri

Kodansha Essay Prize was held on September 19, 2014 at the Tokyo Kaikan located in central Tokyo, Marunouchi.

Lurking Bright Blue Star Caught! —The Last Piece of a Supernova Puzzle

A team led by Gastón Folatelli at the Kavli IPMU, the University of Tokyo, has found evidence of a blue star, which is luminous in the near ultraviolet region at the site of supernova SN 2011dh, which occurred in 2011 in the nearby galaxy M51.

SN 2011dh has been known to be a type II supernova, which is the explosion of a massive star due to gravitational collapse at the end of its life. In the images obtained before the explosion, however, a yellow supergiant (YSG) star was detected at the location of the supernova. But YSG stars in isolation were not thought capable of becoming supernovae and controversy arose in the astronomy community. Some researchers claimed that the actual progenitor must have been a blue compact object called the Wolf-Rayet star; it was faint enough in the optical range so that it was not detected in the pre-supernova images of the space telescope and the detected YSG star could have

been a companion of the exploded star, or even an unrelated object that matched the projected supernova location by chance.

In 2012, the team led by Melina Bersten at the Kavli IPMU and Omar Benvenuto at the University of La Plata, Argentina, showed that the exploding star must have been extended, like a yellow supergiant, and that it must have belonged to a binary system. They predicted that, once the supernova has faded enough, the companion could be discovered in the blue range of the spectrum. In March 2013, the HST imaging observational result, which showed the disappearance of the YSG star was announced, and the prediction by the Bersten group was partly confirmed. This time, the observation of a bright blue star at the location of SN 2011dh conclusively confirmed the binary model they proposed. This result has been published in *Astrophysical Journal Letters* **793** (2014) L22. Also, a press conference was held on September 11, 2014, and it has provoked worldwide public response.

Science Café Universe 2014

The annual “Science Café Universe 2014” was held at the Tamarokuto Science Center (TSC) in Nishi-Tokyo City, jointly sponsored by the Kavli IPMU and the TSC. This year, Kavli IPMU Assistant Professor in mathematics Satoshi Kondo gave the first lecture entitled, “Number Theory: A Story of Prime Numbers,” on June 21, and President of the National Institutes of Natural Sciences (NINS) Katsuhiko Sato, who is also a Kavli IPMU Senior Scientist, gave the second lecture entitled “Inflation Theory: Expectation of Its

Observational Evidence,” on July 6.

Since 2012, a Science Café lecture given on July 7, the Star Festival (Tanabata), or on the day before it, has been customarily delivered in the evening at a special venue, the TSC’s planetarium dome which is known as the “Science Egg,” with a Q&A session held in the TSC’s café corner after the lecture. As Professor Sato is one of those scientists who proposed the inflation theory of the universe, he particularly talked about the newest picture of the universe, which might be brought about by the “discovery” of primordial gravitational waves predicted by the inflation theory. This “discovery” was reported in March of this year from an experiment measuring the polarization of the cosmic microwave background at the South Pole. It became big news, but it has yet to be confirmed. (See *Kavli IPMU News* No. 26, p. 38.)



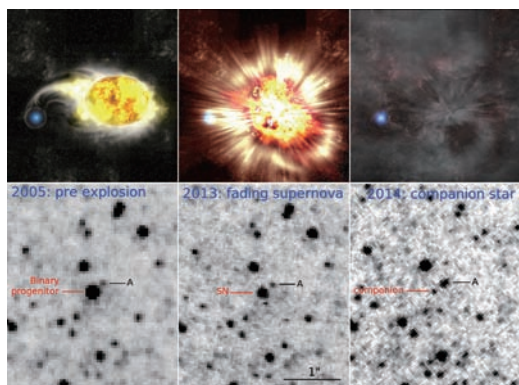
Satoshi Kondo answering questions after the lecture



Katsuhiko Sato answering questions after the lecture

Joint Public Lecture with ISSP “Close Connection between Materials Science and Particle Physics”

On September 28, 2014, a joint public lecture, “Close Connection between Materials Science and



Images in the top row depict an artist's conception of the supernova explosion process. The corresponding images below were taken with the Hubble Space Telescope. The middle top image shows the supernova exploding and the middle bottom image shows the fading supernova after the explosion. (©Top image: Kavli IPMU, Bottom image: NASA, Hubble)

Particle Physics” was held at the Kashiwanoha Conference Center, which is located in front of the TX Kashiwanoha campus station. It was hosted by the Institute for Solid State Physics (ISSP) of the University of Tokyo, and cohosted by the Kavli IPMU and Kashiwa City. Two lectures were given: “One-Dimensional Materials and String Theory,” by Professor Masaki Oshikawa of ISSP, and “Is the Universe Superconducting?” by Kavli IPMU Principal Investigator Hiroshi Ooguri. In these lectures, they explained the close connection between materials science and particle physics in an easy-to-understand manner. They also introduced leading edge research that emerged from collaboration among researchers from both fields.



A scene of Hiroshi Ooguri's lecture

Charles Melby-Thompson Talked at the SSH Students Fair 2014

On August 6 and 7, 2014, the Super Science High School Students Fair 2014 was held at Pacifico Yokohama. In this event, the nine WPI centers, including the Kavli IPMU, jointly ran a booth exhibiting their research activities. In one of the programs, entitled “Researchers Mini Live,” 17 researchers gave mini lectures. Five of them were from the WPI centers; from the Kavli IPMU, postdoc Charles Melby-Thompson enthusiastically talked on, “Watching the Unseen through the Lens of Reason,” in English. His lecture to a full audience was well received, and

after the lecture he was asked a lot of questions, such as, “What is the nature of dark matter?” and, “What is the significance of experiencing study in a foreign country?”



Charles Melby-Thompson talking to SSH students

A Program to Encourage Female Students to Study Science: “Listen to and Look into the Universe”

On August 2, 2014, a Program to Encourage Female Students to Study Science, “Listen to and Look into the Universe,” was held at the Kavli IPMU, jointly hosted by the Kavli IPMU and the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) of the University of Tokyo. The program started from two lectures by female researchers working on leading edge research of the Universe. One of the lectures was given by Tomoko Iwashita, a support scientist at the Kavli IPMU. She spoke on “Where Did Antimatter Go?—Elucidating the Mystery of the Universe Using Accelerators—” In her talk, she explained research conducted at the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) at Tsukuba. Another lecture was given by Naoko Oishi, an Assistant Professor at the ICRR, on “The Music Played by Astronomical Objects.” She explained what the gravitational wave is, and then talked about an experiment conducted at the ICRR attempting to directly detect gravitational waves produced by astronomical phenomena. After the lectures, the participants visited

a laboratory where they watched fabrication of a vertex detector with which particle tracks will be measured within a few μm levels of precision. They then learned the principle of the gravitational-wave detector and assembled a tabletop laser interferometer. Finally, they enjoyed friendly conversation with lecturers and graduate students who helped as teaching assistants, about campus life, research, and the like.



Female students talking with lecturers and graduate students

Kavli IPMU Seminars

1. “Lecture 1 on primordial non-Gaussianity”
Speaker: Matias Zaldarriaga (IAS)
Date: Jun 09, 2014
2. “Lecture 2 on primordial non-Gaussianity”
Speaker: Matias Zaldarriaga (IAS)
Date: Jun 09, 2014
3. “Gravity waves from Kerr/CFT”
Speaker: Achilleas Porfyriadis (Harvard U)
Date: Jun 10, 2014
4. “Discussion meeting”
Speaker: Matias Zaldarriaga (IAS)
Date: Jun 10, 2014
5. “Natural inflation models in string-inspired supergravity”
Speaker: Tetsutaro Higaki (KEK)
Date: Jun 11, 2014
6. “The CMB after 50 yrs, from discovery to BICEP 2”
Speaker: Matias Zaldarriaga (IAS)
Date: Jun 11, 2014
7. “ATOM/Fastlim: Recasting LHC constraints on new physics

- models”
Speaker: Kazuki Sakurai (KCL)
Date: Jun 12, 2014
8. “Lecture 1 on Effective field theory of large-scale structure”
Speaker: Matias Zaldarriaga (IAS)
Date: Jun 12, 2014
 9. “High precision cosmology with BAO surveys: BOSS and future 21cm BAO surveys”
Speaker: Hee-Jong Seo (OSU)
Date: Jun 12, 2014
 10. “Lecture 2 on Effective field theory of large-scale structure”
Speaker: Matias Zaldarriaga (IAS)
Date: Jun 12, 2014
 11. “Energy conservation and predictability in dRGT massive gravity”
Speaker: Ivan Arraut (Osaka U)
Date: Jun 13, 2014
 12. “Perturbative Quantization of Nonlinear Sigma Models with Symmetries”
Speaker: Timothy Nguyen (SCGP)
Date: Jun 17, 2014
 13. “Cosmology with the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS)”
Speaker: Florian Beutler (LBNL)
Date: Jun 19, 2014
 14. “Entanglement and Holography”
Speaker: Andreas Karch (U. Washington)
Date: Jun 19, 2014
 15. “Arnold conjecture, Floer homology, and augmentation ideals of finite groups”
Speaker: Andrei Pajitnov (Université de Nantes)
Date: Jun 19, 2014
 16. “Pure Gravity Mediation”
Speaker: Jason Evans (U Minnesota)
Date: Jun 25, 2014
 17. “Galaxies on FIRE: Stellar Feedback Explains Inefficient Star Formation”
Speaker: Philip Hopkins (Caltech)

- Date: Jun 25, 2014
18. “Calculating the Occurrence Rate of Earth-Like Planets from the NASA Kepler Mission”
Speaker: Jessie Christiansen (NASA Exoplanet Science Institute)
Date: Jun 26, 2014
 19. “A Modular Operad of Embedded Curves”
Speaker: Jesse Wolfson (Northwestern U)
Date: Jul 03, 2014
 20. “Boosted Higgs shape at LHC”
Speaker: Michihisa Takeuchi (KCL)
Date: Jul 04, 2014
 21. “ Ω -deformation and quantization”
Speaker: Junya Yagi (SISSA/INFN Trieste)
Date: Jul 08, 2014
 22. “Causality and Hyperbolicity of Lovelock Theories”
Speaker: Norihiro Tanahashi (Kavli IPMU)
Date: Jul 08, 2014
 23. “dRGT massive gravity: the view of an outsider”
Speaker: Ruth Durrer (Geneve)
Date: Jul 09, 2014
 24. “Black hole dynamics at large D”
Speaker: Roberto Emparan (Barcelona U.)
Date: Jul 09, 2014
 25. “Dark Freedom, Early Universe Bounds, and Sky Surveys”
Speaker: Eric Linder (UC Berkeley)
Date: Jul 10, 2014
 26. “The Petrov classification in general relativity”
Speaker: Amir Aazami (Kavli IPMU)
Date: Jul 10, 2014
 27. “SYZ transformation for coisotropic A-branes”
Speaker: Yi Zhang (Chinese U of Hong Kong)
Date: Jul 11, 2014
 28. “Scaling In Quantum Quench : Holography and Beyond”

Speaker: Sumit Das (U Kentucky)
Date: Jul 15, 2014

Kavli IPMU Komaba Seminars

1. “Universal formulae for Lie groups and Chern-Simons theory”
Speaker: A.P. Veselov (Loughborough U, UK and U Tokyo)
Date: Jun 16, 2014
2. “On some quadratic algebras with applications to Topology, Algebra, Combinatorics, Schubert Calculus and Integrable Systems”
Speaker: Anatol Kirillov (RIMS, Kyoto U)
Date: Jun 30, 2014

Personnel changes

Reappointment

Former Kavli IPMU Assistant Professor Masahito Yamazaki was reappointed on August 16, 2014 after about one-year stay at IAS, Princeton. He told, “I am excited to be back at Kavli IPMU. I have been working on elementary particle theory and string theory. At the Kavli IPMU I am planning to work broadly in the foundations of quantum field theories and string theory, together with other IPMUs.”



Masahito Yamazaki

Also, former Kavli IPMU Postdoctoral Fellow, Yoshiki Oshima was reappointed as a Kavli IPMU Fellow on September 1, 2014.



Yoshiki Oshima

He told, “I am pleased to come back to Kavli IPMU after a one-year stay at IAS in Princeton. My main research interest is in the representation theory of Lie groups. I am working

on branching laws of representations, symmetry breaking operators and related geometries.”

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 Associate Professor Shinji Mukohyama [April 1, 2008 – September 30, 2014] moved to the Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University as a Professor.

Kavli IPMU Assistant Professor Satoshi Kondo [April 16, 2008 – October 31, 2008 as an IPMU postdoctoral fellow, and then – August 31, 2014 as a Kavli IPMU Assistant Professor] moved to The National Research University Higher School of Economics in Moscow as an Assistant Professor.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Melina Bersten [October 1, 2010 – September 30, 2014] moved to the National Scientific and Technical Research Council in Argentina as a Scientific Researcher.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Jyotirmoy Bhattacharya [September 1, 2011 – August 31, 2014] moved to Durham University as a postdoctoral fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Biplob Bhattacharjee [September 1, 2011 – August 31, 2014] moved to the Center for High Energy Physics, the Indian Institute of Science as an Assistant Professor.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Richard Eagar [September 16, 2011 – September 15, 2014] moved to McGill University as a postdoctoral researcher.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Gaston Folatelli [October 1, 2010 – September 30, 2014] moved to the

National Scientific and Technical Research Council in Argentina as a Scientific Researcher.

Kavli IPMU postdoctoral fellow John Kehayias [September 16, 2011 – September 15, 2014] moved to Vanderbilt University as a postdoctoral scholar.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Changzheng Li [September 1, 2011 – August 31, 2014] moved to the IBS Center for Geometry and Physics in Korea as an IBS Fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Chunshan Lin [August 16, 2011 – August 15, 2014] moved to the Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University as a postdoctoral fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Jing Liu [October 1, 2009 – August 21, 2014] moved to the University of South Dakota as an Assistant Professor.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Yu Nakayama [September 1, 2013 – August 31, 2014] moved to Caltech as a Senior Research Fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Myeonghun Park [October 1, 2013 – September 30, 2014] moved to the Asia Pacific Center for Theoretical Physics (APCTP) as a Leader of Junior Research Group.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Daniel Pomerleano [October 1, 2012 – September 30, 2014] moved to Imperial College, London as an EPSRC Postdoctoral Research Fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Robert Quimby [September 1, 2011 – August 31, 2014] moved to San Diego State University, as an Associate Professor / Director of Mount Laguna Observatory.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Cornelius Schmidt-Colinet [April 16, 2011 – July 31, 2014] moved

to Ludwig-Maximilians- Universität München as a postdoctoral fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Yefeng Shen [June 1, 2013 – August 31, 2014] moved to Stanford University as a Postdoctoral Scholar.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Valentin Tonita [October 1, 2011 – September 30, 2014] moved to the Foundation Sciences Mathématiques de Paris as a postdoctoral fellow.

JSPS postdoctoral fellow Sho Iwamoto [April 1, 2013 – September 30, 2014] moved to Technion (Israel Institute of Technology) as a postdoctoral fellow.

JSPS postdoctoral fellow Ryo Saito [April 1, 2014 – September 30, 2014] moved to the Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University as a JSPS postdoctoral fellow, accompanying his host researcher, Professor Shinji Mukohyama.

JSPS postdoctoral fellow Norihiro Tanahashi [April 1, 2013 – August 31, 2014] moved to DAMTP, Cambridge University as a Research Associate.

Also, Kavli IPMU postdoctoral fellow Yu-Chieh Chung resigned the Kavli IPMU at the expiration of his term, from August 1, 2011 to July 31, 2014.

Errata

In the Kavli IPMU News No. 26, page 36, leftmost column, immediately below the sub-header “Kavli IPMU Seminars,” the following 5 lines should be deleted.

1. “Naturalness, Conformal Symmetry and Duality”
Speaker: Yoshiharu Kawamura (Shinshu U)

Date: Nov 06, 2013

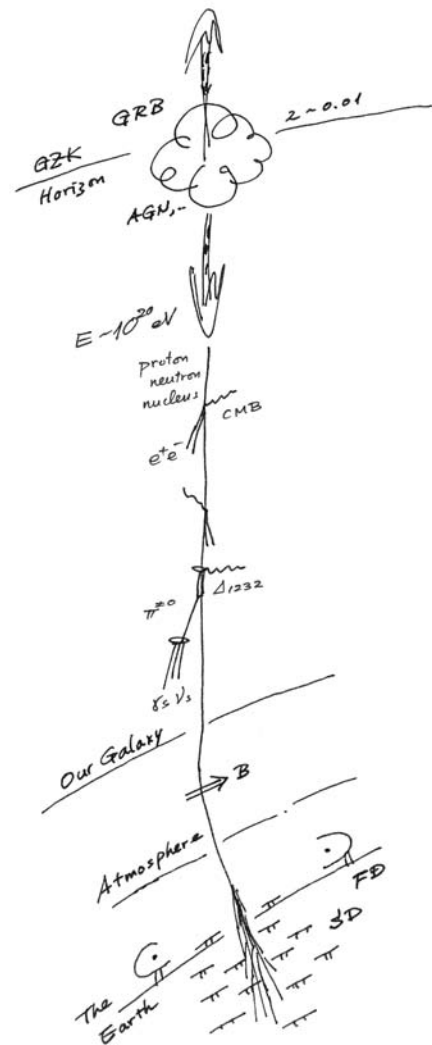
The numbers of all the seminars that follow should be decremented by one.

Highest Energy Cosmic Rays

Masaki Fukushima

Professor, Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo,
and Kavli IPMU Senior Scientist

Primary cosmic rays arriving at the Earth have an energy spectrum smoothly decreasing with $\sim E^{-3}$, and their arrival directions are known to be uniform at the level of 0.1%. These features no longer hold at the energy of $\sim 10^{20}$ eV according to recent observations by the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array (TA). A “dip” structure is found around $10^{18.7}$ eV signifying a change of power index in the energy spectrum, and a “cut-off” above which the flux is strongly suppressed is established at $\sim 10^{19.7}$ eV. The isotropy in the entire sky is largely broken above the cutoff as well; in the northern sky the TA recently announced evidence of a hotspot in the direction of Ursula-major, and the Auger remains to register an enhancement of cosmic ray flux toward the active galactic nuclei Cen A in the southern sky. The anisotropy is considered reflecting non-uniform cosmic ray source distribution in the nearby extra-galactic space, with the arrival of cosmic rays from distant sources being impeded by the interaction with the CMB (cosmic microwave background), also leaving peculiar features in the spectrum. We expect, in the near future, that source astronomical objects or regions of enhanced cosmic ray generation are identified within the GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) horizon ($z < \sim 0.01$), and that our understanding of the physics of cosmic ray acceleration and propagation at the highest energy will further advance. Several experiments such as the TAx4 extension, Auger upgrade and K-EUSO have been proposed to meet this expectation.



近況

Kavli IPMU 機構長
村山 斉 むらやま・ひとし



7月26日：東京千代田区の日本プレスセンターで開催された「読売テクノ・フォーラム」2014 年度夏休みのシンポジウム「宇宙と時空の謎に挑む」で講演。(写真提供：読売新聞社)



8月18日：東京六本木のアーキヒルズクラブ クラブルームでのH-LAB 2014 Forumで講演。(写真：©H-LAB2014 keita hanaoka)



9月4日：WPIの現地視察で概要説明。

宇宙の構造形成のコンピューターシミュレーション

1. 宇宙の実験

自然科学研究では多くの場合、「ある仮説をもとにして実験を行い、その結果によって理論やモデルを検証する」という手順を踏みます。物理学や化学、生物学ではこのような手続きを経て様々な仮説の検証が行われますし、実験結果からまた新たな仮説を考え、次の実験のアイデアを得ることもあるでしょう。このような研究活動は楽しく、ワクワクするものです。

ところが残念なことに、天文学では「あるアイデアにしたがった実験」を行うことはほとんどできません。取り扱う対象がとてつもなく大きいので、人為的な設定を実現することができないのです。もちろんいろいろアイデアはわいてきます。太陽をぐるぐると高速で回転させたらどうなるのでしょうか。膨らむのでしょうか、あるいは外側のガスが飛んでいってしまうのでしょうか。ブラックホール同士がぶつかったら、お互いに飲み込み合うのでしょうか。このような素朴な疑問は考えるだけでも楽しいですし、また実際に宇宙物理学でも重要な問題です。でも、本当に太陽をぐるぐる回す実験はできませんし、銀河を衝突させる実験もできません。長さが数億光年にもおよぶ宇宙の大規模構造なんて、自作したくてもその部品は東急ハンズでも売っていません。

もちろん天文学には天体観測という強力な手段があり、現在では電波やX線など、様々な波長の電磁波

で一つの天体を詳しく観測することができます。地球に向いている面しか見えないとか、奥行きがわからないとか、いくつか制約はあるものの、最新の望遠鏡や観測装置を使えば天体の複雑な構造を手にとるように知ることができるようになりました。それでもやはり、銀河が成長する様子を見たり、冒頭で述べたように何かアイデアをもとにして新たな天体形成の理論をたしかめることはできないのです。そんなことができればどれほど研究が進むことかと、もどかしい思いさえ抱きます。

さいわいなことに、一つ特殊な方法があります。直接にはできない代わりに、コンピューター上に仮想的な宇宙をつくりあげ、その中で天体がどのように誕生するかを再現することならできます。実物を用いた実験の代わりに、コンピューターによる「数値実験」を行えば、星を回転させることも、銀河を衝突させることもできます。このような仮想的な実験では検証方法としてころもとないたと思われるかもしれませんが、いくつか条件を満たしていればとても強力な手段になります。特に天文学では理論研究、宇宙観測にくわえてコンピューターシミュレーションが第三の重要な研究手法として発展してきました。いまでは独立した第三の手法というよりは、理論と観測結果を直接むすびつけたり、観測計画立案のために使われたりと、あらゆる場面で活用されています。

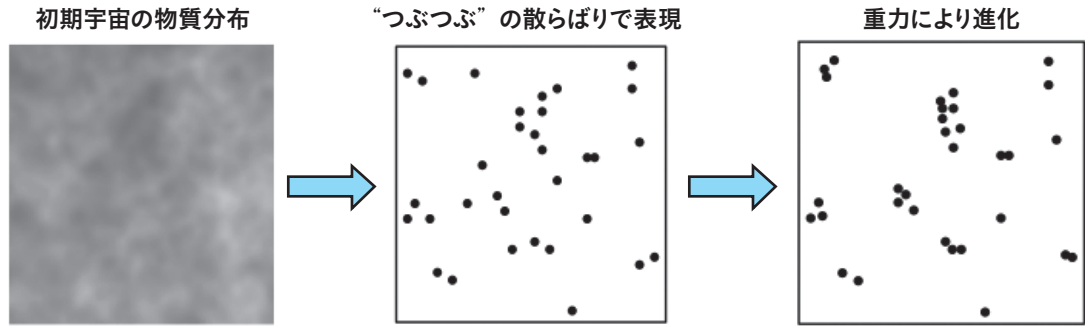


図1 むらむらから銀河団まで。宇宙の構造形成シミュレーションでは、はじめに滑らかな物質分布（左図）をつぶつぶの散らばり具合で表現し（中央）、粒子（つぶつぶ）の重力進化をコンピューターで計算する。右下の式は、ある粒子に加わる、他の粒子からの重力の和と、それによる粒子の運動を記述する。

$$\frac{d^2x_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} Gm_j \frac{x_j - x_i}{|x_j - x_i|^3}$$

2. コンピューター上の仮想宇宙

コンピューターシミュレーションは自然科学や社会科学、またそれ以外でも実に様々な場面で威力を発揮しています。最近では気象や地震現象のシミュレーションがテレビの解説などでも使われていますから、シミュレーション結果を見やすく可視化した動画を目にする機会も多くなりました。重要な情報伝達手段の一つとしても受け止められているようです。

実際には同じ「シミュレーション」という言葉を用いていても、分野によってその役割は少しずつ異なります。ここで、私がなぜ宇宙論のシミュレーションに魅力を感じ、発展の可能性を見つけ、そして自らの研究の主な手段としているかお話ししましょう。その理由は簡単に言えば「初期条件」がはっきりしているからです。最近の大型望遠鏡を用いた観測や、宇宙マイクロ波背景放射の観測のおかげで、宇宙が生まれた頃の様子が明らかになり、また宇宙の構成要素、宇宙膨張の歴史なども分かるようになりました。コンピューターで計算をすすめるにあたって必要なのはその初期値あるいは初期条件です。宇宙論ではなんとその初期条件——実際には宇宙創生から38万年後の姿——を

観測によって詳しく知る事ができるのです。

宇宙論のシミュレーションで重要な事柄がもう一つあります。星やブラックホールなどの天体の形成を理解するためには、一般相対性理論や原子核物理、輻射過程など、大学や大学院で学ぶ高度な物理学が必要となります。しかし、数億光年にもわたる宇宙の大規模構造の形成を考える際に重要なのは実は重力だけです。しかも多くの場合、ニュートン力学、つまり高校や大学初年度で学ぶ基本事項で事足りることも多いのです。自然界には重力の他に3つの相互作用（力）が存在することが知られていて、それぞれ電磁気力、弱い相互作用、強い相互作用とよばれます。電磁気力は磁石などで実感できるのでなじみ深いものですね。一方、弱い相互作用や強い相互作用は原子核や素粒子の反応に関わるもので基本的には微視的な過程で重要となります。つまり、宇宙の構造のサイズではさほど重要ではありません。もちろん上記のいずれも、宇宙初期での進化には多くの役割があったのですが、やがて銀河や銀河団などの大きな天体が形成される際には重力だけが主要な物理過程となります。このように、宇宙の構造形成を理解するには、観測された初期状態から発展して、膨張する宇宙の中で物質同士が重力に

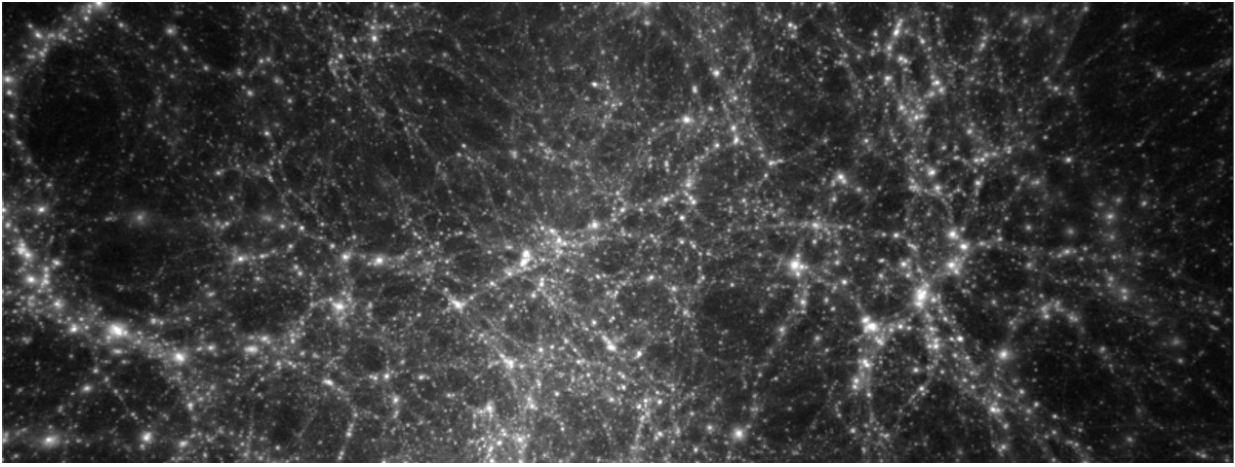


図2 シミュレーションによって得られた、現在の宇宙のダークマター分布。1億光年×3億光年の領域の中で、色の明るい部分にはダークマターが集中している。

よってどのように集まるのかという、とてもシンプルな問題を解けばよいと期待できます。

3. 初期宇宙のむらむら

今では衛星観測によって生まれたての宇宙の姿を詳しく観測できますが、宇宙初期の密度揺らぎはそもそもとても小さなものです。よく、水深100メートルの湖の水面に1ミリメートルのさざ波が立つ程度だと例えられます。波の高さあるいは振幅が小さいと、線形理論を使うことができます。簡単に言えば、波の振幅が時間とともに単調に増加するのです。また、波の重ね合わせといって、いろんな波長をもつ波が互いに干渉しないという性質も持ちます。この線形理論を使えるおかげで、数式を使って初期宇宙での物質分布の時間進化を正確に予言することができます。

さて、初期宇宙の密度揺らぎには大きな特徴があります。それは「揺らぎがガウス統計に従う」という観測事実です。シミュレーションをする観点からは、波の波長と振幅の関係が全ての統計的情報を含んでいるということが最も重要です。いろんな波長の波の振幅と位相（波の山と谷の位置）さえはじめに決めてしまえば、それらの波の重ね合わせによって生じる物質分布が完全にきまります。マイクロ波背景放射の観測

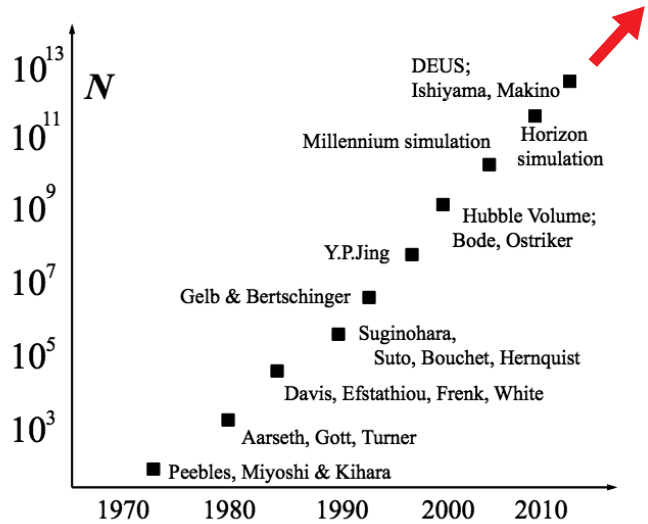
によって、ある時期の物質分布が分かれば、それと統計的には同等の宇宙を作り上げることができます。もちろんコンピューター上での話です。

4. 重力N体シミュレーション

あとは重力によって物質が集まる様子を追えばよいことになります。宇宙初期の物質分布を多数の粒子（つぶつぶ）の分布で置き換え、粒子の間に働く重力を計算します。粒子の速度は互いの重力により時々刻々と変化し、また位置もどんどん変化していきます（図1）。その様子を追う事で、空間全体が膨張する宇宙の中で物質が集まって塊をつくり、その中で天体が生まれる様子を調べることができます。このような数値実験を宇宙論的N体シミュレーションとよび、その歴史は40年ほどにもなります。

1970年代には数百個の粒子（銀河）の重力相互作用を計算し、銀河団の誕生や宇宙の大規模構造の研究などが行われていました。なお、その黎明期には東京大学の三好和憲と木原太郎により、宇宙の構造形成の先駆的N体計算が行われていたことは特筆すべきだと思います（図2）。東京大学物理学教室の木原太郎は統計物理学を研究しており、銀河の分布を定量化するために2点相関関数を用いることを提案しました。相

図3 宇宙論的シミュレーションの進化。横軸に研究発表年、縦軸に使用粒子数を表している。粒子数は過去40年で10億倍にもなった。計算粒子数の増大は、コンピュータの速度向上やメモリ増大によるところも大きい。重力相互作用を効率よく計算するアルゴリズムの発展も重要であった。図中■印の横には、計算を行った研究者、あるいはシミュレーションプロジェクトの名称を記した。これらの計算では、高解像度で一つの天体の内部構造を明らかにしたり、あるいは広大な領域を設定して宇宙の大規模構造の形成を再現した。筆者は大学院生の頃に2000年代の二つの計算に貢献した。



関関数は現代宇宙論で最も重要な統計量の一つです。IPMUですすめるSuMiRE計画でも遠くの銀河の相関関数を測ることにより宇宙の幾何学やダークエネルギーの性質に迫ろうと研究が続けられています。

シミュレーションの規模は、1970年代は粒子数百個を用いる程度でしたが、以降、計算機の性能自体が日進月歩で向上してきたことも重なり、使用粒子数はまさに倍々ゲームのように増加し、40年で10億倍にもなりました。現在では1千億個に近い数の粒子を用いたシミュレーションが行われています。一般に粒子数が大きければ大きいほど、宇宙のより大きな構造のシミュレーションを行うことができます(図2)。また、一つの天体、たとえば銀河の形成を知りたいのであればその内部構造まで詳細に調べることができます。簡単にいえばたくさんの粒子を使うと「良い」シミュレーションを行うことができるのです。

このまま行けば、あと数年で使用粒子数は1兆個に達することが予想されます。1兆個の粒子を用いたシミュレーションは、私のような宇宙物理学の研究者の一つの夢であると言ってもよいでしょう。単に規模が大きくなるというだけではなく、銀河の形成進化の研究分野において、まったく革新的なシミュレーション

が行えるようになるのです。1兆個の粒子を用いれば、天の川銀河の中の全ての星を一つ一つの粒子に置き換えて計算することさえできます。渦巻き状や楕円体など、さまざまな美しい姿をもつ銀河がどうしてそのような形態になったのか、その謎が解けるようになるのかもれません。

5. 宇宙論的シミュレーションの将来

スーパーコンピュータや専用計算機の進歩とともに、宇宙論的シミュレーションはどのような発展をとげるのでしょうか。図3に示した宇宙論的N体シミュレーションの進化をそのまま単純に期待すると、今から半世紀経って、2073年に私が100歳の誕生日を迎えるころ、シミュレーションに使用する粒子数は10の23乗個、アボガドロ数に匹敵するようになります。この数はまた、私たちが観測できる宇宙の中にある星の数にもほぼ等しいものです。つまり、宇宙にある星の全てを一つ一つ粒子で置き換えることさえできます。

しかし、実際にはそのような「単純な」計算を行うことはないだろうと私は思っています。技術的には可

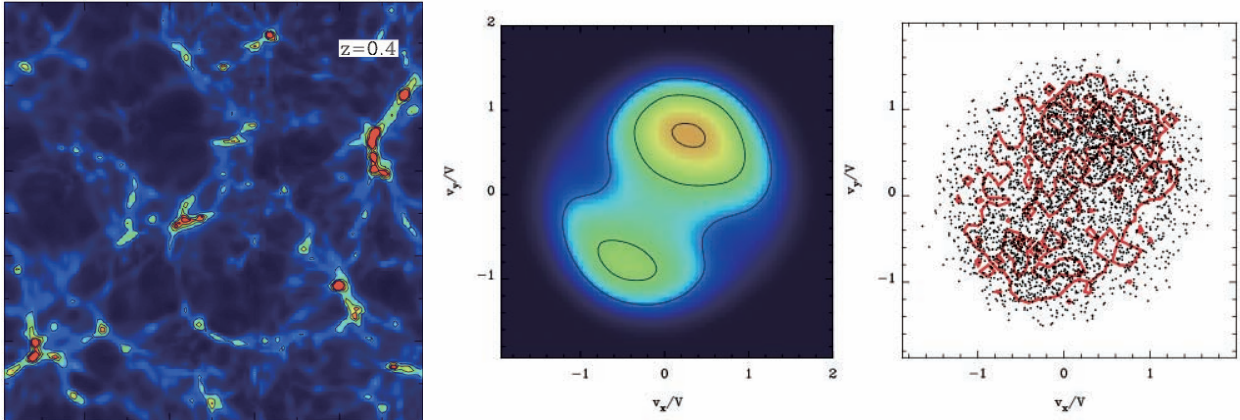


図4 ボルツマン方程式を解くことによって得られたダークマター分布(左図)。現代のN体シミュレーション(図2)と比べれば空間解像度は劣るが、表示された領域の一点一点で、速度空間上の分布が滑らかに表現されている(中央)。右図は、同じ速度分布を従来のN体シミュレーションで計算したものは、粒子分布を均して得た速度分布の形状を表す。

能になるかもしれませんが、今から何十年も経てば、重力N体計算そのものが歴史上の(つまり、古い)手法となっているに違いないと思うのです。

ここまでは、図1のように、仮想的な粒子(つぶつぶ)の運動をニュートン力学の問題として記述してきました。本当は、宇宙を満たす膨大な数のダークマター粒子の運動を支配する基礎方程式は粒子の速度の分布を記述するボルツマン方程式と重力のポアソン方程式です。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \nabla \phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = 0$$

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho = 4\pi G \int f d^3 \vec{v}$$

この式で、分布関数 $f=f(x, y, z, u, v, w)$ は空間中のある場所 (x, y, z) において速度 (u, v, w) を持つ粒子がどのくらいの数あるのかを表します。それを全ての速度について積分すると物質密度 $\rho(x, y, z)$ が得られ、重力のポアソン方程式(2つ目の式)から重力場 $\phi(x, y, z)$ を求めることができます。上記のボルツマン-ポアソン方程式にしたがって、空間+速度空間の6次元空間内で進化させることができれば究極のシミュレーションを遂行できることとなります。最近、私たちの研究グループは、筑波大学の共同研究者とともにこの目標へ向かって第一歩を踏み出しました。速度分布

関数を6次元位相空間上で直接積分することがついにはできるようになったのです。筑波大学のスーパーコンピュータの10パーセント程度を借り切って、6次元空間を64の6乗の格子の上に切り、各格子点で速度分布関数が変化の様子を追うことができました。その結果を図4に示します。ダークマター粒子群の分布が空間、そして速度空間でも滑らかに表現できるようになりました。

6. まとめ

今後30年から50年というという長い期間で考えれば、あらゆる分野で計算手法もどんどん進歩し、コンピュータの進歩もあいまって、これまでできなかったシミュレーションが行えるようになるでしょう。私の予想では、コンピュータの進歩とともに計算そのものは実にシンプルで、例えば上記で紹介したように支配方程式系を直接積分するようなものに変貌していくと思います。重力に加えて流体力学や輻射輸送、化学反応、核反応をふくめた天体形成の詳細まで解像し、宇宙全体の進化の全貌を統一的に表現し、シミュレーションで進化を明らかにすることができるようになる日も近いでしょう。

Our Team

羽澄 昌史

はずみ・まさし 専門分野: **素粒子宇宙物理学**

Kavli IPMU 教授

KEKとの兼任でカプリIPMUに勤めることになりました。私は実験物理学者です。素粒子と時空の根本法則を求めて、実験・観測のアイデアを出し、プロジェクトを立ち上げ、実行し、科学論文を書くという仕事をしています。2007年までは加速器を用いた素粒子実験（B中間子におけるCP非保存を発見したKEK Bファクトリー Belle実験など）を手がけていました。それ以降は、インフレーション理論の実験的検証に興味を持ち、KEKに新しいグループを作り、カリフォルニア大学パークレー校、サンディエゴ校などのグループと共同で、POLARBEARプロジェクトを進めています。



す。POLARBEARは宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の偏光観測を行う地上望遠鏡で、チリ・アタカマで観測をしています。

Kavli IPMUでは、人工衛星による究極感度のCMB偏光観測を目指すLiteBIRD計画を推進する予定です。LiteBIRDにより、インフレーションを精査し、背後にある量子重力理論を突き止めるのが私の希望です。

黄 崧

ホアン・ソン 専門分野: **天体物理学**

博士研究員

私は宇宙における大質量銀河の寿命に関する研究を行っています。「宇宙の夜明け」に衝突合体を始めた銀河の種族として、これらの大質量銀河は、私たちが銀河の形成と進化についての知識を拓ける上で非常に役立つ貴重な情報を伝えてくれます。私はHSC（ハイパー・シュプリーム・カム）サーベイやMaNGAのような野心的なプロジェクトにより収集される、測光及び分光の両方の情報を用いて、非常に興味深いこれらの



Our Team

銀河の構造進化、質量降着、および星形成の歴史に新たな光を当てることを試みます。

Round Table Talk (No. 26, p. 57から続く) : 村山 斉と大栗博司、ピーター・ゴダードと語る

ピーター・ゴダード Peter Goddard
プリンストン高等研究所教授

村山 斉 むらやま・ひとし
Kavli IPMU 機構長

大栗 博司 おおぐり・ひろし
Kavli IPMU 主任研究員



国からの予算措置が益々計画経済的色彩を帯びる中で重要性を増す民間助成金

大栗 資金集めの話が出ましたが、ケンブリッジ大学で特に数理科学の建物群を建設するために、またその後高等研究所に移られてからも、大いに資金集めに携わってこられたことと思います。こういった基礎科学に寄付を行う民間の慈善事業は、英国や米国の伝統に強く根ざしているようですね。

ゴダード ええ、ここ数十年、ほぼ20世紀においては、特にアメリカにおける伝統でした。数世紀を振り返れば、英国において長い間に渡る強い伝統がありました。特にオックスフォード大学とケンブリッジ大学が、他の大学と違って、現在もっている資産とある範囲の独立性を獲得したのは、カレッジ

に対して人々が与えた資産によるものです。しかし、唯一の資金調達法としてのその伝統は、徐々に損なわれてきました。

大栗 英国においてはということですね。

ゴダード 英国では20世紀初め頃から、高等教育の拡大と多様化の結果としてそうになりました。特に大学に実験室が必要になってきたからです。大学で教育し、研究をするのがどんどん高くなるようになってきたのです。なぜなら、19世紀半ばまでは伝統的なカリキュラムの実施、あるいは数学と西洋古典学の研究をしていて、たいした費用はかかりませんでした。19世紀半ばからは研究のために、キャンベディッシュ研究所等の実験施設が必要になっ

たのです。大学院レベルでは益々資源が必要となり、それと共に第一次世界大戦もあり、その時点でケンブリッジ大学とオックスフォード大学に危機が訪れました。そして、政府が大学に資金を供与し始めました。最初は、政府が大学に影響を及ぼすために資金を供給するのではなく、大学委員会を通じて行われ、政府は意思決定から切り離されていました。その仕組みは1970年代から、特に1980年代に徐々に損なわれてきました。現在では、政府が大学に資金を与えるのは、政府が望むことを大学に行わせるためであるという見方になっています。

大栗 政府が大学にインセンティブを与えているということでしょうか。

ゴダード はい、そうです。特に1990

年頃から、大学に好きなことをさせようとか、大学は社会において独立した勢力であるべきだ、というよりは、目的として富の創出に力点が置かれるようになりました。従って、その変化は政府の資金援助がひも付きになりがちであることを意味するようになったのです。また、政府の展望が、少なくとも英国ではそうであるし、アメリカでもそうだと思うのですが、以前よりも短期的になったため、世論に対してより敏感になっています。選挙で再選されることに、より強く関心をもつようになり、それは2、3年の時間スケールで結果を得ようと求めることを意味します。そうしないと次の選挙に影響を与えられないからです。私たちが新しい建物、その他を必要とした時、こういった特徴的な点が全て影響しました。政府が資金を出してくれることは全く当てにできなかったもので、私たちはケンブリッジ大学のために自分で資金を調達しなければならぬと確信するようになりました。

大栗 そうですね、その動向は非常に興味深いものですが、二つの面があると思います。最近、ニューヨークタイムズに民間の慈善事業に頼りすぎることの危険性についての論説が掲載されましたが、一方、民間の慈善事業によって色々恩恵を受けることもあって、私はアメリカの私立大学にいて、村山さんのパークレーもほとんど私立大学みたいなものですが、例えば…

村山 ええ、最近、パークレーでは公的な資金は僅か10%です。

大栗 例えば、新しいブレイクスルーが起きた時、政府の資金が出てくるのを待たなければならない場合があります。もし自分の裁量で使える民間資金をもっていれば、手の届くところにぶら下がっている果実をすぐに摘み取る（「少ない投資で多くの成果をあげる」という意味の英語の慣用句）ことができます。それは政府が反応するのを待っていたのでは難しいかもしれません。ここでは両方の面があるのではないかと思います。Kavli IPMUは寄付

集めに成功してきたという意味で、日本では例外的な研究所です。

村山 その通りです。例えば大栗さんが「壁越え公式」に関するワークショップを開催したいと言いましたが、私はその時即座にワークショップを開ける予算を配分することができて、その後多くの研究活動を生み出しました。

大栗 とても素晴らしいことでした。高等研究所で現在博士研究員をしている山崎雅人さんと一緒に私はある論文を書いたのですが、それは新しい分野を開くもので、急いでワークショップを開催したいと思い、村山さんに提案しました。そうしたら直ちに予算を認めてくれたので、3ヶ月かそこらでワークショップ開催にこぎ着けました。普通なら準備に1年かかるところ、ありがたいことに予算をいただき、またIPMUの国際交流チームがすごく有能で献身的だったおかげでこのワークショップを開催することができて、私自身の研究と他のIPMUの多くの研究者にとって非常に役立ちました。こういったことは大きな違いを生み出します。

村山 ええ、柔軟性は非常に重要なことです。

ゴダード その通りです。どの国でも政府の予算措置は益々計画経済的色彩を帯びる一方だと思いますから、民間の助成金が非常に重要になるであろうという結論になることは確かだと思います。政府は益々課題を設定しようとし、その課題はしばしば短期的です。それに付随するものとして、上意下達という別の側面があります。これは、上からの命令で問題が解決できるという考え方です。本当にそうかどうかは知りませんが、仮に、英国は関数解析が弱いと決まるとしましょう。そこで、数年間で数100万ポンドを注ぎ込めば状況を劇的に変えることができる、というものです。もちろん、そうはなりません。そんなものは学問的な力を増強する方法ではありません。短期的な効果は上がるかもしれませんが、学問の世界において上からの命令

により2、3年のタイムスケールで重要な発展が可能であるという考えは、単純な誤りであると思います。しかし、官僚たちはそれを信じています。なぜなら、それが彼らのレゾナートル、存在理由だからです。

科学の進歩は予想していたよりも遙かにエキサイティング

ゴダード これに伴う他の側面に、会計検査の自己目的化、つまり、納税者に対して、予算を予定通りに使ったことを証明できなければならないという考え方があります。これは、予算を得た時には、その使い道が決まっているはずだということです。このような考え方の問題は、計画が始まったときには、それがどう進んでいくかはわからないということです。私が英国を離れてプリンストンに行った直後、英国研究会議の一つからシニア・フェロウシップをもらっていた人についての評価を頼まれたことを覚えています。これは高い地位の教授に5年間の研究資金を与えるものです。私が頼まれたことは、その人の研究成果について報告することでした。彼が書いた論文等、全ての詳細が送られてきました。最初の質問は「予定通りの成果が得られたか？」だったと記憶しています。私は勿論「No」と答えました。

大栗 何が問題だったのですか？

ゴダード 勿論、彼の研究計画は意義のあるものでした。しかし、彼の成し遂げたことは、計画よりももっとずっと面白いことでした。これはまさしく私たちがそうあってほしいと思うことです。これは、多くの国で行われている官僚的な科学予算の配分方法では決して見極めることのできない重要なことであると思います。

大栗 あらかじめ行き先の決まっていない研究というわけですね。

ゴダード そうです。私は高等研究所に参加するメンバーによくこう言ったものでした。もし何をしようとするのか、どうやってしようとするのか、いつまでに終わらせようとするのか、それが分

かっているようなら、それは真に独創的な研究ではない。私たちがしていることは、あらかじめ想像できないようなことを発見することです。私たちに豊かな想像力があるかもしれませんが、実際に起きることは予期できたことよりもずっと驚くべきことであるということには、本当に興奮させられます。空想科学小説の大家、ジュール・ヴェルヌとH.G.ウェルズを見てみると、彼らは19世紀末及び20世紀当初にあの素晴らしい物語を書いています。しかし、彼らが書いたことと比べ、科学で実際に起きたことを考えてみれば遙かにエキサイティングです。

大栗 その通りです。科学の進歩は彼らの想像を超えていました。ですから、こういう基礎科学の研究、特にその目標は、前もって計画できるものではありません。

ゴダード ええ、超弦理論の発展を見てみれば、どの段階も人々が予想したものには決してなりませんでした。

大栗 また、あちらこちらさまよったあげく得られた成果は、予期できない応用を持つことがよくあります。

ゴダード ええ。実用的な結果になることさえあります。たとえば、私たちの生活の大きな部分を何よりも変えてしまい、また何にも増して商業的可能性を作り出したものの一つがワールドワイドウェブですが、それはどこかの会社の研究開発部門が、「さて、インターネットがあるから、これを商業活動に応用するにはどうしたらよいらう。どうしたら、もっと役に立てることができたらどうか」と考えてきたものではありません。これは科学的なチャレンジに応えようとして生み出されたものだったのです。

数学と基礎物理学の関係

大栗 数学と物理学の間の学際的な研究についてもご意見を伺いたと思います。英国では物理と数学の分けが、(フランスやドイツなどの)大陸側の数学と違うのではないかと思います。これ

はあなたの学際的な研究活動に関する考え方に影響を与えましたか? 英国では物理学者の中にも数学者とみなされる人たちがいるという意味で、物理と数学の交流が大陸側よりも緊密です。

ゴダード 境界は常に人為的なものであり、地域の文化によって決められるものだと思います。いろいろな方法を駆使して物理の問題を解こうとするのは、英国、特にケンブリッジ大学の伝統です。その来歴をたどると、大学が構築された歴史に行き当たるのですが、例えば、ケンブリッジはオックスフォードや他の地域の大学と違っていました。ケンブリッジでは18世紀以降、主要な科目が実は西洋古典学ではなく数学でした。ケンブリッジでの首席学位試験は数学でした。

大栗 全学生に適用されたのですか?

ゴダード ええ、そうです。18世紀以降、数学の特別な試験が発展し、最高の学位を得たいと思ったら数学をとらなければなりませんでした。それは1820年頃に西洋古典学が数学と並んで首席学位を得るために学ぶ科目となるまで続きました。たとえば、詩人のウィリアム・ワーズワースのような人も数学を学びました。彼は数学の奨学金を得てケンブリッジに入学しましたが、余り良い成績ではありませんでした。その後19世紀後半には、ジェームス・クラーク・マクスウェルから始まる大物科学者たちが、数学を卒業してキャベンディッシュ研究所に入るようになります。それから20世紀初頭には経済学者のメイナード・ケインズのような人さえ最初数学から学び始めたのです。常にその伝統が背景にありました。現在は掘り起こさないと分からないのですが、その伝統は現在に至る道筋に影響を及ぼしてきました。

大栗 とても興味深いお話です。

ゴダード それはケンブリッジ大学に見られる現象ですが、数学の枠組みの中で人々は様々な道に分かれて行きました。国際的に見ると、時とともに変化した主要なことは、明らかに数学と基礎物理学の関係が非常に大きく変わ

ったことであると思います。

大栗 あなたはどのようにお考えですか? どのように変わったのでしょうか?

ゴダード 1960年代には、例えば現在の物理のセミナーで当然とみなされている類の数学について、十分な知識を持っている人はほとんどいなかったのではないかと思います。

70年代の初め、数学と物理の結婚は終止符を打ったのか?

大栗 その通りです。それに関して、フリーマン・ダイソンが書いた記事があったと思います。多分70年代初めに書かれたのでは…

ゴダード “*Missed Opportunities* (逃した機会)”ですか?

大栗 ええ、*Missed Opportunities*です。その中で彼はこう言っています。「数学と物理学の結婚は過去何世紀の間、非常に実り多いものであったが、最近、離婚に至った。」

村山 その通りです。何が離婚の原因か詳しく書かれていますか?

大栗 一つには素粒子物理が混沌とした状態だったことです。その当時は、素粒子の標準模型が確立する前、ゲージ理論が主流になる前でした。

村山 それは面白い。

ゴダード 記事が書かれたのは、微妙なタイミングだったのですね。まさしくその時に…

大栗 まさにゲージ理論が急に羽ばたき始めた頃でした。

ゴダード ゲージ理論の成功は70年代、71年か72年にジェラルド・トフーフトがもたらしました。そして標準模型の構築に至ったわけですが、ここで支配的影響を与え本当に物事を変え始めたのは、1970年代半ばのマイケル・アティヤー他の仕事であり、その後エドワード・ウィッテンによる影響力の高まりであったと思います。それが、何をもって物理学者が学ぶべき適度な数学とみなすべきか、についての人々の認識を本当に変えたのだと思います。例えば、私が大学院生の時に研究した最初の問題は、複素平面上の散乱

行列の特異点でした。物理的な領域では特異点とその不連続点はある程度理解されていると思われていましたが、摂動論の範囲で複素特異点を理解しようとする試みには限界があり、従って物理領域の外部における特異点、および複素特異点を考えるように指導されました。この問題については、(現在では常識になっている)ホモロジーの手法など用いた研究はありましたが、当時はそれについて知っている人はほとんどおらず、話をする時は、一から十まで翻訳することが必要でした。

大栗 (ホモロジーは物理の)標準的な言葉ではなかったのですか?

ゴダード 全然標準的な言葉ではありませんでした。実のところ、やや胡散臭く思われていました。歴史を振り返ると、ある言葉で問題を議論して解き、それを別の言葉に翻訳して説明するということは、よく行われてきました。ただし、ニュートンでもそうだったかどうかについては、議論があります。彼は、あらゆることを古典的な幾何学、すなわちアポロニウス他のギリシャの幾何学で説明し、微積分を使った説明は記しませんでした。しかし、自分では微積分を使っていたのです。当時の科学者は、古典的な幾何学で議論をしていましたから、彼は微積分の使用を隠していたのだと思います。

また、ディラックはあるとき、自分は幾何学を使って研究したと言いました。彼が正確にはどのように幾何学を使ったのかについては、疑問があります。彼は時間・空間について考える上で幾何学を使い、相対論的方程式などを考える上で幾何学を使いました。では、彼はヒルベルト空間を考える際にも幾何学を使ったのか? 恐らく、そうではなかったでしょう。とにかく、ある時彼は確かにこう言いました。「自分は幾何学的に考え、しかしそれを代数に翻訳しました。というのは、それが…」

大栗 人々が理解する言葉だったからですね。

ゴダード こういった過程は様々な局面で続いているのですが、しかし今や…

大栗 今や、隠す必要はありません。

ゴダード そうです、その必要はありません。もはやそれほど胡散臭くはありません。それで、あなたは数学と物理の関係をどう考えていますか?

大栗 明らかに双方向に非常に実り多いものでした。あなたが言われたように、現代数学は、ゲージ理論と超弦理論、それから基礎物理学の他の分野についての物理学者の理解を強固なものとしてきました。その一方で、物理学からの洞察もまた数学に前向きな影響を与え、例えば証明すべき予想や、幾何学について考える新しい方法を提供してきたと思います。特に、幾何学の量子的性質は、数学者はもちろん知らなかったことなのですが、今や数学の最前線、中でも幾何学と表現論の領域で非常に共通する潮流となっています。ですから、双方にとって非常に有益であったと思います。Kavli IPMUで行われていることの一つですが、自然の基本的法則をより深く理解しようと試みる時、既存の数学は大抵いつも役に立たないというのは、当然のことです。ニュートンは微積分を創り出さなければならず、マクスウェルは偏微分方程式を使わなければならず、アインシュタインはリーマン幾何を使わなければなりませんでした。

ゴダード しかし、マクスウェルが使った偏微分方程式や、アインシュタインが使ったリーマン幾何は既に存在していました。

大栗 既に存在していましたが、その当時は最先端の数学でした。私たちが人類の知識の限界を押し上げようとする時に、既存の数学が役立つかもしれないという保証がないことは当然です。ですから、物理学者と数学者の交流は双方に役立ち得るものです。その交流は、数学者に対して研究すべき新しい問題を与え、新しい領域を切り開き、また数学の異なる領域を結びつけます。



現在、数学と物理学には同時に発展している領域が存在

ゴダード 現在、数学と物理学には同時に発展している領域があります。ある意味、同時に発展していることは偶然のように見えます。例えば、無限次元リー群論と、それが物理学における着想やパーテックス(頂点)演算子、等々とのように関係していたかです。これらは並行して発展しましたが、始まりは互いに完全に独立で、全く関係なく、しかし同時だったのです。これらが本当に偶然なのか、あるいは窺い知れない何かがあるのか、と考えると、いつも深い興味にかられます。70年代、そして多分80年代にそうであったらうことは、数学的問題により興味を持っていた人たちは物理を語る上で数学を使う心構えができていたのに対し、現象論的問題により興味を持っていた人たちはそうではなく、ある種の隔たりを産み出す傾向にありました。しかし、今はそれが解消されたように見えます。なぜなら、村山さん、あなたのように現象論的問題にも興味を持ち、また数学に関連した話を全くいとわない人たちが大勢いますから。ですから、その意味で状況が本当に変わったのだと思います。

大栗 村山さんのような、素粒子の理論モデルを構築し、実験によって検証されることを望む人たちにとっても、この種の発展から現れた着想と数学が、大きな余剰次元など、以前は考えもしなかったようなモデルの構築に役立っているのではないのでしょうか。

村山 歴史を遡ってみると、例えばゲルマンがクォークモデルを提案した時が物理学者がSU(2)より大きい群を使い始めた最初でした。そうですね? 群論の流行に苦情を言う人もいました。そういう人たちは、どうもこ



のレベルの群論にさえもついていけないような人たちだったようです。それから群論の言葉は忘れ去られた感がありましたが、実際は、クォークのフレーバー対称性だけでなく、ゲージ対称性やその他に対する正しい言葉であったことが分かりました。群論無しで現在私たちが知っているような素粒子物理が存在したであろうとは思いません。

ゴダード その通りですが、私はその裏の面もあったと思います。1950年代のどこかでゲルマンが、ストレンジネスなどを導入したため $SU(2)$ より大きい群が必要なことを悟り、 $SU(2) \times SU(2)$ などについて語り始めた人たちがいました。彼らはこれがコンパクト・リー群であることは知りませんでした。彼らはすぐ聞きに行くということをしませんでした。誰に聞いたら良いのか分からなかったものと思われまます。ゲルマンがあるとき言ったことですが、彼は自分自身で問題を解こうと腰を据えてとりかかったそうです。7個の生成元を得たところで断念したのだと思います（後にゲルマンが使った $SU(3)$ 群には、8個の生成元があった）。

今から思うと不思議なことです。今では、分類問題にせよ、空間の幾何の問題にせよ、直接数学の文献にあたるのが普通ですから。

大栗 数学と物理は再婚したわけですね。

ゴダード いえ、私が思うに、そもそも離婚は…

大栗 …しなかったのでしょうか？

ゴダード ええ、別居を試してみただけだと思います。

大栗 それでは、一時的な猶予期間のようなものだったというわけですね。

ゴダード 当然ですが、この数学と物理の関係はKavli IPMUの存在意義のひとつでもあると思います。今や、それは、何か神秘的な、あるいは少数のグループ内だけに限って興味をもたれるものではないということです。様々な傾向をもった人たちに一般的に受け入れられる、文化の一部なのです。非常

に理論的な問題について考えたいとか、LHCからの最新の結果を本当に理解したいとかに関わらず、それ以上の共通する文化を誰もがもっています。**村山** どうすれば私たちは社会に対する直接的影響をもたない、こういった分野を擁護できるとお考えですか？

直接的に役立つものではないが、貴重な文化的影響を与える基礎科学

ゴダード 何かの病気の治療法となるかもしれないようなもの創り出す、といった意味での直接的に役に立つ影響はありませんが、明らかに貴重な文化的影響を及ぼします。私は友人一学者ではありません—と話してそれを意識しました。今や彼らは基礎科学で起きていることを、以前よりもっと知るようになりました。仮に30年前と比べてみたら、はるかに多くを知っています。ヒッグス粒子の発見にどれだけ興味もたれているかご覧下さい。例えば、議論の余地はあるとしても概念的な見地からはもっと重要なWとZの発見と比べると、全く巨大なものです。もしもヒッグス粒子が存在しなかったら、私たちはみんなノイローゼに陥っていたでしょう。ある程度、それは私たちがこのヒッグス粒子の発見というイベントを何10年も待ちわびてきたからであると思います。

村山 ええ、その通りです。ですから、歴史的なイベントです。

ゴダード また、私は、CERNのような研究機関や、多くの国でそういう研究機関への予算配分に関わっている人たちが、納税者等に状況を説明する上でより一層の努力をしなければならないということをはっきり悟ったと思います。単に広報室からプレスリリースを発表して済みという訳にはいかないこと。人々に何が起きようとしているか理解してもらうための全体的なプロセスでなければならないこと。そういったこと全てが、一般市民の認識する私たちのところのような研究所の位置づけに対して、私たちがしていることをより良く理解してくれるような方向

で、役立つと思います。50年も80年も前の姿勢は、研究には象牙の塔が必要だというものでした。プリンストン高等研究所の歴史を見てみれば、当初の数10年、研究所員は役に立つ応用が別に悪いことではないと感じていたと思いますが、実際はそういうことにはならなくて、いわば所員が純粋であるための環境を確実にするため、研究所を磨き上げられた壁をもつ象牙の塔と化して、一般人が入ってこられないようにすることが必要とされました。

現在、その姿勢はどこでも違っていると思います。学術的な環境を保護することは大切です。研究者に、明日には役に立つ結果を出すように四六時中求めることはせず、ゆったり考えることのできる空間を与えるということですが、しかし、それは、外部の人たちに私たちのしていることを説明し、彼らを招き入れ、彼らに講演し、私たちがしていることを彼らと議論することと完全に両立するものです。なぜなら、私たちは外部の世界と接触のない修道院のようなコミュニティに孤立してはならないからです。このような接触をもつことは、私たちにとって実際に良いことであり、外部の世界にとっても良いことなのです。

村山 英国ではそうなっていますね？サイエンスカフェは英国で考え出されたものではなかったでしょうか？

ゴダード ええ、そうですが、どんな成果になるか分からない、その成果が予測できない、というようなことを研究する人たちにも機会を与えられなければいけないという説明を伴う必要があります。このような研究こそが、私たちの宇宙についての理解を変えてしまい、遂には生活の実際的な側面を変えてしまうものです。これをきちんと説明していくのは簡単ではありません。しかし、それを説明する能力とやる気がある人は、どんどん実行していく必要があります。プリンストン高等研究所では、ロベルト・ダイクグループ所長が、研究成果の出版と一般への普及に益々力を入れ、今までにも増し

てこの行動を続けていくに違いありません。実際、私が1974年に高等研究所に来た時と比べると、素晴らしい所ではあったけれども、当時こういうことは余り行われておらず、それに対して今では常時行われています。とは言え、高等研究所では静かな所に行きたいと思えばできるし、部屋にいたいと思えばできるし、森の中を散歩して平和で精神を刺激するような経験をしたいと思えばそれもできます。しかし、それと同時に、高等研究所は外部の世界と多かれ少なかれ継続的に交流しています。

村山 それは重要なポイントですね。では、多分これが私の伺いたい最後の質問になると思います。あなたはニュートン研究所で新しい研究所の創設を、プリンストンで高等研究所の進展を、それぞれ指導された訳ですから、真に素晴らしい研究所を運営する上で、こういうことはしてはいけないということについて見識をお持ちです。その教訓を伺いたいのですが、恐らく落とし穴に落ちたようなことは無かったのではないのでしょうか。

真に学術的な研究所は、設定された目標に集中するべきである

ゴダード いや、ありますよ。多分、落とし穴はこれまで随分ありましたが、私は今言ったことと共に、外部の世界とこういう交流をしながら、しかし研究ができる環境とすることに確実にプライオリティーを与えるようにすることが可能であると思います。どの研究所でも官僚主義に取り囲まれていて、それは特に数ヶ月滞する人たちに大きな影響を与えるものですが、私にはKavli IPMUで村山さんが決してそういう官僚主義が邪魔しないようにすることに多大な努力をされ、その努力が非常に成功していることが良く分かります。別の観点としては財源に関するもので、これは米英における状況ですが、支援を求める際、研究所の目標に忠実であるように十分注意を払うべきです。というのも、資金を募ろうと

する場合、その資金で実施したい目標があるわけですが、誰かがやって来て資金提供を申し出るものの、望むことに使えるのはその一部でしかない、ということも起きるからです。いや、ひよっとするとそのためには全く使えないかもしれないが、資金調達目標を達成したいがために、主たる目標ではないことを実施する資金を受け入れてしまう。そういうことでも、実際に行く価値があるかもしれませんが、結局のところKavli IPMUのような研究所では、できることは限られています。やってみてはどうかと示唆されることの中にはとても素晴らしいことがあるかもしれませんが、研究所の目的とするものに合致しなければ、「代わりにやってくれる他の人を誰か探しましょう」と言うべきであると思います。

村山 それは重要ですね。

ゴダード はっきり目標を設定すること、良いことだからといって何でもやったりしないことが重要だと思います。

大栗 そうですね。オポチュニティーコスト（全ての選択肢を実現できないことから生じるもので、もし選択しなかった他の行動をした場合に得られたであろう利益が得られないこと）があり得ます。

ゴダード ええ、そうです。誰かがやって来て、「あなたの時間を買いませんか。」と言うことがあり得ると思いますが、実際はあなたの時間を買うことはできないし、あなたをもう一人造ることはできません。いや、どんなことでも結局は管理運営に影響を与え、所長に影響を与え、研究所に影響を与えます。幅広いことは重要ですが、しかし、研究所の目標に集中すること、思いつくまま何でもしたりはしないことも重要であると思います。

村山 深遠な助言を頂き、ありがとうございました。

大栗 ありがとうございました。

ゴダード 私も楽しい議論ができて、御礼を言います。この研究所には本当に感銘を受けました。東京大学にとつ

ても、日本にとっても、それから世界にとっても意味のある大きな進展を遂げたと思います。こういう研究所がそれぞれ何が重要であるかを語ることで、研究所のネットワークの全体として、重要な理想とは何かということに関して深い意味のあることを発信することになると思います。ありがとうございました。

村山、大栗 お疲れ様でした。



Interview

ヤンキー・キム教授に聞く

聞き手: 村山 斉

幸運は備えがなければ捕らえられない

村山 この前ここに来たのは、まだ小さなプレハブの時でしたね？

キム そうです。

村山 すごく変わったでしょう？

キム この研究棟は建築中でした。これから中を良く見てみます。この研究棟の理念は、皆実質的に同じフロアにいるということだそうですね。

村山 その通りです。とてもうまく実現できていると思います。オフィスの配置は分野毎に分けないでまぜこぜにして、中央にある交流スペースを取り巻いています。ですから、皆自然に交流スペースにやってきます。

キム 素晴らしいですね。昨日の外部諮問委員会についてはどう思います？

村山 とても助かりました。我々の成果についてどうすればもっと良いプレゼンができるか、5年延長に向けて何を主張するべきか、沢山アイデアをいただきました。勿論、これか

らそのアイデアを整理してよく考えた上で、プレゼンを改良し、提出書類も改善しなければなりません。とはいえ、すごく助かりました。本当に感謝しています。

キム それはどうも。あなたが成し遂げたことに、委員全員、とても感銘を受けました。

村山 それは良かった。

キム プレゼンを聞いて、あなたが随分前に講演で『Mr.インクレディブル』のアニメを取り入れたのを思い出しました。あなたは『ミッションインポッシブル』をやり遂げたなと考えていたんです。

村山 確かに、今振り返ってみてさえ、奇跡の連続と言ってしまうように思えます。

キム 奇跡は単なる幸運に過ぎないけれども、何もしなくては幸運はやってこないとか言われていますね。確かに幸運が訪れてくれるのは良いのですが、それを掴む準備ができていないと、実際は幸運にはありつけません。

村山 それは小柴先生がいつも言っていることです。

キム 本当？

村山 小柴先生は超新星1987Aからのニュートリノを捕らえました。そのたった1ヶ月前だったら、まだバックグラウンドが非常に高くして捕らえられなかったでしょう。その1ヶ月後には定年退官することになっていま

ヤンキー・キムさんは、シカゴ大学のLouis Block 冠教授で、フェルミ国立加速器研究所（フェルミラボ）の前副所長です。1990年にロチェスター大学からPh.D.の学位を取得、その後1996年にカリフォルニア大学パークレー校の助教授となり、2000年に同准教授、2002年に同教授、2003年以來シカゴ大学教授、この間2006年7月から2013年6月までフェルミラボの副所長を務めました。2005年に韓国のHo-Am科学賞を受賞したほか、多くの輝かしい受賞歴があります。

した。ですから、たった2ヶ月の間しかチャンスが無かったのですが、その許された2ヶ月間のちょうど16万年前に超新星が爆発しました。

キム まさに幸運だけでは不十分で、捕らえる準備ができていなければなりません。

村山 その通り、準備ができていることが必要です。

さて、あなたはフェルミ国立加速器研究所（以下、フェルミラボと略称）の副所長を退いてシカゴ大学の教授に戻られたのですが、フェルミラボの副所長時代を振り返って、どういうことを感じていますか？ 何が一番困難だったのか、何が一番やりがいがあったのか、そして今、何が変わったのか？

過渡期のフェルミラボ

キム 一番困難だったことの一つは、数多くの変化に直面しなければならなかったことだと思います。

村山 過渡期でした。

キム 私がフェルミラボの副所長になった2006年には、LHCの稼働後すぐにテバトロン（フ

¹ EPP2010はElementary Particle Physics in the 21st Century（21世紀の素粒子物理学）の意味。米国科学アカデミーは10年毎に物理学の全領域について、その展望を検討することとしており、研究者で構成されるEPP2010委員会に対し、次の15年間のアメリカの素粒子研究プログラムに優先順位を付けて答申する任務を課した。EPP2010委員会の最終報告は2006年に公表された。

エルミラボの陽子・反陽子衝突加速器）が閉鎖されることと、将来に向けての旗艦的研究プログラムを準備する必要があることが分かっていました。そしてアメリカの素粒子物理研究者は、国際リニアコライダー（ILC）をフェルミラボに建設する計画を進めることに合意しました。この結果、BTeVのような他のプロジェクトが中止されました。NOvAも中止される瀬戸際がありました。私たちの分野の一部の人たちはこの状況に狼狽しました。ILCの方向に全員が賛成したわけではありません。

村山 全員一致するのは不可能ですね。

キム 研究者コミュニティの大多数はILCに焦点を合わせることを望みました。米国エネルギー省（DOE）はILCを支持し、またEPP2010¹も強く支持しました。しかし、アメリカがILCのホスト国となるのは、費用負担が高くつきすぎるのが分かったのです。それで、次善の計画を立てることが必要になりました。その計画の策定を進める役割が私の副所長としての最初の仕事の一つでした。

村山 プロジェクトXがそれですね。

キム いえ、プロジェクトXを超えるものです。プロジェク

村山 齊さんはKavli IPMUの機構長で、カリフォルニア大学バークレー校の教授を兼務しています。



トXはその一部でした。計画にはニュートリノとミュオンとK中間子の研究プログラムが含まれていました。ところで、ピア²はNOvAプロジェクトを何とか生き延びさせました。彼がいなかったらNOvAは取り止めになったかもしれません。とにかくNOvAと短基線のニュートリノ実験が計画に入っていました。また、Muon g-2 実験とMu2e実験でミュオンを研究するプログラムも計画に含まれていました。これらが研究所の新たな方向でしたが、比較的近い将来のプログラムですから、私たちはもっと長期的な計画も必要としていました。その計画では、より長期的な旗艦プロジェクトが長基線ニュートリノ実験LBNEとマルチメガワッ

² 当時のフェルミラボ所長、ピア・オドローネ (Pier Oddone)。

³ DUSEL はDeep Underground Science and Engineering Laboratory (科学及び工学のための大深度地下実験施設) の略で、DOEのプロジェクトであった。南ダコタ州のホームステークに開設されたサンフォード地下実験施設は、当初DUSELの一部として計画されたものであって、物理の実験が幾つか行われており、またLBNE実験の遠距離検出器の設置が計画されている。

⁴ P5 (Particle Physics Project Prioritization Panel、素粒子物理学プロジェクト優先順位決定委員会) は、DOE科学局の高エネルギー物理学およびNSF (アメリカ国立科学財団) が合同で設置する諮問機関、HEPAP (High Energy Physics Advisory Panel、高エネルギー物理学諮問団) の一部である。P5は様々な予算のつき方を想定し、10年のタイムスケールで実施可能な米国の高エネルギー物理の戦略計画を、この分野の20年先までの世界的展望を踏まえて更新することを任務とする。

トの陽子源、プロジェクトXでした。LBNEは、基線長が1,300 kmで、巨大検出器を南ダコタ州に設置する実験です。しかし、それだけでは十分ではなく、さらに必要とされるのが…

村山 大強度です。

キム そう、大強度です。それがプロジェクトXです。将来のニュートリノとミュオンの研究プログラム、その他のいろいろな研究プログラムのための加速器となるだろうというものです。私たちの戦略では、LBNEより、加速器を改良してより大強度のビームを供給することに高いプライオリティーをもたせていました。LBNEはDUSEL³に設置されることが想定されていましたが、私たちはDUSELはものすごく大きくて、複雑で、物理のプロジェクトだけではない多目的で、実現までには長い時間を要すると考えていました。

村山 その通りです。従って、新しい検出器を目指す前に、まず最初は加速器の改良を目指す考えだったのです。

テバトロン閉鎖後、インテンシティーフロンティアを目指したフェルミラボ

キム そうです。2007年にフェルミラボの戦略計画策定のための運営委員会の議論を私がリードしましたが、その委員会の提案がニュートリノとミュオンの研究プログラムと加速器

の改良でした。ピアは委員会からの提案を受け入れ、インテンシティーフロンティアがフェルミラボの主要な目標となりました。すると、アメリカ国内に設置される研究施設は主としてインテンシティーフロンティア研究計画のためのもので、その後20年はその状態が続くということになります。いずれにせよ、委員会が報告書を提出した後、アメリカでは2008年に国内の素粒子物理学プロジェクトの優先順位付けを行う委員会、P5⁴が開催されました。P5はニュートリノとミュオンに焦点を絞る私たちのインテンシティーフロンティア計画を支持してくれました。しかし、LBNEとマルチメガワットの陽子源、プロジェクトXの順番を入れ替えることを勧告したのです。一般的には巨大ニュートリノ検出器と大強度加速器を両方とも目指す考え方について、P5と私たちは一致していました。これは2014年のP5の報告書にあるように、今でも変わっていません。当時のDOEの考えでは、LBNEの建設開始後ほぼ1年でプロジェクトXの建設をスタートさせられるであろうというものでした。しかし、実際問題として2つとも巨額プロジェクトで、同時に実施するのは極めて困難でした。それで、段階的な進め

方と国際協力が必要でした。

村山 その通りです。

キム 2014年のP5は、私たちが数年前に開始させたミュオンの研究プログラムを十分に支持してくれています。ニュートリノの研究プログラムは順調に進んでいます。NOvAはデータ取得を続けており、MicroBooNEの建設は完成間近でもうすぐ実験が始まるでしょう。次のステップはLBNEと加速器の改良です。全体として、当初の計画が研究者コミュニティと2014年のP5に十分支持されていて、私はとても嬉しく思っています。

村山 当初のプランに比べると年次計画が延長されていますが、まだ全体計画はそのままです。

キム ええ、プロジェクトは大きくなりがちで、どんなプロジェクトも実施には長い時間がかかります。前回のP5から2014年のP5までたった5～6年しか経っていません。ですから、間違った方向に進んでいない限り、2014年のP5の報告書で、全般的戦略に関する大きな変更があるとは思っていませんでした。正しい方向に進んでいた訳で、私は喜んでます。しかし、今回のP5の報告書には、重点推進課題 (science drivers)、優先順位、実施戦略など、多くの重要なメッセージがあります。

村山 その通りですが、少し詳細に踏み込むと、勿論LBNEに

はかなり紆余曲折がありました。当初は地下に巨大検出器を設置したい意向で、研究者コミュニティは水チェレンコフ検出器を支持しました。その後、液体アルゴンに覆り、地上に設置することになりました。今は、再び地下に置かなければならないと言われてます。この話はどうしてこのように変わってきたのでしょうか。

液体アルゴンによる検出技術を選択したLBNE

キム 仰ることは正しくて、確かに水対液体アルゴンという構図であって、検出技術の重要な選択でした。水を用いる検出技術は、日本のスーパーカミオカンデがすごく良く働いて来たので非常に進歩しました。ですから、水を用いる検出技術は、もっとずっと大きな検出器が必要で、それに付随する技術的課題はあるものの、実績があって安全な選択肢です。液体アルゴンは比較的新しく、将来もっと有望な検出技術ですが、機能することが最近まで検証されていませんでした。

村山 特に、その規模では。

キム そうです。ICARUSは長い時間かかりましたが、結局は非常に成功した液体アルゴン検出器となりました。ICARUSの開発と実験はイタリアで始められたものです。一方、アメリカ側では、近年多数の研

究開発が精力的に行われてきており、多くの進展がありました。MicroBooNEはさっき触れた短基線実験ですが、液体アルゴン検出技術を使っています。ICARUSの経験と最近のアメリカでの開発努力により、LBNEの検出技術の最終的選択が行われた時点までに、液体アルゴンを用いる検出技術は高い信頼性を得ました。フェルミラボではArgoNeuTと呼ばれる小さな液体アルゴン検出器にテストビームが照射され、見事な結果が得られました。

村山 なるほど。大きさはどのくらいですか？

キム 液体アルゴンの質量は1トン以下です。

村山 非常に小さいですね。

キム ええ。同じ感度で比較すると、液体アルゴン検出器は水チェレンコフ検出器よりずっと小さくできるでしょう。これはもう一つの魅力的な要素です。ただし、液体アルゴン検出器の方が安いと言うわけではありません。実際、コストは同程度です。しかし、液体アルゴンを用いる検出技術は、新しくて将来性があります。この点で、水よりももっとわくわくさせられます。また、その技術はニュートリノ実験だけでなく、ダークマター検出実験や他の分野でも使えます。

村山 その通りです。わくわくしないわけにはいきませんね。

キム かなりきわどいところだったのですが、最後は決めなければならず、液体アルゴンが選択されました。これは非常に大きな変更でした。その後、プロジェクトのコストが原因でもう一つの変更がありました。LBNEの液体アルゴン検出器は34,000トンですが、全コストの見積もりはDOEには許容できないほどの高額でした。DOEは私たちに2段階の戦略を提案するように求め、それから第1段階のプロジェクトについてレビューを受けるように求めました。DOEのシステムはCD (critical decision、重大事項決定)と呼ばれるプロセスを使用しますが、科学的意義を認める段階CD-0から、建設を完了する段階CD-4までがあります。私たちは既にCD-0の承認を受けていました。CD-1はその次のプロジェクトの概念設計の承認を受ける段階です。DOEのCD-1レビューを受け、承認を得るプロセスでは、DOE以外からの資金援助はないものと仮定しなければなりません—実際は共同研究に加わる国と研究機関からの分担金の拠出が見込まれるのですが。その理由は、それがどのくらいの額になるかはっきりしていないからです。アメリカがこのプロジェクトを真剣に考え、真っ先に責任をもってやると確約するまでは、言い換えればCD-1が認められるま

では、他の国は大きな金額の拠出を約束したりすることはありません。その場合の問題は、CD-1を得るためのプロジェクトの規模が他からの分担金の拠出を得て最終的に予想されるプロジェクトに比べて小さくなり、従って国際的な研究者コミュニティには魅力が薄れるように見えることです。いずれにせよ、私たちはこう考えました。DOEからCD-1の承認を得れば他の国も参加するかも知れない、そうなれば一緒により大きく、より性能が良く、従ってより多くの成果が期待できる強力な検出器を造ることができるだろう。

村山 その通りです。ある程度はギャンブルです。

CD-1を得て広範な国際協力を追求するLBNE

キム ギャンブル？ そうですね。CD-1が承認されれば、他の国の研究者はアメリカが実施に責任をもつということにもっと自信をもてるであろうし、より良いプロジェクトとするため、参加を約束するでしょう。ですから、これは作戦だった訳です。CD-1プロセスでは、私たちが提案した南ダコタ州内に基線長1,300 kmの検出器を置くオプションだけでなく、別のオプションの検討も求められました。そこで、私たちはNOvA検出器が設置されてい



るAsh RiverやMINOS検出器が設置されているSoudan鉱山などの別の候補地を考慮しました。どちらもフェルミラポからおおよそ800 kmの地点です。そして、私たちは、提案した基線長1,300 kmのオプションの方が物理に対する感度が優れていることを証明しました。基線長が長くなると物質の効果が大きくなり、ニュートリノ振動のパターンに現れる標準模型の3世代のパラダイムを超える新しい物理に対して、基線長の長いオプションの方が感度が良くなります。初期段階で研究する物理のためには、検出器の質量10,000トンが最小限必要になります。この検出器を地下に設置するためには私たちに与えられたDOEの予算では十分とは言えないので、CD-1承認に向けたプロジェクトのレビューでは10,000トンの検出器を地表に置くことにしました。CD-1の承認を受けた後、私たちはこのプロジェクトに国際的な研究者コミュニティを惹きつけることができ、その拠出金によって検出器を地下に設置し、全質量も増やすことができるであろうという計画だったので、この

計画を誤解した人たちがおり、研究者コミュニティから地表の検出器に関して、陽子崩壊やその他の非加速器実験に対して感度が低いという深刻な懸念が表明されたことは知っています。

こうしてDOEからCD-1の承認を得ました。これを手にして私たちはイタリア、日本、英国、CERN、ブラジルなど他の国の多数の物理学者およびファンディングエイジェンシー（研究資金配分機関）と会い、プロジェクトへのより強力な関与と、場合可能な拠出金について話し合いました。液体アルゴンの検出技術は、他の国の多くの研究者にとって魅力的な要素でした。もっとも、ヨーロッパの研究者コミュニティでは少し違うバージョンの液体アルゴンによる検出技術を開発してきましたが。

村山 ええ、二相式の技術ですね。

キム そうです。彼らは二相式の技術を使いたがっています。これはアメリカの方式よりも少し進んだ方式で、従って研究開発にもっと長い時間を要します。私たちは国際的な研究者コミュニティに対して柔軟性

と自由度を持たせたいと思いました。そこで5,000トンから10,000トンのモジュールで検出器を構成するデザインについて考えました。長い地下トンネルを建設して、後で製作されるかもしれないモジュールを持ち込む余地を残すものです。ニュートリノの検出器は、次の意味で衝突実験の検出器とは異なります。つまり、検出器全体を一度に製作する必要は無く、データを取りながら付け加えることができますということです。この考えによれば、ヨーロッパや他の国の研究者が望めば、独自の設計の検出器を造れるのです。

村山 次々に加えていけば良い。
キム ええ、時間の経過と共に付け加えます。後から入れる検出器は改良されたデザインさえ利用可能です。勿論、科学の観点から最善なのは一度に34,000トンの検出器を造れることですが、モジュール化することの方が技術的にも財政的にもリスクが少ないと考えました。巨大な検出器を一つ製作する場合は、もっと大きな技術的リスクがあります。ICARUSとMicroBooNEはたった数百トンスケールの検出器です。34,000トンの検出器は、それらより2桁程大きいのです。

村山 大変な飛躍です。

キム はい、モジュール化するデザインは技術的にもっと安全です。1台のモジュールを造っ

ている間に、恐らく次のモジュールに対してはデザインを改良できるでしょう。こうすればヨーロッパの研究者は自分のデザインで検出器モジュールを造れます。他の国も同様です。インドとブラジルは以前から前置検出器の設計、製作に興味をもって、過去に何度も話し合いが行われてきましたが、CD-1が承認されて、外国からの参加者との話し合いでの私たちの立場はずっと良くなりました。前置検出器は主にインド、地下施設とビームラインはアメリカ、複数のモジュールから成る遠距離検出器はアメリカ、ヨーロッパ、南アメリカ諸国等が設計、製作する計画でした。

村山 その通りです。

キム 新しいP5は巨大質量の地下検出器の重要性を明言しました。P5の報告書はプロジェクトの国際的な組織と管理運営について強調しています。これは、アメリカが他の国と、以前に比べてより正式な議論を開始し、より正式なステップを踏む上で、本当に役に立つでしょう。

村山 ええ、私はそれこそ正しいやり方だと思います。昨今は何事も非常に国際的なので、一つの国だけが先に研究を進めてしまい、「我々は資金不足なので、参加してはどうかね?」と言ったりすることよりは—それは実際はイコール・パートナー

ではありません—国際的にスタートしたいというわけですね。そういうやり方の方がうまく行くのではないかと期待されます。

キム その通りです。以前の私たちの素粒子実験を見てみれば、私たちは国際協力がかなり得意だったと分かるでしょう。私が一番良く知っているのはCDFのケースです。1970年代と1980年代のことでした。設計を一緒に行いました。イタリアと日本が当初から大きな貢献をしてくれ、彼らのアイデアが設計に取り入れられました。一つの良い例は衝突点の方向を向いたタワー構造の概念で、CDFで用いて成功し、素粒子実験のカロリメーターに広く使われてきました。

村山 ええ、この研究者コミュニティーに属していて素晴らしいのが、そういった点です。

キム 話をLBNEに戻して、私たちが最初かなりアメリカ中心のやり方でDOEからCD-1承認を得ることが必要だった理由は、アメリカが計画を貫き通すかどうか、国際研究者コミュニティーが相当の懸念をもって、彼らはプロジェクトへの参加を真剣に考える前に、アメリカがあるレベルで確約するのを見ておきたいということだったからです。ご存知の通り、アメリカは多くのプロジェクトを中止し、悪評を得ています。最近

のアメリカの状況はCDFの時代のそれとはかなり違っています。それに加えて、アメリカ国内の研究施設がTevatron、あるいはエネルギーフロンティアからインテンシティーフロンティアに焦点を移しました。これはとても大きな変化です。変化は不確定性を伴いますから、人々は変化に対してとても神経質になります。研究者以外のフェルミラボのスタッフにとって、これは辛いことです。研究者は少なくとも不確定性とは何か知っています。研究とは凡そそんなものです。

村山 何も保証されていません。やってみるまで分からないでしょう。

キム 全くその通りです。もし確かに分かっているなら、研究する必要は無いでしょう。新しい施設を建設して研究を行うことは不確定なものです。フェルミラボでは研究者よりエンジニア、技術者、コンピューターの専門家、事務スタッフ等、研究者以外のの方がずっと多く、特に彼らにとって不確定性は受け入れ難いものです。フェルミラボのスタッフはほぼ30年間Tevatronが稼働するのを見てきたものです。勿論、その間、他に多くのことが続いてきましたが、Tevatronは研究所のシンボルでした。

村山 中心的な活動でした。

キム そしてTevatronのリング



が稼働を止めました。これは研究所のスタッフにとって、心理的に途方もなく大きな衝撃でした。

村山 全くその通りと思います。

キム また、その変化が、誰もが耳を背けたくなる人員の削減を要求する方向だったのです。私たちは未来を築くため、新しい研究施設と実験装置の建設に、より多くの予算を注ぎ込まなければなりません。人件費が支配的なTevatronの運転から、物と設備に予算をシフトさせなければなりません。これは研究所に雇用されている人たちに本当の意味での衝撃を与えました。この複雑な状況を処理することは途方もない難問でした。実に全く辛いことでした。しかし、未来を築くためには避けることのできないことでした。

村山 あなたたちはそれをやり遂げました。

キム ええ、私たちはやり遂げました。私は、もうこれ以上の人員削減が必要ないことを切に願っています。去年の夏、私が研究所を去る時、muon g-2のリングがブルックヘブンからフェルミラボへの移送の途上になりました。とても素晴らしいこ

とでした。

村山 そうです、あれはドラマチックなできごとでした。

普通の生活に戻り、実質のある活動を始める

キム それまでにmuon g-2のリングを収容する実験棟の建設が始まり、MuZeプロジェクトはかなり進展し、NOvAはほぼ建設を終え、MicroBooNEは大分建設が進んでいました。また、イリノイ加速器研究センターと呼ばれる新しい建物の建設も大分進んでいました。私たちの当初の戦略計画に盛り込まれた数多くのことが実現されつつありました。常勤の教授として大学に戻るのは比較的容易でした。

村山 なるほど、そうでしたか。

キム なぜなら、私はシカゴ大学で自分の研究グループを持ち続けていたからで、ポストドクと大学院生がいました。もっとも、彼らのために余り時間は割けなかったのですが。当時、彼らとは夕方週末にミーティングをしたものでした。学生達は私の状況を理解してくれ、私のタイトなスケジュールに合わせてくれました。過渡期を乗り切る上で、学生を持っていたことは、

持たない場合と比べれば大変な違いでした。シカゴ大学の高エネルギー物理グループはNSFから資金援助を受けていて、去年の秋がNSFからの期間3年の補助金を更新する申請の時期でした。それで、去年の夏、私は研究代表者としての申請書作りに忙殺されました。これも過渡期を乗り切るのが役に立ちました。良いタイミングでした。去年の秋は3ヶ月間をCERNで過ごし、シカゴの大学院生の一人と一緒にピット（地下の実験ホール）でハードウェアの仕事をしました。トリガーの改良のため、数枚の電子回路の基板を差しこんで試験しました。ピットに下りて、ケーブルを抜き、使用されてきた基板を取り出し、新しい基板を差し込み、ケーブルをつなぎ、基板をテストする。肉体労働です。労働すると、役に立つことをしたという気分になります。とても良い気分です。

村山 確かにすごく良い気分だったと思います。実質のあることをしているのですから。

キム ええ、私は物をいじることが好きなんです。でも、管理者としての仕事をしている時は、沢山の人と会わなければならないので、それにほとんどの時間を費やさなければなりません。ある面ではやりがいを感じるのですが、戦略を考え、予算と安全について気を配り問題があればそれを克服する方法を考え、全てが順調に進むことを確認する。いつもどこかでちょっとした問題がおきるので、面白くてやりがいがあることも沢山あります。しかし、この仕事は実際の物に触れる必要は余りありません。きつくて、いざさかストレスの多い仕事です。去年の秋、ハードウェアの仕事をし、私は体から毒気が抜けた感

じがしました。CERNに3ヶ月滞り、私はシカゴに戻り、大学の学部で物理を専攻している女子学生のための会議を組織しました。

村山 なるほど。

キム この会議はアメリカの8大学でマーティン・ルーサー・キング・デー（毎年1月第3月曜日を祝日とする）と重なる週末に同時開催されました。シカゴ大学、カリフォルニア大学バークレー校、フロリダ州立大学、メリーランド大学、ストーンブルック大学、ルイジアナ州立大学、ペンシルバニア州立大学、ユタ大学だったと思います。全部で約1,000人の女子学生です。想像できますか？

村山 1,000人も！

キム 私たちのが最大で、約220人の女子学生が参加しました。学生達が一番近いところで参加できるように、8大学が共同して会議を組織しました。とにかく、仕事量は多かったのですが、こんなに多くの物理を専攻している女子学生が同時に集まったのを見たことは、本当に良かったです。講師の一人が基調講演を行いました。その際は全会場をビデオで接続し、参加者全員が講演を聴きました。誰もが1,000人の女子学生を同時に見ることができました。こんなに多くの女子学生が物理を学んでいることを知って、参加者は皆非常に勇気づけられたことと思います。通常、自分の大学で、物理のクラスにはたった数人しか女性がいまませんから、彼女たちはいざさか孤立感もち、ここは自分いるべき場所か疑問をもっています。

村山 間違いなく大変勇気づけられたと思います。

キム はい、そうでした。勿論、彼女たちは会議で素晴らし

い講演を聴きましたが、こんなに多くの仲間達が一緒に集まっているのを見るだけでも、とてもわくわくして勇気づけられることです。それが今年の1月のことで、この春は講義で手一杯でした。春学期が終わって、直ちに私はトリガーの改良に関係した作業のためCERNに行きました。現在、私は大学院生、ポスドクともっと多くの時間一CERNでは私は大学院生2人、ポスドク2人と一緒にオフィスにいます。彼らとオフィスを共有すること自体、素敵なことです。どう説明したら良いかわかりませんが、とにかく素敵なんです。

村山 本当にそうだと思います。将来どうされる積もりですか？あなたは韓国の学術政策にも関わっていますよね。

キム 韓国は2年前、IBS(Institute for Basic Science、基礎科学研究院)を発足させました。IBSの下には基礎科学の全分野をカバーする50の研究センターが置かれることになっています。これまでに20程度のセンターが設立されました。また、IBSの下での希少同位体加速器プロジェクトもあります。これは主として原子核研究用ですが、それだけでなく医学利用から物質科学まで広く応用できます。この加速器施設で非常に低エネルギーのミュオンを用いる素粒子実験も行えます。うまくいけばこのセンター群と加速器から多くの重要な研究成果が生み出されることでしょう。それが何か予言はできませんが、良い成果が得られるでしょう。

村山 ええ、その通りです。韓国と日本はもっと協力できるでしょうか？

キム そうなると素晴らしいで

すね。Kavli IPMUは韓国と関係があると思っていましたが。

村山 KIAS(Korea Institute for Advanced Study、韓国高等科学院)とは、それほど強くはないのですが研究者が行き来する関係があります。

キム そうですね。日本の研究施設で研究している大きな韓国人研究者コミュニティがあることを知っています。数年前に韓国物理学会のJ-PARCセッションで200人ほどの参加者がいたと聞きました。私にはこの数が正しいかどうか自信はありませんが、確かに相当数の韓国人研究者一主には原子核物理の研究者コミュニティからですが一の研究がJ-PARCの施設と関連しているという印象をもちました。また、KEKのBelle 2実験では努力を継続しています。他には、スーパーカミオカンデですね。ですから、結構多いですね。しかし、日本人と韓国人が何かについて一緒に歩調を合わせてできるか、ということを検討するために集まったことがこれまでであるかどうかは知りません。その類のことをやってみるのは有益かもしれないませんが、もっとも研究者は自分たちの興味に基づいて行動するものですね。

村山 全くその通りです。研究者に強制はできません。

キム そうですね。いずれにせよ、多くの機会と可能性があると思います。

村山 とても良い話ができました。

WPI平成26年度現地視察—延長申請を審査

2014年9月4日、5日の2日間、WPIの平成26年度現地視察が行われました。今回はKavli IPMUはWPI拠点の5年延長審査を申請しており、これまでの拠点形成の成果及び延長期間の拠点構想の進展計画を審査するべく、視察団として黒木登志夫PD（プログラムディレクター）、宇川 彰PD代理、三田一郎PO（プログラムオフィサー、Kavli IPMU担当）、観山正見PO（東京工業大学「地球生命研究所」担当）、Kavli IPMU 担当作業部会の中島 啓、細谷 裕、三輪哲二、Matthias Staudacher、Ian Shipsey、Anthony Tyson 各委員、WPI プログラム委員会から石田寛人委員、中村道治委員、文部科学省及び日本学術振興会WPI事務局から岩渕秀樹文部科学省研究振興局基礎研究振興課基礎研究推進室長をはじめとする方々が訪れました。初日は村山機構長の概要説明と、長時間にわたるKavli IPMUの各研究者からの成果報告が行われ、最後に村山機構長による進展計画の説明の際には東京大学から濱田総長、松本洋一郎研究担



視察団及びKavli IPMUの研究者に概要説明を行う村山機構長。

当理事・副学長、Kavli IPMU 参与でもある相原博昭理事・副学長も出席し、視察者側からの質問に答えました。2日目は午前中にPD、PO、各作業部会委員からの講評があり、本年度の現地視察が終了しました。

立川裕二科学研究員、ヘルマン・ワイル賞を受賞

東京大学理学部物理学科准教授でKavli IPMU科学研究員の立川裕二さんが2014年のヘルマン・ワイル賞（Hermann Weyl Prize）を受賞しました。ヘルマン・ワイル賞は、対称性を使った物理学において独創的で重要な仕事をした若い科学者に光をあてるべく、2000年に創設され、35歳以下が博士号取得後5年以内の研究者が対象となります。立川さんはAlday-Gaiotto-Tachikawa 予想により、数学および量子物理学に目覚ましい進歩をもたらしたことが評価され、日本人としては初の同賞受賞者となりました。



立川裕二さん

大栗博司主任研究員、講談社科学出版賞を受賞

Kavli IPMUの主任研究員でCaltech（カリフォルニア工科大学）のカプリ冠教授及び同大学ウォルター・パーク理論物理研究所（Burke Institute）初代所長の大栗博司さんが、著書「大栗先生の超弦理論入門 九次元世界にあった究極の理論」（講談社ブルーバックス）によって第30回講談社科学出版賞を受賞しました。同賞は自然科学を中心に、科学的思考、科学技術などをテーマとする優れた一般向け科学書を対象に、1985年に創設されたものです。受賞した大栗さんの著書は超弦理論の一般向け入門書で、難解な超弦理論を噛み砕いて解説しながらも、最先端の研究成果に触れることのでき



大栗博司さん

る内容となっています。

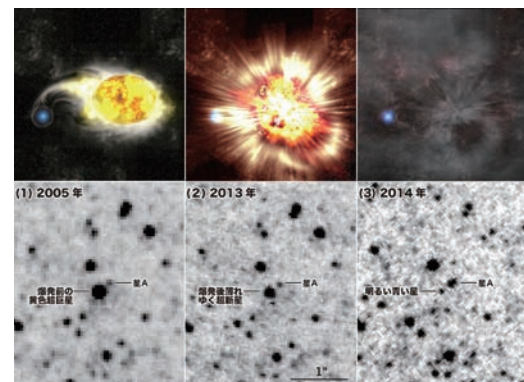
授賞式は2014年9月19日に丸の内での東京會館で、講談社ノンフィクション賞および講談社エッセイ賞の授賞式と合同で行われました。

本当にあった! 消えた黄色超巨星跡に青い星—超新星理論の予測を証明

Kavli IPMUのガストン・フォラテリ特任研究員らは、ハッブル宇宙望遠鏡を用いた観測により、近傍のM51銀河で3年前の2011年に超新星SN2011dhが出現した場所に、近紫外領域で明るく輝く青色の星を発見しました。

SN2011dhは、恒星がその一生の最後に自分自身の質量を支えきれなくなり、急激につぶれて大爆発を起こす重力崩壊型超新星爆発でしたが、爆発前にその位置を撮影した画像には、星の進化の途中であり、超新星爆発を起こさないはずの黄色超巨星が写っていました。このため、爆発した星は重力崩壊型超新星爆発を起こすウォルフ・ライエ星と呼ばれる青色コンパクト星で、爆発前の可視光領域での光学観測では暗くて見えなかった、そして黄色超巨星は爆発した星の伴星もしくは超新星とは無関係で、地球からは偶然同じ場所に見えていた、など諸説があり、論争となっていました。

この謎を解く理論として、2012年にKavli IPMUのメリーナ・パーステン特任研究員らが、爆発した星は明るい青色の星と対を成して進化したことによって黄色超巨星になった、という連星モデルを提唱し、爆発後に残された



上は想像図、下はハッブル望遠鏡が捉えた画像。中央上は超新星爆発を起こしたところ、中央下は爆発後徐々に暗くなってゆく段階。観測画像では比較用に星Aを示している。(©Top images: Kavli IPMU; Bottom images: NASA/Kavli IPMU/Gastón Folatelli)

明るい青色の星が観測によって見つかることを予測しました。そして2013年3月にはハッブル宇宙望遠鏡による観測から、超新星の爆発前にあった黄色超巨星が無くなってしまっているということが報告され、バーステンらの予測の一部が確認されました。さらに、今回、明るい青色の星が発見されたことから、彼らが提唱したモデルが最終的に検証されました。この成果は *Astrophysical Journal Letters* **793** (2014) L22に掲載され、また2014年9月11日には記者会見が行われ、世界的に大きな反響を呼びました。

「サイエンスカフェ宇宙2014」開催

今年もKavli IPMUと多摩六都科学館の共催により同科学館を会場として「サイエンスカフェ宇宙2014」が開催され、6月21日にKavli IPMU 特任助教の数学者、近藤 智さんが「整数論：素数のはなし」と題して、また7月6日には自然科学研究機構長でKavli IPMU 客員上級科学研究員を兼ねる佐藤勝彦さんが「インフレーション理論、観測的実証への期待」と題して講演を行いました。2012年から、七夕、あるいはその前日には多摩六都科学館プラネタリウム「サイエンスエッグ」を第一部会場として講演、その後移動して「カフェ」形式の懇談会を行うことが慣例



講演終了後、質問に答える近藤さん



懇談会場で質問に答える佐藤さん

化しています。今年は3月に南極での観測でインフレーション理論が予測する宇宙の始まりに生じた重力波の痕跡が発見されたとの報告があり、まだ確認はされていないものの、大きな話題になりました (Kavli IPMU News No. 26, 裏表紙参照)が、宇宙のインフレーション理論の提唱者の一人である佐藤さんは今回の“発見”がもたらすかもしれない最新の宇宙像について話をされました。

講演会「物質の科学と素粒子物理の深い関係」

2014年9月28日に、TX柏の葉キャンパス駅前にある柏の葉カンファレンスセンターで、東京大学物性研究所主催、Kavli IPMU及び柏市の共催による一般講演会「物質の科学と素粒子物理の深い関係」が開催され、物性研究所の押川正毅教授が「1次元物質と弦の理論」と題し、また、Kavli IPMU主任研究員の大栗博司さんが「宇宙は超伝導か」と題して、講演を行いました。2つの講演で、物性物理学と素粒子物理学の深い関係が分かり易く解説され、それぞれの分野の研究者による共同研究で生み出された最先端研究についても紹介されました。



大栗さんの講演風景

SSH全国大会にてミニレクチャー「理知のレンズで未知を“見る”」

2014年8月6日、7日の2日間、パシフィコ横浜を会場として「スーパーサイエンスハイスクール (SSH) 生徒研究発表会」において、WPI9 拠点が共同でブースを出展しました。ミニレクチャー「研究者ミニライブ」では、Kavli IPMUからは、チャールズ・メルビートンブソン博士研究員が「理知のレンズで未知を“見る”」と題して英語

でトークセッションを行いました。満員の聴衆は彼の熱いトークに聞き入り、講演後にも「ダークマターの性質は?」「外国で学ぶことを経験する意義は?」など、熱心な質問が続きました。



講演するKavli IPMUのチャールズ・メルビートンブソン博士研究員

女子中高生進路支援イベント「宇宙ヲ聴キ 宇宙ヲ見ル」開催

2014年8月2日にKavli IPMUと東京大学宇宙線研究所(ICRR)の共催による女子中高生進路支援イベント「宇宙ヲ聴キ 宇宙ヲ見ル」がKavli IPMU 研究棟を会場として開催され、宇宙研究の最前線で活躍する2人の女性研究者の講演、実験室訪問、実習実験、先輩研究者との懇談会が行われました。講演はKavli IPMU 学術支援専門職員、岩下友子さんが「反物質はどこへ消えた? 一加速器を使った宇宙の謎の解明一」と題して、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構(KEK)の巨大な装置を使い消えた反物質の謎を解こうとしている研究について、ICRR 特任助教、大石奈緒子さんが「天体の奏でる音楽」と題して、重力波とは何か、天体現象による重力波を直接捉えるためICRRで行われている研究などについて話しました。実験室訪問では、素粒子の飛跡をミクロンの精度で測定する、反応点検出器の組み立てラボを見学しました。実習実験では、重力波望



Kavli IPMUの藤原交流広場で先輩研究者と懇談

遠鏡の仕組みを習い、実際にテーブルトップのレーザー干渉計を組み立ててみました。懇談会では大学生活のこと、研究のこと等が話し合われました。

人事異動

再任

元 Kavli IPMU 助教の山崎雅人さんが約1年間プリンストン高等研究所に滞在後、2014年8月16日付けでKavli IPMU 助教に再任されました。山崎さんは、「Kavli IPMUに戻って来たことを嬉しく思います。私はこれまで素粒子理論・超弦理論を研究してきました。カブリIPMUの皆さんと共に場の量子論と超弦理論の基礎付けについて、幅広く研究していきたいと思っております。」と抱負を述べています。



山崎雅人さん

また、元Kavli IPMU 博士研究員の大島芳樹さんが2014年9月1日付けでKavli IPMU Fellowに採用されました。大島さんは次のように語っています。



大島芳樹さん

「プリンストン高等研究所での一年の滞在の後、Kavli IPMUに戻って来られて嬉しく思います。私の研究分野はリー群の表現論です。現在、表現の分岐則、symmetry breaking operators、および関連する幾何について調べています。」

転出

次の方々が転出しました。[括弧内はKavli IPMU在任期間です。]

向山信治さん [2008年4月1日 - 2014年9月30日]、Kavli IPMU准教授から京都大学基礎物理学研究所教授へ。

近藤 智さん [2008年4月16日 - 2008年10月31日、IPMU博士研究員、その後 - 2014年8月31日、Kavli IPMU助教]、モスクワの The National Research University Higher School of Economics 助教授へ。

Melina Bersten さん [2010年10月1日 - 2014年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員からアルゼンチンのNational Scientific and Technical Research CouncilのScientific Researcherへ。

Jyotirmoy Bhattacharyaさん [2011年9月1日 - 2014年8月31日]、Kavli IPMU 博士研究員から英国ダラム大学博士研究員へ。

Biplob Bhattacharjeeさん [2011年9月1日 - 2014年8月31日]、Kavli IPMU 博士研究員からインド理科大学院 (Indian Institute of Science) 高エネルギー物理学センターの助教授へ。

Richard Eagarさん [2011年9月16日 - 2014年9月15日]、Kavli IPMU 博士研究員からMcGill Universityの博士研究員へ。

Gaston Folatelliさん [2010年10月1日 - 2014年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員からアルゼンチンのNational Scientific and Technical Research CouncilのScientific Researcherへ。

John Kehayiasさん [2011年9月16日 - 2014年9月15日]、Kavli IPMU 博士研究員から米国ヴァンダービルト大学の博士研究員へ。

Changzheng Li (李 長征)さん [2011年9月1日 - 2014年8月31日]、Kavli IPMU 博士研究員から韓国基礎科学研究院 (IBS) 幾何学・物理学センターのIBS Fellowへ。

Chunshan Lin (林 春山)さん [2011年8月16日 - 2014年8月15日]、Kavli IPMU 博士研究員から京都大学基礎物理学研究所博士研究員へ。

Jing Liu (劉 晶)さん [2009年10月1日 - 2014年8月21日]、Kavli IPMU 博士研究員から米国南ダコタ大学助教授へ。

中山 優さん [2013年9月1日 - 2014年8月31日]、Kavli IPMU 博士研究員からカリフォルニア工科大学のSenior Research Fellowへ。

Myeonghun Park (朴 明勲)さん [2013年10月1日 - 2014年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員からアジア太平洋理論物理学センター ((APCTP) の

Leader of Junior Research Groupへ。

Daniel Pomerleanoさん [2012年10月1日 - 2014年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員からインペリアル・カレッジ・ロンドンのEPSRC (英国工学・物理科学研究会議) 博士研究員へ。

Robert Quimbyさん [2011年9月1日 - 2014年8月31日]、Kavli IPMU 博士研究員から米国サンディエゴ州立大学の准教授及び同大学ラグナ山天文台長へ。

Cornelius Schmidt-Colinetさん [2011年4月16日 - 2014年7月31日]、Kavli IPMU 博士研究員からルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘンの博士研究員へ。

Yefeng Shen (沈 焯鋒)さん [2013年6月1日 - 2014年8月31日]、Kavli IPMU 博士研究員からスタンフォード大学博士研究員へ。

Valentin Tonitaさん [2011年10月1日 - 2014年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員からFoundation Sciences Mathématiques de Paris博士研究員へ。

岩本 祥さん [2013年4月1日 - 2014年9月30日]、日本学術振興会特別研究員からテクニオン (イスラエル工科大学) 博士研究員へ。

齋藤 亮さん [2014年4月1日 - 2014年9月30日]、日本学術振興会特別研究員の身分のまま向山信治教授の異動に伴い京都大学基礎物理学研究所に機関変更。

棚橋典大さん [2013年4月1日 - 2014年8月31日]、日本学術振興会特別研究員からケンブリッジ大学 DAMTP (応用数学・理論物理学科) Research Associateへ。

また、Yu-Chieh Chung (鍾 宇傑)さんがKavli IPMU 博士研究員を任期満了で退職しました。在任期間は2011年8月1日から2014年7月31日でした。

訂正

IPMU News No. 24の40ページ、第1コラム本文の1行目、「今年7月4日」を「去年の7月4日」に訂正します。



最高エネルギー宇宙線

福島正己 東京大学宇宙線研究所教授、Kavli IPMU上級科学研員

地球に到来する一次宇宙線は、ほぼ E^{-3} のべきで減少する滑らかなスペクトルをもち、到来方向は0.1%の程度で一様等方であることが知られていますが、最近のAugerとTA (Telescope Array) の観測によって 10^{20} eV付近では大きく様子が異なることが判ってきました。 $10^{18.7}$ eVにべきの値が切りかわる「くぼみ」があり、 $10^{19.7}$ eV以上では流量が急激におちる「カットオフ」が確認されました。カットオフを超えるエネルギーでは一様等方性も破れ、北天を観測するTAでは大熊座の方向にホットスポットの証拠がみつき、南天のAugerでは活動的な銀河Cen Aの方向で到来数が増えています。これは遠方からの宇宙線がCMB(宇宙マイクロ波背景放射)などの光子と反応してシールドされ、カットオフやくぼみの構造をつくるとともに、近傍の超銀河宇宙の物質分布を強調してみせるためと考えられ、近い未来にGZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) 地平内 ($z < \sim 0.01$) で起源星や起源領域が同定されて、最高エネルギー宇宙線の加速や伝搬の物理が理解されると期待されています。このためにTAX4, Auger upgradeやK-EUSOなどの新実験や拡充計画が提案されています。

