

IPMU NEWS

Feature

Gravity's Holography

Interview with Michael S. Turner

IPMU International Conference: Dark Energy

Round Table

Lisa Randall with Hitoshi Murayama and Hiroshi Ooguri



IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Dark Energy
- 4 **Feature** Hiroshi Ooguri
Gravity's Holography
- 8 **Our Team** Alexey Bondal
Paul H. Frampton
Alex Bene
Alexander Getmanenko
Minxin Huang
Daniel Krefl
Yogesh Kumar Srivastava
Matthew Carl Sudano
- 12 **IPMU Interview** with Michael S. Turner
- 18 **Workshop Report**
IPMU International Conference
Dark Energy: "Lighting up the Darkness!"
- 20 **Round Table Talk**
Lisa Randall with Hitoshi Murayama and Hiroshi Ooguri
- 24 **News**
- 28 **Atmospheric Neutrinos** Takaaki Kajita

Japanese

- 29 **Director's Corner** 村山 斉
暗黒エネルギー
- 30 **Feature** 大栗 博司
重力のホログラフィー
- 34 **Our Team** アレクセイ・ボンダル
ポール・フランプトン
アレックス・ベネ
アレクサンダー・ゲトマネンコ
黄 民信
ダニエル・クレフル
ヨゲシュ・クマル・スリワスタワ
マシュー・カール・スタノ
- 38 **IPMU Interview** マイケル・ターナー教授に聞く
- 44 **Workshop Report**
IPMU国際研究会
ダークエネルギー：“暗黒成分を解明しよう！”
- 46 **Round Table Talk**
村山斉と大栗博司、リサ・ランドールと語る
- 50 **News**
- 52 **大気ニュートリノ** 梶田 隆章



Hiroshi Ooguri is Fred Kavli Professor of Theoretical Physics at the California Institute of Technology, and a principal investigator at the IPMU. He is a leading theorist in high energy physics and works at the interface of elementary particle physics, string theory, and related mathematics. After receiving M.S. in 1986 from Kyoto University, he became an assistant professor at the University of Tokyo in 1986. He received Sc.D. from the University of Tokyo in 1989. Subsequently, he was an assistant professor at the University of Chicago (1989-1990), an associate professor at the Research Institute for Mathematical Sciences in Kyoto University (1990-1994), and a professor at the University of California at Berkeley (1994-2000). Since 2000, he has been a professor at Caltech. He received the inaugural Leonard Eisenbud Prize for Mathematics and Physics from the American Mathematical Society in 2008, together with Andrew Strominger and Cumrun Vafa. He also received a Humboldt Research Award from the Alexander von Humboldt Foundation in 2009.

大栗博司：カリフォルニア工科大学Fred Kavli理論物理学冠教授でIPMU主任研究員を兼ねる。高エネルギー物理学の理論研究者として世界的な権威であり、素粒子理論、ストリング理論、および関連する数学の接点で研究を進めている。1986年に京都大学で修士の学位取得後、直ちに東京大学の助手となり、1989年に東京大学から理学博士の学位を取得。その後、シカゴ大学助教授（1989-1990）、京都大学数理解析研究所助教授（現在の准教授、1990-1994）、カリフォルニア大学バークレー校教授（1994-2000）を経て2000年からカリフォルニア工科大学教授。2008年にA. Strominger、C. Vafaとともにアメリカ数学会から第1回のレオナルド・アイゼンバッド賞を受賞。また、2009年にドイツのアレクサンダー・フォン・フンボルト財団からフンボルト賞を受賞。

Dark Energy

Director of IPMU

Hitoshi Murayama

Imagine you are a kid in the park, competing with other kids on how high you can throw a ball. Your ball is going straight up, the higher it goes, the slower it becomes, because of the Earth's gravitation pull. But as you watch the ball, it suddenly starts picking up speed, going faster and faster, and disappears from sight. You scream, run home, until you can tell Mom your story. And you find Mom doesn't believe you on this one.

This is exactly what happened in 1998. Saul Perlmutter, my colleague in Berkeley, tried to measure precisely the way Universe has been slowing down as it gets bigger. Sure enough, he found the Universe is getting bigger. The expansion was slowing down for about first seven billion years, but then it started to pick up speed and now is getting faster and faster. He screamed to the world about this discovery, so did his competitors.

Scientists are naturally skeptical, and did not believe this discovery right away. But later measurements showed the same result. Not only that, this discovery *solved* other mysteries of the Universe. For example, we can determine the age of a star reliably. And many of them were found to be *older than the Universe!* But if the Universe is accelerating, its expansion was slower in the past. Then it should have taken longer than we thought to become as big as it is now, and is indeed older than the oldest stars we've seen. With the new discovery, things started to all make sense.

But why is the Universe picking up speed? It seems to gain energy from nowhere. As the Universe expands, *something* is gaining energy and pushing the expansion, a kind of anti-gravity. We call it *dark energy*. We don't know what it is, but believe dark energy is whopping 73% of the energy in the Universe.

Recently we hosted the *godfather* of dark energy, Michael Turner from Chicago to present his views on the nature of dark energy. He also talked to the general public in the evening. It was extremely well attend, especially for a talk given in English, thanks to live and funny translations by Naoshi Sugiyama. Read them talk about dark energy and IPMU in this issue.

It is now clear that gravity, which we all believed to understand since Newton, is a new frontier. To reveal the nature of dark energy, we need to figure out how gravity, which governs large objects such as the Universe itself, meshes together with quantum mechanics, which governs small objects such as electrons, neutrinos, and quarks. Hirosi Ooguri tells you about the latest attempts in this big quest towards the unified theory of elementary particles and the Universe.



Gravity's Holography

In Director's Corner in the previous issue, Hiroshi Murayama explained the notion of the unification of forces in nature by invoking his personal story about the fall of the Berlin wall. In this article, we will expand on this topic and introduce superstring theory, which is a candidate for the ultimate unified theory of all the forces. We will also discuss the holographic principle, which is an important feature of quantum gravity.

Maxwell Theory and Discovery of Electromagnetic Waves

In the late 19th century, J.C. Maxwell discovered the unified description of electricity and magnetism by a single set of equations. According to the Maxwell equations, a change in an electric field induces a magnetic field and vice versa. Maxwell found a wave-like solution to the equations, in which an electric field and a magnetic field induce each other and the resulting wave propagates at the speed of light. Maxwell's theoretical prediction was confirmed experimentally by H. Hertz 15 years later. By the beginning of the 20th century, transatlantic transmission became reality. Maxwell's unification has set the foundation of modern information technology.

Geometry of Space and Time

While the electromagnetic force is communicated

by an electromagnetic field, the gravitational force has a more profound origin in plasticity of space and time. The Einstein equation describes how space and time are warped by matter. Einstein predicted a gravitational wave as a solution to his equation, where ripples of space and time propagate at the speed of light. 60 years later, R. Hulse and J. Taylor discovered evidences that gravitational waves are emitted by a binary pulsar. Several detectors, including TAMA 300 in Japan, are currently in operation to capture a gravitational wave directly.

Einstein's theory of gravity is an indispensable tool in our study of the Universe, but it also plays roles in our everyday life. For example, the GPS navigation device determines its location by receiving signals from atomic clocks on satellites. However, since the satellites are moving at high velocities and at high altitudes, where Earth's gravitational field is weak, the atomic clocks run slightly faster by relativity effects. The GPS would be useless unless such errors are corrected by Einstein's theory.

Renormalization

Quantum mechanics is the second pillar of modern physics. Except for gravity, all known forces in nature have been incorporated in quantum mechanics. For example, the unification of Maxwell's theory of electromagnetism with quantum

Where has the information gone?

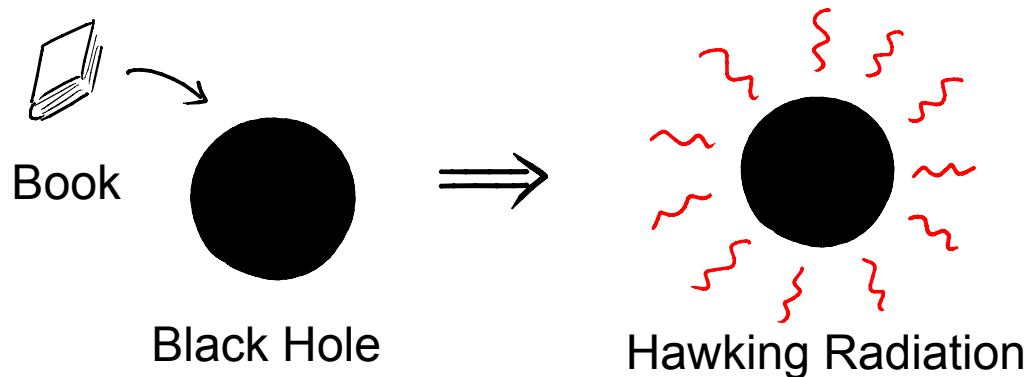


Figure 1. The black hole information paradox

mechanics was attempted by W. Heisenberg and W. Pauli and completed by the renormalization theory of R. Feynman, J. Schwinger and S. Tomonaga.

According to the uncertainty principle of Heisenberg, such familiar quantities as positions and velocities of a particle fluctuate in the microscopic world of quantum mechanics. If we try to combine Maxwell's theory with quantum mechanics, an electromagnetic field would also fluctuate. Since the field can vary in space and time, combining quantum fluctuations at all locations leads to infinities in computations. The renormalization provides a way to remove the infinities and to make testable predictions of quantum electromagnetism.

Paradoxes of Quantum Gravity

Similarly, an attempt to quantize Einstein's theory of gravity produces infinities, but these cannot be removed by renormalization. Moreover, since the gravitational force is a property of space and time, quantizing gravity means that space and time

themselves must fluctuate. This has led to various paradoxes and posed challenges to physicists.

In 1974, S. Hawking showed that a black hole generates heat by quantum mechanical effects and may evaporate away. Based on this theoretical result, he claimed that causal determinism must be violated in quantum gravity. Determinism is one of the most fundamental ideas in science, which states that, if we know everything that is happening now, the past and future are completely determined by fundamental laws of nature.

Let us consider throwing a book in a black hole, as shown in Figure 1. The black hole would gain weight by absorbing the book, but the effect would radiate away. According to Hawking's computation, throwing in a different book with the same weight would produce exactly the same radiation. If we cannot tell the book by measuring the resulting radiation, we would have lost the information on the past, contradicting determinism. This is the black hole information paradox [1].

Superstring Theory

The unification of quantum mechanics and general relativity has been an outstanding problem in theoretical physics, and various attempts have been made to find its solution. Among them, the only known theory that is consistent and has any hope of reproducing a realistic model of elementary particles is superstring theory. It solves the problem of infinities by postulating that fundamental building blocks of matter are strings rather than particles.

The strings vibrate like violin strings, and each vibration mode corresponds to an elementary particle. T. Yoneya, while still a graduate student, discovered that one of such modes mediates the gravitational force. J. Scherk and J. Schwarz, who made the same discovery independently, proposed to use superstring theory to construct the ultimate unified theory of all forces.

However, superstring theory remained on the sideline for about 10 years since then. One of the reasons was that it was not known how to incorporate “parity violation,” which is an essential property of elementary particles. It seems that everything we experience can also happen if it is reflected on a mirror, but this reflection symmetry called “parity” is violated in the world of elementary particles. Nevertheless, Schwarz continued to study the theory almost by himself for the 10 years, and

discovered with M. Green a remarkable mechanism to incorporate parity violation in superstring theory, opening a way to construct a unified theory using superstring theory.

Holographic Principle

After 25 years since the breakthrough by Green and Schwarz, superstring theory has made great progress. Here we will discuss the holographic principle, which is one of its surprising outcomes.

In quantum mechanics, there is a notion of wave-particle duality. For example, an electromagnetic wave is a wave-like solution to the Maxwell equations. However, if we apply quantum mechanics, the electromagnetic wave becomes a particle called the photon. The electron, which we think of as a particle, is also a wave obeying the Schrödinger equation. In the early history of quantum mechanics, there were debates on whether the electron is a particle or a wave. Nowadays, we view that the two properties are not contradictory but are complementary aspects of the whole picture.

Take a look at Rubin’s vase in Figure 2. If we pay attention to the white area, we see a vase. On the other hand, the black area seems to indicate that there are two people facing each other. We cannot say that which interpretation is correct. This is another example of duality.

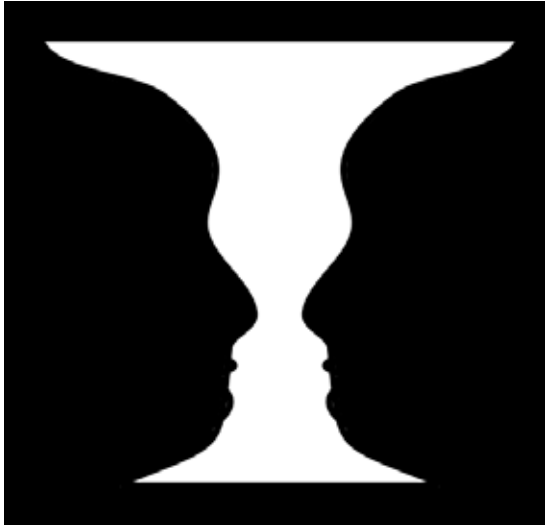


Figure 2. Rubin's vase

The holographic principle is yet another example of duality. Holography is a term in optics, which means encoding geometric data of a 3-dimensional object on a 2-dimensional surface so that the 3-dimensional image can be reconstructed later. In superstring theory, all the phenomena in quantum gravity can be projected onto a screen located at boundaries of space, and they can be described using a quantum theory without gravity defined on the screen. Borrowing the terminology of optics, this idea is called gravity's holography.

By using the holographic principle it has become possible to solve deepest puzzles of quantum gravity such as Hawking's paradox by translating them into problems in ordinary quantum mechanics without

gravity. This has led to major progress toward constructing a unified theory with gravity.

Conversely, it has also become possible to translate difficult problems in quantum mechanics into the language of quantum gravity and solve them by using geometric methods. This has broadened applications of superstring theory, providing new perspectives to a variety of problems ranging from hadron physics and thermodynamical properties of quark-gluon plasma to strongly correlated phenomena in condensed matter physics such as quantum criticality and quantum fluids. There is even a hope of understanding the mechanism of high temperature superconductivity using superstring theory [2].

Superstring theory is a candidate for the ultimate unified theory. It is also a theoretical tool to solve a variety of problems in physics beyond the scope of elementary particle physics. These two aspects are related by the duality called the holographic principle. At IPMU, we are pursuing both of these two directions by involving a wide range of scientists from pure mathematicians to condensed matter physicists.

References:

- [1] H. Ooguri, Black Holes and the Fate of Determinism, a talk at the Caltech Alumni Day, http://today.caltech.edu/theater/29930_56k.ram
- [2] S. Hartnoll, Lectures on holographic methods for condensed matter physics, arXiv:0903.3246

Our Team

Alexey Bondal

Research Area: **Mathematics**

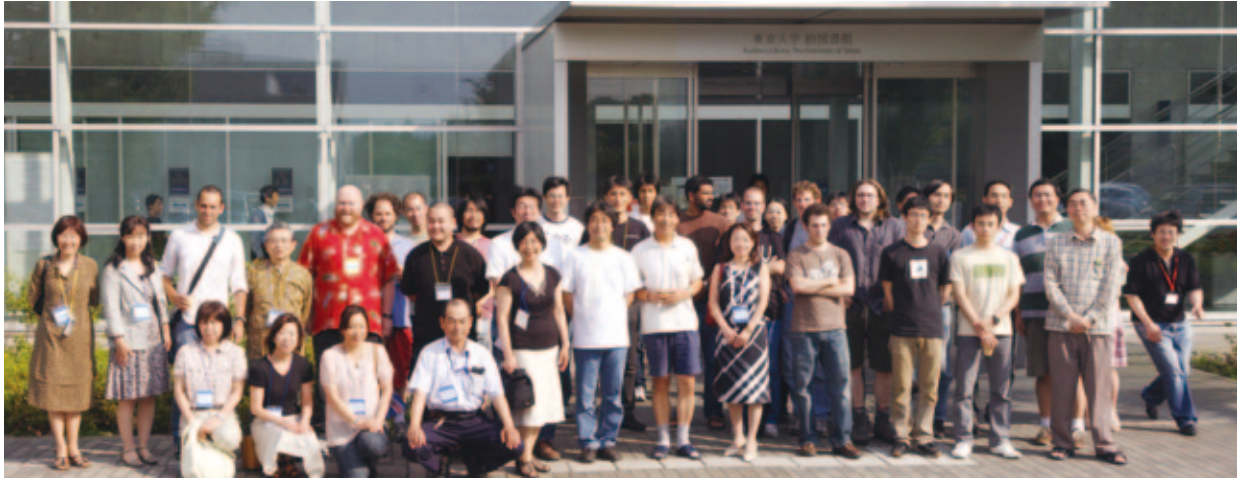
Principal Investigator



Some non-mathematicians tend to view mathematics merely as a collection of technical tools to use whenever these tools are applicable to their work. Some mathematicians have a similar point of view regarding homological algebra and algebraic geometry, one of the most technical areas of mathematics. This restrictive approach often fails for both mathematics and these particular areas of it. As experience shows, one has to use the very ideology of the theory and not just concrete results in order to get real insight when applying homological algebra and algebraic geometry to his/her research.

Nowadays, these areas, which are my primary subjects of research, have an enormous influence on various areas in mathematics, mathematical physics, and string theory. I have developed an approach to noncommutative geometry by means of derived categories, an advanced technique in homological algebra. Derived categories, which first emerged as a very abstract mathematical tool, are now considered to be the most powerful method for describing D-branes of topological field theories in physics. In addition to applications, one has to continually

develop the basics of homological algebra and its applications to algebraic geometry, in order to mathematically understand various proposals by physicists aimed at describing the structural evidence of our world. Among my results is the discovery of homological relation between geometry of some algebraic varieties and representation theory, reconstruction of algebraic varieties from their derived categories, a homological interpretation of the Minimal Model Program in birational geometry, introduction of Serre functor and invariants of derived categories based on it, construction of enhancements of triangulated categories, the discovery of the action of the braid group on the set of exceptional collections - particular kind of bases in triangulated categories.



A get-together of IPMU volunteers with IPMU scientists and administrative staff

Paul H. Frampton

Research Area: **Theoretical Physics**

IPMU Professor

My research interests in theoretical physics include particle phenomenology, theoretical cosmology and string theory. I have worked mostly in particle theory model building beyond the standard model with predictions of new particles such as the axigluon in the chiral color model and the bilepton in the 331 model. Both are examples of additional gauge bosons.

While awaiting the LHC at CERN I have become active in cosmology questions. Cyclic cosmology based on dark energy can avoid the initial singularity associated with the big bang. I have identified all dark matter as intermediate-mass black holes which is fully consistent with all observations. Both of these projects rely on consideration of the entropy of the universe.



I have been fascinated by string theory ever since its earliest days. I was a postdoc of the Japanese theorist Nambu when he invented it!

Our Team

Alex Bene

Research Area: **Mathematics**

Postdoc

In my research, I study Riemann surfaces, their moduli spaces, and their mapping class groups. The main tool I employ is a type of Feynman diagrams called a fatgraph which essentially gives a combinatorial representative of such surfaces. With this combinatorial perspective, one can use QFT techniques to study the cohomological aspects of moduli of Riemann surfaces and mapping class groups. More recently, I have used this combinatorial approach to study representations of mapping class



groups, the classical Johnson homomorphisms, and finite type invariants of 3-manifolds. This last topic is interesting as it has a different QFT interpretations, and many of these finite type invariants also can be described in terms of similar Feynman diagrams.

Alexander Getmanenko

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

My research is on the Schrödinger equation in the complex domain, semiclassical approximation, and “resurgent analysis” linking perturbative and non-perturbative asymptotics. Among other quantum tunneling problems treated by these techniques, I study the Witten Laplacian whose eigenfunctions are expected to contain information about pseudoholomorphic discs in the symplectic



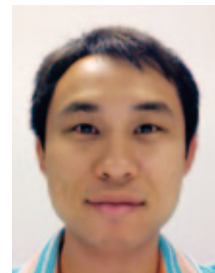
formulation of the string theory. I am excited to come to Japan with its tradition of complex-analytic methods for differential equations.

Minxin Huang

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

My research explores various aspects of the AdS/CFT correspondence, including giant gravitons and pp-waves. I also study topological string theory. Topological string theory counts the number of holomorphic curves in Calabi-Yau space, a problem of great interest in the mathematics of algebraic geometry. Finally, I am interested in the applications of string theory to cosmology and particle physics. Some of my recent works with collaborators study



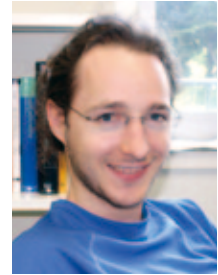
the non-Gaussian feature in the anisotropy of the Cosmic Microwave Background (CMB) in various inflationary models inspired by string theory constructions.

Daniel Krefl

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

Lately, my work has been mainly concerned with extending the topological string machinery to orientifolds, that is, a combined gauging of world-sheet parity and a target-space involution. Besides the physical importance of orientifolds in superstring theories, this also leads to some new mathematics. This is because, roughly speaking, the free-energy of the orientifolded topological string is the generating function of maps from the world-sheet to target-



space, where the world-sheet may now possess boundaries and cross-caps, thus, giving a physical count of some new invariants of the target-space.

Yogesh Kumar Srivastava

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

Black Holes provide an intriguing arena in which to explore the challenges posed by the interplay of general relativity and quantum mechanics. String Theory has successfully explained Bekenstein-Hawking entropy in terms of statistical degeneracy associated with different brane configurations. Initial comparisons were made using only the Einstein-Hilbert action (i.e., neglecting higher derivative and quantum corrections in the string effective action) on



the macroscopic side and considering large charge limit on the microscopic side. Recently, I have been interested in extending the agreement to include the corrections. I am also working on constructing actual microstates for string theoretic black holes.

Matthew Carl Sudano

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

Despite the phenomenal success of modern particle physics, we know that our understanding is incomplete, and there is reason to believe that we may soon have hard evidence of new physics! I have been studying supersymmetry, a form of new physics that may alleviate some of the unattractive features of the standard model. In particular, I have worked on both the high-energy problem of realizing calculable



dynamical supersymmetry breaking and the low-energy problem of generalizing the parameterization of its effects.

Our Team

IPMU Interview with Michael S. Turner

Interviewer: Naoshi Sugiyama

Godfather of dark energy

Sugiyama: Welcome to IPMU. You are known as the godfather of dark energy, and the person who invented the term. How did you come to this name?

Turner: Names have to be short and catchy; they have to be accurate to some degree, but not too accurate so as to make them boring.

Sugiyama: "Black hole" would be a good example then, is that right?

Turner: "Black hole" is a great example.

Sugiyama: Black holes used to be called "collapsers" and other names... I think the name came from John Wheeler.

Michael S. Turner is Bruce V. & Diana M. Rauner Distinguished Service Professor, Departments of Astronomy and Astrophysics, and Physics, and the College; Enrico Fermi Institute; Kavli Institute for Cosmological Physics (KICP), at the University of Chicago. He is a world-renowned cosmologist, and was awarded Helen B. Warner Prize of the American Astronomical Society in 1984 and Julius Edgar Lilienfeld Prize of the American Physical Society in 1997. He was the Assistant Director for Mathematical and Physical Sciences for the US National Science Foundation in 2003 - 2006.

Turner: Yes, black hole is definitely catchy, and it is pretty accurate. I hope dark energy does as well. First of all, it's the perfect mate to dark matter. In relativity anything that has a pressure comparable with its energy density is called energy-like, and anything that has very small pressure is called matter-like. This stuff is more like energy rather than like matter, in the sense that pressure is comparable to energy density.

Sugiyama: Well, the sign is different and it breaks its energy condition.*1

Turner: A Good name can't be too accurate, because if you make it really accurate, the name gets longer and longer and fewer people will understand that. So "black hole" is great: it's not inaccurate, and it is very catchy. I hope dark energy is viewed the same way.

Sugiyama: OK. What are your impressions of IPMU?

Turner: I think IPMU is a very timely idea. There is a lot of energy here and it's attracting a lot of people from all over the

*1: Here, the "energy condition" means the "strong energy condition" which requires that a sum of the energy density and 3 times the pressure of (a fluid of) normal matter or radiation should be positive.

world. I think IPMU will have not only big effect in Japan, but it will have a big effect beyond Japan. Because science today is so international, something that happens in Japan is not only going to change Japan, but it is also going to change the rest of the world. I am very excited about IPMU.

Sugiyama: The main purpose of IPMU is to act as a bridge among mathematicians, physicists, astronomers, and astrophysicists, and to help reveal the secrets of the universe. I am just wondering if you started your career as a particle physicist or an astrophysicist.

Turner: My career began in particle physics. I was a student at the Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), and then I got interested in general relativity. I did my thesis in general relativity, on gravitational waves. Then, I moved on to Chicago, and I fell under the influence of Dave Schramm.^{*2} He said: "Astrophysics is good, Cosmology is good, Particle Physics is good; all three together is even better!" I was in the right place at the right time and most importantly, had the right mentor – David Schramm.

*2: A famous cosmologist worked at the University of Chicago. His research connected cosmology, particle theory, and nuclear physics. He was born in 1945 and died tragically in 1997 in a crash of a plane he was piloting.

*3: Professor Emeritus at Stanford University. He is known for his research on strong sources of gravity such as neutron stars and black holes, and on gravitational waves.

Sugiyama: That's right. I am curious about that period in the 1980's. I imagine it as something like a golden age of particle cosmology.

Turner: No, I don't think it was the golden age. I think it was the very beginning of what may become a Golden Age. It was the first coming together of two fields. At the time there were different views of how successful this coming together of the very big and the very small would be. Dave Schramm was very enthusiastic about bringing particle physics and cosmology together. My adviser at Stanford, Bob Wagoner,^{*3} who wrote the first computer code to study "Big Bang Nucleosynthesis," which is one of the pillars of early universe cosmology, was unenthusiastic about it. His advice to me was: "Do something safer, like gravitational waves."

Sugiyama: That's safer than particle cosmology ...

Go-go junk bond days of early universe cosmology

Turner: At the beginning of anything new and different, it's not clear if it is going to pan out. In the 1980's it was basically a bunch of wild and very bold speculations, that if correct, would change forever both fields. However, it wasn't obvious that those wild speculations could ever be tested or further would turn out to be true. The 1980's

Naoshi Sugiyama is a principal investigator of IPMU. He is also professor of physics at the School of Science, Nagoya University.



were the go-go junk bond days of early universe cosmology. Anything went, and there were lots of very ambitious ideas – cosmic strings, textures, phase transition, monopoles, monopoles on strings, Kaluza-Klein, and axion. The two most important ideas were particle dark matter and inflation. These two ideas really caught on and helped drive the entire field of cosmology. They led to a framework for discussing the evolution of structure, known now as cold dark matter, which made specific predictions which could be tested. The observers have paid cold dark matter the highest compliment they can, which is to try to rule it out!

Sugiyama: But they didn't succeed...

Turner: Well, they did. They kept ruling it out, but CDM kept wiggling out. Finally, we have a version – CDM with dark energy or Lambda CDM^{*4} – which fits all the data. The challenge now is to figure out what dark energy is, and to see if the theory continues to fit the data as the data gets better and better. I am not sure what would have happened, if data didn't start to come in the 1990's. I am certain that we would not be on the verge of a golden age if the observations

*4: Lambda (Λ) means the cosmological constant which Einstein introduced to his equation of gravity.

*5: Professor at Oxford University. He is known for his research on cosmology, galaxy formation, dark matter, and so on.

*6: Professor at the University of California, Berkeley. He is known for his pioneering observations of the large-scale structure of the universe as well as numerical simulations for its formation.

had not come in the 1990's. People would have gotten tired of speculations.

Sugiyama: What are the key observations of this golden age: Sloan-like surveys, cosmic microwave background (CMB), or supernovae?

Turner: There are all kinds of observations. What really makes this a special time is the sheer number: large-scale structure, microwave background, the high red-shift universe, dark energy studies, dark matter experiments, the LHC, and you put them all together and the whole is even greater than the sum of the parts. And what all of these observations have in common, is that they all can test inflation and cold dark matter, the two big ideas that came out of 1980's. If you go back to 1980, the idea that you would ever measure the curvature of the universe seemed very remote. People were focusing on measuring the actual matter density. It's very hard to do; you really need a big, big sample of the universe here.

Sugiyama: That's right, using the number count of galaxies, things like that...

Turner: When you were at Berkeley, you might remember that Ω (density parameter of the universe) climbed almost to one, and then it started sinking, finally arriving at about 0.3.

Sugiyama: Right, I remember that one day in 1994, I think, we had a debate at a seminar at the end of the semester. Joe Silk^{*5} and Marc Davis^{*6}...

Turner: Flipped the coin to decide who got which side –

the issue was completely up in the air.

Sugiyama: Yes, they flipped a coin. One took the flat $\Omega=1$ universe; the other had to argue for a low-density universe. That was really spectacular... But now, this fun has been denied us because all data points to the universe being low density, but flat, since we also have an unexpected player in the game in the form of dark energy.

Turner: Dark energy is such a wonderful story; the story began in 1980; those of us who believed in inflation said very carefully that it doesn't mean $\Omega_{\text{matter}} = 1$. It means you have a flat universe. But we were pinning our hopes on particle dark matter, because we already knew that if we will have enough matter to make the universe flat, that wasn't baryons, instead it had to be particle dark matter. That was already pretty exotic. And then, during the 1980's the measurements of Ω_{matter} went up, getting close to one and then falling down, and it looked in the late 1990's that the inflation was really on the ropes because Ω_{matter} was falling short of 1. As a last desperate try, we suggested that it was something like a cosmological constant.

Sugiyama: Right, but that may be the last thing to introduce...

Discovery of accelerating universe changed cosmology over night

Turner: If you look at cosmology around 1997, it was not clear where things were

going to go, because you had that idea of inflation and dark matter and they worked pretty well if you took $\Omega_{\text{matter}} = 0.3$, but inflation really insists Ω is one. It looked like it was not going to be a happy ending. Then in 1998 the discovery that the universe was accelerating changed it all, essentially over night.

Sugiyama: Is that supernovae data?^{*7}

Turner: Yes.

Sugiyama: They even reached the wrong conclusion in the first paper, if I remember correctly.

Turner: It is true that the first ten supernovae or so did not show signs that the universe is accelerating. And even the original discovery data from 1998 is not very strong. But instantaneously everybody said: "Aha, we have a solution. We have a universe with dark matter and dark energy and it's accelerating, because the accelerating universe and dark energy made everything fit together." Over the past ten years the evidence has become rock solid.

Sugiyama: Two years later, Boomerang CMB also proved that the geometry of the universe is flat. That is really a triumph.

Turner: Yes, 2000 was a very important year and Boomerang really settled the issue of

*7: Observations of the distances and redshifts of distant galaxies reveal if the rate of the cosmic expansion at that time was faster or slower than the present rate. This in turn tells if the cosmic expansion is decelerating or accelerating.



Public lecture by Michael Turner (see p. 19)

flatness. But 1998 was the watershed year. I will give you an example why. In April 1998, Dave Schramm was supposed to debate with Jim Peebles*8 on whether the universe was flat and this time there wasn't going to be a coin flip. Schramm had flat and Peebles had non-flat. You know Dave Schramm died in December of 1997. The whole fall before his death he was worried about his debate with Peebles and the only thing

*8: A pioneer in Big Bang cosmology. He contributed to the discovery of cosmic microwave background radiation by theoretically predicting that it is detectable. He also contributed to the theory of structure formation through the first detailed calculations of the formation process of hydrogen atoms. Now he is Professor Emeritus at Princeton University.

he could see that would make a winning case for flat universe was Λ (cosmological constant). Dave kept coming to my office saying: "Any supernovae results yet?" So I think in December Dave thought that Peebles would win the debate because the supernova data had not yet been reported. Only weeks after his tragic death, the supernovae results were announced. I was asked to fill in for Dave and the debate organizers said: "You know, Jim is not really sure about what the debate topic is." I said: "I think I know what it was supposed to be: flat versus non-flat." I spoke with Jim and he said: "Yes, indeed, flat vs. not-flat is the debate topic, but I am not willing to debate not-

flat anymore" The discovery of cosmic acceleration changed it all, almost overnight.

Sugiyama: Because after the data...

Turner: Well, the supernovae data was not decisive and you could have argued against it. But you could see the handwriting on the wall: As crazy as the whole picture was, at last everything fit in together.

Sugiyama: So right now with cold dark matter, flat geometry, and dark energy working pretty well for every single bit of data, is there no compelling reason to think about any other possibility or still we should explore alternatives?

Turner: Well, it depends on who you are. If you are what

I would call an astrophysical cosmologist, somebody who is interested in reconstructing the history of the universe, then I think you would be pretty happy with the model you just described, because we know whatever the dark energy is, it is very similar to cosmological constant vacuum energy and for the purposes of understanding how the universe evolves to form structure, you know the basic cosmological model well enough for this purpose. But if you are what I would call a fundamental cosmologist and you are very interested in the fundamental features of the universe and how they came about you would want to know more.



Public lecture by Michael Turner (see p. 19)

Sugiyama: “What is dark matter, what is dark energy?”

Turner: Yes, coming back to the dark matter, again, if you are an astrophysical cosmologist, I don't think you really care if it is an axion or neutralino. The key thing is that it's very cold. If you are a fundamental cosmologist, then even though the dark energy seems to behave just like a cosmological constant, if there is even 1% difference, that's a very big deal. And likewise with the dark matter, to a fundamental cosmologist the difference between an axion and neutralino is a very big deal. So, astrophysical cosmologists know enough about the fundamental model; they can do what I think is

extraordinarily interesting, to reconstruct the history of how we got here, the first stars, first galaxies. But in the terms of fundamental cosmology and the birth of the universe, we are just scratching the surface.

Sugiyama: OK. So I guess you maybe belong more to the fundamentalists. I have another question for you: If dark energy is coming from the Planckian era, it is quite unlikely that we would have such small dark energy in the present day. It's not natural. So, we need an appropriate explanation for that. What is your explanation?

To be a great theorist you need big problems to solve

Turner: The scale of the dark

energy – more than 30 orders-of-magnitude below the Planck scale seems to suggest that it has nothing to do with Planckian physics. That being said, we don't have a clue what it does have to do with! I think today's session really illustrated this: theorists are without good ideas about what the dark energy is. They have plenty of ideas, but none of them are compelling – they are mostly ad hoc and don't shed light on anything else. But, I think what is so wonderful about this problem is that it is a big one. It's really big one, and the solution is not at all obvious.

Sugiyama: So we have to be very happy as theorists or researchers that we can tackle

such a big problem.

Turner: I think you are right. If it's an exciting time, you not only need data and smart people, but you need big problems. You know, Bill Clinton, our 42nd President, had enormous political skills, but he was President at a time when there were no big problems to solve.

Sugiyama: The new president has many problems to solve... major problems.

Turner: I think Bill Clinton is very envious of Barack Obama for just that reason. To be a great theorist (or a great president) you have to live at a time when there are big problems to solve. But when the problems are really great,



One of the slides shown by Michael Turner at his public lecture

there is no guarantee that it will be solved in your time window. Dark energy might be solved in 5 years, 10 years, or it may take a hundred years.

Sugiyama: Thinking about dark matter, Zwicky*⁹ found dark matter in the 1930's; we still don't know what it is. The same thing might happen with dark energy.

Turner: That's very true. Zwicky was the most creative astrophysicist of his time, and

*9: A famous astronomer (1898-1974) worked at California Institute of Technology. He is known for many brilliant achievements; for example, extensive observations focusing on the relation between supernovae and neutron stars, finding the method to determine the distance to far-off galaxies by using supernovae, and the discovery of the existence of dark matter.

he speculated about what dark matter was – neutron stars, white dwarfs, black holes. Nowhere on his list was a new particle of nature. It looks like we are just about to solve the dark matter puzzle; so that would be eighty years or so. Let's hope that dark energy doesn't take as long! And you never know, the solution could be just around the corner.

Sugiyama: What is our next major task? Dark energy is extremely difficult and dark matter is almost there. We have a flood of data coming. What are your thoughts on the future of cosmology?

Turner: I would even say right now that we live in extremely exciting times, where theory

and observation have come together. And I think the next 10 to 15 years will determine whether or not this is a golden age in the following sense: we have some very powerful ideas, we have fantastic instruments, and whether or not this will be considered golden age will turn on "Did we solve some of the big problems? For example, did we figure out what dark matter is?; did we figure out how the universe began?; did we figure out dark energy?; did we figure out the origin of ordinary matter, baryogenesis?; did we finish the story of the formation of stars and galaxy?"

Sugiyama: It sounds like a major leap to new knowledge, a new understanding of the

universe...

Turner: What's really exciting is that one of the founding principles of the IPMU is; it's not just the astronomy, it's not just particle physics, it's not just mathematics. They are all tied together and so a jump in any one of them, will likely be a jump in all three together.

Sugiyama: Please come back again to IPMU to see what happens...

Turner: I certainly want to come back. You and your colleagues created something very special. And I look forward to watching how IPMU changes science around the world.

Sugiyama: Thank you very much.

IPMU International Conference Dark Energy: “Lighting up the Darkness!”

Naoshi Sugiyama

Principal Investigator

Masahiro Takada

IPMU Associate Professor

Eiichiro Komatsu

IPMU Visiting Scientist / Associate Professor, The University of Texas at Austin

Yen-Ting Lin

IPMU Postdoctoral Fellow

Dark energy is one of the most important and profound problems in modern cosmology and physics. Just ten years ago, based on observations of distant type-Ia supernovae, two independent groups reported a very shocking discovery: the universe today is in an accelerating expansion phase. According to Einstein’s theory of gravity, cosmic acceleration implies that the universe is occupied by a mysterious energy component known as dark energy, which continues to emerge in space as the universe expands and acts as a repulsive force, pulling galaxies further apart from each other. The nature of dark energy will determine the ultimate fate of our universe. It might continue to expand eternally, or it could begin to contract at some point in the future. Another possible alternative is the so-called Big Rip, in which all matter in the universe, including stars, galaxies, and atoms, are progressively torn apart at a certain point in the future. Even Nobel laureate and renowned particle physics theorist Frank Wilczek (MIT) called the dark energy problem as “maybe the most fundamentally mysterious thing in basic science.” As an entirely different

explanation of cosmic acceleration, in recent years many cosmologists have also argued that cosmic acceleration may be a sign that Einstein’s gravity theory breaks down on cosmological distance scales.

Cosmological observations are needed to explore the nature of dark energy (or more precisely the nature of cosmic acceleration). For this purpose massive surveys of the universe are being planned all over the world. One such survey is the Subaru Telescope Survey slated to get underway in 2011 with a new wide-field camera. IPMU will be involved in this research. Several promising ways of approaching dark energy are being seriously studied: cosmic microwave background, supernovae, baryonic acoustic oscillation measured via the clustering statistics of galaxy distribution, weak shearing effects on distant galaxies, and the counting statistics of galaxy clusters. Hence, the primary tasks of each of these methods are currently (1) developing a theoretical modeling of the dark energy measurement methods that is accurate enough for the desired precision of dark energy measurement, and (2) understanding sources of systematic errors



involved in each method.

Against this research background, this international conference was put together. It brought together many prominent scientists from all over the world as invited speakers, for a five-day conference consisting of invited and contributed presentations (41 in total). Starting with an opening review by Prof. Michael Turner (Chicago), the conference continued with sessions covering a broad range of topics: dark energy measurement methods, recent developments in theoretical studies of dark energy, and the potential for modified gravity on cosmological scales. Each session started with a talk by an invited speaker, which was followed by contributions selected from registered presentations, each of which stimulated active discussion among the participants. We also had 24 poster presentations. We received a great deal of positive feedback on the conference from many of the 134 participants in total, which included 55 foreign participants. In short, this IPMU international conference was a success.

On the middle day of the conference, the organizers arranged for the IPMU public lecture

given by Prof. Michael Turner. Even though this was the first English-language public lecture hosted by IPMU, the conference room was filled to capacity with more than 160 people attending. It seems that Michael's talk was quite accessible to most of the audience thanks to the help of a presentation file translated into Japanese as well as brief summaries made by one of the organizers, Naoshi Sugiyama, during the talk. For example, Michael's jokes often sparked a ripple of laughter from the audience. Also Michael received a significant number of questions after his talk, taking us past the scheduled ending. All this is evidence that the public lecture proved even more successful than anticipated by the organizers.

The organizers would like to thank to all participants for contributing to the success of this conference. We very much hope to hold another conference in a few years to discuss our progress (or perhaps resolution!) of the dark energy problem. Finally we would like to thank the administrative staff for supporting the organization and operation of the conference.

Round Table Talk: Lisa Randall with Hitoshi Murayama and Hiroshi Ooguri

Hitoshi Murayama
Director of IPMU

Hiroshi Ooguri
Principal Investigator of IPMU

Lisa Randall
Professor of Harvard University

Warped Extra-Dimensions sold well in Japan

Ooguri: You have already been to Japan a couple of times and your book, *Warped Passages*,^{*1} which has been translated into Japanese, has sold quite well. We saw it on prominent display in great numbers in a bookstore.

Randall: Before my book even came out, my interview with the astronaut, Koichi Wakata, was shown on television and that interview was turned into a little book.^{*2} So when my book came out, it had already been widely promoted. I was very impressed by how interested Japanese people were in science.

Murayama: I think I told you before that your book saved me once. Soon after I was appointed as a director of IPMU there were “who is this guy?” kind of discussions in the blogosphere, and then somebody pointed out that by looking up your book, my name could be found in it. So, it was like, “OK, well at least this guy isn’t crazy

^{*1:} *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions* (Allen Lane at Penguin, June 2005, ECCO Press at Harper Collins, Sept 2005). Japanese version published by Japan Broadcast Publishing Co., Ltd., Tokyo, June 2007.

^{*2:} *Extra Dimensions Exist* (in Japanese), Lisa Randall and Koichi Wakata, Japan Broadcast Publishing Co., Ltd., Tokyo, May 2007.



or anything.”

Ooguri: That is a great credential.

Randall: It is excellent. I was very impressed. I mean, I think everyone here in Japan handled things really well and they were great.

Ooguri: Do you have an impression of how Japan is doing in basic science, specifically in the particle physics area?

Randall: I think Japan is doing extremely well, especially with a new institution like IPMU. It is actually a big deal to get so much activity going on there. Moreover, they have many good experimental programs in progress, particularly in keeping up with international competition in neutrino and B physics, and of course in string theory as well. What do you think, Hitoshi?

Murayama: First of all, you should definitely come and visit IPMU; we are really hoping you will accept our invitation. Right now, this World

Premier International Research Center Program is focusing strongly on having an institute in Japan, which is really international. We have just achieved a milestone in having more than half of the members being non-Japanese.

Randall: So how are the Japanese taking that? My first impression when I arrived in Japan was that everyone is Japanese. How is it working out in such an environment?

Murayama: When IPMU was launched, there was sort of a misunderstanding that this would provide new job opportunities for many young Japanese researchers. The people who were under that impression were obviously a little disappointed because there were not that many job opportunities for Japanese applicants. But at the same time, Japanese researchers were excited about the opportunity to interact with so many researchers from outside of Japan.

It is very good to get all the cross-talk

Randall: That makes a lot of sense. Obviously, it is very good to get all the cross-talk. And even when you are in Japan, it is interesting that you tell the difference between Japanese who have been abroad, and Japanese who haven't.

Murayama: That is interesting. What is the difference?

Randall: The interaction style is somewhat different. As you know, our style of interaction is a little bit different. We tend to interrupt-- things like this,--be a little bit more free form. It is not as respectful or observant of hierarchy...

Murayama: I do not want that to happen; so one of the really big things about IPMU is that we arrange our organizations to be flat; there is no hierarchy; everyone is pretty much on an equal footing...

Randall: Really? That is a big change.

Murayama: Yes, it is a big change in Japanese culture.

Randall: Is that working?

Murayama: It is working quite well so far. One of the things which most people pointed out to me at the beginning was that now that we have mathematicians and theoretical physicists, experimental physicists and astronomers under the same roof, the traditional thinking would be to create four departments, each of them headed by some senior person and having its own hierarchy. I said no, that would create just the same thing over again, so we do not want to do this. So, there is no department, everybody is in the same group, and we discuss all the hiring jointly and there is no real distinction between a senior professor and a junior professor. So that is the way it is organized. And all of the postdocs that we have hired so

far look very happy. There is a German and Italian couple and they have a blog^{*3} on the web. You can see that they have been enjoying life in Japan and see it as an adventure.

Randall: So this blog is a kind of access tower...

Ooguri: Actually this blog helps us in recruiting new researchers from abroad. They can be rather anxious about moving to Japan and the blog gives a firsthand account of how this couple was able to find an apartment, open a bank account, and so on.

Randall: My impression from my visits to Japan was that the people are extremely helpful and communicate with people very kindly. They are very respectful to visitors.

Ooguri: Well, there are of course linguistic barriers and also differences in custom. When Hitoshi gave a public lecture at Kashiwa, where IPMU is located, in Chiba prefecture, he solicited volunteers to help. Many people who were fluent in English signed up to help scientists from abroad get settled in Japan.

Murayama: If you imagine, for example, yourself getting appointed for a position in Japan, what would you see as a difficulty -- a sort of mental block, psychological barrier, logistical issue? We have to keep working on those things. So maybe you have good suggestions...

Randall: I guess taking a few people together is always a good idea so that it is not just one person in an isolated environment. And having a couple of conferences along the way so people have some center of activity, just to stimulate things, just to get certain things started in particular research areas. I guess having other people there and, of course, having

*3: <http://chipango.wordpress.com/>

some resources. Traveling obviously is complicated and it would be important to be able to travel on a regular basis, so they do not feel too isolated. Aside from what I have mentioned, what did you think are the important issues?

Murayama: One of the things is just the psychological aspect. Just going to a different country is already a little scary, and also the common fear is that once somebody from the USA moves to Japan, there is the fear that that person may not be able to come back to the US later on, losing exposure and stuff like that. So we are putting a lot of emphasis on the fact that we actually force each one of them to spend at least 1 month every year outside Japan, so they are not allowed to stay the entire year in Japan. So we are strongly encouraging people to spend time abroad and get themselves exposed, and also at the same time get IPMU itself exposed. We are also allowing them to be away up to 3 months. So that seems to diffuse the fear among many of the candidates.

Now switching gears a little bit. What are you excited about lately about science, particle physics, cosmology...?

Recently, I have been interested in dark matter

Randall: Recently, I have been more interested in dark matter because there is a lot that just has not been thought out. Also, as you know, there are a lot of experiments that indicate dark matter. We seem to be coming to the point where we are really expecting to see some impact. That is one direction for my interest. The other direction I have been thinking about recently is connecting to some more formal string theory

models. From my perspective, there is a lot of interesting work in string theory, but what is interesting is if it tells us something new that we have not thought about in terms of particle physics models. There are things that might look unnatural from a lower dimensional perspective, and you can barely understand them in terms of some of the symmetries etc., but from a higher dimensional perspective sometimes there are some ideas that come out more naturally or more elegantly. It is really something that makes sense in extra dimensions. For instance, lately I have been thinking a little bit about F-theory models, which give you motivation for believing the generation number of quarks and leptons and a particular form for their mass matrices.

Ooguri: What seems to be natural depends on perspectives...

Randall: It is something that I would not necessarily have thought of from a lower dimensional perspective. It really introduces a whole new set of theoretical tools and ideas.

Ooguri: I see. IPMU could contribute in any of the areas that you are interested in. Hitoshi should tell you what is going on at IPMU.

Murayama: When we proposed this institute, I listed five questions, mostly, of course, for people who are outside of the field: what is the universe made of, how did it start, what is its fate, why do we exist in this universe and what are its fundamental laws? And I know that each of you are well aware of the significance of these questions. One of the things I emphasized to people outside the field is the following: if we ask the question about how the universe started, actually we are talking about singularity and physicists do not know how to deal with singularity.

But mathematicians can define what they mean by infinity and compare different sizes of infinity and stuff like that. So this is really the area where mathematicians can come in, possibly resolving or defining the singularity in a meaningful way, and that way we can foresee some meaningful interactions between physicists and mathematicians.

Randall: Do you see meaningful interactions possibly even at a more immediate level? I mean if there are really genuinely new ideas that come in terms of model building as well. This does not always happen.

Murayama: Actually something happened at IPMU already. One of our young phenomenology guys recently collaborated with a mathematician, an algebraic geometer, precisely because of that reason.

Randall: Great. This is sort of understanding black holes or cosmology on a more abstract global level, in geometry or algebra. But at some level, I think, the interaction works both ways and is very important because it is very nice to categorize all possible geometries. But there are some physical questions without answers. So, I think it is good for people to be thinking along these physical lines as well. When you are doing things that way, I think that you most likely to progress. So, I think having standard tools for coming in and asking different questions really makes progress in ways that we have not done before.

Murayama: Now, let me talk about the projects we are involved in. On the astronomy front, we are building a new camera for the Subaru telescope, which is an 8-meter class telescope. It is pretty much the same size as Keck but the structure is much more rigid. As a result, you can mount a much

bigger camera on the structure, which gives you much wider field of view. In one shot you can take an image which completely encompasses the full moon, and that will make this telescope an ideal survey telescope. So, the plan is to have the entire northern hemisphere surveyed to build a 3-D map of dark matter using the weak lensing effect and that in turn would give you information about the equation of the state of dark energy. At Kamioka, we have the plan of going on the Super-Kamiokande and one professor we hired is trying to convert Super-Kamiokande into a different style of experiment that can look for neutrinos in supernova explosions at cosmological distances - billions of light years away. It is called GADZOOKS! The real R&D is just about to start because of IPMU. And also there is another guy trying to convert the KamLAND experiment into a neutrinoless double beta-decay experiment by dissolving gaseous xenon in the liquid scintillator. And finally there is a new experiment called XMASS that is starting now for direct dark matter detection using 800 kilograms of liquid xenon.

Randall: Is XMASS definitely going to test inelastic dark matter?

Murayama: They claim that they have two orders of magnitude compared the current limit.

Randall: Great. As for dark matter, I'm also interested in DAMA data.

Ooguri: Do you seriously take the announcement of dark matter detection by the DAMA experiment?

Randall: I'm only a theorist, so I do not pretend to know if that is real. But, in this case I think there are reasonable explanations for it and also you can make interesting predictions for future experiments. So I think in terms of our role as scientists, this

is what we should be doing. The detector sensitivities have really gone to the level that you might really hope to find something. So I think while we are waiting for the Large Hadron Collider (LHC) to return^{*4} this is a very good thing to be thinking of.

What do you expect of LHC?

Murayama: Let us pursue this. I am sure you have been asked this question all the time: What do you expect from the LHC?

Randall: I do not know what to expect. I think we will find a Higgs boson. Rather than saying what we expect, I think one of our responsibilities is to say what we should be on the lookout for and try to make sure that we are not missing things because we were not clever enough to figure out ways to look for them. In terms of what we will find, I am not betting on that.

Murayama: Not even on warped extra dimensions?

Randall: I would not give anything more than 5% probability at this point. It is not that I think it is impossible. There was definitely a time when it seemed that no matter what they found they were going to call it supersymmetry for at least year or two, until they figured out what it is. I think it is good to go in and say we really do not know what is there. We are just going to look at it with a clear view and see what is there, and then we will try to put it together. Of course, I would like it to be warped geometries, but I would like it to be

^{*4}: LHC at CERN is a proton-proton collider with a center of mass energy of 14 TeV. After the first collision in September 2008, LHC developed a liquid helium leak and it is now undergoing repairs. LHC is expected to resume collisions in November this year. See a related article in *IPMU News* No. 5, pp. 4-7.

anything. So you would not say it is definitely supersymmetry at this point?

Murayama: I would not say that. I would love to see supersymmetry and I have been pushing that idea for a long time indeed. But it is also true that there is no guarantee that it is there within the reach of the LHC.

Randall: And it is looking a little worse because we have not seen any sign of it.

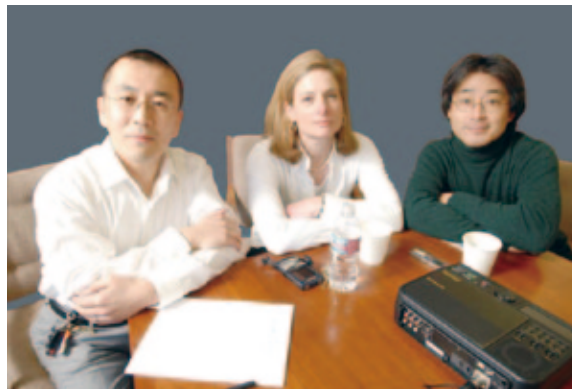
Murayama: Right. Especially in B physics experiments, which have been so dead-on correct with the Kobayashi-Maskawa theory.

Randall: I will tell you one thing that I do really like about extra-dimensional theories in general. I really do think that these are the first theories that give some compelling explanation of flavor. We have this huge clue, because neutrino mixing angles are big and quark mixing angles are small and it has to be telling us something. We have this interesting structure that the Kobayashi-Maskawa matrix is almost the identity. We have all this very powerful information, and I would say that all these extra-dimensional theories seem to give

some compelling explanation of this.

Murayama: It is time for the last question. Do you have any messages especially for young people entering the field of studying stars?

Randall: One thing that I have really appreciated in Japan on my visits is how much people get excited about science, and how seriously they take it that we really can know more about the universe and about what things are made of. Science is a process of finding. I would like to emphasize that many people can contribute to its progress. Now that you are bringing a new institution to Japan, we really do to some extent look at Japan. It is a really remarkable thing that they did create this institute. It shows that Japanese people have respect, attention, and excitement about physics. Progress in science does not happen overnight. I think there are these deep questions about the universe that will be answered by having a large group of people working together over a period of time. It is a very important thing and it is just great that Japan has appreciated that.



Left: Hiroshi Ooguri; center: Lisa Randall; right: Hitoshi Murayama. Lisa Randall is a theoretical physicist working on particle theory and cosmology. She is famous for her particle physics models based on "warped extra dimensions." She received her Ph.D. degree from Harvard University in 1987, and has been a professor at Harvard since 2001.

Before returning to Harvard, she held a professorship at Princeton University and MIT. She received numerous honors, for example, membership of the National Academy of Sciences in 2008 and the Julius Lilienfeld Prize from the American Physical Society in 2007. This round table discussion was held at the California Institute of Technology in February 2009 when she was staying there as a Gordon Moore Distinguished Scholar.

Third Meeting of the IPMU External Advisory Committee

The third meeting of the IPMU External Advisory Committee was held on April 18, 2009, with eight of the nine committee members, Roberto Peccei (UCLA, chair), John Ellis (CERN), Steve Kahn (Stanford/SLAC), Norio Kaifu (The Open Univ. of Japan), Young-Kee Kim (Fermilab), Sadayoshi Kojima (Tokyo Inst. of Technology), David Morrison (UC Santa Barbara), Nicolai Reshetikhin (UC Berkeley & Amsterdam), in attendance. The committee will soon report to the President of the University of Tokyo with advice for improving and further developing IPMU.



IPMU Annual Report 2008 Published

IPMU has published the *IPMU ANNUAL REPORT 2008*, highlighting its World Premier International Research Center Initiative project implementation and research activities during the 18-month period from IPMU's foundation in October 2007 to March 2009. The PDF version can be downloaded from the IPMU web site, <http://www.ipmu.jp/research-activities/annual-reports>.

Shigeki Sugimoto Receives the Yukawa-Tomonaga Memorial Prize

On July 8, 2009, Kyoto University announced that the Yukawa-Tomonaga Memorial Prize had been awarded to Shigeki Sugimoto of IPMU and Tadakatsu Sakai of Nagoya University for their contribution to the development of the "holographic quantum chromodynamics model based on gauge superstring theory/gravity correspondence" analysis technique of strong interactions between hadrons (such as protons, neutrons, and mesons) using superstring theory.

Their work has attracted significant attention due to its pioneering approach and, as a result, their two papers have been cited almost 600 times. The award ceremony will take place on September 11, 2009.

Conference Report –IPMU International Conference Dark Energy: "Lighting up the Darkness!"

This Conference was held for five days, June 22-26, 2009, in the Media Hall of the Kashiwa Library on the University of Tokyo Kashiwa campus. Details are reported on pp. 18-19.

Special Public Lecture "The Dark Side of the Universe"

A special public lecture entitled "The Dark Side of the Universe" was held in the evening of June 24, 2009, in the Media Hall of the Kashiwa Library. The event was associated with the aforementioned International Conference. The speaker, Michael S. Turner, is a theoretical astrophysicist who is known as the godfather of dark energy. Although the lecture was given in English, it was attended by more than 160 people. An IPMU Principle Investigator, Naoshi Sugiyama, emceed

the lecture and summarized Michael's talk in Japanese at several stages throughout it. Because the lecture was given in this style, comments such as "it was easy to understand" and "it was quite a unique style that made it more enjoyable than the usual lectures" were found in the questionnaires that were collected afterwards.

Some pictures from the lecture are shown on pp. 15-17.

"Tanabata" Star Festival Lecture "The Story of the Milky Way Galaxy"

It has been 400 years since Galileo Galilei made the first observation of the sky using a telescope, and this year has been designated the International Year of Astronomy. In an attempt to publicize this special year, the Astronomical Society of Japan took the initiative and held nationwide public lectures on astronomy on July 7, the day of the "Tanabata" Star Festival. IPMU took part, and a public lecture entitled "The Story of the Milky Way Galaxy" was held on July 7, 2009 at the planetarium in the Kashiwa City Library. After the Kashiwa Planetarium Association projected images of stars in the night sky as viewed from Kashiwa onto a screen so that people could locate the constellations, as well as the images from the Tanabata story, IPMU Associate Professor Naoki Yoshida lectured on the past, present and future of the Milky Way Galaxy. Although this was the first lecture of its type at the Kashiwa City



Library, the participants enjoyed the Star Festival and its cozy atmosphere, and many expressed the wish that this type of event would be repeated.

Program to Encourage Female Students to Study Science: "Look into the Future!"

Three graduate schools and four institutions of the University of Tokyo, including IPMU, have been undertaking a Japan Science and Technology Agency (JST) supported project, which is an initiative to encourage female students to choose a career path in scientific fields. As the first among other forthcoming events, a visit to KEK at Tsukuba was organized for August 12 under the title of "Look into the Future! Celebrating the Nobel Prize! Let's Visit an Antimatter Laboratory and Have Tea with some Female Researchers." Around 20 female junior high school and high school students participated, some with their parents. They visited the KEKB Accelerator and the BELLE Experimental Hall, where the theory of Nobel laureates Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa was tested and confirmed. They then had a friendly discussion with some female researchers, including IPMU's Jiayu Tang and Susanne Reffert and KEK's Professor Haruyo Koiso. Various questions such as "Can you keep a good balance between work and home life?" and "Have you had any problems because there are not many female researchers in your workplace?" were asked by the students, who were concerned about their future



path for studying science. The female researchers answered their questions comprehensively. The participants enjoyed the friendly conversations with the researchers throughout the talk.

The 3rd Science Show Performed by Students of Today, "Soramiru (Looking into the Universe)"

On July 13, 2009, the 3rd Science Show by University of Tokyo (Today) students called "Soramiru (Looking into the Universe)" was jointly performed by Komaba Educational Development and IPMU in the Graduate School of Mathematical Science Hall on the Komaba Campus. Students of the College of Arts and Sciences at the University of Tokyo and the Science Communication Circle had developed a dramatic version of Fundamental Cosmology and Particle Physics for the public. Late in the show, Director of IPMU Hitoshi Murayama took part in the play and explained dark matter. Around 100 participants enjoyed the elaborate staging.



Future Conference –Focus Week: Statistical Frontiers of Astrophysics

The IPMU focus week "Statistical Frontiers of Astrophysics" will be held for five days from September 28 to October 2 in the Media Hall of the Kashiwa Library.

At the frontier of astrophysics, where major surveys are being carried out and/or planned, it is increasingly imperative to use statistical methods to extract

scientific constraints from the massive data sets. For example, it was only recently (around seven years ago) that the Markov Chain Monte Carlo method, a well-known method in the statistical field, was introduced to the cosmology community. Nowadays, the MCMC method is a very powerful tool for constraining parameters such as the age of the Universe, dark energy, and dark matter from cosmological data sets. There may be other methods that are also useful for addressing astronomical problems. This workshop will gather together the leading researchers working in the usually unconnected fields of statistics and astrophysics. The purpose is for them to get to know each other, learn about/discuss the methods of their own approaches, and explore the possibility of working together in the cross-disciplinary fields.

Future Conference –Focus Week: QCD in Connection with BSM Study at LHC

The focus week "QCD in Connection with BSM (Beyond the Standard Model) Study at LHC" will be held between November 9 and 13, 2009 in the Media Hall at the Kashiwa Library, co-sponsored by IPMU and the KEK Theory Center. It is already the fourth focus week on LHC. This time, we want to focus on the connection with new physics studies at LHC.

In recent years, there has been increasing interest in the QCD processes at LHC. This is because strong interaction, multi-particle emissions from signals and background processes make it difficult to measure the fundamental parameters of physics beyond the standard model without accurate understanding of these QCD processes. Top experts in this field will participate. We will arrange seminars and discussions in addition to lectures for graduate students and postdocs on

the above issues. We will also organize a one-day workshop so that those participants who wish to give a talk can be accommodated.

Future Conference – Focus Week: The Epoch of Reionization

IPMU will host a Focus Week on the Epoch of Reionization from November 30 to December 2 in the Media Hall, Kashiwa Library. We are inviting researchers working on high redshift galaxies using the Subaru telescope and those working on 21cm observations using LOFAR to attend. The combined data from these observations will enable us to study in detail how the cosmic Dark Ages ended at the epoch of reionization. We are also inviting theorists and observers to discuss possible synergies between galaxy surveys and 21cm observations.

IPMU Seminars

IPMU hosts regular seminars on every Wednesday at 3:30 and invite speakers from around the world. Information is posted on IPMU website (http://db.ipmu.jp/seminar/?mode=seminar_recent). You will find detailed information and request form (when needed) there. One of the purposes for these regular seminars is to encourage researchers from different fields to understand each other's specialties.

Separate seminars are also held for each research fields. At present, seminars for particle physics and astrophysics are held on every Thursday at 1:30pm, mathematics and mathematical physics on every Tuesday at 1:15pm. All seminars use English.

Mathematics seminars are also held at the University of Tokyo Komaba Campus.

1. "Quantum Curves and D-Modules"
Speaker: Lotte Hollands (University of Amsterdam)
Date: May 28, 2009
2. "The ANTARES Deep-Sea Neutrino Telescope"
Speaker: Paschal Coyle (Centre de Physique des Particules de Marseille)
Date: June 01, 2009
3. "21 cm cosmology"
Speaker: Ue-LiPen (CITA)
Date: June 02, 2009
4. "Apery and Gamma"
Speaker: Sergey Galkin (IPMU)
Date: June 4, 2009
5. "Rare Opportunities: Seeking New Physics with Rare Decays of Light Particles"
Speaker: Douglas Bryman (University of British Columbia)
Date: June 04, 2009
6. "Generic elements of the mapping class group"
Speaker: Joseph Maher (visiting Tokyo Institute of Technology)
Date: June 04, 2009
7. "Cosmological Simulations of Early Structure Formation"
Speaker: Darren Reed (LANL)
Date: June 05, 2009
8. "Multiplication in differential cohomology and cohomology operation"
Speaker: Kiyonori Gomi (Kyoto University)
Date: June 08, 2009
9. "Massive Stars: Key Players in the Early Universe"
Speaker: Raphael Hirschi
Date: June 10, 2009
10. "Axions in Particle Physics and Cosmology"
Speaker: Georg Raffelt (Max-Planck-Institut für Physik)
Date: June 10, 2009
11. "Viable inflationary models ending with a first-order phase transition"
Speaker: Marina Cortes
Date: June 11, 2009
12. "On three-dimensional chiral gravity"
Speaker: Gaston Giribet (University of Buenos Aires and CONICET)
Date: June 11, 2009
13. "Aspects of Horava-Lifshitz cosmology"
Speaker: Shinji Mukohyama (IPMU)
Date: June 12, 2009
14. "Holographic Lifshitz-like Fixed Point in String Theory"
Speaker: Tadashi Takayanagi (IPMU)
Date: June 12, 2009
15. "Horava-Lifshitz Holography"
Speaker: Tatzuma Nishioka
Date: June 12, 2009
16. "Primordial non-Gaussianity and constraints from WMAP"
Speaker: Kendrick Smith (University of Cambridge)
Date: June 16, 2009
17. "Lecture on B-mode polarization and Primordial non-Gaussianity: Two big things to expect from the Planck data"
Speaker: Eiichiro Komatsu (University of Texas)
Date: June 17, 2009
18. "Novel reconstruction technique for New Physics processes with initial state radiation"
Speaker: Mihoko M. Nojiri (IPMU/KEK)
Date: June 18, 2009
19. "K3 surfaces with involution, equivariant analytic torsion and automorphic forms"
Speaker: Ken-Ichi Yoshizawa (University of Tokyo)
Date: June 19, 2009
20. "Two Topics in Cluster Cosmology: Studying Dark Energy and Sigma8"
Speaker: Subhabrata Majumdar (Tata Institute)
Date: June 29, 2009
21. "Some thoughts on the large-scale CMB anomalies"
Speaker: Kin-Wang Ng (Institute of Physics, Academia Sinica)

- Date: June 30, 2009
22. "Cosmological and astrophysical probes of dark matter annihilation"
Speaker: Kazunori Nakayama (ICRR)
Date: July 02, 2009
 23. "Collider phenomenology of split-UED"
Speaker: Michihisa Takeuchi (ICRR)
Date: July 09, 2009
 24. "Cosmic-Ray Positrons and Supernova/Pulsar/GRB Remnants"
Speaker: Kunihito Ioka (KEK)
Date: July 15, 2009
 25. "Dark Matter and PAMELA/Fermi Anomalies"
Speaker: Tsutomu Yanagida (IPMU)
Date: July 15, 2009
 26. "Escape fraction of ionizing photons in high-z galaxies"
Speaker: Kentaro Nagamine (University of Nevada)
Date: July 16, 2009
 27. "Extremal (super-) conformal field theories"
Speaker: Matthias Gaberdiel (ETH)
Date: July 16, 2009
 28. "Defects and symmetries"
Speaker: Ingo Runkel (King's College London)
Date: July 21, 2009
 29. "Modeling GRB Host Galaxies"
Speaker: Yuu Niino (Kyoto University)
Date: July 23, 2009
 30. "Entanglement in quantum chains"
Speaker: Bernard Nienhuis (Amsterdam University)
Date: July 23, 2009
 31. "Deep Surveys of $z=7$ Ly-alpha Emitting Galaxies with Subaru Telescope: Implications for Galaxy Evolution and Reionization"
Speaker: Kazuaki Ota (RIKEN)
Date: Augst 05, 2009
 32. "Theoretical Constraints on the Higgs Effective Couplings"
Speaker: Ian Low (ANL/Northwestern University)
Date: August 05, 2009
 33. "Recent studies on supernova nucleosynthesis with X-ray observations of supernova remnants"
Speaker: Hiroya Yamaguchi (RIKEN)
Date: August 06, 2009
 34. "Spiky strings and spin chains"
Speaker: Nick Dorey (DAMTP)
Date: August 06, 2009
 35. "Last bets for Higgs and Supersymmetry before the LHC starts"
Speaker: John Ellis (CERN)
Date: August 11, 2009
 36. "Kazhdan-Lusztig Theory"
Speaker: Nanhua Xi (Chinese Academy of Science)
Date: August 12, 2009
 37. "Categorical approach for Weyl modules, after Chari-Fourie-Khandai"
Speaker: Katsuyuki Naoi (University of Tokyo)
Date: August 13, 2009
 38. "Lagrangian intersection Floer theory – the foundation and some calculations"
Speaker: Hiroshi Ohta (Nagoya Unieiversity)
Date: August 19, 2009
 39. "Fermilab Plan with an Intensity Frontier Accelerator"
Speaker: Young-Kee Kim (Fermilab)
Date: August 19, 2009
 40. "Twin Higgs and Lepton Number Violation at the LHC"
Speaker: Goh Hock-seng (Berkeley)
Date: August 20, 2009
 41. "Form Factor Dark Matter"
Speaker: Brian Feldstein (Boston University)
Date: August 20, 2009
 42. "Non-geometric heterotic compactifications"
Speaker: David Morrison (UCSB)
Date: August 25, 2009
 43. "Testing AGN feedback models and simulating environmental effects on AGN activities"
Speaker: Min-Su Shin (Princeton University)
Date: August 25, 2009
 44. "Exactly solvable models of tilings and Littlewood–Richardson coefficients"
Speaker: Paul Zinn-Justin (Paris 6)
Date: August 28, 2009
 45. "Global Torelli theorem for hyperkähler manifolds"
Speaker: Misha Verbitsky (IPMU)
Date: August 31, 2009

IPMU Komaba Seminar

1. "Mapping class group for hyperkähler manifolds"
Speaker: Misha Verbitsky (ITEP Moscow/IPMU)
Date: July 27, 2009

Personnel Change

New Principal Investigator

From July 13, 2009, Professor Alexey Bondal of the University of Aberdeen also holds the position of Principal Investigator of IPMU. To date, he has been a Senior Visiting Researcher at IPMU. He will lead research at IPMU in the area of Mathematics.

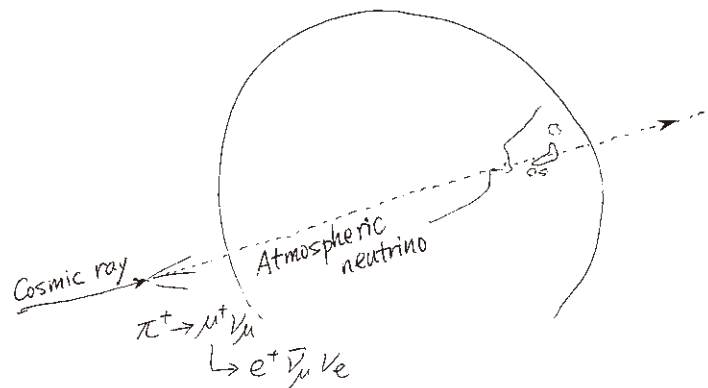
Next Issue of IPMU NEWS to Be Published in January, 2010

Usually, IPMU News No. 8 would be published in December 2009. However, the IPMU Building that is currently under construction is expected to be completed towards the end of this year. Accordingly, IPMU News No. 8 will be published in January, 2010 as a special issue celebrating the completion of the IPMU Building.

Atmospheric Neutrinos

Takaaki Kajita Principal Investigator of IPMU

A cosmic ray is the radiation of high energy particles arriving at Earth from the Universe. These cosmic ray particles interact with the air nuclei in the high altitude atmosphere. In these high energy nuclear interactions, many pions and kaons are produced. Since these particles are unstable, they decay into other particles, including neutrinos. These neutrinos are called atmospheric neutrinos, and they have been studied in underground experiments. Through the studies of atmospheric neutrinos, neutrino oscillations, which occur because of finite neutrino masses, have been discovered.



暗黒エネルギー

IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし

公園で遊んでいる子供になったと想像してみてください。誰がボールを一番高く投げ上げることができるか他の子供たちと張り合っているのです。あなたの投げたボールは高く上がっていきませんが、地球の重力に引っ張られてだんだんゆっくりになります。ところが見ている間に突然勢いをつけ、どんどん速くなって見えなくなってしまいます。驚き叫んで家に走って帰りお母さんに報告しますが、こればかりはどうしても信じてもらえません。

実は1998年にこの通りのことが起こったのです。私のパークレイの同僚のパールマッターは宇宙の膨張がだんだん遅くなってきた様子を正確に測ろうとしていました。確かに宇宙は膨張しているのですが、膨張の速さは宇宙が始まって70億年間遅くなってきた後、勢いをつけて今はどんどん速くなっています。彼も、同時に研究を進めていたライバルも、驚き叫んで世界中に報告しました。

研究者は生来疑い深く、この発見を信じませんでした。ところがその後の測定は同じ結果を出していますし、しかもこの発見は宇宙の他の謎を解決したのです。例えば、星を観測するとその年齢をかなり正確に決めることができるのですが、なんと多くの星が宇宙自身よりも古いという馬鹿げた結果が出ていたのです。しかし宇宙の膨張が加速しているのであれば、昔はもっとゆっくり膨張していたことになります。ですから宇宙が今の大きさになるまでには思っていたよりももっと時間がかかったはずで、その分宇宙は古く、星よりも昔からあったということになります。こうして加速する膨張の発見のお蔭で沢山のことのつじつまが合うようになりました。

それではどうして宇宙の膨張は速くなっているのでしょうか。無からエネルギーを取り出しているように見えます。宇宙が膨張するにつれ、何者かがエネルギーを増やし、宇宙の膨張を後押ししている、いわば「反重力」があるわけです。私たち研究者はこの何者かを「暗黒エネルギー」と呼んでいます。その正体はまだ分かっていませんが、宇宙のエネルギーのなんと73%を占めていると考えています。

最近暗黒エネルギーの名付け親であるシカゴ大学のターナー教授を招待し、暗黒エネルギーの正体について彼の考えを話してもらいました。そして夜には一般向けの講演もしてもらいました。英語での講演でしたが、杉山直主任研究員の生の楽しい通訳のお蔭もあり大盛況でした。この二人が暗黒エネルギーの正体とIPMUについて対談している様子を今号でお楽しみいただけます。

こうしてニュートン以来理解できたと思っていた重力は、実は最先端の研究対象であることがはっきりしました。暗黒エネルギーの正体を暴くには、宇宙のように大きな物体を対象とする重力と、電子・ニュートリノ・クォークのようなミクロな粒子を対象にする量子力学を、何とか一緒に扱える枠組みが必要です。こうした素粒子と宇宙の統一理論を探る最新の試みについて大栗博司主任研究員が解説しています。



重力のホログラフィー

村山機構長は本誌前号のDirector's Cornerで、東西ドイツの統一をたとえにして、自然界にある様々な力の統一について語りました。この記事ではこれを引き継いで、力の統一とは何か、それは何をもたらすのかを考え、究極の統一理論の候補である超弦理論とそのホログラフィー原理についても解説します。

マックスウェル理論と電磁波の発見

19世紀の後半にマックスウェルは、それまで別々の現象と考えられていた電気と磁気を統一的に記述するマックスウェル方程式を発見しました。この方程式は、電場が変化すると磁場が生まれ、逆に磁場の変化が電場を引き起こすことを表現しています。マックスウェルはこの方程式を解くことで、電場と磁場が絡み合いながら光の速さで伝わっていく波、すなわち電磁波の存在を理論的に予言しました。その15年後にヘルツは電磁波を実験的に確認し、20世紀のはじめにはマルコーニが大西洋を横断する無線通信に成功するまでになりました。今日の情報産業があるのは、マックスウェルによる電磁気力の統一のおかげだと言えます。

時間と空間の幾何学

マックスウェルの理論では電場や磁場が電磁気力を伝えるのに対し、アインシュタインの一般相対性理論で重力を伝えるのは時間や空間の曲がり具合です。アインシュタインは友人の数学者グロスマンの協力によ

り、当時最新の数学であったリーマン幾何学を使うことで、物質が時空間を曲げる様子を表すアインシュタイン方程式に到達しました。そして、マックスウェルが電磁波を予言したように、アインシュタインは時空間のさざ波が光の速さで伝わっていく重力波を予言しました。その60年後に、ハルスとテイラーは、連星パルサーが重力波を放出している間接的証拠を発見しました。現在日本を含む世界各地で重力波を直接捉えることを目指す測定器が稼働しています。

アインシュタインの重力理論は、ブラックホールの存在を予言し、ビッグバン理論の基礎となるなど、宇宙の研究に欠かせない道具となっています。また、私たちの日常生活にも影響を与えています。カーナビなどに使われているGPSは、人工衛星に搭載されている原子時計からの信号を受けて現在地を決めますが、人工衛星が重力の弱い上空を高速で運動しているため時計に微妙な進みが生じ、相対性理論を使って補正をしないと使い物にならないのです。

くりこみ理論

一般相対性理論とならぶ20世紀の物理学のもう1本の柱は、ミクロの世界を記述する量子力学です。私たちが知っている自然界の力は、重力の他はすべて量子力学の枠組みに取り入れられています。たとえば、マックスウェルの電磁気理論と量子力学の統合は、ハイゼンベルグとパウリによって試みられ、ファインマン・シュビンガー・朝永の「くりこみ理論」によって

本の情報はどこに行ったのか？

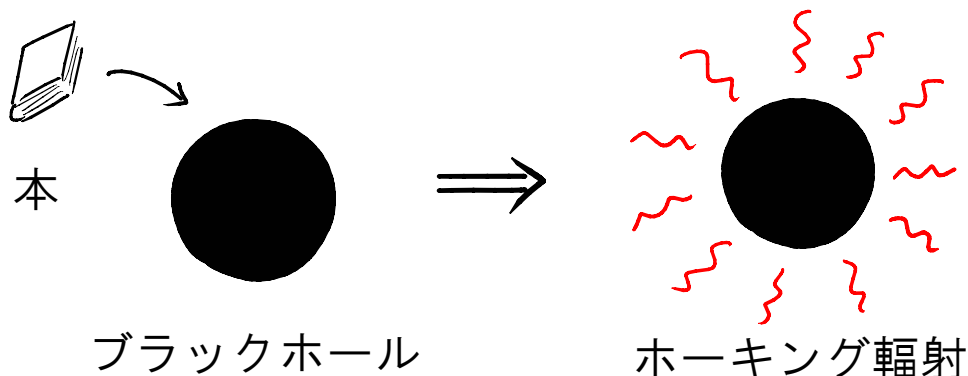


図1 ブラックホールの情報問題

一応の完成を見ました。

量子力学の記述する世界では、私たちが日常経験しないような不思議な現象が起きます。たとえば、ハイゼンベルグの不確定性原理によると、物体の位置や速度といった量も、量子力学の世界では常にゆらいでいます。そこで、マックスウェルの電磁気理論を量子力学と組み合わせると、電場や磁場の状態もミクロな世界でゆらぐこととなります。電場や磁場の方向や強さは場所ごとに変わることができるので、そのゆらぎの効果をすべて勘定に入れようとすると、いろいろな計算に無限大が現れて意味を成さなくなります。この問題を解決したのが、くりこみ理論なのです。

量子重力のパラドックス

さて、アインシュタインの重力理論を量子力学と組み合わせようとすると同じような理由で無限大が現れますが、これは電磁気の場合よりたちの悪い無限大で、くりこみの方法で解決することができません。また、アインシュタインの理論では、重力を伝えるのは時間や空間の曲がり具合なので、これに量子力学の考え方

を当てはめると、時間や空間の構造自身がミクロな世界でゆらぐこととなります。これが様々なパラドックスのもととなり、物理学者を悩ませてきました。

その中でも有名なのは、ブラックホールが量子力学的効果で熱を持ち、蒸発してしまうというホーキングの計算です。ホーキングはこの過程が決定論と矛盾すると主張しました。決定論とは、いま起きていることを全部知っていれば、自然界の基本法則によって未来や過去が完全に決定されるという、自然科学の基礎となる考え方です。

図1のように、ブラックホールに本を投げ入れることを考えてみましょう。ブラックホールの質量は本の分だけ一時的に増えますが、それは熱放射によって散逸してしまいます。ホーキングの計算によると、別な本を投げ入れても、本の質量が同じなら、全く同じ放射が返ってくるようになります。放射を観測しても、過去にどちらの本を投げ入れたのかが判別できなければ、過去の情報が再現できないので決定論に反していることになるのです。これがブラックホールの情報問題です[1]。

Feature

超弦理論

重力理論と量子力学の統合は、過去半世紀以上の理論物理学の最も重要な課題の1つであり、無限大の問題を解決するために、様々なアイデアが試みられてきました。そのなかで、理論として整合性を持ち、また現実的な素粒子モデルを再現する見込みがあるのは、これまでのところ超弦理論だけです。超ひも理論と呼ばれることもあります。名前が示すように、物質の基本単位が、ひものように広がったものであるとし、これによって量子重力の無限大の問題を解消しようとしています。

このひもは、バイオリンの弦のように振動し、その音色の1つひとつが様々な素粒子に対応すると考えられています。米谷民明は大学院に在学中に、この振動の1つが重力を伝えることを発見し、超弦理論が重力理論を含んでいることを示しました。これを独立に発見したシャークとシュワルツは、超弦理論を使ってすべての力を説明する究極の統一理論を構成することを提案しました。

しかし、超弦理論はその後10年ほど素粒子論の傍流に留まりました。その理由の1つは、素粒子の世界に特徴的な「鏡像対称性の破れ」を超弦理論に組み込むことができなかったからです。私たちが日常経験する現象は、鏡に映しても実現可能なように見えます。これを鏡像対称性と呼びます。しかし、この対称性はミクロのレベルで破れています。鏡像対称性の破れは、K中間子と呼ばれる素粒子の崩壊現象を説明するため

に、李政道（リー・ジュヨンダオ）と楊振寧（ヤーン・ジェンニン）によって予言され、呉健雄（ウー・ジエンシオン）の実験によって確認されました。

シュワルツはその後10年間、人気のなかった超弦理論をこつこつと研究し続け、グリーンとの共同研究で鏡像対称性の問題を解決して、超弦理論から素粒子のモデルを作る道筋をつけることに成功しました。今日、超弦理論は素粒子論の主要な研究分野の1つとなっています。

ホログラフィー原理

グリーンとシュワルツが突破口を開いてから25年間に超弦理論は大きな発展を遂げてきました。ここでは、その中で発見された「ホログラフィー原理」について解説しましょう。

量子力学には、「粒子と波の双対性」という考え方があります。たとえば、電磁波はマックスウェルの方程式にしたがう波ですが、マックスウェルの理論に量子力学を当てはめると、電磁波は1つひとつ数えられる粒子としての性質を持つようになります。逆に、電子は粒子と考えられてきましたが、量子力学ではシュレディンガーの方程式にしたがう波でもあります。量子力学史の初期には、電子は粒子なのか波なのかをめぐって論争がありましたが、今日ではこの2つの見方は矛盾するものではなく、これらが補い合って電子の全体像を表していると考えられています。これが粒子と波の双対性です。

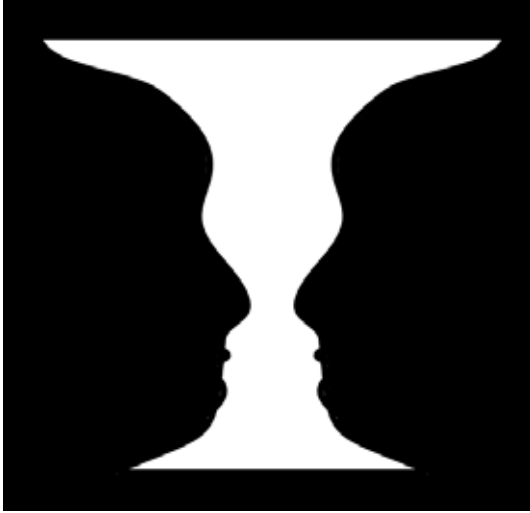


図2 ルビンの壺

図2はルビンの壺と呼ばれる錯視図形です。この絵では、白い部分に着目すると壺があるように、黒い部分に着目すると2人が向かい合っているように見えますが、どちらの解釈が正しいと言うことはありません。これも双対性の例です。

ホログラフィー原理も双対性の例です。ホログラフィーというのは、もともと光学の用語で、3次元の立体像を2次元面上の干渉縞に記録し再現する方法のことです。超弦理論では、量子重力のすべての現象は、空間の果てにおいたスクリーンに投影することができ、その上の重力を含まない量子力学理論によって記述できると考えられています。これを表現するのに光学の用語を借用して、ホログラフィー原理と呼ぶのです。

たとえば私たちは、縦、横、高さで指定される3次元の空間を実在のものだと感じています。しかし、空間の果てにおかれたスクリーン上の理論から見ると、3次元の空間も、そこに働く重力も幻影だということになります。ホログラフィー原理によると、この2つ

の見方のどちらがより本質的かという問いには意味がなく、これらは量子重力の異なる側面を表していることとなります。

ホーキングのパラドックスのような量子重力の深いなぞも、ホログラフィー原理を使って、重力を含まない量子力学の問題に翻訳することで、解決できるようになりました[1]。これにより、重力を含む究極の統一理論の完成に向けた研究が大きく進みました。

また逆に、量子力学の難しい問題を重力理論に翻訳して、幾何学的方法で解くこともできるようになりました。これは超弦理論の応用の範囲を大きく広げ、クォーク・グルーオン・プラズマの熱力学的性質やハドロン物理、さらには物性物理学の量子相転移や量子流体などの強相関現象の研究にも新しい視点を与えています。このような研究が、20年来のなぞである高温超伝導の仕組みの手がかりになるかもしれないとの期待もあります[2]。

このように超弦理論には、素粒子の統一理論の候補としての側面と、素粒子物理学の枠を超えた物理学の様々な分野の問題を解く数学的道具としての側面があり、この2つはホログラフィー原理で結び付けられています。IPMUでは、気鋭の数学者や物性物理学者も巻き込んで、超弦理論の両方の側面について研究を押し進めています。

参考文献：

- [1] 大栗博司、量子ブラックホールと創発する時空間、バリティ 2009年6月号
- [2] S. Hartnoll, Lectures on holographic methods for condensed matter physics, arXiv:0903.3246

アレクセイ・ボンダル Alexey Bondal 専門分野: 数学

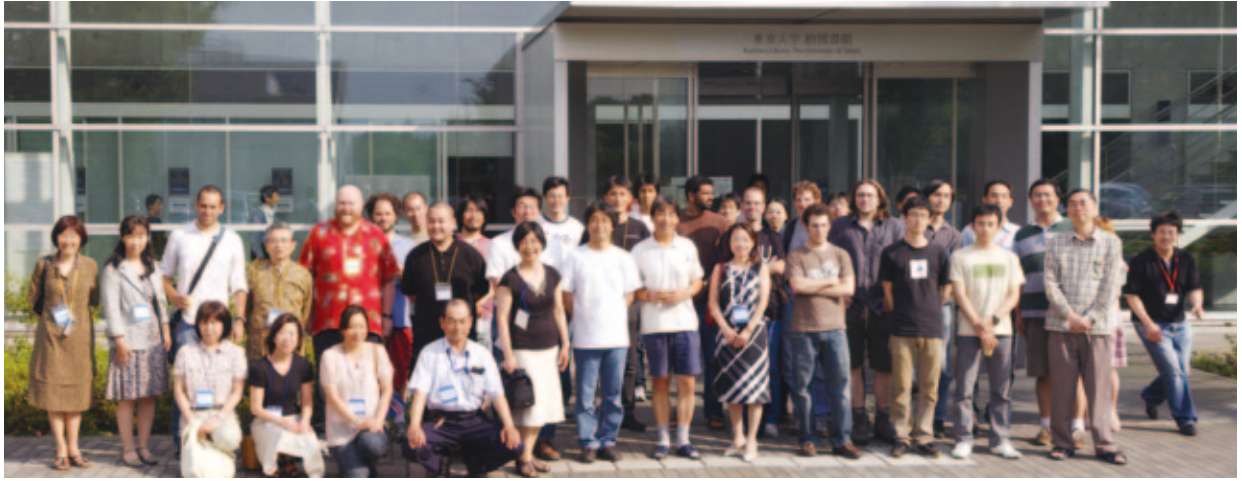
IPMU 主任研究員

数学者でない研究者には、数学のことを、自分の研究に適用可能な時にはいつでも使いたい便利な技術的ツールの山と考えがちな人たちがいます。数学者の中にも、数学の中でとりわけ技術的な分野であるホモロジー代数と代数幾何学について、同様の見解を持つ人たちがいます。数学に対する、また、特に上記の分野に対するこのような限定的なアプローチでは、ものの役に立たないことが多いのです。経験的には、ホモロジー代数と代数幾何学を研究に应用する際に、本質を見抜くには、単に具体的な結果だけではなく、理論のイデオロギーそのものを用いなければなりません。

今日、私の主要な研究課題であるこれらの分野は、数学、数理物理学、ストリング理論の様々な分野に大きな影響を与えています。私は、ホモロジー代数における高等な技術である導来圏を手段として、非可換幾何学へのアプローチを展開しました。導来圏は非常に抽象的なツールとして出現しましたが、現在では物理学でトポロジカルな場の理論のDブレーンを記述する



最も強力な方法であると考えられています。物理学者は、自然界の構造に関する事実を記述するため、様々な命題を提起します。それらを数学的に理解するためには、物理への応用と並行して、ホモロジー代数の基礎とその代数幾何学への応用を発展させ続けなければなりません。私の研究成果には次のようなものがあります。ある代数多様体の幾何と表現論とのホモロジカルな関係の発見、代数多様体をその導来圏から再構成すること、双有理幾何学における極小モデル・プログラムのホモロジカルな解釈、Serre関手およびそれに基づく導来圏の不変量の導入、三角圏の拡張の構成、三角圏の特殊な基底であるexceptional collectionsの集合への組みひも群の作用の発見などです。



IPMUボランティアと研究者および事務部門スタッフの集い

ポール・フランプトン Paul H. Frampton 専門分野: 理論物理学

IPMU 教授

私は理論物理学を専門とし、素粒子現象論、理論的宇宙論、ストリング理論等に興味を持っています。これまで主に標準模型を超える理論模型の構築を手がけ、カイラルカラー模型におけるアクシグルーオンや331模型におけるバイレプトンのような新粒子の予言をしました。両方とも新たに加わるゲージボソンの例です。

CERNのLHCの稼働を待つ間、私は積極的に宇宙論の問題を研究してきました。ダークエネルギーに基づく周期的宇宙論は、ビッグバンに伴う宇宙の始まりの特異点を回避できます。また、私は中間質量ブラックホールが観測と矛盾することなくダークマターを全て説明できる事を示しました。これらの研究は、いずれも宇宙のエントロピーに関する考察に基づいています。



ストリング理論には、最も初期の頃から魅せられ続けてきました。私は、ノーベル物理学賞を受賞した南部陽一郎博士がストリングを考え出した時のポストクだったのです！

Our Team

アレックス・ベネ Alex Bene 専門分野: 数学

博士研究員

私はリーマン面、そのモジュライ空間および写像類群を研究しています。私が用いる主なツールはファットグラフと呼ばれるファインマン図形です。これらは、リーマン面の組み合わせ的代表的代表系を本質的に与えています。この組み合わせ的な見方により、リーマン面のモジュライおよび写像類のコホモロジー的な様相の研究に場の量子論の手法を利用できます。最近では、写像類群の表現、古典的ジョンソン準同型、3次元多様体の有限型不変量の研究に、この組み合わせ的なアプ

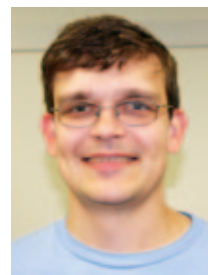


ローチを用いています。有限型不変量は、異なる場の量子論的解釈を有すること、またこれらの多くは、類似のファインマン図形によって記述されることから、このトピックは興味深いものとなっています。

アレクサンダー・ゲトマネンコ Alexander Getmanenko 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私の研究は、複素領域上のシュレディンガー方程式、準古典近似、および摂動的漸近挙動と非摂動的漸近挙動を結びつける「再生関数の理論」に関するものです。これらの手法によって取り扱われる量子トンネル効果の問題の中で、私はウィッテン・ラプラシアンを研究しています。その固有関数はストリング理論のシンプレクティック幾何学による定式化に使われる擬正則円



盤の情報を含んでいると期待されています。私は微分方程式に対する複素解析の手法に伝統を有する日本に來たことで非常に刺激を受けています。

黄 民信 ホアン・ミンシン 専門分野: 数学

博士研究員

私はAdS/CFT対応（反ドシッター空間と共形場理論の対応）に関して、巨大重力子 (giant graviton) とpp波を含む種々の様相を研究しています。また、トポロジカルなストリング理論の研究も行っています。この理論は、カラビ・ヤウ空間の中の正則曲線の数を数え上げますが、それは数学の代数幾何で大きな興味をもたれている問題です。最後に、宇宙論と素粒子物理学へのストリング理論の応用にも興味があります。最近私は共同研究



者と共に、ストリング理論の構成に触発された種々のインフレーションモデルにおいて、宇宙マイクロ波背景放射の非等方性をもつ非ガウス的特徴についての研究を行い、数編の論文を発表しました。

ダニエル・クレフル Daniel Krefl 専門分野:理論物理学

博士研究員

最近の私の研究は、主としてトポロジカルストリングの手法をオリエンティフォールドに拡張すること、つまり、世界面のパリティと標的空間の対合(involution)を同時にゲージ化することに関係しています。スーパーstring理論におけるオリエンティフォールドは物理的に重要ですが、この研究は新しい数学にもつながります。なぜなら、オリエンティフォールドのあるトポロジカルストリングの自由エネルギー



は、大雑把に言うと、境界とクロスキャップ(射影平面)を持つことができる世界面から標的空間への写像の生成関数であり、標的空間の新しい不変量を物理的な方法で数えることになるからです。

ヨゲシュ・クマル・スリワスタワ Yogesh Kumar Srivastava 専門分野:理論物理学

博士研究員

ブラックホールは、一般相対論と量子力学の相互作用によって生じる挑戦的課題を研究する興味深い場を提供します。string理論は、異なるブレーン配位に伴う統計的縮退によってベッケンシュタイン-ホーキング・エントロピーを説明することに成功しました。初期における比較は、巨視的側面ではアインシュタイン・ヒルベルト作用のみを用い(すなわち、高階微分とstringの有効作用の量子補正を無視し)、微視的側面では大きな電荷の極限のみを考慮して行われましたが、私は



最近、補正を加えてさらに良く一致させることに興味をもっています。私はまた、string理論におけるブラックホールに対して実際の微視的状态を構成する研究を行っています。

マシュー・カール・スタノ Matthew Carl Sudano 専門分野:理論物理学

博士研究員

現代の素粒子物理学は驚く程の成功を納めています。その理解は不完全であること、また近く新しい物理の確実な証拠が得られると信ずる理由があることを私たちは知っています。私は、標準模型の幾つかの不満足な点を軽減するかもしれない新しい形の物理である超対称性について研究を続けてきました。特に、ダイナミカルに超対称性を破る計算可能な模型の実現という高エネルギー側からのアプローチに加え、その効



果を低エネルギー有効理論としてどの様にパラメータ表示するかという低エネルギー側からのアプローチの両面から研究を行ってきました。

Our Team

マイケル・ターナー教授に 聞く

聞き手: 杉山 直

ダークエネルギーの名付け親

杉山 IPMUへようこそ。あなたはダークエネルギーの名付け親、発案者として知られていますが、どのようにしてこの名前を思いついたのですか？

ターナー 名前は短くて覚えやすいこと、ある程度は正確であることが必要です。でも、あまり正確にしすぎない方が良いでしょう。つまらなくなってしまう。

杉山 「ブラックホール」は良い例ではないでしょうか？

ターナー 「ブラックホール」は実に素晴らしい例です。

杉山 以前はブラックホールのことを「つぶれたもの」という意味のcollapsersなどと呼びました。ジョン・ホイーラーがつけた名前だと思いますが...

ターナー はい。ブラックホールは実に覚えやすく、また結構正確です。ダークエネルギーもそうあって欲しいものです。まず、

その名前はダークマターと完璧に呼応しています。相対論では、エネルギー密度と同程度の圧力を及ぼすものは何でも「エネルギー的」と呼ばれ、圧力が非常に小さければ「物質(マター)的」と呼ばれます。ダークエネルギーは、圧力がエネルギー密度と同程度であるという意味で、物質に似ていると言うよりもずっとエネルギーに似ています。

杉山 でも圧力の符号が逆で、相対性理論で言うところのエネルギー条件^{*1}も破っていますが...

ターナー 良い名前というものはずしも正確ではないのですよ。正確にしようとする、名前はどんどん長くなり、理解できる人がどんどん減ってしまいます。その意味でもブラックホールは素晴らしい。不正確ではないし、実に覚えやすい。ダークエネルギーも同じように考えて欲しいですね。

杉山 わかりました。では、次にIPMUの印象をお聞かせください。

ターナー IPMUはとても時宜にかなっていると思います。エネルギーに満ちており、世界中から多くの人を引きつけています。IPMUは日本国内だけで

マイケル・ターナーさんはシカゴ大学の特別功労教授で、天文学・天体物理学、物理学、エンリコ・フェルミ研究所、カヴリ宇宙物理学研究所(KICP)に所属しています。宇宙論研究者として世界的に有名で、1984年に米国天文学会からワナー賞、1997年に米国物理学会からリリエンフェルド賞などを受賞。2003年から2006年まで、米国立科学財団NSFの数学・物理系科学局長を務めました。

^{*1}: 通常の物質(流体)では、エネルギー密度と圧力の3倍を加えたものが正である(強いエネルギー条件)という条件。

なく、国外にも大きな影響を及ぼすでしょう。今日のサイエンスは非常に国際化が進んでいますから、日本で起きたことは日本を変えるだけでなく、世界も変えるのです。ですから私はIPMUに非常に刺激を受けています。

杉山 IPMUの主たる目的は数学者、物理学者、天文学者、天体物理学者の間の垣根を取り払い、宇宙の謎の解明を促進することです。ところで、あなたが研究者としてスタートしたのは、素粒子物理学者としてでしょうか、それとも天体物理学者としてでしょうか。

ターナー 最初は素粒子物理です。私はスタンフォード大学の線形加速器センター（SLAC）の大学院生で、一般相対論に興味をもちました。実際、一般相対論の研究で博士論文を書きました。重力波についてです。その後シカゴ大学に行き、デイヴィッド（デイヴ）・シュラム^{*2}に影響されるようになったのです。彼は言いました。「天体物理も宇宙論も素粒子物理もそれぞれ面白い。3つ一緒になるともっともっと面白い！」私は最適の時に最適の場所において、さらに大事なことはデイヴ・シュラムという最適の指導者を得たのです。

杉山 まさにそうですね。私はその1980年代のことを知りたいのですが、素粒子的宇宙論の黄金時代のようなものなのでしょうか。

ターナー いや、黄金時代では

^{*2}:シカゴ大学で活躍した宇宙論研究者。宇宙論と素粒子理論、核物理を結んだ研究を行った。1945年生まれ、1997年に自らの操縦するジェット機の事故で悲劇的な死を遂げる。

^{*3}:中性子星やブラックホールなどの強い重力源、また重力波についての研究などで知られる。スタンフォード大学名誉教授。

なかったと思います。これから黄金時代になるかもしれないものがまさに始まった時だったと思います。二つの分野が融合した最初です。その頃はこの極大と極小の融合がどれほど成功するかということに、いろいろ異なる意見がありました。デイヴ・シュラムは素粒子物理と宇宙論を融合させることにすごく熱中していました。スタンフォードでの私の指導者だったボブ・ワゴナー^{*3}は冷めていました。彼は、初期宇宙についての宇宙論の一つの柱であるビッグバン元素合成の研究のため、最初の計算機プログラムを書いた人ですが、私にこうアドバイスしたのです。「重力波のような、もっと安全なことをやりなさい。」

杉山 素粒子的宇宙論よりは安全ですね...

初期宇宙論の go-goジャンクボンド時代

ターナー 新しくて毛色の違うものは、どんなものであれ最初はうまく発展するかどうかかわらないものです。1980年代には基本的には無謀でずいぶん大胆な推測の山でした。もし正しかったら素粒子物理も宇宙論も変えてしまうようなものでしたが。しかし、こういう無謀な推測が、一体、検証可能なのか、その結果正しいということがわかるのか、全く見通しがありませんでした。言ってみれば、1980年代は初期宇宙論にとって、ジャンクボンド（高利回りだがリスクの高い債券）でイケイケの時代でした。何でもありで、すごく野心的なアイデアがあふれていました。宇宙ひも、テクスチャー、相転移、磁気単極

杉山直さんはIPMUの主任研究員の一人で、また名古屋大学理学研究科の教授でもあります。



子、宇宙ひも上の磁気単極子、カルーザ・クライン、アキシオン... 中でも2つの最も重要なアイデアが素粒子のダークマターとインフレーションでした。この2つのアイデアは人気を博して宇宙論分野全体の進展を促しました。そして構造の進化を議論する枠組みに導いたのです。今は冷たいダークマター (CDM) として知られているものですが、検証可能なはっきりした予言をしたわけでは、天文観測屋はCDMに彼らができる最高の敬意を払いました。否定してやろうとしたのです。

杉山 しかし成功しませんでした...

ターナー 成功したとも言えます。観測屋はCDMをずっと否定してきました。それでもCDMは隙間を縫って生き延びてきたのです。ついに、私たちはすべてのデータにうまく合う最新版を手に入れました。CDMにダークエネルギーを加えた枠組み、別の言い方ではラムダCDM^{*4}です。今や挑戦すべきことは、ダークエネルギーとは何か理解すること、またデータの質がどんどん良くなっても理論はデータを説明できるのか確認することです。もし1990年代にデータが現れ始めなかったら何が起きていたか、私にはよくわかりません。確かなことは、もし1990年代の観測がなかったら、今、我々は黄金時代の入り口に立っていないかたでしょう。推測することに

*4: ラムダはギリシャ文字の Λ で、アインシュタインが重力場方程式に導入した宇宙定数を表す。

*5: 宇宙論、銀河形成、ダークマターなどの研究によって知られる。現在はオックスフォード大学教授。

*6: 宇宙での大規模構造の先駆的な観測、また数値シミュレーションを行ったことで知られる。カリフォルニア大学バークレー校教授。

疲れ果てていたと思います。

杉山 では何がこの黄金時代の重要な観測なのでしょう。スローンデジタルスカイサーベイのような銀河探査か、宇宙マイクロ波背景放射か、遠方超新星探査か...

ターナー いろいろな観測があります。実にたくさんあるということが、今を特別な時代しているのです。大規模構造、マイクロ波の宇宙背景放射、高赤方偏移の宇宙、ダークエネルギーの研究、ダークマターの実験、LHC等々。こういう様々な観測を取りまとめ、全体として評価してやると、個別のデータを単に足し合わせたより、はるかに大きな価値を持ちます。これらの観測すべてに共通するのは、1980年代に現れた2つの重要なアイデア、インフレーションと冷たいダークマターの検証が可能なることです。1980年代に戻ってみると、宇宙の曲率を測定することができるとはとても考えられていませんでした。そこで天文学者は物質密度の測定に集中していました。それは非常に難しいことでした。宇宙を非常に広く深く観測することがどうしても必要となるのです。

杉山 その通りです。銀河の計数を使う等々...

ターナー あなたがパークレーにいたときのことで、多分覚えていますが、当時は観測による Ω (宇宙の密度パラメーター) の値がほとんど1に到達しました。でもその後減り始め、とうとう0.3になったわけですが。

杉山 そうです。1994年のある日のことだと思いますが、パークレーでは学期の終わりのセミナーで、ディベートを行いました。ジョー・シルク^{*5}とマー

ク・デービス^{*6}が...

ターナー どちらの立場を取るかコインを投げたのですよね。その問題は全く未解決でした。

杉山 そう、コインを投げました。一人は $\Omega=1$ の平坦な宇宙の立場をとり、もう一人は低密度の宇宙に賛成する議論を展開したのです。それは見ものでした。今ではこういう楽しみは無くなりました。ダークエネルギーという思いもよらないブレークゲームに加わったため、全てのデータが宇宙は低密度だが平坦だと示していますから。

ターナー ダークエネルギーは実に素晴らしい物語です。この物語の始まりは1980年です。インフレーションを信じた者は非常に注意深く「インフレーションの帰結は、物質の密度パラメーター $\Omega_{\text{matter}} = 1$ を意味するものではない」と言っていました。インフレーションが意味するところは宇宙が平坦なことなのです。しかし、当初、我々は (未知の) 素粒子のダークマターによって、 $\Omega_{\text{matter}} = 1$ が実現するのではないかという希望を持っていました。なぜなら、当時すでに、宇宙を平坦にするだけ十分な物質があるならば、それは普通の物質であるバリオンではなく、素粒子のダークマターでなければならぬことが知られていたのです。素粒子のダークマター自身、とても奇妙なものでした。そして1980年代のうちに Ω_{matter} の測定値が大きくなって1に近づいたのですが、その後下がりだし、1990年代の末には Ω_{matter} がどうしても1に届かないことが明らかになってきた結果、インフレーションは窮地に追い込まれてしまったのです。そこで最後の窮余の策として宇宙を平坦にするための不足分を補うのは宇宙定数

のようなものではないかと提案したのです。

杉山 そうですが、でもそれは最後の最後に導入するものではないでしょうか。

加速する宇宙膨張の発見は一夜にして宇宙論を一変させた

ターナー 1997年頃の宇宙論を振り返ると、どこへ向かっているのかははっきりしませんでした。インフレーションとダークマターのアイデアがあり、 $\Omega_{\text{matter}} = 0.3$ でさえあれば、とても物事がうまく説明できることがわかっていました。しかし、実はインフレーションは Ω が1であることを主張する訳です。ですからハッピーエンドになるとはとても思えませんでした。そして1998年の「宇宙膨張が加速している」という発見が、一夜にして状況を一変させてしまったのです。

杉山 それは超新星のデータですね?^{*7}

ターナー その通りです。

杉山 私の記憶が正しければ、最初の論文では誤った結論に達したと思います。

ターナー 確かに最初の10かそこらの超新星のデータは、宇宙の加速膨張を示してはいませんでした。1998年の最初の発見のデータでさえ、それほど強い証拠ではないのです。しかし、それを見た瞬間、皆こう言ったのです。「やった。ついに答えが得られたぞ。宇宙にはダークマターとダークエネルギーが満ちていて、膨張を加速させているのだ。加速膨張宇宙とダークエネルギーで全てを統一的に説

*7: 遠方の超新星の距離と赤方偏移を観測することで、宇宙の膨張がその当時現在よりも遅かったか、速かったかを知ることができる。宇宙膨張が減速しているのか加速しているのかわかるのである。



ターナーさんの一般向け講演会の様子 (p. 45参照)

明できる。」その証拠は最近10年間で極めて強固になりました。

杉山 超新星データの発表の2年後には、気球実験のブーメランも、マイクロ波宇宙背景放射の観測により、宇宙が平坦であることを証明しました。これは本当に大きな成功でした。

ターナー そうです。2000年は非常に重要な年で、実際、ブーメランが平坦性の問題を解決しました。しかし、分岐点は1998年だったのです。どうしてなのか、一例を上げましょう。1998年4月に、デイヴ・シュラムはジム・ピーブルス^{*8}と宇宙が平坦かどうかについてディベートをすることになってい

^{*8}: ビッグバン宇宙論研究の先駆者。宇宙マイクロ波背景放射の理論的予想を行い、その発見を助けた。水素原子形成過程の詳細な計算を最初に行い、宇宙での構造形成に関しても重要な業績がある。プリンストン大学名誉教授。

ました。このときは役割分担をコインを投げて決めるのではなく、シュラムが平坦な宇宙、ピーブルスが平坦でない宇宙について主張することになっていました。ご存知と思いますが、シュラムは1997年12月に飛行機事故で亡くなったのです。亡くなる前の秋に、彼はずっとピーブルスとのディベートを心配していました。彼が平坦な宇宙を弁護して勝つことができると思えた材料は、唯一 Λ (宇宙定数) だけでした。デイヴは始終私の部屋に来ては「超新星のデータはまだか?」と言ったものです。超新星のデータが未報告なので、12月の段階でデイヴはピーブルスがディベートに勝つと考えていたように思います。超新星の結果が報告されたのは、彼の悲劇的な死のわずか数週間後でした。私はディベ

ートの世話人からデイヴの代役を頼まれましたが、世話人はこう言ったのです。「ジムはディベートの主題が何かははっきり知らないと言っています。」私は「何を主題にすることになっていたか、知ってますよ。平坦か、そうでないかです。」と言いました。そこでジムと話したら、彼は「確かにそうだけれども、もはや私は平坦でない宇宙について主張したいと思わない。」と言ったのです。宇宙の加速膨張の発見は、この例にあるように、全てをほとんど一夜にして変えてしまったのです。

杉山 データが出た後なので...

ターナー まあ、超新星のデータは決定的ではなかったし、反論することもできたと思います。しかし、災いの前兆に気づくことはできました。全体の構図は途方もないものだったけれ

ども、ついに全てがびったり取まってしまったのです。

杉山 今や、冷たいダークマターと宇宙の平坦性とダークエネルギーが全てのデータを非常にうまく説明するのですが、もはや他の可能性を考えなければならぬ理由は無いのでしょうか。

ターナー そうですね、それは立場によるでしょう。私が「天体物理学的宇宙論研究者」と呼んでいる、宇宙の歴史を再構成することに興味を持つ人たちは、あなたが今言ったモデルでもとてもハッピーだと思います。なぜなら、ダークエネルギーが何であろうとも、宇宙定数で表される真空のエネルギーに非常に良く似ていて、宇宙がどのように進化して構造を形成したのかを理解するという目的のためには、基本となる宇宙モデルは十分良く知っていると言えるか



ターナーさんの一般向け講演会の様子 (p. 45参照)

らです。しかし、私が「原理主義的宇宙論研究者」と呼ぶ、宇宙の基本的な特質や、それがなぜそうなのかに強く興味を持つ人たちはもっと多くのことを知りたいと考えるでしょう。

杉山 ダークマターは何か、ダークエネルギーは何かということですね？

ターナー その通りです。再度ダークマターに戻りますが、天体物理学的宇宙論研究者はアクションかニュートラリーノかにはこだわりません。重要なことは、非常に冷たいということです。一方、原理主義的宇宙論研究者にとっては、ダークエネルギーが宇宙定数とほとんど同じに振舞うように見えても、もし1%でも違いがあれば重大事なのです。同様に、ダークマターについても、彼らにとってはアクションとニュートラリーノ

の違いは重大事です。つまり、天体物理学的宇宙論研究者は基本モデルについて彼らが知りたいと思うことを十分に知っており、私にはとてつもなく興味深く思えることを研究できるのです。それは我々がどうやってここに至ったのか、最初の恒星は、最初の銀河は、という宇宙の歴史を再構成することです。しかし、原理主義的宇宙論および宇宙の誕生の見地からは、我々はやっとなら表面をひっかいているに過ぎません。

杉山 了解しました。あなたは多分、どちらかという原理主義者に属しているのではないかと思います。もう一つ質問があります。もしダークエネルギーの起源が宇宙が誕生した当初のプランク時代にあるとすると、現在のこんなに小さなダークエネルギーは不自然で、あり

そうもないことになります。従って、適切な説明が必要です。あなたはどのように説明しますか。

偉大な理論家になるには、解くべき大問題が必要

ターナー プランクスケールより30桁以上小さなダークエネルギーのスケールは、プランク時代の物理とは無関係であることを示唆しているように見えます。とは言うものの、ダークエネルギーがいったい何と関係があるのか、何も手がかりがないのです。今日の会議の様子がこの状況を良く表していると思います。理論家はダークエネルギーが何かについて、良いアイデアをもっていません。アイデアはたくさんありますが、ほとんどがその場しのぎで、他の何かに光を当てるといことがないため、どれも説得力があり

ません。しかし、この問題の素晴らしいところは非常に大きな問題であるということです。実に大きくて、解決の見通しは全くついていません。

杉山 理論家として、あるいは研究者として、このように大きな問題に取り組むことができるのはとても幸せなことに違いありません。

ターナー その通りだと思います。わくわくするような時代には、データや頭の良い人たちだけでなく、大きな問題が必要なのです。アメリカの第42代大統領、ビル・クリントンはずば抜けた政治的手腕を持っていましたが、解決すべき重大問題の無い時代の大統領だったので

杉山 こんどの大統領には解決すべき多くの問題があります。実に重大な問題が...



ターナーさんが一般向け講演会で示したスライドから

ターナー まさにその理由で、ビル・クリントンはバラク・オバマをとてもうらやんでいると思います。偉大な理論家（あるいは偉大な大統領）になるには、解くべき大問題がある時代に生きている必要があります。しかし、問題が本当に大きいと、自分が活躍できる間にそれが解決される保証がありません。ダークエネルギーの解明には、5年から10年か、あるいは100年かかるかもしれません。

杉山 ダークマターについて考えると、ツヴィッキー*9が1930年代にその存在を発見しましたが、まだ正体がわかって

*9: カリフォルニア工科大学で活躍した天文学者 (1898-1974)。超新星と中性子星の関係に着目し膨大な観測を行ったこと、超新星が距離の決定に使えることを見いだしたこと、銀河のカタログを作成したこと、さらにダークマターの存在を最初に発見したことなど、顕著な業績がある。

いません。ダークエネルギーについても同じことが起きるかもしれないですね。

ターナー 全くその通りです。ツヴィッキーはその時代で最も独創的な天体物理学者で、ダークマターが何者か推測しました。中性子星、白色矮星、ブラックホール等です。彼のリストには新粒子はどこにもありません。80年ほどかかって、我々は今まさにダークマターの謎を解こうとしているように見えます。ダークエネルギー解明にはそんなに長くかからないことを期待しましょう。ひょっとすると、解決はもう間近かも知れないのですよ。

杉山 我々の次の大仕事は何でしょうか。ダークエネルギーはとんでもなく難しそうだし、ダークマターはすぐ解決できそうだし。データは殺到しています。

将来の宇宙論についてのお考えは？

ターナー 私は今、こう言えるのではないと思うのです。「我々は理論と観測が一緒になった、極めてエキサイティングな時代に生きています」と。我々は非常に強力なアイデアと素晴らしい観測装置をもっています。今が黄金時代なのかどうかは、10年から15年先に次のような質問に対する答えがどうなっているかで決まることだと思います。「我々は大きな問題を幾つか解決したでしょうか？ 例えば、我々はダークマターの正体を理解したでしょうか、宇宙はいかにして始まったか理解したでしょうか、ダークエネルギーとは何か理解したでしょうか、普通の物質の起源であるバリオン生成を理解したでしょうか、星と銀河の形成の筋書きを書き終えた

だろうか、等々」

杉山 おっしゃっていることは、新しい知識への大きな跳躍、宇宙の新しい理解のように聞こえますが...

ターナー 本当にエキサイティングなのは、IPMUの設立方針の一つ、「天文学だけではなく、素粒子物理だけではなく、数学だけではなく。それらは皆結びついていて、どれかの飛躍は多分3分野全部が共に飛躍することにつながる。」ということですよ。

杉山 IPMUで何が起きるか、また見に来てください。

ターナー 是非また来たいと思います。あなた方はとても特別なものを創造しました。IPMUが世界の科学をどのように変革するか、楽しみに注目しています。

杉山 ありがとうございます。

IPMU国際研究会 ダークエネルギー：“暗黒成分を解明しよう！”

杉山 直 すぎやま・なおし

IPMU主任研究員

高田昌広 たかだ・まさひろ

IPMU准教授

小松英一郎 こまつ・えいいちろう

テキサス大学オースティン校准教授、IPMU併任研究員

林 彦廷 Yen-Ting Lin

IPMU博士研究員

ダークエネルギーは現代の宇宙論および物理学における最も重要な問題のひとつです。ちょうど10年前に、遠方のIa型超新星の観測から、宇宙の膨張が加速しているという衝撃的な結果が2つの独立なグループから報告されました。アインシュタインの重力理論によれば、加速膨張は、宇宙膨張とともに沸きだし続け万有斥力として宇宙膨張を加速させる、全く正体不明のダークエネルギーが、現在の宇宙のエネルギーの大部分を占めていることを意味しています。ダークエネルギーの性質によって、宇宙が膨張し続けるか、収縮に転じるか、あるいはある瞬間に宇宙空間の全ての物質を無限に引き裂いてしまうか、という宇宙の運命が決まります。ダークエネルギー問題は、ノーベル物理学賞を受賞した著名な物理学者をもってしても「基礎科学における最も根源的な謎」（ウィルチェック、素粒子物理学者）と言わしめる最難解問題になっているのです。あるいは、近年では宇宙の加速膨張が宇宙論スケールにおいてアインシュタインの重力理論が間違っているために引き起こされている、という可能性も活発に議論されています。

加速膨張あるいはダークエネルギーの性質を解明するためには宇宙観測が必要になります。これを主目的

とした大規模宇宙サーベイが世界中で計画されており、暗黒エネルギー探査は熾烈な国際競争にあります。IPMUが推進している、新主焦点カメラを用い、2011年からすばる望遠鏡で深宇宙サーベイを行うという計画もその一つです。有力な手段としては、宇宙背景放射、遠方超新星探査、銀河クラスタリング統計量からのバリオン振動探査、遠方銀河像への弱重力レンズ効果、銀河団の個数統計、が考えられています。それぞれの方法において暗黒エネルギーの精密測定に必要な理論モデルを開発し、また測定に伴う系統誤差を理解することが緊急課題となっています。

以上のようなこの分野の背景のもとに今回の国際会議が開催されました。世界各地から著名な研究者を招待講演者として招聘し、また一般講演者も交え、5日間にわたり行われた会議での総講演数は41を数えました。まずはシカゴ大学のマイケル・ターナー氏のレビュー講演を皮切りに、上記の各々のダークエネルギーの測定方法に関するセッション、ダークエネルギーの理論的研究の進展、修正重力理論の可能性、と幅広い分野をバランス良くカバーできたと思います。各セッションは招待講演を中心に多数の応募のなかから選ばれた一般講演によって構成され、活発な議論をもつ



ことができ、多くの参加者に好評だったと思います。また、24のポスター発表もありました。登録参加者が全134名（うち外国人は55人）という大人数からも分かるように、IPMUで初めての本格的な国際会議は、大成功のうちに終えることができたと言えるでしょう。

また、会議の中日には一般向けの講演会としてマイケル・ターナー氏の「宇宙の暗黒面」を開催しました。これはIPMU初めての英語での一般講演会でしたが、会場に入りきれないほどの160名を超える参加者がありました。講演には日本語に訳したスライドを用い、また、進行役を務めた組織委員の杉山が講演途中の要所で概略を説明するなど工夫したことで、大部分の参加者に講演内容を理解していただいたようです。これ

は例えばマイケルのジョークのたびに会場が笑いの渦に包まれたこと、また質疑応答の際に時間が足りないほどの多くの質問があったことから分かると思います。この一般講演についても世話人の予想以上の大成功をおさめることができました。

参加者の皆さまには会議の成功に貢献していただき、大変ありがとうございました。数年後にダークエネルギー問題の進展(解決?)の会議を開催できるよう、研究に邁進しましょう！また、最後になりますが、いつものように会議運営を大変スムーズに終えることができ、この場を借りて事務スタッフの皆さまにも感謝の意を表したいと思います。

Round Table Talk: 村山斉と大栗博司、リサ・ランドールと語る^{*1}

村山 斉 むらやま・ひとし
IPMU機構長

大栗 博司 おおぐり・ひろし
IPMU主任研究員/カリフォルニア工科大学教授

リサ・ランドール Lisa Randall
ハーバード大学教授

ベストセラーとなった『ワープする宇宙』

大栗 日本には何度かいらっしゃっていますね。『ワープする宇宙』^{*2}の日本語訳も評判のようです。本屋で平積みになっているのを拝見しましたよ。

ランドール あの本が出る前に、宇宙飛行士(若田光一さん)との対談がテレビ番組として放送されて、その記録が別な小冊子^{*3}として出版されていました。おかげで、本が出版されたときには、宣伝が行き渡っていたのです。日本の人々が科学にとっても興味を持っているということに、強い印象を受けました。

村山 以前お話したと思いますが、その本のおかげで助かったことがあります。IPMUの機構長に任命された直後、ブログ界で「こいつは誰なんだ?」というような議論が起きましたが、誰かがあの本に私の名前が出ていると指摘したわけです。まあ、こいつは少なくとも変なやつではないな、というようなものです。

大栗 立派な適格証明書ですよ。

ランドール 素敵な話ですね。これも日本で強い印象を受けたことですが、誰もが物事を実にうまく処理していました。大し

^{*1}: この記事の短縮版が岩波書店刊行の『科学』2009年7月号、IPMU特集、pp.756-761に「鼎談：素粒子論と宇宙論の展望」と題して大栗博司による解説「鼎談の手引き」とともに掲載されている。この『科学』のIPMU特集号には、鼎談で語られているIPMUの研究について、他にも多くの解説が掲載されている。

^{*2}: リサ・ランドール:『ワープする宇宙・5次元時空の謎を解く』向山信治、塩原通緒訳(日本放送出版協会、2007)。

^{*3}: リサ・ランドール、若田 光一:『リサ・ランドール・異次元は存在する』(日本放送出版協会、2007)。



たものです。

大栗 日本の基礎科学、特に素粒子物理学の現状についてどう思われますか。

ランドール IPMUができて、とてもうまくいっていると思います。これだけ高いレベルの研究活動が行われるようになったのは、大きな出来事です。素粒子実験における成果もすばらしいと思います。特に、ニュートリノやB中間子の物理では高い国際競争力があります。もちろん、超弦理論の研究も活発です。村山さんはどう思いますか。

村山 まず、ランドールさんにも、ぜひIPMUを訪問していただきたいと思います。世界トップレベル研究拠点計画では、日本に真の国際研究機関を作ることが当面の目標です。IPMUでは、研究者の過半数が外国国籍になるところまで来ました。

ランドール 日本国内ではどう見られているのでしょうか。日本に着いたときの第一印象は、どちらを見ても日本人しかないということです。そのような環境で、うまくいっていますか。

村山 IPMUが立ち上がったとき、日本の若い研究者の間には、これは彼らの雇用対策のためだという誤解もあったようでした。

た。ですから、外国からの研究者をたくさん雇って、日本人にそれほど職がいきたらなかったときには、がっかりした人たちもいたようです。しかし、IPMUができて、海外からの多くの研究者と交流する機会が増えたことには、大いに刺激を受けているようです。

いろんな会話が飛び交うことが良い

ランドール その話は実に良く納得できます。いろんな会話が飛び交うことがとても良いのは明らかです。面白いことに、あなたたちは日本にいる時でさえ、外国経験のある日本人とそうでない日本人を区別していますね。

村山 それは面白い。で、何を区別しているのでしょうか。

ランドール 交流のスタイルがちよっと違ってきます。私たちの交流スタイルは、よく人の話に割り込んだり、もっと自由で形式にとらわれないではないですか。丁寧ではないし、上下関係を尊重したりしません。

村山 IPMUのとても大きな特徴の一つは、平らな組織にしたことです。上下関係はなく、ほとんど平等なのです。

ランドール 本当に?それは大きな変化ですね。

村山 そう、日本の文化では非常に大きな変化です。

ランドール うまくいってますか?

村山 今までのところ、とてもうまくいっています。最初にほとんどの人から指摘されたことですが、数学者と理論物理学者、実験物理学者、天文学者を同じ屋根の下に集めるので、伝統的な考え方では4つの研究部門を作り、それぞれに実績のあるリーダーがいて階級組織ができるのだらうということ。私は、いや違うと言いました。それでは同じことの繰り返しになるだけなので、そうはしたくない。ですから、IPMUに研究部門はありません。皆同じ一つのグループに属し、研究者の採用も一緒に議論します。教授と若手の准教授、助教との間に本当の違いはありません。これがIPMUの組織です。IPMUに海外から来た研究員はみんなとても楽しそうにしていますよ。その中にドイツ人とイタリア人の夫婦がいるのですが、ブログ^{*4}を書いていて、日本での生活を冒険として楽しんでいる様子が分かります。

ランドール 発信塔ですね。

大栗 このブログは海外から研究者を雇うときに役に立っています。海外から来る人は、日本に住むのはどういうものか不安に思っている人も多いのですが、このブログでは彼らが銀行口座を開いたり、アパートを見つける様子を書いてあって…。

ランドール 日本を訪問したときには、日本人はとても親切だという印象をうけました。親身に対応してくれるという。

大栗 それでも、言葉の壁や習慣の違いといった問題はあります。村山さんがIPMUのある千葉県柏市で市民向け講演会をしたときに、研究所のボランティアを募りました。そうしたら、英語のできる人たちがたくさん応募してくださったので、海外からの研究者が日本で生活を始めるためのお手伝いをいただいています。

村山 もしランドールさんが日本の職に就くことになったとしたら、どんなことに困ると思いますか。

ランドール 研究者をばらばらに雇うのではなく、同じような興味の人をまとめて雇うようにしたほうがよいと思います。研究会を開くなどして、常に刺激的な環境にすること。研究者が孤立しないように、海外出張が簡単にできることも大切です。他に何か大事なことがありますか。

村山 一つは心理的な面です。違う国に行くというだけでちょっと心配になりますよね。共通する不安は、一たびアメリカから日本に移ってしまおうと向こうから見えなくなってしまう、もうアメリカに戻れなくなるのではないかということです。そこで、次のことを強調しています。IPMUでは強制的に全員が毎年少なくとも一ヶ月は海外に滞在することとしており、一年中日本に滞在することは許されません。このように海外で過ごして自分を売り込んでくることを奨励していますが、それは同時にIPMU自身を売り込むこととなります。また、海外滞在は年に3ヶ月まで許可しています。こうすることで多くの採用候補者の不安は解消しているように見えます。

さて、少し話題を変えましょう。素粒子論や宇宙論では、最近どのようなことに興味をお持ちですか。

最近の興味はダークマター

ランドール 暗黒物質にはまだ理論的にも調べられていないことがたくさんあり、またさまざまな実験が結果を出し始めているので、これから大きな発展があるように思っています。これが1つ。

もう1つは、数学的な超弦理論と素粒子の模型との関連です。超弦理論にはいろいろな側面がありますが、私が興味があるのは、素粒子の模型を作るうえで考えたことがなかった可能性を超弦理論が示唆してくれるという点です。低次元の見方からは不自然で、対称性などを使ってもうまく説明できない現象でも、高次元(余剰次元)の理論からは自然に理解できることがあります。

たとえば、私が現在興味のあるF-理論を使うと、クォークやレプトンにどうして世代があるのか、またその質量行列がどうしてこのような形をしているのかが説明できます。

大栗 何が自然かというのは見方によりますね。

ランドール プレーンなどは本質的に新しい考え方で、低次元の見方では考えつかなかったものです。それによって、まったく新しい理論的手法やアイデアが生まれました。

大栗 なるほど。あなたが興味をお持ちの分野は、どれをとっても多分IPMUが貢献できると思います。IPMUの現状は村山さんが話してくれるはずですよ。

村山 IPMUを提案したとき、宇宙は何でできているのだらう、宇宙はどのようにして始まったのだらう、宇宙の運命はどうなるのだらう、なぜ我々はこの宇宙に存在して

*4: <http://chipango.wordpress.com/>

いるのだろう、宇宙の基本法則は何だろう、という5つの問題を掲げました。勿論、主として分野外の人に向けたものです。お二人ともこの問題の重要性は十分お分かりのほうです。分野外の人に強調した点の一つはこういうことです。私たちが宇宙はどのように始まったのかを問うということは、実は特異点を議論することであり、物理学者は特異点の扱い方を知りません。しかし、数学者は「無限大」が何を意味するかを定義することができ、異なる大きさの無限大とかを比較したりできます。従って、これは数学者が、多分特異点を解消したり意味のあるように定義するといったように実際に参加できる分野です。そういうように物理学者と数学者の意味のある相互作用が幾つかあるだろうと予測できます。

ランドール 意味のある相互作用で、もっと直接的と言えるようなレベルのものはありますか。つまり、理論モデルの構築に関して、真に新しいアイデアも現れていますか。必ずしもいつも起きることではありませんが。

村山 実際はIPMUで既にその例があります。最近、まさにその理由で現象論の若手が代数幾何の数学者と共同研究をしました。

ランドール 立派ですね。これはブラックホールや宇宙論の問題を幾何学や代数学を使って抽象化することで、より広い見方で理解することにつながるという類のものです。こうした異分野の交流は、双方向に働くということも重要なことです。幾何の分類も結構なことですが、一方で未解決の物理的な問題もあり、こうした物理的な方向から考えることも大切です。そう

することで、進歩の可能性を広げることになります。いろいろな方向からの様々な質問に答える手段を用意することで、これまでになかった形での成果を得ることができると思います。

村山 では、我々が関わっているプロジェクトについてお話ししましょう。天文学の最前線では8メートル級の望遠鏡、すばるに搭載する新しいカメラを製作中です。すばる望遠鏡はケック望遠鏡とそっくりの大きさですが、構造はもっとずっと頑丈です。それで、すばるにはもっと大きなカメラを搭載でき、そのカメラはもっと広い視野を持っていて、1回の露光で満月を完全に含む領域を撮影できます。ですからこの望遠鏡は理想的な深宇宙探査用望遠鏡なのです。計画は北天全体を探索し、弱い重力レンズ効果を利用してダークマターの3次元分布図を作ります。その結果、ダークエネルギーの状態方程式に関する情報が得られるでしょう。

神岡ではスーパーカミオカンデを続ける計画で、IPMUで雇用した教授がスーパーカミオカンデを今と違ったスタイルの実験に転換して、何十億光年という宇宙論的な距離での超新星爆発からのニュートリノを探ることができるようにしようとしています。それをGADZOOKS!(ガズークス!)という名前で呼んでいます、本当の意味での開発研究がIPMUによって始まろうとしています。また、IPMUのもう一人の研究者は、カムランド実験の液体シンチレーターにキセノンガスを溶け込ませて「ニュートリノを出さない二重ベータ崩壊」の探索実験に転換しようとしています。最後に、エックスマスと呼ばれる新しい実験が今始まったところです。800キログラムの液体

キセノンを使って、直接ダークマターを検出する実験です。

ランドール エックスマスはダークマターの非弾性散乱を明確に調べようというものですか？

村山 現在の限界を2桁改善します。

ランドール 大したものですね。暗黒物質に関しては、私はDAMA実験にも興味があります。

大栗 DAMA実験で暗黒物質が検出されたという発表を真剣に受け取っているのですか。

ランドール 私はただの理論屋なので、それが本当かどうかは判定できません。しかし、この実験結果には理論的な説明ができて、それに基づいて将来の実験についての予言をすることができるので、科学者として追求すべき問題だと思います。

検出器の精度が上がってきたので、何かが見つかるかと期待できます。大ハドロン衝突型加速器(LHC)が再起動^{*5}するのを待っている間に、考えるには良い問題でしょう。

LHCで何が分かる？

村山 では、そちらの方面について話をしましょう。これは何度も聞かれたことだと思いますが、LHCでは何が見つかると思いますか。

ランドール 何が分かるかは予想できません。ヒッグス粒子は見つかるでしょう。

*5: LHCはCERNの陽子・陽子衝突加速器(重心系衝突エネルギー 14 TeV)だが、昨年9月に超伝導電磁石を冷やす液体ヘリウムが漏れて故障し、現在保守点検作業中。実験再開は今秋11月の予定である。IPMU News No.5, pp.22-25に関連記事が掲載されている。

何が見つかるかを語るより、できる限り広い可能性を考えておくことが大切です。思いもよらない現象が起きたときに、それを探す手立てを講じなかったから見逃したということのないようにしておかないといけません。何が見つかるかについては、賭けをする気はありません。

村山 「ワープした余剰次元」もですか。

ランドール 可能性はありますが、5%以上の確率があるとは思いません。あり得ないと言ってるわけではありませんよ。かつては、何か思いがけない実験結果が見つかったと、最初の1-2年の間、本当にそれが何であったかが分かるまでは、何が見つかったとしても超対称性が発見されたときと騒いだ時期がありました。そういうことが起きたときに、「いや、何かがあるか分からない」と言うことができることは大切なことです。偏見のない目で何が起きているのかを見て、それから考えるのです。

村山さんなら、LHCでは絶対に超対称性が見つかると思うのではないですか。

村山 そうは言いません。超対称性が見つかるとういと思えますし、昔からその可能性を追究してきました。しかし、LHCの到達領域にあるという保証がないことも事実です。

ランドール これまで、超対称性があるという実験的証拠がまったく出ていないので、超対称性は少し分が悪くなっていますね。

村山 それは認めます。特に、B中間子の実験は、超対称性を使わなくても小林・益川理論で完全に説明できてしまいます。

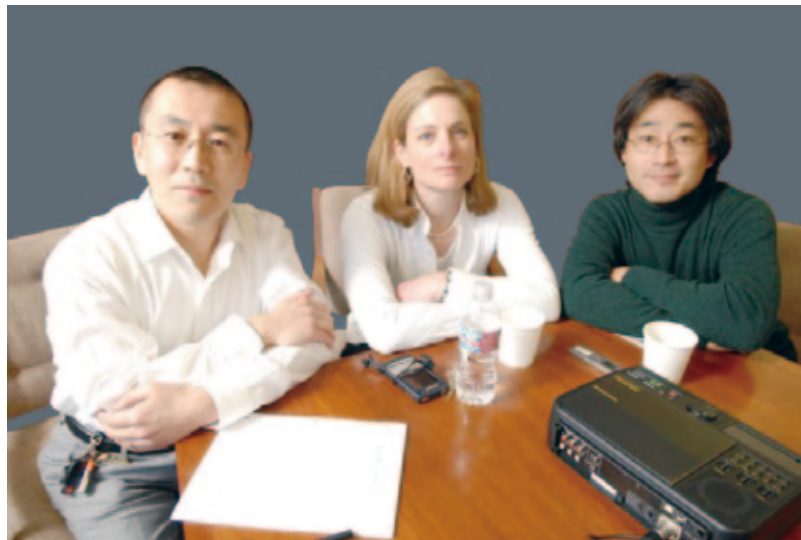
ランドール 私が余剰次元の理論を好む理由の1つは、これがフレーバーの物理に説得力のある説明ができる初めての理論

だからです。ニュートリノの混合角が大きくて、クォークの混合角が小さいということには、なにかの意味があると思います。小林・益川行列が単位行列に近いのはなぜでしょうか。余剰次元の理論は、このような構造に説得力のある説明を与えます。

村山 では最後に、これからこの分野に進む若い人たちにメッセージをお願いします。

ランドール 日本を訪問して、特に感銘を受けたことは、人々が科学に強い興味を持っていること。宇宙のこと、この世界が何からできているのかを知ることができるということは、大切なことだと理解してくれていることです。科学とは発見の過程です。

私が強調したいことは、多くの人が科学の進歩に貢献できるということです。あなたたちが日本でこの新しい研究所を始めたので、海外の私たちも日本に注目するようになっていきます。このような研究所ができたことは画期的なことです。これは、日本人たちが、物理学に興味を持ち、尊重していることの現れです。科学の発展は一朝一夕に起きることはありません。宇宙についての深遠な問題は、多くの研究者を結集し、たっぷり時間を与えることでようやく解けるものです。これは重要なことで、日本の人がそれをわかってくれていることは、素晴らしいと思います。



左から大栗博司さん、リサ・ランドールさん、村山齊さん。
ランドールさんは素粒子論と宇宙論の研究者で、「ワープした余剰次元」を使った素粒子模型を提唱したことで有名です。1987年にハーバード大学から博士号を授与された後、プリンストン大学とマサチューセッツ工科大学の教授を経て、2001年からハーバード大学教授。2007年にアメリカ物理学会のリリエンフェルド賞を受賞し、2008年に全米科学アカデミーの会員に選ばれるなど、数々の荣誉に輝いています。この座談会はランドール教授がカリフォルニア工科大学にゴードン・ムーア荣誉客員教授として滞在中の2009年2月に行われました。

第3回外部諮問委員会

2009年8月18日にIPMUの外部諮問委員会が開催されました。委員会は国際的に著名な9名の研究者で構成され、Roberto Peccei (UCLA、委員長)、John Ellis (CERN)、Steve Kahn (Stanford/SLAC)、海部宣男 (放送大学)、Young-Kee Kim (Fermilab)、小島定吉 (東京工業大学)、David Morrison (UC Santa Barbara)、Nicolai Reshetikhin (UC Berkeley & Amsterdam) の8名の委員が出席されました。委員会からはIPMUが今後の発展を図るための有益な提言をいただき、まもなく東京大学総長宛に報告書が提出されます。



IPMU年次報告書を発行

2008年度のIPMUの事業と研究活動を紹介する年次報告書“IPMU ANNUAL REPORT 2008”を発行しました。今回は2007年10月の発足から2009年3月までの1年半の活動記録と研究のハイライトが記載されています。IPMUのwebページ <http://www.ipmu.jp/ja/research-activities/annual-reports> で内容をご覧ください。

IPMU杉本茂樹特任教授、湯川・朝永奨励賞を受賞

2009年7月8日、京都大学からIPMUの杉本茂樹特任教授と名古屋大学大学院理学研究科の酒井忠勝准教授を第2回湯川・朝永奨励賞共同受賞者に決定したことが発表されました。受賞理由は、超弦理論を用いて陽子・中性子・中間子などの強い相互作用をする粒子 (ハドロン) の性質を解析する方法を開発した功績「ゲージ理論/超弦・重力理論対応に基づく量子色力学 (QCD) の双対ホログラフ模型の構築」です。なお、授賞式は2009年9月11日に行われます。

国際研究会報告

——ダークエネルギー：暗黒成分を解明しよう!

2009年6月22日-26日の5日間、東京大学柏キャンパス図書館メディアホールにおいて、「IPMU国際研究会 ダークエネルギー：暗黒成分を解明しよう!」が開催されました。詳しくは44ページをご覧ください。

特別一般講演会「The Dark Side of the Universe」

前項の国際研究会開催中の2009年6月24日、東京大学柏図書館のメディアホールにおいて、特別一般講演会「The Dark Side of the Universe (宇宙の暗黒面)」が催されました。講演者は暗黒エネルギーの名付け親として知られる理論天体物理学者のMichael Turnerさんで、英語での講演でしたが160名以上の参加者が会場を訪れました。IPMUの杉山直主任研究員が司会を務めるとともに、講演途中の要所で概要を日本語で説明しました。この方式をとったこともあり、アンケートでは「非常に分かりやすかった」「通常の日本語講演とはまた違った面白さがあった」などの回答が得られました。(41-43ページに講演会の写真があります。)

世界天文年全国同時七夕講演会の一環として「天の川銀河ものがたり」を開催

2009年7月7日、柏市立図書館本館内プラネタリウムにおいて、世界天文年全国同時七夕講演会の一環として「天の川銀河ものがたり」が開催されました。今年はガリレオが初めて望遠鏡で夜空を眺めてからちょうど400年という節目で、「世界天文年」に指定されています。日本天文学会主催で、7月7日の七夕の日に全国同時開催で講演会を開き天文年を盛り上げようという試みに、IPMUも協力しました。柏プラネタリウム研究会によるプラネタリウム投影で柏の夜空を眺めながら星座を探し、七夕物語の投影番組を終えたのち、吉田直紀IPMU准教授が天の川銀河の現在・過去・未来について講演を行いました。このような試みは柏市立図書館では初めてでしたが、アットホームな雰囲気に参加者は七夕を楽しみ、今後のイベントの継続を願う意見も多く寄せられました。



女子中高生支援事業「未来をのぞこう!」

2009年度からJST (科学技術振興機構) の支援を受けて、IPMUを含む東京大学の7つの研究組織が女子中高生の理系進路選択支援事業を行っています。その初回のイベント「未来をのぞこう! ~祝・ノーベル賞! 反物質ラボ見学と女性研究者とのティータイム~」が2009年8月12日に行われ、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) を訪問しました。参加した約30名の女子中高

生とその父母は、ノーベル物理学賞を受賞した小林誠、益川敏英両氏の理論検証の舞台となったKEKB加速器を見学し、その後女性研究者を囲んで懇談を行いました。「家庭生活と両立できますか?」「女性が少なくて困りませんか?」など、女子学生が、理系進路を選択するうえで不安に思うこともIPMUの研究員Susanne ReffertとJiayu Tang, KEKの小磯晴代教授ら女性研究者が丁寧に回答し、和やかな雰囲気での懇談を終えました。



第3回東大生によるサイエンスショー「宇宙観る(そらみる)」

2009年7月13日、東京大学駒場キャンパス数理学研究科大講義室において、東京大学教養学部教養教育開発機構とIPMUの共催で、第3回東大生によるサイエンスショー「宇宙観る(そらみる)」が開催されました。東京大学の全学自由研究ゼミナールの受講生やサイエンスコミュニケーションサークルCASTの学生たちが一般向けに天文学・素粒子物理学の基礎を伝える劇を行いました。ショーの後半でIPMUの村山機構長が劇に参加し、暗黒物質について説明しました。約100名の観客は凝った演出のショーを楽しんでいました。



今後の研究会 ——フォーカスウィーク: 宇宙物理学における最先端統計分野

2009年9月28日の週に5日間、東京大学柏キャンパス図書館メディアホールにて「フォーカスウィーク:宇宙物理学における最先端統計分野」を開催します。

様々な大規模宇宙サーベイが進行中あるいは計画中の宇宙物理の最前線では、これらの大量の観測データから目標とするサイエンスの情報を引き出すために、統計的手法を用いることが必要不可欠になっています。例えば、マルコフ連鎖モンテカルロ法と呼ばれる、統計解析学では良く知られた方法が宇宙論に紹介されたのはごく最近(7年ほど前)で、現在では宇宙論データから宇宙年齢、暗黒エネルギー、暗黒物質などのパラメーターを制限する強力な手段として用いられています。このように、宇宙物理学で有効な統計解析学的手法がまだまだ沢山あるかもしれません。この研究会では、これまでは異分野である、統計学、宇宙物理学の分野において第一線で活躍する研究者を一同に集め、互いの研究アプローチを理解・議論し、交流を深め、共同研究の可能性を探ることを目指しています。

今後の研究会 ——フォーカスウィーク: 第4回LHC現象論

2009年11月9日-13日の5日間、高エネルギー加速器研究機構理論センターと共催でLHCの物理についてのフォーカスウィークを行います。LHCに関するフォーカスウィークは今回で4回目ですが、今回の議論の中心は強い相互作用(QCD)の物理です。LHCでは現在の素粒子標準模型の「ほころび」である新粒子が見えると期待されています。このような粒子の存在を確認するためには、同時におこるQCDのプロセスを正しく理解することが必要です。放出されるクォークの作るジェットの「形」を新粒子確認に結びつけ

るアイデアや、ジェットの分布をより高次の補正まで含めて議論するNLO計算、それらを数値的に処理するモンテカルロのトップエキスパートが来訪する予定です。

今後の研究会 ——フォーカスウィーク: 宇宙再電離期を探る

2009年11月30日-12月2日の3日間、東京大学柏キャンパス図書館メディアホールにおいて、「フォーカスウィーク:宇宙再電離期」が開催されます。日本のすばる望遠鏡を用いた遠方銀河の観測と、欧州の電波望遠鏡群LOFARによる21cm線の観測を組み合わせることで、宇宙初期の暗黒時代がどのように終焉したのかを解明しようと専門家が集まります。上記のプロジェクトからの代表者をはじめ、現在世界中で計画されている同種の観測プロジェクトを推進する研究者を招待し、観測データの有効な活用と理論モデルの構築へ向けた議論を行います。

人事異動

主任研究員

IPMUの併任研究員を務めていたイギリス Aberdeen 大学の Alexey Bondal 教授が、2009年7月13日付けで Aberdeen 大学在籍のまま IPMU 主任研究員を兼ねることになりました。今後の IPMU の数学分野の発展に貢献していただきます。

次号の発行予定変更のお知らせ

次号の IPMU NEWS (No. 8) 発行予定は、通常2009年12月のところ、新研究棟の完成記念特別号として2010年1月に変更します。



大気ニュートリノ

梶田隆章 IPMU主任研究員

宇宙線は宇宙の彼方から地球にやってくる高エネルギー粒子です。これらの宇宙線は大気の上空で空気の原子核と相互作用します。そしてその相互作用で多くのパイ中間子やK中間子が生成されます。生成された中間子は不安定で、ニュートリノや他の粒子に崩壊します。このように生成されたニュートリノは「大気ニュートリノ」と呼ばれています。大気ニュートリノは地下実験で研究されてきました。そして、大気ニュートリノの研究を通して、ニュートリノに有限の質量があることによって起こるニュートリノ振動が発見されました。

