

# IPMU NEWS

Feature  
Measuring the Universe with the Ancient Supernovae

Interview with Junichiro Kawaguchi

Workshop Report

HORIBA INTERNATIONAL CONFERENCE  
COSMO/CosPA 2010



12

No.

December 2010

# IPMU NEWS CONTENTS

## English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama  
High Risk, High Return
- 4 **Feature** Ken'ichi Nomoto  
Measuring the Universe with the Ancient Supernovae
- 10 **Our Team** Shigeki Matsumoto  
Yuji Tachikawa  
Melina Bersten  
Gaston Folatelli  
Ahmet Emir Gumrukcuoglu  
Johannes Schmude  
Simon Wood
- 14 **Workshop Report**  
HORIBA INTERNATIONAL CONFERENCE  
COSMO/CosPA 2010
- 16 **IPMU Interview** with Junichiro Kawaguchi
- 21 **News**
- 26 **Q-ball** Masahiro Kawasaki

## Japanese

- 27 **Director's Corner** 村山 斉  
ハイリスク・ハイリターン
- 28 **Feature** 野本 憲一  
過去の超新星を使って宇宙の膨張を測る
- 34 **Our Team** 松本 重貴  
立川 裕二  
メリーナ・バーステン  
ガストン・フォラテリ  
アフメト・エミル・ギュムルクチュオル  
ヨハネス・シュムード  
サイモン・ウッド
- 38 **Workshop Report**  
堀場国際会議 COSMO/CosPA 2010
- 40 **IPMU Interview** 川口淳一郎教授に聞く
- 45 **News**
- 48 **Qボール** 川崎 雅裕



Ken'ichi Nomoto is IPMU Professor and a principal investigator. He is a leading astronomer in the fields of stellar evolution, supernova theory, and the cosmic origin of the elements. He received the 1989 Nishina Memorial Prize for his contribution on "Theoretical Study of Supernova," and the 1995 Japan Academy Prize with Daiichiro Sugimoto for their work on "Theory of Stellar Evolution and Supernovae." He received his Ph.D. from the University of Tokyo in 1974. In the same year he became a research associate at Ibaraki University. In 1979, he returned to the University of Tokyo as a research associate. He became an associate professor in 1985 and a professor in 1997. Since 2008, he has been IPMU Professor.

野本憲一：東京大学IPMUの特任教授で主任研究員を兼ねる。恒星進化論、超新星爆発の理論、宇宙の元素の起源などの天文学分野における世界的なリーダーの一人であり、「超新星の理論的研究」で1989年に仁科記念賞、「星の進化と超新星の理論」で杉本大一郎氏と共に1995年に日本学士院賞を受賞。また、2010年にIAP（パリ天体物理学研究所）メダル受章。1974年に東京大学から博士の学位を取得。同年、茨城大学理学部助手、1979年、東京大学教養学部助手、同助教授を経て1997年、同教授、2000年、東京大学理学系研究科天文学専攻教授、2008年からIPMU特任教授。

## High Risk, High Return

Director of IPMU

Hitoshi Murayama

Hayabusa's seven-year journey to the asteroid Itokawa captured imagination and admiration of us all. In this issue of IPMU News, you find the interview of the Hayabusa mission director, Junichiro Kawaguchi, by our Ed Turner. You may read about how brave he was proposing such a mission, taking high risks hoping for a high return. Return it did. Overcoming many technical problems, it made back from the asteroid carrying particles of its material. Scientifically, it may shed light on the formation history of the solar system. But the reason why we jumped up and down when it reentered the atmosphere was different, a huge sense of achievement that a *mission impossible* was accomplished.

Indeed, scientific research is full of dramas. A stereotype of a scientist would be something like this: wearing a thick pair of glasses, always clad in a white lab coat, stone-faced with little emotion, not socially minded, moving about almost mechanically in a lab full of dangerous chemicals and microbes, and following protocols and never deviate from well-defined routines.

But you would be surprised watching how scientists actually work: taking risks into an uncharted territory, disappointed by hitting a dead end, excited to see light down the tunnel, laughing with friends, arguing to find out what is right, concentrating to endure difficult

tasks, stumbling on a totally unexpected directions, rivalry with people elsewhere in the world, and often working in a team enjoying the company. And science is totally global: wherever you go for conferences, workshops, schools, and seminars, you immediately find new friends working in the similar area of study.

The article by our PI Ken Nomoto shows how he ventured into the mystery of supernova explosions, an uncharted territory at that time, building the theory that now became standard, working with collaborators worldwide to prove his theory, and how it led to a totally unexpected discovery of dark energy.

Ken shared his story during the Open Campus days of the Kashiwa campus with an unexpectedly large audience. They were mesmerized by his lecture. On the previous day, Chiba-kun, a gender-neutral new mascot of the Chiba prefecture, visited me, and listened to my explanation how elementary particles interact with each other. Enjoy the snap shot.



# Measuring the Universe with the Ancient Supernovae

## Tycho Brahe's supernova and the observation of its echo

About 12,000 years ago, one star made a big explosion in our Galaxy. The light emitted from the explosion reached the Earth in November, 1572 AD. This “new” star was observed as a “guest star” in Korea and then China. About a week later, a famous Danish astronomer, Tycho Brahe observed this star in Constellation Cassiopeia. Tycho noticed that this was a “new” star, changing its color and brightness with time. He continued his naked-eye observation of the star until it disappeared in March 1574 AD. This observation of change in the sky was a challenge to Aristotle's view of the “constant” universe.

After Tycho's observation, the telescope was invented, and Galileo made astronomical observations using the telescope. Recently, with modern instruments, astronomical observations in other wavebands, such as radio, infrared, X-rays, and gamma-rays, became possible. Similar bright new stars have been observed in very distant galaxies. Zwicky and Baade coined “supernova” for those especially bright novae. At the location of Tycho's star, a nebula has been found and named “Tycho's supernova remnant,” and X-ray and infrared observations revealed heavy element abundances (Fig. 1). The optical light emitted in 1572, however, could not be observed with telescopes, so that it was impossible to study the detailed nature of the supernova in 1572 AD itself.

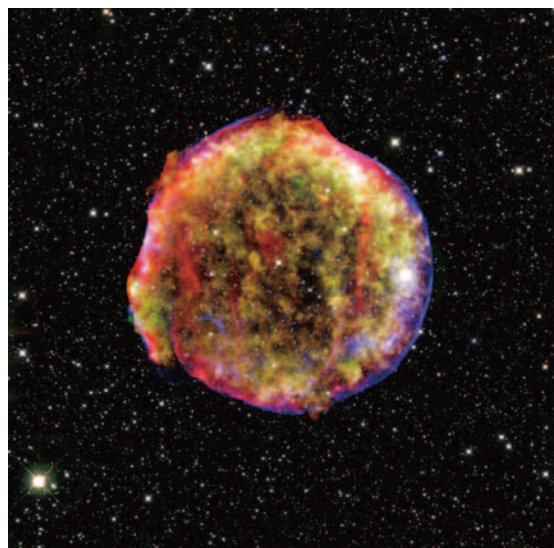


Figure 1: Tycho's supernova remnant (Max-Planck-Institut für Astronomie).

However, surprisingly enough, in 2008, 436 years after Tycho's observation, the optical light from SN 1572 was observed. It was an echo. The optical echo occurs when the light emitted from the source is scattered by the dust in the surrounding interstellar cloud, and it reached the Earth some time later. The observed echo brought the information of SN 1572 itself. In a sense, the echo is a video tape that shows the past.

How to find the echo? If there exist dusty materials distributed outward, then the echo spot seems to move quickly outward. By identifying the echo from such a quickly moving spot of light with a telescope in Spain, our team of NAOJ, IPMU, and MPE successfully conducted spectroscopic

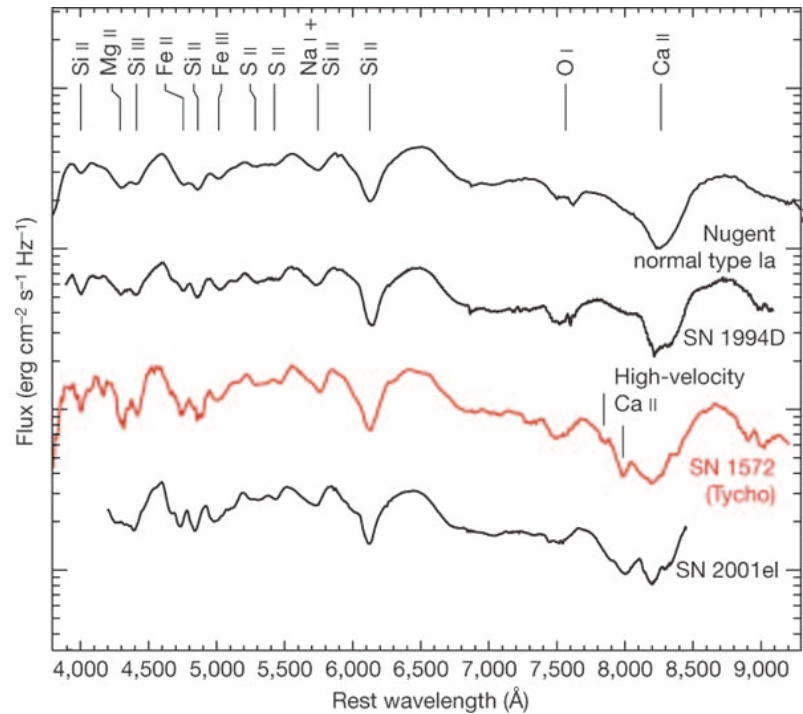


Figure 2: The spectrum of the echo of Tycho's supernova (SN 1572) (red) compared with the spectra of several type Ia supernovae (black) (Krause et al. 2008 Nature **456**, 617).

observation of the echo with the Subaru Telescope in September 2008. It is just amazing that the supernova light observed by Tycho with only the naked eye was observed now, 436 years later, with the modern telescope.

We have found that the observed spectrum of SN 1572 (the red line in Fig. 2) is very similar to the spectra of Type Ia supernovae (SNe Ia) (black lines in Fig. 2). Absorption lines in the spectra are identified with those of iron, silicon, magnesium, oxygen, etc. This implies that these supernovae created those elements in the explosion. (Note that no hydrogen line is seen, despite the fact that hydrogen is the most abundant element in the universe.) This similarity means that SNe Ia are strikingly similar, irrespective of the very distant galaxies in which they appeared.

The question, then, is what kind of stars explode as SNe Ia. When I started working on SNe Ia in the

early 1980s, we could not even identify the elements in the spectra of SNe Ia seen in Figure 2. It was only evident from the spectra that there was no hydrogen in SNe Ia, so the progenitor stars had undergone unusual evolution. We had two candidates of the progenitor: a helium star with about 2 solar mass and a white dwarf (WD). The WD model for SNe Ia has been established only after further development of observations and theories.

### What are white dwarfs?

Stars like the Sun shine by burning hydrogen into helium in the central region. When hydrogen is exhausted, the envelope of the star expands to a radius as large as almost an orbital radius of Venus, and the star becomes a red giant. In the central region of the star, helium burns into carbon and oxygen. When the helium is exhausted, the

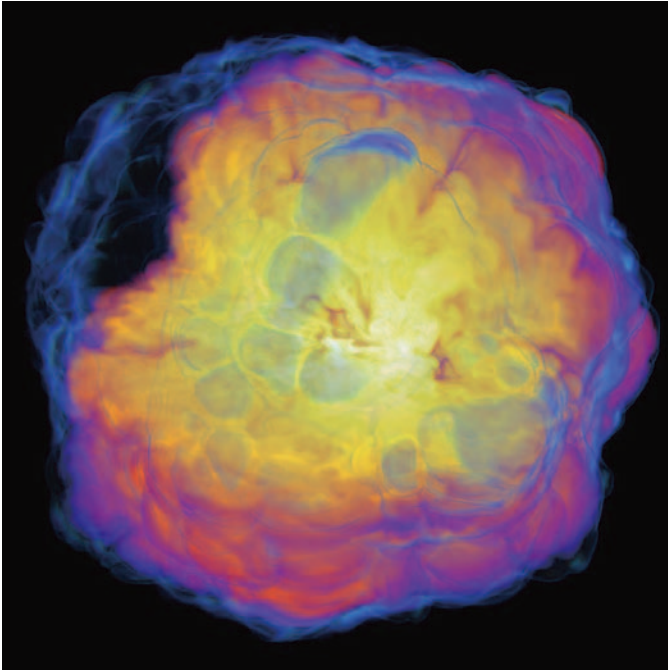


Figure 3: Simulation of the exploding white dwarf. The various colors indicate the various heavy elements (e.g., Fe) synthesized in the interior (W. Hillebrandt).

stellar envelope expands further even to the orbital radius of the Earth. Eventually, the outer envelope is separated from the core of the star to form a so-called planetary nebula. The remaining stellar core is composed of carbon and oxygen. Its radius is as small as the size of the Earth. Its surface temperature is so high that it is called a white dwarf (WD).

The WD is very different from an ordinary star. In ordinary stars, the thermal motion of gas particles provides sufficient pressure against gravity. In the WD, electrons are degenerate, where electrons at high densities need to occupy high energy states due to Pauli's exclusion principle in quantum mechanics. Such degenerate electrons provide the pressure against gravity.

A typical WD star has a mass of about 0.5–1 solar mass and a radius that is about one hundredth of the solar radius, which is as small as the radius of the Earth. Its central density is extremely high—about

1 ton per cubic centimeter. There is an upper limit to the mass of a WD—the so-called Chandrasekhar mass (1.4 solar mass)—because the velocity cannot exceed the speed of light according to the special theory of relativity. As the WD's mass approaches this limit, the central density becomes infinitely high. This is an important mass limit for SNe Ia to be standard candles.

### Nuclear explosions of white dwarfs

The evolution of a single WD is simply a cooling process. However, if the WD is a member of a close binary system, its ultimate fate could be very different. Because of the mass transfer from the companion star, the mass of the WD could increase to the Chandrasekhar mass. The central density of the WD then becomes high enough for a carbon fusion reaction to increase the central temperature.



Figure 4: Type Ia supernova SN 1994D (lower-left) (NASA).

Since the degenerate pressure does not depend on the temperature, the pressure stays constant and the WD does not expand. Then the temperature does not drop but continues to increase. It accelerates the carbon fusion reaction, which eventually leads to thermonuclear runaway. Such a WD is a veritable carbon bomb (Fig. 3).

Thermonuclear runaway increases the temperature up to 5 to 10 billion degrees, and most of the carbon and oxygen burn to nickel 56. The burned central region forms a bubble, which heats up the surrounding layer to burn more carbon. This creates more bubbles and the burning front propagates outward. Under certain conditions, a shock wave may form to induce detonation, which could give rise to an asymmetric explosion.

Nickel 56 is radioactive and decays into cobalt 56 with a half-life of about a week. Cobalt 56 is also radioactive, decaying into stable iron 56 with

a half-life of 78 days. Gamma-rays emitted from these radioactive decays have high enough energy to excite the surrounding gas and emit optical light. Therefore, supernova brightness depends on how much nickel 56 is synthesized. The observation of SNe Ia is witnessing the creation of iron in the universe. Since the mass of the WD at the explosion is close to the Chandrasekhar mass, the synthesized mass of nickel 56 is about 0.6 solar mass which is virtually constant among SNe Ia. This is the reason why the brightness of SNe Ia is nearly uniform.

### Acceleration of the expansion of the universe

An SN Ia shines as bright as a whole galaxy which contains 10–100 billion stars—so it can be observed even at a distance of 10 billion light years—and the brightness of SNe Ia is nearly uniform. Therefore SNe Ia are good standard candles to provide evidence of

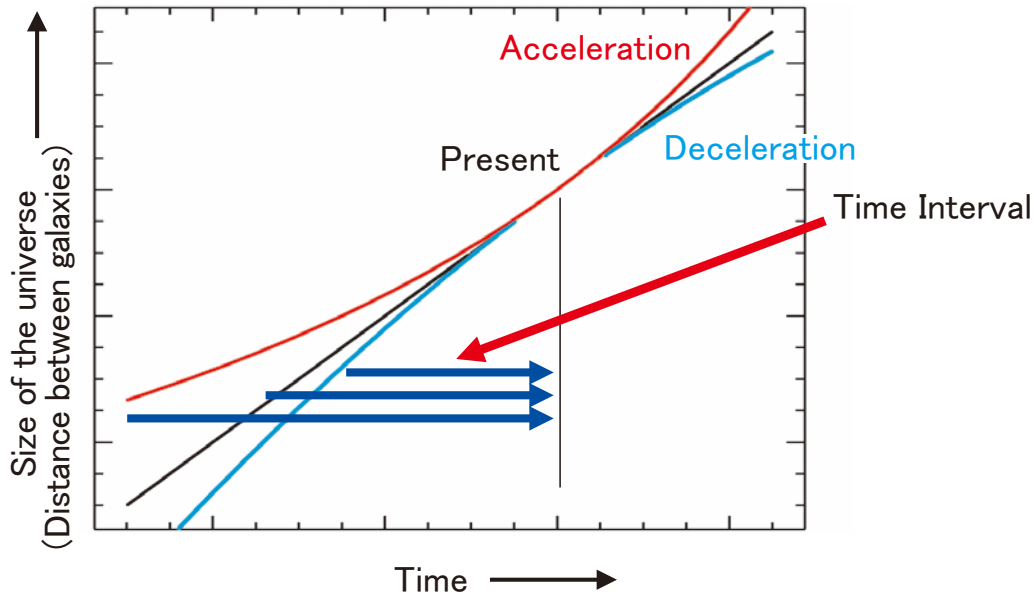


Figure 5: The size of the expanding universe vs. time. The red, blue, and black lines show the universe with acceleration, with deceleration, and without acceleration or deceleration.

the acceleration of cosmic expansion.

How has the acceleration of cosmic expansion been discovered? Figure 5 shows that the separation between galaxies (i.e., the size of the universe) is increasing with time due to cosmic expansion. The slope indicates the rate of expansion, and the red (blue) line shows cases of deceleration (acceleration) of cosmic expansion.

As the size of the universe increases, the wavelength of the light emitted in the past is stretched, so that the light is red-shifted ( $z$ ). The universe was smaller in the past by a factor of  $1/(1+z)$ .

If cosmic expansion has accelerated, then the rate of expansion must have been slower in the past and gradually accelerated to reach the current rate. With acceleration, it takes more time for the light from the past SN Ia to reach us, i.e., the SN Ia is more distant, and thus dimmer, compared to cases with no acceleration.

If the expansion has decelerated, on the other hand, the rate of expansion in the past was faster, so the distance to the past SN is shorter compared to cases without deceleration. Therefore the SN Ia is brighter than in cases with no deceleration.

### Dark Energy

The abscissa of Figure 6 shows the brightness of an SN Ia at a certain redshift ( $z$ ) compared to the empty universe with no acceleration or deceleration. The observed points are obtained by averaging the brightness of many SNe Ia. It is clear that SNe Ia around  $z = 0.5$  are fainter than in the empty universe.

In contrast, the SN Ia around  $z = 1.7$  is brighter. This implies that the cosmic expansion was decelerated in the past but turned to acceleration some 6 billion years ago.



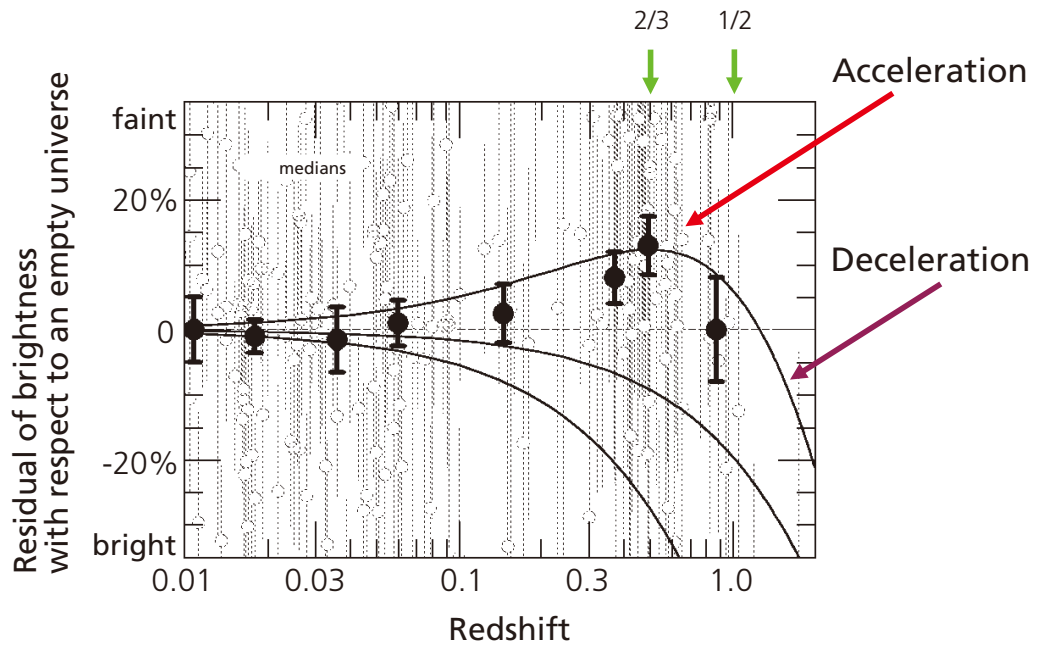


Figure 6: The brightness of distant supernovae at high redshift. The differences from an empty universe with no acceleration or deceleration are shown (Tonry et al. 2003 ApJ **594**, 1).

The deceleration of cosmic expansion can be understood as a result of the gravitational force exerted by matter in the universe. The reason why the acceleration started should be the effect of anti-gravity that causes repulsive force. The nature of the source of this repulsive force is unknown, and it is thus referred to as “Dark Energy.” The observations of cosmic background radiation combined with some other observations have revealed that the composition of the current universe comprises about 73% dark energy, 23 % dark matter, and only 4% ordinary matter. Amazingly, 96% of the universe consists of “dark.”

What this “Dark Energy” is, what its equation of state is, and whether it is the cosmological constant introduced by Einstein are fundamental questions in physics. In order to answer these questions, we need to construct “precision cosmology” by more detailed observational and theoretical studies. By observing

a larger number of distant supernovae, we should be able to investigate how the nature of SNe Ia depends on their host galaxies and redshift and reduce systematic errors. We need more accurate observations using next generation astronomical satellites, space telescopes, and 30 m class giant ground-based telescopes.

At the IPMU, we are studying SNe Ia by combining the observational and theoretical approaches, where we are trying to identify the progenitor binary star systems that produce SNe Ia, to clarify the nature of host galaxies, and to simulate aspherical explosions and associated nucleosynthesis. By revealing the nature of SNe Ia, we are approaching “precision cosmology.”

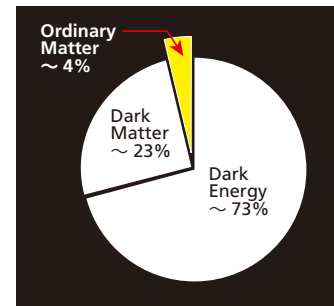


Figure 7: Composition of the universe.

# Our Team

## Shigeki Matsumoto

Research Area: *Cosmology*

IPMU Associate Professor



The dark matter problem of the universe is very important not only for particle physics but also astrophysics and cosmology. Thanks to recent cosmological observations, the existence of dark matter has been established, however, its nature has not been revealed yet. I have researched the nature of dark matter from the viewpoint of new physics at the TeV scale. To be more precisely, I have studied how dark matter can be detected in collider experiments (LHC and ILC) and detection measurements based on several new physics models such as the supersymmetric model, the little higgs model with T-parity, and the universal extra-dimension model. As an advanced topic of these

studies, I would like to establish a method to clarify the nature of dark matter in a model-independent fashion. In addition to the topic related to dark matter, I am also planning to study the first order phase transition and the non-equilibrium dynamics of elementary particles in the early universe.

# Yuji Tachikawa

Research Area: **Theoretical Physics**

IPMU Assistant Professor

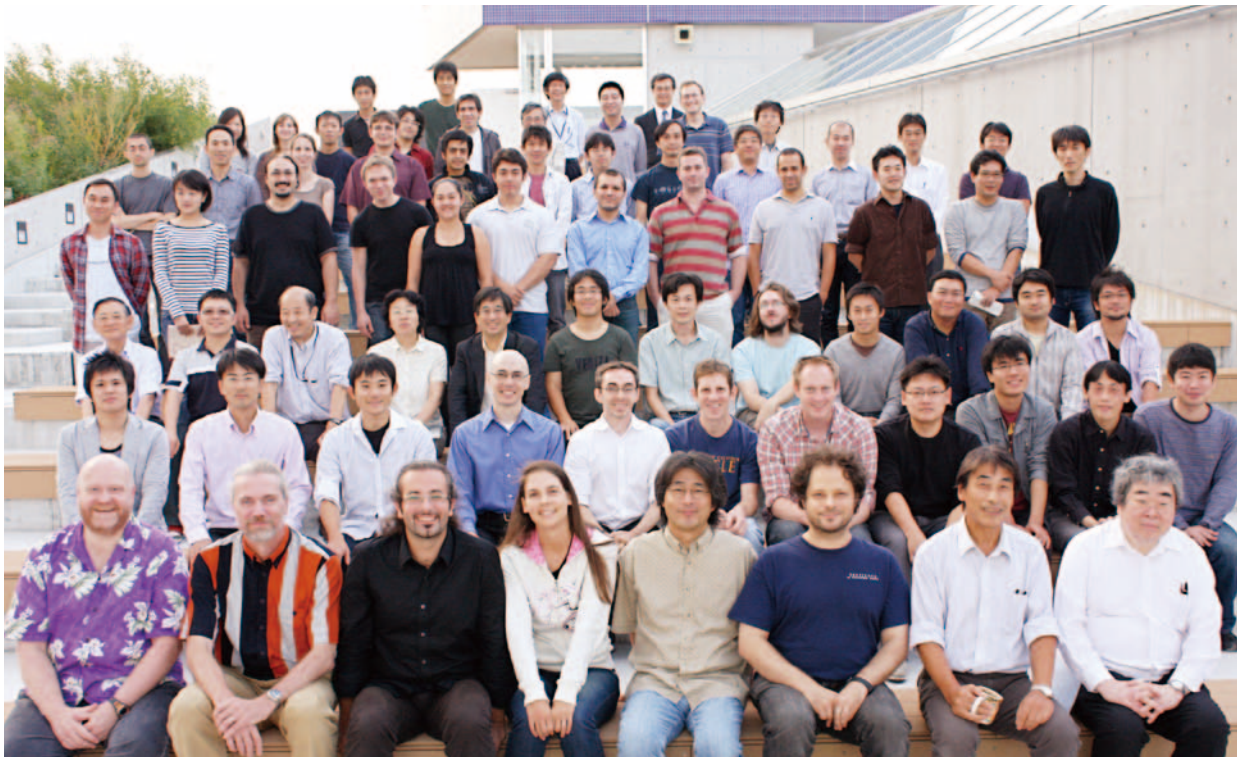


The effort to reconcile quantum mechanics, which governs microscopic phenomena, and general relativity, which governs strong gravitation, led to the emergence of the superstring theory. It is the leading candidate to give a unified description of Nature at its most microscopic level, but frankly what interests me most about superstring theory is its exceptionally rich internal structure.

The theory is so rich that it not only necessitates the use of cutting-edge mathematics, but it has also occasionally given a new area of mathematics, which later received rigorous and vigorous study by mathematicians. For example, the study of supersymmetric states of string theory is now known

to be related closely with algebraic geometry and representation theory.

My hope as a physicist in this Institute is to unearth more ideas from string theory, to be polished into perfection by mathematicians in the same building, thus connecting the P (physics) and the M (mathematics) of the IPMU.



Researchers gathered at the "amphitheater" of the IPMU building on the occasion of the IPMU's third anniversary in October 2010.

Our Team

## Melina Bersten

Research Area: **Astronomy**

Postdoc

My main research interests involve computational and theoretical astrophysics. Specifically, I work in the field of supernovae. These are very relevant astrophysical objects because of their connection with the final stages of stellar evolution and the energetic and chemical evolution of galaxies. They are also important in Cosmology as distance indicators. Through the computation of hydrodynamic models



of core-collapse supernovae and comparison with observations, I aim at gaining a better knowledge of the physical properties of the progenitor stars.

## Gaston Folatelli

Research Area: **Astrophysics**

Postdoc

I am an observational astrophysicist working in the field of supernovae. I first got interested in this subject through the use of Type Ia supernovae as powerful distance indicators in the study of the expansion history of the Universe. I focused on the use of spectroscopy and multi-band photometry as a means to improve the precision of distance measurements. In the past few years, I also became interested in understanding supernovae



as astrophysical objects in connection with stellar evolution, the mechanism of explosion, and the interaction with the interstellar medium. For that purpose I have been involved in the monitoring of all types of supernovae very soon after explosion.

## Ahmet Emir Gumrukcuoglu

Research Area: **Cosmology**

Postdoc

My interests primarily revolve around cosmological inflation. One focus of my research is the study of inflationary scenarios with new observable signatures, such as broken statistical isotropy and/or substantial non-Gaussianity, which provide additional criteria for discriminating among different models. I am also interested in the effect of supersymmetric flat directions on the post-inflationary evolution of the



universe. An ongoing project involves a nonlinear study of the preheating of flat direction condensates - the explosive decay may give rise to gravitational waves in the frequency range of upcoming observations.

## Johannes Schmude

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

I am interested in relationships between geometry, gauge- and string theories. In the past, I have mainly worked on problems regarding gauge/string duality, specifically the case of gauge theories with additional fundamental matter fields. On the string theory side of the duality, these are represented by D-brane sources, which can be conveniently described by the mathematics of generalized calibrations. Just as calibrations capture the physics of D-branes, G-structures provide a very natural language to



address issues regarding the involved supergravity backgrounds themselves.

## Simon Wood

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

The primary focus of my research is logarithmic conformal field theory. Conformal field theories are quantum field theories that are invariant with respect to transformations that preserve angles but not lengths. These theories are encountered in string theory and statistical mechanics and have a very rich mathematical structure that can be described by vertex operator algebras. Logarithmic conformal field theory is a generalization of standard conformal field theory, which admits logarithmic divergences in correlation functions. The vertex operator algebras



of logarithmic conformal field theories are still quite poorly understood. Here at the IPMU I hope to get a better understanding of these vertex operator algebras of logarithmic conformal field theories as well as the categorical structures underlying their representation theory.

# HORIBA INTERNATIONAL CONFERENCE COSMO/CosPA 2010

Shinji Mukohyama

IPMU Associate Professor

Jun'ichi Yokayama

Professor of the Research Center for the Early Universe (RESCEU) at the University of Tokyo and IPMU Senior Scientist



An international conference on cosmology and particle astrophysics was co-organized by IPMU and RESCEU from September 27 to October 1, 2010 at the Hongo Campus of the University of Tokyo.\* The main venue was Yayoi Auditorium (Ichijo Hall), and several halls in the School of Science, such as Koshiba Hall, were used for parallel sessions. This conference integrated two annual international conference series: COSMO, which had been held mostly in Europe and North America alternately, and CosPA, which had been held in the Asia Pacific region, in places such as Taiwan, Korea and Australia. More than 290 researchers from 30 countries attended the conference. In the following, let us review 29 invited lectures in the order of cosmic history.

In the very early universe, quantum fluctuations are so significant that even Einstein's theory of general relativity can't work, and we need "quantum gravity," a dream theory reconciling Einstein's general relativity and quantum theory. The conference began with a talk by Horava, who had recently proposed a new theory of quantum gravity.

After exiting the realm of quantum physics, the universe is thought to have experienced an epoch of

\* <http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/symposium/cosmocospa2010/index.php>

rapid accelerated expansion called inflation and then turned into a hot fireball of universe. Since inflation is not only theoretically beautiful but also able to explain the observed spectrum of cosmic microwave background radiation (CMB) correctly, it is considered as an important part of modern cosmology. Inflation was one of main themes in this conference. We had many talks such as Silverstein's model in string theory, supersymmetric models by Takahashi and Stewart, Kaloper's argument about large field models, and Senatore's effective theory of inflation. We also had Hamaguchi's talk on temperature after inflation.

Just after inflation, there were nearly equal amounts of particles and anti-particles. Since things like our bodies and the earth are made of baryons, extra baryonic particles must have been generated from them. Buchmueller gave a talk on this subject called baryogenesis. In the subsequent hot universe, most baryons took the form of protons and neutrons. How were light elements synthesized from these? Big-bang cosmology answers this question. Steigman talked about recent topics in this subject called nucleosynthesis.

The universe expands further and its dominant gravitational source changes from radiation to

matter. Actually, most matter in the universe is unidentified and called dark matter. There were many talks on dark matter in this conference. Mahapatra and Ogawa reported the current status and future prospects of experiments aiming at direct detection of dark matter. Umetsu reported the inferred distribution of dark matter in galaxy clusters. As for theories, we have heard about the possibility of detection in colliders from Roszkowski, indirect detection with cosmic ray from Marfatia, axions from Sikivie, gravitinos from Covi and gravitational instabilities from Bernardeau.

Soon after matter dominance began, as the universe cooled down, protons and electrons recombined to form hydrogen atoms. Photons kept being scattered in plasma before recombination, but now can move straightforward. Photons released at recombination are actually observed as CMB. Correlations among photons from different directions make it possible to determine parameters describing our universe with precision. As Dunkley and Hazumi forecasted, more detailed information about our universe will be obtained in the near future. For example, we can constrain models of inflation. Moreover, as Brandenberger noted, there is a possibility to observe evidence of cosmic strings formed in the early universe.

Until this point, the universe expanded with deceleration due to its gravity. Surprisingly enough, observational data of CMB and distant supernovae indicate that the current expansion of the universe is accelerating. If Einstein's theory of general relativity is right, then this implies that the universe is filled with an unknown energy sourcing some sort of anti-gravity. Does this mysterious energy called dark energy really exist? What is it then? If relativity must be modified, then how so? This is one of the most

significant mysteries in cosmology. As Miyazaki and Murayama, reported, promising observational projects were recently launched in Japan. In theories, Chen and Starobinsky gave talks on the cosmological constant problem and  $f(R)$  gravity, respectively.

Following the cosmic history, we finally reach the present time — a fortunate time for cosmology, when we can expect new observational/experimental data one after another. Apart from the observations and experiments already reviewed above, Asai reported the status of LHC and Roulet reported the observations of ultrahigh energy cosmic rays. Related theory talks were by Kim on string theory particle physics models and by Xing on cosmic neutrino oscillation, respectively. Another observational talk was given by Murphy on quasar observation. His result indicates spatial variations of physical constants in a distance of cosmic scale and will be a historical discovery, if confirmed in the future.

As we have seen, cosmology is full of mysteries and problems to be tackled. We had not only the invited talks but also about 100 contributed talks and about 100 posters, and many exciting subjects were presented there. Discussions among participants were active, and it seems that some new research projects began. We hope that communications and discussions during this conference will lead to new development of cosmology research. Finally, members of the organizing committee would like to thank Dr. Masao Horiba for his generous support through the Horiba International Conference grant. We are grateful to the JSPS Core-to-Core Program, "International Research Network for Dark Energy," and the Asia Pacific Center for Theoretical Physics for their financial support, and the Physical Society of Japan and Global COE program for their approval.



## IPMU Interview

# with Junichiro Kawaguchi

Interviewer: Edwin L. Turner

### Hayabusa: High-risk high-return mission

**Turner:** Let me start by congratulating you on the amazing success of this mission which has commanded the whole world's attention, astonishment and admiration.

**Kawaguchi:** Honestly, it's been amazing — I was just very fortunate.

**Turner:** The thing that struck me the most about the Hayabusa mission compared

to other space missions with which I have some familiarity, mostly at NASA, is the very high

Junichiro Kawaguchi is Research Director of Department of Space Systems and Astronautics, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). He is also Program Director of the Lunar and Planetary Exploration Program Group as well as Project Manager of the asteroid explorer HAYABUSA mission. He received a Doctorate in Engineering from the University of Tokyo in 1983. He became an Assistant Professor at ISAS in the same year, and a Professor in 2000. His specialties include flight dynamics for exploration spacecraft, and attitude and orbit control.

tolerance for risk — your willingness to accept the possibility of failure. Was it a conscious decision to take that sort of courageous or bold approach?

**Kawaguchi:** Actually, it was full of risks. It was a kind of high-risk, high-return mission. In 1995 we proposed the mission to the government when our organization was part of the Ministry of Education. At that time, the main body of the present JAXA was NASDA, and it was separate from the government. Since our organization was dedicated to research and development, the mission was proposed as a form of research. The government accepted the proposal and endorsed the project, even though it was a single-role mission — a technological demonstration of ion engine propulsion. Our minimum success criterion at that time was to get the ion engine to work for just one thousand hours. Also everything in the mission occurred in sequence. That meant that if something failed in the middle, the subsequent portions would be lost. So that was a very



big risk, and it was already noted and acknowledged by the government when we proposed the mission. So the government accepted a certain amount of risk.

**Turner:** And of course there were many close calls. Was there any sort of formal mission failure assessment? Did you actually have an engineering assessment of how likely you were to get, say, the sample return which was the ultimate step, I guess?

**Kawaguchi:** No such rigorous process was performed. There was a kind of notional and qualitative discussion about the mission that consisted of the first ion engine propulsion, autonomous touch-down and sample collection, and also the re-entry of the vehicle. Supposedly, everything had around a fifty percent chance of success, so the overall possibility of completing the mission was extremely low, right? We were aware of that, and the government also noted it. To be honest, even we were not sure that the mission could be completed. So that was a major challenge.

**Turner:** I very much admire the courage of doing that, because although it is possible to define mission success as testing the ion engine, I am sure after you have devoted many years of your life, and many people have also devoted years of their lives, to the work you really are very anxious to have full success.

**Kawaguchi:** Right, thank you.

#### Recovery of lost communication: a miracle

**Turner:** I also wanted to ask you about the high drama of this mission, so many almost disasters, so many brilliant recoveries! What would you say was the most satisfying success? When did you feel the best? About what event?

**Kawaguchi:** There were a few occasions, but ultimately it was when the capsule was recovered. However, on our way to re-entry, we lost all contact with the spacecraft for five or six weeks at one stage. So it was also when we received a radio signal from the spacecraft after the hiatus in communications of around seven weeks.

**Turner:** That was because of loss of pointing of the antenna?

**Kawaguchi:** No, the whole spacecraft and system were down. We gradually turned on the instruments one by one, and attempted to transmit various commands to the spacecraft. It was kind of a miracle even to us. That was one major instance. The next one was when we were able to restart the ion engine by devising a new configuration of the ion engine system.

**Turner:** Yes, I read about that. Amazing!

**Kawaguchi:** When that

Edwin L. Turner is a Professor of Astrophysical Sciences at Princeton University. He is also a Visiting Senior Scientist at IPMU. His research interests extend over exoplanets, astrobiology, cosmology, gravitational lensing, quasars, and statistical problems in astrophysics.



combination actually worked, we realized that we might be able to get the spacecraft to return to Earth. That was the second instance.

**Turner:** Great. I guess the partner question must be what was the most disappointing failure or loss on the mission?

**Kawaguchi:** The highly sophisticated technology, the ion engine, the autonomous navigation guidance, and also the re-entry worked very well, which probably came as a surprise to us. However, if we look at things such as the reaction wheels, which are a kind of low-level technology, those are the instruments that failed during the journey. That was very disappointing. We did not expect that such basic things would be subject to failure — extremely disappointing.

**Turner:** What about the little robot that was going to hop around on the asteroid?

**Kawaguchi:** Right. We were supposed to jettison the robotic lander while the spacecraft was above the surface. We intended to make that happen when the spacecraft actually touched down. We thought we should avoid such a complicated operation whereby the robotic lander would be separated

prior to such a major event. However, at the time, our navigation control skills were not ready to make that separation occur. That was our fault. The lessons learned will be incorporated in the next mission. In addition, the sample collection projectile did not fire. When the spacecraft tried to pick up the sample from the surface, it was intended to shoot a projectile to the surface. But the projectile was not actually shot due to a programming failure. That was also the result of human error.

**Turner:** Was there anything in your involvement with the mission that particularly surprised you, any event that you just never imagined happening?

**Kawaguchi:** We actually adopted the appropriate measures for all difficulties and incidents. We thought that they should work based on certain assumptions, even when the restoration of communications was actually planned. We thought about what boundaries and what areas our measures could work for. However, there was no guarantee that our assumptions were correct. Whether or not those assumptions were actually correct was not something that could be controlled by humans or by our project itself. So we believe we had plenty of good fortune.

### Interplay between science and engineering in space missions

**Turner:** In such space missions there is usually some interplay between science and engineering considerations. So the scientists would like certain sorts of data, and the engineers have certain constraints and practical considerations. The interface between these two can be a very complex and delicate balance. How was that handled for the Hayabusa mission?

**Kawaguchi:** This was proposed as an engineering mission and a technology demonstration. If we had just wanted to perform the technology demonstration, we would not have had to actually fly to the asteroid. So ion engines could have propelled the spacecraft just within the vicinity of the Earth, and re-entry could have occurred from that point. However, even a technology demonstration mission should accompany or take advantage of the flight opportunity to perform scientific feats. That was our intention. So we decided to actually undertake the space flight to the asteroid. But this was just for our case. There are two types of missions: science-driven and engineering-driven missions.

Based on my personal experience over probably 30 years, my impression is that science can be performed within engineering missions.

Some scientists would say that the mission should be driven by scientific purposes, and request the technology required to that end. However, sometimes the technology is not adequate or is not mature enough. In that case, the planned scientific mission may be threatened with cancellation. The space business is extremely expensive and involves significant investment from the government. To ensure that the missions are performed safely, all science missions need to be planned by looking at the engineering foundations. That means that scientists should not request excessively complicated missions. So an engineering-driven mission is a very good way of doing things, in a sense. That is what I think.

**Turner:** In this particular case, I guess the science driver of visiting an asteroid introduced a serious engineering complication of doing operations with a long time delay for the signal travel time. Did that make the operation significantly more challenging from an engineering sense?

**Kawaguchi:** Yes. Even from an engineering perspective, that longer communication time makes exploration or scientific observation difficult. However, what we realized is that the people, operators and researchers, can easily become accustomed to performing such operations. At the beginning of our stay near the asteroid, we actually



The Japanese asteroid explorer Hayabusa, launched on May 9, 2003, arrived at asteroid ITOKAWA in September 2005. This artist's image shows Hayabusa's approach to ITOKAWA (courtesy: Akihiro Ikeshita). Hayabusa touched down on the surface of the asteroid and collected soil samples. It returned to the Earth and re-entered the atmosphere above the southern Australia sky on June 13, 2010.

had a great deal of difficulty. However, it was handled gradually. We believe that even at a very great distance, the operations of that mission were able to be performed. It was not such a major difficulty.

**Turner:** So you learned something.

**Kawaguchi:** We learned a great deal.

**Turner:** What was the time delay, roundtrip?

**Kawaguchi:** It was approximately 35 to 40 minutes — which is still not particularly large — but if some spacecraft goes farther away in the next five to six years, the travel time will be significant.

**Turner:** Yes, that is going to be a major issue for exploration of the Solar System. Is there anything major that you would do differently if you were doing the mission over again, either before launch or after launch, not about specific problems but as far as overall mission design or mission choices? Were you happy in the end? Of course in the end it was a big success, so you must be pretty happy.

**Kawaguchi:** As of now, I am relatively satisfied, regardless of how seriously the spacecraft was damaged, because the spacecraft was

able to survive and return home. That means that we are able to say which portions need to be more rigid and should be compensated for in subsequent missions. This is a significant advantage. If the mission had been interrupted partway through, we would not be able to say this.

**Turner:** So, the Hayabusa mission must now own several world records. The sample that was returned must be the most distant material ever brought back to the Earth.

**Kawaguchi:** We hope so. Some of the detailed results of the analysis will probably be available in a few months. Still, we have to wait for those results. Even though what we were able to get was very minute and consists of only small particles, I am sure that some of the particles will contain compounds from the asteroid's origin.\*

**Turner:** There was already a publication of major results in a special issue of Science Magazine, in 2005 or 2006, from the data that was radioed back by telemetry. Will there be a similar publication of a large amount of results from the analysis of the returned sample?

**Kawaguchi:** I think so. What will come out early next year will probably only be the initial results of the analysis. But that will probably be a new set of results that can be shown to the world. In addition, we plan to issue an AO (announcement of opportunity) to the world to solicit proposals. We will

distribute samples and results to scientists.

**Turner:** That means that scientist around the world would have an opportunity to study the material?

**Kawaguchi:** That is correct, if a number of particles are obtained.

#### Dream come true

**Turner:** I would now like to ask you a few slightly more personal questions. To lead such an amazing mission of exploration seems like an almost romantic development in life. Did you ever, when you were young, a child or a young man, imagine that you would get to do such a thing?

**Kawaguchi:** It was my dream. The time when I was a child and while I was at primary school fully overlapped with the Apollo, or Gemini, or Mercury... with the Gemini and Apollo era. We were provided with a large number of opportunities. The Russians and NASA were in competition in the space race during the Cold War. I experienced actual real-time TV relays from the surface of the moon.

**Turner:** I remember it vividly.

**Kawaguchi:** That was a major historical event, and I was actually greatly impressed by it. However, the Apollo 11 mission took place in 1969, and one of the first small Japanese satellites in the lowest orbit was launched the following year. Even though our satellite launch made

Japan the fourth country in the world to reach orbit, it still meant that we were ahead of the rest of the world. However, the gap between Japan and NASA's or Russia's activity was enormous. I wondered what we could do in terms of space exploration. And I was skeptical about the future of the Japanese space development program while I was in high school. But I was extremely interested in space exploration. Although there were still significant uncertainties, I decided to go to post-graduate school to undertake research into space development. During this time, I had an opportunity when Japan was attempting to launch the first interplanetary probe to Halley's Comet in 1985. That was a major trigger for me to change my point of view and take a different approach. What I mean is that I had been skeptical up until then, but beyond that point, I made a decision to devote myself to space development. The biggest events that affected my life were Pioneer 10 and Pioneer 11, Viking 1 and Viking 2, and Voyager. Those were the deep space missions that really gave me a true sense of how accurately those spacecraft were navigated and guided to their destinations. That was another significant area of impact on my life. So I started thinking about remote or autonomous automation, or control, or guidance. Controlling a spacecraft to an extremely

\* This interview was held on October 16, 2010. Later, JAXA announced identification of the origin of the particles brought back by Hayabusa. They have been identified as rocky particles, and most of them were judged to be of extraterrestrial origin, and definitely from Asteroid Itokawa. See [http://www.jaxa.jp/press/2010/11/20101116\\_hayabusa\\_e.html](http://www.jaxa.jp/press/2010/11/20101116_hayabusa_e.html).

distant location, making that spacecraft perform robotically and autonomously, and then making it fly back to Earth is exactly what I wanted to do. Years later, my dream truly paid off.

**Turner:** It is wonderful that you can have a life dream that comes true.

**Kawaguchi:** Yes, I was quite fortunate.

**Turner:** And to reach out and touch an asteroid is an amazing dream. And your dream really caught on with the public even throughout the mission and certainly since the mission ended. Hayabusa has had a tremendous following in the public. I think maybe the Mars landers might have been similar and trips to the Moon, but in many ways this is one of the most popular space missions ever.

**Kawaguchi:** Especially in Japan.

**Turner:** All over the world, but especially in Japan. Did you expect that? Does that seem surprising to you or natural?

**Kawaguchi:** I had scarcely imagined this happening. I was not planning to do this, to produce this reaction from the public. But we tried to make our activity transparent to the outside world, especially when we performed touch-down events — through the internet and the readings of the transmitter, what we did was shown just as it was. And for the return journey and re-entry we did the same thing. So everything could be clearly seen from the outside.

### Hayabusa imparting a feeling: not just a machine, but an actual falcon

**Turner:** There is something about the going out and coming back that gives the whole mission a sort of human emotional tone. It is like someone going off from his or her home and having a great struggle and then returning, almost like the plot of a novel or a folktale. It is easy, I think, for people to relate to Hayabusa in emotional terms. Of course as professionals, engineers or scientists, we understand that it is just a machine, just like a tape recorder or cell phone or automobile. But at the same time, it is easy to feel that it almost has a personality — in English we would say, anthropomorphize the spacecraft. Did the operations team do that to some extent? Did you begin to feel like Hayabusa was not just a machine but an actual falcon?

**Kawaguchi:** Before the launch, while the spacecraft was under development, we did not have that feeling. However, right before the launch, we had not expected it, but some musicians composed some jazz tunes. They issued a CD and they shared with us what they were feeling and what the mission was. By composing jazz tunes, they imparted the feeling that the mission was not just on a machine or a spacecraft. It would return like a baby to the ground. They had already noticed that, but we

did not have that impression. However, after the launch, the spacecraft was fully equipped with highly sophisticated autonomy. Autonomy can be programmed. So we had accumulated numerous rules that were programmed into the spacecraft. Without this autonomy, even ion engines could not be driven. So many, probably hundreds or thousands of rules, gradually accumulated in the spacecraft. We had to count on the fact that the rules would be followed autonomously by the spacecraft. It meant that, for seven years, we had *raised* the spacecraft. Gradually the project team began to think that it was not a machine, but almost a child that we had raised.

**Turner:** You *raised* it! I think that is a very natural human reaction. I imagine during the mission, you must have spent much or most of your time working on this particular mission itself. I know you are also director of the JAXA Centre for Space Exploration. How are you spending your time post mission? Or how are you looking towards its end? Or what are you looking forward to in the future?

**Kawaguchi:** First of all, the next mission will be undertaken by the next generation so that we are able to increase the number of specialists who can carry out this kind of activity. The transfer of that technology, knowledge, and the like is a very important aspect of

nurturing the next generation. I will not actually be concretely involved in the next mission. However, I can work as an adviser. Supposedly, I was the first generation; Hayabusa's first generation was asked to build and operate a spacecraft; that was probably easily done. However, it will not increase the strength of the community of the next generation. I still probably have another 8 to 10 years before my retirement. I am attempting to propose the next mission, which may not be readily endorsed by the government. But proposing new missions and new programs is what we have to do. I hope the project team will have another generation that will be responsible for that.

**Turner:** My last question is about the name "Hayabusa." I understand it is a kind of bird of prey which in English is called a falcon. How was that chosen?

**Kawaguchi:** It comes from the way the spacecraft picks up and takes hold of the samples. Hayabusa, the falcon, makes a steep descent and touches down, then seizes its prey. The work undertaken on the spacecraft and the sampling is also carried out using the touch-down and go method. That is why we named the spacecraft Hayabusa, the falcon.

**Turner:** Very interesting. It has been a wonderful pleasure for me to hear about all of this directly from you. It is certainly a remarkable story. Thank you.

# News

## IPMU Takes Part in 2010 Open House at UT Kashiwa Campus

An open house on the Kashiwa Campus of the University of Tokyo was held on October 29 and 30, 2010. It was the first occasion for IPMU to open its building to the public. Panels showing the IPMU research activities and a newly edited video to introduce IPMU were presented on the first floor. In the lecture hall, the Head of the IPMU's International Relations Section, Midori Ozawa, spoke about "Behind the Scenes of Hosting Foreign Researchers" on October 29. This was followed by a Japanese play – a parody of the Japanese folktale *Momotaro*, by nine IPMU's foreign researchers – which met with hearty laughter and applause from the audience. The next day, the IPMU Principal Investigator Ken'ichi Nomoto gave a lecture entitled "Evolution of the Universe Probed by Supernovae." Also, on the first day, a mascot character of Chiba prefecture, Chiba-kun, visited the IPMU (see a photo on page 3). A total of 630 people visited the IPMU during the two days.



A scene of Prof. Ken'ichi Nomoto's lecture.



Japanese play by IPMU's foreign researchers.

## IPMU Jointly Hosted Program to Encourage Female Students to Study Science "Look into the Future!" at Kashiwa Campus

Since 2009, this program has been undertaken by S&T related graduate schools and institutions, including the IPMU at the University of Tokyo (see page 25 of the IPMU NEWS No. 7). This year, together with the Graduate School of Frontier Sciences and the Institute for Solid State Physics, the IPMU hosted "Look into the Future!" on October 30, during the 2010 Open House on the Kashiwa Campus. In the morning, around 60 female junior high school and high school students were divided into three groups, each visiting one of the three hosts. A group of around 20 students participated in a workshop at the IPMU "Let's Fathom the Enormity of the Universe!" organized by an IPMU postdoctoral fellow Masaomi Tanaka. They enjoyed the first experience in calculating the size of the Universe by themselves. In the afternoon, the three hosts jointly organized a panel discussion among female researchers as panelists. The participants also enjoyed conversations over tea during the break. This event was a good opportunity for the participants to get a sense of the appeal of research and of the life of a researcher.



## IPMU Director Murayama Gave a Public Lecture in SpaceExpo "SORAHAKU 2010"

SpaceExpo "SORAHAKU 2010" was held from October 29–31, 2010, at the Science Museum located in Kitanomaru

Park, near the Imperial Palace in Tokyo, and IPMU Director Hitoshi Murayama gave a public lecture entitled "Will the Universe Ever End?" on October 31.

The aim of this event was to inspire the hopes, dreams, and curiosity of children for a new era of science and technology, by relating two different fields of study—Astronomy and Environmental Energy. A total of 31,627 people visited SORAHAKU 2010 over three days.

## 4th IPMU-ICRR Joint Public Lecture: "Travelling the Universe"

On October 14, 2010, the fourth IPMU-ICRR (Institute for Cosmic Ray Research) joint public lecture entitled "Travelling the Universe" was held at the Koshiba Hall on the Hongo Campus of the University of Tokyo, with an audience of about 130 people. IPMU Associate Professor Shinji Mukohyama gave a lecture entitled "The Universe beyond Four Dimensions," and ICRR Assistant Professor Hiroko Miyahara gave a lecture entitled "Climate of the Universe and Climate of the Earth." After the lectures, there was a long discussion session between the two lecturers and the audience in which many audience members ardently asked many questions, which the lecturers answered.



## IPMU Participates in Science Agora 2010

Science Agora 2010 was held from November 11–21, 2010 at the Tokyo International Exchange

Center in Tokyo Academic Park in the Tokyo's waterfront region, Odaiba. It is an open "place of assembly," where science catalyzes interaction and stimulates discussion among participants with diverse backgrounds. In this event, the five WPI centers, including the IPMU, and Japan Society for Promotion of Science (JSPS) jointly organized a workshop entitled "Let's Think Together about Japan's Future Strategy," on November 20. Yuichi Takayanagi, Director of Tamarokuto Science Center, served as a facilitator, and four panelists well versed in the arenas of science in the world made presentations and discussion about what are needed now for the sake of Japan's future science and technology. Questions from the audience were taken into account in the discussion.

#### The SuMIRe Web Site Opened

The web site <http://sumire.ipmu.jp/> has been launched in order to publicize the purposes, outcomes, and the like of the "SuMIRe (Subaru Measurement of Images and Redshifts)" project. IPMU Director Hitoshi Murayama is the core researcher of this project—one of the 30 research projects selected by CSTP (Council for S&T Policy, Cabinet Office of Japanese Government) last year and supported by FIRST (Funding Program for World-Leading Innovative R&D on Science and Technology), see IPMU NEWS No. 10, page 20.

#### The 25th Nishinomiya-Yukawa Memorial Prize Awarded to Eiichiro Komatsu

Eiichiro Komatsu, Professor of Astronomy at the University of Texas at Austin and IPMU Joint Senior Scientist, was awarded the 25th Nishinomiya-Yukawa Memorial Prize for "Critical Tests of Theory of the Early

Universe Using the Cosmic Microwave Background Radiation." He contributed in constraining the cosmology parameters such as the age of the universe and dark energy, and thus the models of the early universe such as the inflation universe model using NASA's WMAP satellite. The award ceremony was held on November 4 at the Nishinomiya City Hall.

#### Tadashi Takayanagi Receives 2010 Yukawa-Kimura Prize

The Yukawa Memorial Foundation announced that this year's (4th) Toshiei Kimura Theoretical Physics Prize (Yukawa-Kimura Prize) has been awarded to IPMU Associate Professor Tadashi Takayanagi for his research on "Holography and Tachyon Condensation in Superstring Theory." His achievements in an exactly solvable matrix model for two-dimensional superstring, holographic calculations of entanglement entropy, and descriptions of tachyon condensations in superstring theory have been recognized by the award selection committee. The award ceremony will be held on January 19 at the Yukawa Institute for Theoretical Physics.

#### IPMU Senior Scientist Toshiyuki Kobayashi Awarded Inoue Science Prize

Toshiyuki Kobayashi, Professor at the Graduate School of Mathematical Sciences, the University of Tokyo, and IPMU Senior Scientist, won the 27th Inoue Science Prize for his contribution to the "analysis of infinite-dimensional symmetries." His outstanding achievements in the creation of a discontinuous group theory that goes beyond the framework of Riemann geometry, the invention of a fundamental theory of a discrete branching rule in the representation

theory in infinite dimensions, and the original contributions in anomalous unitary representation and non-commutative harmonic analysis, have been recognized as having significant impacts in many areas of mathematics and leading to the creation of new research areas. The award ceremony will be held on February 4, 2011.

#### Fuminobu Takahashi Receives 2011 PSJ Young Scientist Award

IPMU Assistant Professor Fuminobu Takahashi won the 5th Young Scientist Award of the Physical Society of Japan. He was selected as an award recipient in the division of cosmic-ray physics and astrophysics for his three articles, "Gravitino Overproduction in Inflaton Decay," "The Gravitino Overproduction Problem in the Inflationary Universe," and "Inflaton Decay in Supergravity." The award ceremony will be held on March 25, 2011 at the PSJ 2011 Annual Meeting.

#### An Article by Orland and Reffert Selected for the Highlights of 2009 and 2010 of *Classical and Quantum Gravity*

The Editorial Board of *Classical and Quantum Gravity (CQG)* selected the article "The renormalizability of Horava-Lifshitz-type gravities" by IPMU postdoctoral fellows Domenico Orlando and Susanne Reffert (<http://herald.iop.org/CQG/m176/jip/link/4076>) as one of the journal's Highlights of 2009 and 2010. *CQG* is an established journal for physicists, mathematicians, and cosmologists in the fields of gravitation and the theory of spacetime. The subject of their recognition is exactly what the IPMU emphasizes, namely, that a fusion of physics and mathematics is the key to solving the mysteries of the universe.

### The President's Council of the University of Tokyo Visits IPMU

The President's Council of the University of Tokyo aims at receiving advice and support from world leaders in various fields to help increase the global prominence of The University of Tokyo. The Council members have diverse cultural and career backgrounds, representing 15 nationalities.

On November 19, 2010, President Hamada and nine members had a Council meeting on the Kashiwa campus, and after the meeting, members visited IPMU. They listened to Director Murayama's presentation about the outline of IPMU and had an informal discussion with IPMU researchers.



### The IPMU Director's Book "What Is the Universe Made of?" Sells Well

A Japanese publishing company, Gentosha, Inc., published IPMU Director Murayama's book written for the layman, "What Is the Universe Made of?—Solving the Mystery of the Universe with Particle Physics." It is an introduction to particle cosmology, addressing such questions as "How did the universe begin?" "Why do we exist at all?" and "What is the fate of the universe?" from the viewpoint of particle physics. As of this writing, at the end of December 2010, more than 220,000 copies of the book have been sold. Director Murayama donates all the proceeds from the sales of this book to IPMU in support of its activities.

### Santa Claus Family is Coming to Dongri from IPMU

Following last year's visit, IPMU Professor Mark Vagins visited Donguri Nursery School on the Kashiwa campus again this year. He was accompanied this year not only by his wife Michiyo, but also their 6-month-old son Isaac, all dressed up in a Christmas costume. They handed presents to the children and sang songs with them. The children were delighted at the magical moment with the Santa Claus family.



### Focus Week on String Cosmology

A workshop entitled "Focus Week on String Cosmology" was held at IPMU from October 4–8, 2010. String cosmology is cosmology based on the superstring theory, a strong candidate as the ultimate theory. Various topics such as the beginning of the universe, the origin of cosmic inflation and observability in the cosmic microwave background were discussed.

### Workshop: The Observational Pursuit of Dark Energy after Astro2010

The goal of this conference, held at Caltech from October 7–8, 2010, was to have a timely discussion on the optimum way forward in developing various dark energy probes in light of the recommendations of the US National Academy of Sciences Decadal Survey "Astro2010," the report of which was released on August 13, 2010. Discussions were made on current, imminent, and planned ground-

and space-based programs exploiting the various techniques to constrain dark energy, in a convivial atmosphere made possible in the Hameetman Auditorium of the recently-completed Cahill Center for Astronomy and Astrophysics at Caltech.

### Workshop: The Evolution of Massive Galaxies and Their AGNs with the SDSS-III/BOSS Survey

The IPMU is a member institute of the SDSS-III/BOSS collaboration which is carrying out a massive spectroscopic survey of distant galaxies. This workshop, held at IPMU from October 25–28, 2010, brought together individuals from the BOSS community with a strong interest in studies of luminous galaxies and/or AGNs. There were fruitful discussions on topics ranging from the observational strategy and data analysis to scientific results based on the early data and future collaboration. Participants also enjoyed a Yakata-Bune (Japanese houseboat) cruise on the Tokyo Bay.

### Mini Workshop on Neutrinos

Although neutrinos have been studied extensively in the past, the neutrino remains one of the least understood particles. In particular, it may be related to the origin of matter and physics beyond the standard model. The purpose of this meeting, held at the IPMU from November 8–11, 2010, was to review the current experimental and theoretical understandings of neutrinos and exchange ideas and opinions. Three theorists and five experimentalists were invited and active discussions were held on the recent hot topics in this field.

### Workshop on Population III Gamma-Ray Burst

On November 15, 2010, ten astrophysicists gathered together at the IPMU to discuss prospects for detecting high-redshift gamma-ray bursts (GRBs). The farthest known GRB is located at  $z=8.2$ , when the universe was just 600 million years after the Big Bang. Planned satellites are expected to detect many such high- $z$  GRBs. At the meeting, the spectral energy distribution from radio to X-ray bands was discussed.

### Workshop: Supernova Explosions and Nucleosynthesis

The Origin of Matter and Evolution of the Galaxies (OMEG) Institute is a lecture series for nuclear astrophysics held by the Japan Forum of Nuclear Astrophysics. The 4th OMEG institute on "Supernova Explosions and Nucleosynthesis" was hosted by the IPMU on December 1, 2010. Two lectures were presented. Dr Christian D. Ott from Caltech gave a lecture on state-of-the-art computer simulations of supernova explosions, and Professor Friedrich-K. Thielemann provided a lecture on heavy elements nucleosynthesis beyond the iron-group.

### Future Workshop: IPMU Workshop on Black Holes

The "IPMU Workshop on Black Holes" will be held at IPMU from February 21–25, 2011. Black holes are the hot topic in a broad range of research fields, from astronomical observations to theoretical calculations in string theory and loop quantum gravity. It is now timely to bring together people with very different backgrounds to encourage interdisciplinary discussions, looking for new ideas and collaborations, and the workshop will address this necessity.

### IPMU Seminars

1. "Cosmological Aspects in Direct Gauge Mediation"  
Speaker: Yutaka Ookouchi (IPMU)  
Date: Sep 22, 2010
2. "A discrete approach to halo and galaxy clustering"  
Speaker: Vincent Desjacques (ITP Zurich)  
Date: Sep 24, 2010
3. "Quivers from Matrix Factorizations"  
Speaker: David Morrison (UC Santa Barbara/IPMU)  
Date: Sep 27, 2010
4. "Gauge theories and matrix models"  
Speaker: Robbert Dijkgraaf (University of Amsterdam)  
Date: Oct 01, 2010
5. "Lectures on the Bethe Ansatz: the physical system and the original Bethe solution for the XXX1/2 spin chain"  
Speaker: Domenico Orlando (IPMU)  
Date: Oct 01, 2010
6. "Dimer models and noncommutative crepant resolutions"  
Speaker: Nathan Broomhead (Leibniz University)  
Date: Oct 04, 2010
7. "Non-perturbative predictions of stochastic inflation and their dependence of initial conditions"  
Speaker: Alexei A. Starobinsky (Landau Institute)  
Date: Oct 07, 2010
8. "Lectures on the Bethe Ansatz: the Algebraic Bethe Ansatz for XXX1/2 spin chain"  
Speaker: Domenico Orlando (IPMU)  
Date: Oct 08, 2010
9. "Supergravity and string vacua in six dimensions"  
Speaker: Washington Taylor (MIT)  
Date: Oct 12, 2010
10. "General Gauge Mediation at the Tevatron and LHC"  
Speaker: David Shih (IAS)  
Date: Oct 13, 2010
11. "New Puzzles in Supermassive Black Hole Evolution"  
Speaker: Charles Steinhardt (IPMU)  
Date: Oct 14, 2010
12. "Quivers, Non-Commutative Geometry, and AdS/CFT"  
Speaker: Richard Eager (UC Santa Barbara)  
Date: Oct 14, 2010
13. "The magnetized universe via CMB"  
Speaker: Yifung (Bess) Ng (Case Western Reserve University)  
Date: Oct 14, 2010
14. "Gromov-Witten invariants and representations of infinite dimensional Lie algebras"  
Speaker: Todor Milanov (IPMU)  
Date: Oct 19, 2010
15. "The expanding Universe, PCA and supernova: an attempt to avoid dark energy parameterizations"  
Speaker: Emille Ishida (IPMU)  
Date: Oct 19, 2010
16. "The Magnetized Universe"  
Speaker: Rafael da Silva de Souza (IPMU)  
Date: Oct 21, 2010
17. "Nuclear Matrix Model"  
Speaker: Koji Hashimoto (Riken)  
Date: Oct 26, 2010
18. "Luminous Dark Matter"  
Speaker: Brian Feldstein (IPMU)  
Date: Oct 28, 2010
19. "Fefferman's program on conformal geometry and the Green functions of the conformal powers of the Laplacian"  
Speaker: Raphael Ponge (The University of Tokyo)  
Date: Oct 28, 2010
20. "Searching for binary supermassive black holes: from tens of kpc to sub-pc scales"



- Speaker: Yue Shen (CfA)  
Date: Nov 01, 2010
21. "Inflation, reheating and flat direction preheating"  
Speaker: Ahmet Emir Gumrukcuoglu (IPMU)  
Date: Nov 04, 2010
  22. "Physical processes on stellar dynamics (relaxation, dynamical friction, phase-space consistency, etc)"  
Speaker: Luca Ciotti (Bologna)  
Date: Nov 04, 2010
  23. "Tidal fields, stellar escape from galaxies in clusters"  
Speaker: Luca Ciotti (Bologna)  
Date: Nov 05, 2010
  24. "Lectures on the Bethe Ansatz: the physical spectrum for the XXX1/2 spin chain"  
Speaker: Domenico Orlando (IPMU)  
Date: Nov 05, 2010
  25. "Hydrodynamics, Holographic Optics and Negative Refractive Index"  
Speaker: Davide Forcella (ENS)  
Date: Nov 09, 2010
  26. "Five Founding Questions of IPMU"  
Speaker: Hitoshi Murayama (IPMU)  
Date: Nov 11, 2010
  27. "Lectures on the Bethe Ansatz: the XXZ spin chain and the  $SL(2|q)$  quantum symmetry"  
Speaker: Domenico Orlando (IPMU)  
Date: Nov 12, 2010
  28. "D-Brane Superpotentials: A Worldsheet Perspective"  
Speaker: Marco Baumgartl (LMU, Munich)  
Date: Nov 15, 2010
  29. "String-Loop Corrections to  $c-a$ "  
Speaker: Ruben Minasian (CEA/Saclay)  
Date: Nov 16, 2010
  30. "Lefschetz trace formula and the  $l$ -adic cohomology of the Rapoport-Zink spaces"  
Speaker: Yoichi Mieda (Kyushu

- University)  
Date: Nov 16, 2010
31. "The theory of arithmetic D-modules and characteristic cycles"  
Speaker: Tomoyuki Abe (The University of Tokyo)  
Date: Nov 17, 2010
  32. "The galileon"  
Speaker: Enrico Trincherini (SISSA, Trieste)  
Date: Nov 18, 2010
  33. "Suoersymmetric  $T^3$  Fibrations"  
Speaker: David Morrison (UC Santa Barbara)  
Date: Nov 18, 2010
  34. "Mirror Symmetry for Minuscule Varieties"  
Speaker: Alexey Bondal (IPMU/Aberdeen)  
Date: Nov 19, 2010
  35. "Lectures on the Bethe Ansatz: recent developments"  
Speaker: Domenico Orlando (IPMU)  
Date: Nov 19, 2010
  36. "Surface Operators and Wall Crossing"  
Speaker: Sergei Gukov (Caltech)  
Date: Nov 19, 2010
  37. "Local B-model and mixed Hodge structure"  
Speaker: Yukiko Konishi (Kyoto University)  
Date: Nov 22, 2010
  38. "Measurement of large scale fluctuation of CMB induced by large scale structure"  
Speaker: Atsushi Nishizawa (IPMU)  
Date: Nov 25, 2010
  39. "Dilogarithm identities in CFT and cluster algebras"  
Speaker: Tomoki Nakanishi (Nagoya University)  
Date: Nov 25, 2010
  40. "Calabi-Yau triangulated categories and Cluster tilting"  
Speaker: Osamu Iyama (Nagoya University)

- Date: Nov 29, 2010
41. "Calabi-Yau triangulated categories and Cluster tilting"  
Speaker: Osamu Iyama (Nagoya University)  
Date: Nov 30, 2010
  42. "Gerbes and Topological Actions in Field Theory"  
Speaker: Krzysztof Gawedzki (ENS-Lyon)  
Date: Nov 30, 2010

#### IPMU Komaba Seminars

1. "Quasi-modular forms and Gromov-Witten theory of elliptic orbifold  $P^1$ "  
Speaker: Todor Milanov (IPMU)  
Date: Oct 18, 2010
2. "Hamiltonian torus actions on orbifolds and orbifold-GKM theorem" (joint work with T. Holm)  
Speaker: Tomoo Matsumura (Cornell University)  
Date: Nov 26, 2010
3. "Borchers products in monstrous moonshine"  
Speaker: Scott Carnahan (IPMU)  
Date: Nov 29, 2010

#### Personnel Changes

Damien Easson, previously an IPMU postdoctoral fellow, has taken a position as an Assistant Professor at Arizona State University. He was at the IPMU from August 8, 2008 to December 15, 2010.

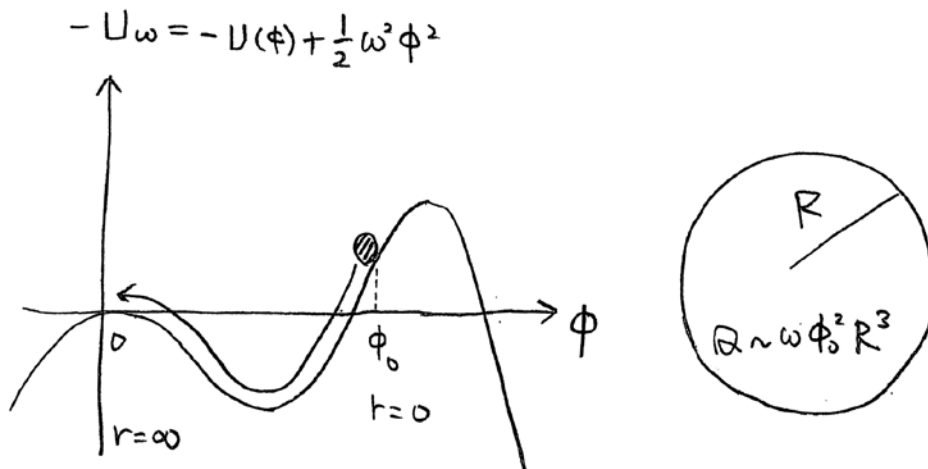
Also, Marcos Valdes, who was at the IPMU between November 13, 2008 and November 13, 2010, under the auspices of the JSPS's Postdoctoral Fellowship for Foreign Researchers, moved to the Scuola Normale Superiore di Pisa in Italy as a postdoctoral fellow.

## Q-ball

Masahiro Kawasaki

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

A Q-ball is a non-topological soliton solution which exists in theories of scalar field with global U(1) symmetry. As the name indicates, it is a spherical object with some conserved charge  $Q$ . The Q-ball has attracted much attention since it was found in the late 1990s that Q-balls exist in the supersymmetric standard model of particle physics and they can be produced in abundance in the early universe. In this case, Q-balls have a baryon and/or lepton number, as conserved charge, and are closely related to the matter-antimatter asymmetry of the universe. Q-balls can also account for the dark matter of our universe.



## ハイリスク・ハイリターン

IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし

探査機「はやぶさ」が小惑星イトカワへの7年間の旅から帰還したことに感動し想像力をかき立てられた人は多いでしょう。今号では IPMU の Ed Turner が「はやぶさ」のプロジェクトマネージャーである川口淳一郎さんにインタビューします。彼が大きなリターンを期待して高いリスクを覚悟し、勇気をもって「はやぶさ」を提案したことがわかります。そして見事にリターンしたのです。数々の技術的な問題を乗り越え、イトカワの微粒子を持って帰還しました。研究の面では、太陽系形成の歴史について知見が得られるでしょう。しかし「はやぶさ」が大気に入射したときに私たちが大喜びした理由は、ミッション・インポシブルが遂行された達成感の感激だと思えます。

実際、科学研究はドラマに満ちているのです。研究者のステレオタイプはこんな感じでしょう。瓶底眼鏡をかけ、いつも白衣をまとい、感情に乏しく無表情で、社会性がなく、危険な化学物質や微生物だらけの実験室を機械的に動き回り、規則を厳格に守って毎日同じパターンで生活する。

しかし、実際の科学者の仕事の様子を観察すると、皆さん驚かれます。リスクを覚悟で未開拓の分野に乗り込み、行き止まりに突き当たってがっかりし、トンネルの向こうに光が見えて興奮し、友達と一緒に笑い、何が正しいのか議論になり、難しい作業にどっぷりとはまり、全く新しい方向にたまたま気づき、世界のどこかのライバルと競争し、

しばしば仲間とチームで仕事する。そして科学は完全にグローバルです。会議、ワークショップ、スクール、講演と、どこに出かけていっても、近い分野の仕事に取り組む新しい友達が見つかります。

野本憲一主任研究員の解説でも、彼が、当時未開拓の地であった超新星爆発の謎の解明に乗り込み、今は標準になった理論を打ち立て、世界中の共同研究者と自分の理論の検証に取り組み、それが全く予想しなかった暗黒エネルギーの発見に繋がった様子を読むことができます。

柏キャンパスの一般公開2日目、台風にもかかわらず大勢集まった聴衆に、野本さんはこの物語を講演しました。皆さん魅了されていたようです。一般公開の初日には、千葉県のマスコット「チーバ君」が私のオフィスを訪れ、素粒子がどのようにして相互作用するか、私の解説を聞いていきました。そのときの写真をご覧下さい。



## 過去の超新星を使って宇宙の膨張を測る

### ティコ・ブラーエの超新星とそのエコーの観測

今から約12,000年前、私たちの銀河系のなかで星が一つ、大爆発を起こした。そのとき発せられた光は西暦1572年11月に地球に届いた。この新たな星は金星ほどに輝いた「客星」として、まず韓国そして中国で記録された。約1週間後、デンマークの天文学者ティコ・ブラーエが、この星をカシオペア座に発見した。望遠鏡のない肉眼観測時代の最大の天文学者と呼ばれ、正確に星の位置を記憶する能力に長けていたティコは、それが明るさや色に変化している新しい星「新星」であることにすぐに気づき、見えなくなる1574年3月まで明るさと色の変化を記録し続けた。「宇宙は変わることはない」とするアリストテレス以来の宇宙観の変革を迫る画期的なできごとであった。

その後、望遠鏡が発明され、1609年にはガリレオによって望遠鏡を使った天体観測が行なわれた。近年では技術の進歩によって、可視光以外の波長（電波、赤外線、X線、ガンマ線）でも天体を観測できるようになった。短期だが明るく輝く「新星」は銀河系外の遠方の銀河にも発見され、1934年、カリフォルニア工科大のバーデとツヴィキーは、遠方の特別に明るい「新星」を「超新星」と命名した。ティコの観測した星の位置には超新星の残骸が発見されて「ティコの超新星残骸」と呼ばれるようになり、特にX線や赤外線による観測などで、残骸中の元素の組成が調べられてきた（図1）。しかし、1572年の超新星の光そのものは、望遠鏡で観測する術はなく、その超新星の詳しい性質

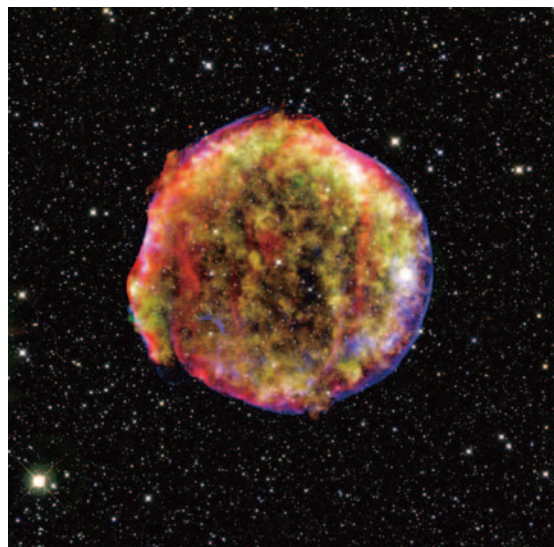


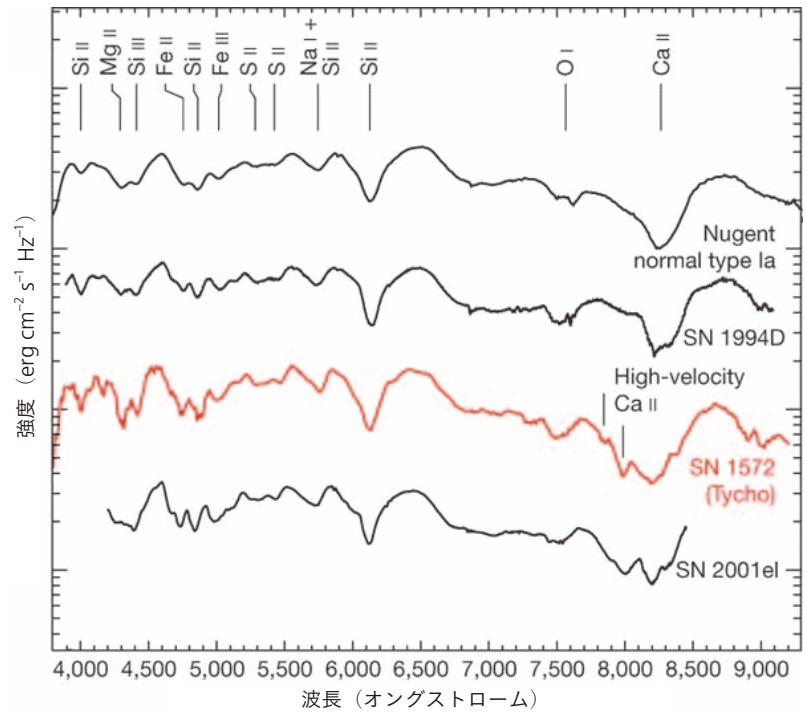
図1 ティコの超新星の残骸  
(マックスプランク天文学研究所提供)。

もわかりようがなかった。

ところが、436年たった2008年になって、ティコの超新星の正体を教えてくれるメッセージが宇宙から届けられた。運んできたのは「光のエコー」である。「光のエコー」とは、光源から出た光が、離れた場所にある星間雲に含まれるチリによって反射され、遅れて地球にやってくる現象をいう。遅れてやってきた光が運んでくるのは、ティコの超新星の爆発当時の過去の情報である。「光のエコー」は、いわば、過去を再現するビデオテープのようなものである。

光が次々とより遠くの物質に反射してやってくると、あたかも光が移動しているように見えることになる。この光の移動をスペインにあるカラアルト天文台

図2 ティコの超新星 (SN 1572) のエコーのスペクトル (赤線) と、いくつかのIa型超新星のスペクトル (黒線) との比較 (Krause et al. 2008 Nature 456, 617)。



での観測で確認し、2008年9月、国立天文台、数物連携宇宙研究機構 (IPMU)、マックスプランク天文学研究所の観測グループによって、すばる望遠鏡が向けられた。そして「光のエコー」を観測し、436年前には肉眼で見るしかなかった光を分光することに成功したのである。ティコ・ブラーエの目が見たのと同じ光が、遠回りして今到達し、強力な現代の望遠鏡によって、初めて分光観測できたということは、素晴らしいというしかない。

得られたスペクトル (図2の赤線) を、これまでの超新星のスペクトル (図2の黒線) と比べた結果、Ia型と分類される超新星のものと見事に一致した。スペクトルの谷間を作っている吸収線は、鉄、シリコン、マグネシウム、酸素などの元素のものと特定され、この超新星爆発がこれらの元素を大量に生成・放出したことが分かる。(ただし、宇宙に大量に存在しているはずの水素の吸収線が見えない。) さらに、Ia型超新星は銀河系内のものでも、数千万光年というはるか遠方のものでも、どれも極めてよく似ていることが確認

できる。

では、Ia型超新星とはどのような星が爆発したものなのか。私がIa型超新星の研究に携わり始めた1980年代の初めの頃は、図2のスペクトルがどの元素で作られているかも理解できていなかった。とにかく、水素は存在しない星の爆発なので、普通でない進化を遂げた星のはずである。太陽の2倍ほどの質量を持ったヘリウム星と白色矮星とが2大候補だった。白色矮星モデルが確立してきたのは、その後の観測と理論の進展による。

### 白色矮星とは

太陽のような恒星は、その中心で水素を燃やしてヘリウムを生成することで輝いている。中心付近の水素が燃え尽きてしまうと、外側のガスが金星軌道ほどまでふくれて赤色巨星になる。星の中心では、今度はヘリウムが燃えて炭素や酸素が生成され、やがてヘリウムが燃え尽きると、星の外側のガスはさらに地球軌道

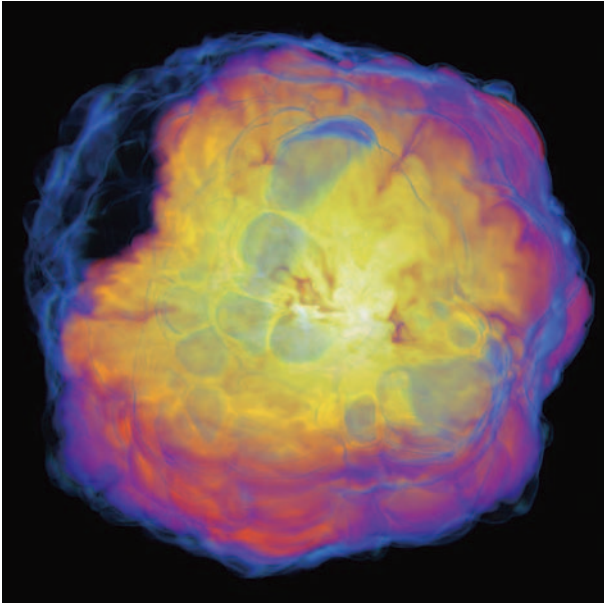


図3 白色矮星の爆発の3Dシミュレーション。カラーは内部で合成された鉄などの重元素を示す。(W. Hillebrandt 提供)

くらいまでふくらむ。最終的に、外側の層がはがれて惑星状星雲とよばれる星雲が形成される。中心に残された炭素と酸素からなる芯は、高温で地球ほどの大きさしかないことから、白色矮星と呼ばれる。

白色矮星は普通の星とは異なっている。普通の恒星は、ガスが熱運動し広がろうとする圧力によって、自らの重みで縮もうとする重力に対抗している。それに対して白色矮星は、電子が量子力学的な現象である縮退をすることによって重力に対抗している。パウリの排他律によると、ある特定のエネルギーとスピンの量子状態になれる電子は一つだけである。縮退した電子は低いエネルギー状態がほかの電子によって占められてしまうと、どんどん高いエネルギー状態にならざるを得なくなり、これによって重力に対抗する圧力（縮退圧）が生じるのである。

白色矮星は小さな星で、典型的な質量は太陽と同じくらいのものからその半分程度、半径は太陽の100分の1程度で地球とほぼ同じ大きさである。密度は非常に高く、角砂糖ほどの大きさでも重さが1トンもある。電子の縮退圧で重力とバランスをとっているが、

縮退圧で支えられる質量には「速度は光速を越えられない」という特殊相対性理論からくる「チャンドラセカールの限界質量」という上限がある。星の質量が限界質量に近づくと、中心密度が無限大に近づく。このことがIa型超新星の性質に重要な意味をもっている。

### 白色矮星の核爆発

白色矮星が単独で存在している場合、それはただ冷えていくだけである。しかし、白色矮星がほかの星と連星系を形成している場合は、その運命に大きな違いが生じる。連星系のなかには周期が一年程度かそれ以下というものがある。これだけ二つの星が接近していると、白色矮星の相手の星が進化し膨張したさい、そのガスが白色矮星の上に降り積もり、白色矮星の質量が増え、チャンドラセカールの限界質量に近づいていく。

チャンドラセカールの限界質量にぎりぎり近づくと中心密度が高くなり、炭素どうしが融合する核融合反応が始まる。狭いところに酸素と炭素が押し詰められている白色矮星は、ある意味で固体燃料の固まりみた

図4 Ia型超新星 SN 1994D (左下) (NASA提供)。



いなものなので、いったん火がつくと爆発的に反応が進行し、まさに炭素爆弾となる。そのシミュレーションの一例を図3に示す。

火がついた中心部分の温度は50億度から100億度までなり、ほとんどの炭素と酸素がニッケル56になる。このとき、中心以外の部分は冷たいままで1000万度くらいしかない。火の玉のような中心部分から上がった熱いニッケル56の泡が、まだ冷たいまわりの炭素を多く含む領域に触れると、そこでも炭素が爆発的に燃え、さらにそれが次の領域に伝わる。こうして、炭素が燃える波面が泡のような形を伴って、一気に星全体に広がっていく。ある条件下では、泡から衝撃波が発生して爆轟波となり、非等方な爆発を起こす。

中心で作られたニッケル56は放射性元素で不安定なため、半減期約1週間でコバルト56に崩壊し、それがさらに半減期78日で安定な鉄56に崩壊する。崩壊するときに放出される $\gamma$ 線は非常にエネルギーが高く、飛び散っていく周りのガスを励起して、光り輝かせる。したがって、超新星がどれだけ明るくなるかは、放射性元素のニッケル56がどれだけ生成されたかに

よって決まる。超新星の観測とは、宇宙で「鉄」が形成されつつある、正にその現場を目撃していることに他ならない。白色矮星は、その質量がチャンドラセカールの限界質量に近くなると爆発を起こすので、生成されるニッケル56の質量も太陽質量の約0.6倍とほぼ決まっている。そのため、超新星の明るさがほぼ一定になるのである。

### Ia型超新星の明るさと宇宙膨張の加速・減速

Ia型超新星は100億～1000億個の星からなる銀河全体に匹敵する明るさで輝くために、100億光年彼方のものも観測できる。そして、図2のスペクトルがほとんど同一のように、どれもほとんど同じ絶対的な明るさを示している(図4)。そのため、超新星の出現した銀河までの距離を測る良い「標準光源」として使われ、宇宙がダークエネルギーによって加速膨張していることを直接的に示す上で、非常に役に立った。

では実際に、宇宙膨張の加速はどのように見出されたのだろうか。図5の線は、宇宙の大きさを表す銀

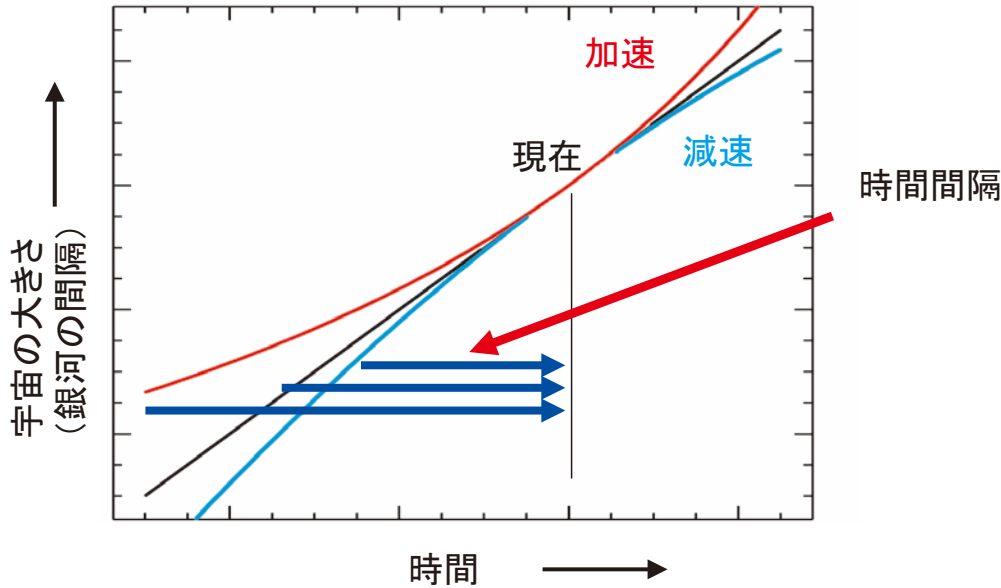


図5 膨張する宇宙のサイズと時間の関係。宇宙膨張が加速(赤線)あるいは減速(青線)される場合と、加速も減速もない場合(黒線)との比較。

河間の間隔(縦軸)が時間(横軸)が経つにつれて広がって、宇宙が膨張していく様子を模式的に示している。この線の傾きが膨張速度を示しているのも、もし宇宙膨張が加速していると赤線、減速していると青線のようなカーブを描くことになる。

また、この図5で、過去に放射された光の波長は、銀河間の間隔の広がりとともに長く(赤く)なり、現在の時点で、 $z$ だけ赤方偏移して観測されることになる。したがって、縦軸で、過去の宇宙が現在よりどれだけ小さかったかという大きさの比が、 $1/(1+z)$ に相当することになる。

そこで、もし宇宙膨張が加速していると、初期のころは現在より遅かった膨張のスピードが、だんだんと加速された結果、現在のスピードに到達したことになる。この場合、宇宙の大きさが、例えば現在の半分ころ(すなわち赤方偏移 $\sim 1$ )の時代の天体からの光が届くのにかかる時間は、加速がない場合より長くなる。これは宇宙の年齢がより古いことを意味する。したがって、加速がない宇宙と比べると超新星はより遠

くにあることになり、本来の明るさが同じでも暗く見える。

それに対して、宇宙膨張が減速している場合は話が逆になる。初期のころは膨張のスピードが現在より速かったので、同じ赤方偏移をもった超新星までの距離が、減速がない宇宙と比べると近いことになり、超新星の見かけの明るさが明るくなる。

### ダークエネルギー

図6の縦軸の「明るさのずれ」は、ある赤方偏移で観測された超新星が、加速も減速もない宇宙に出現した場合と比べて、暗ければ点は上にいき、明るければ下にくることを示す。この図にプロットされた超新星の明るさは、多数の観測データの平均値であるが、赤方偏移が0.5あたりでは、空っぽの宇宙よりも暗いと有意に主張することができる。

一方、赤方偏移が1.7あたりでは、超新星は明るく見えている。このことから、遠い過去においては宇宙



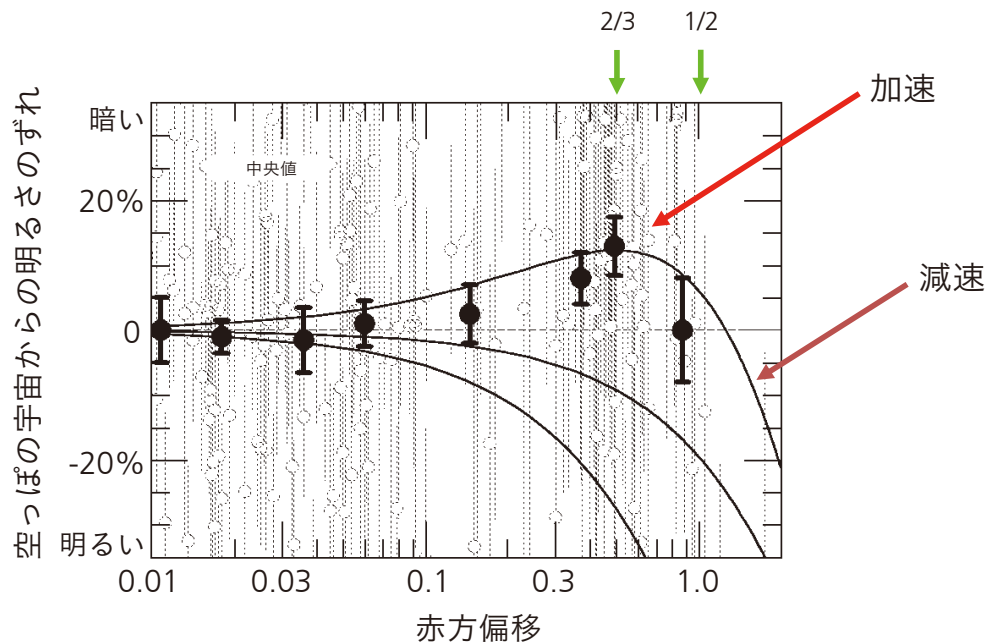


図6 赤方偏移の大きい遠方の超新星の明るさ。加速も減速もない空っぽの宇宙の場合の明るさのずれ(Tonry et al. 2003 Apr 594, 1)。

の膨張は減速していたが、宇宙が大きくなるにつれて、60億年ほど前から、膨張が加速に転じたという結論が得られる。

宇宙膨張が減速するのは、宇宙に含まれる物質が重力を及ぼす効果として理解できる。それが加速に転じたのは、「斥力」を及ぼす「反重力」源の効果重力の効果を上まわったためである。この斥力を及ぼすものの正体は不明なため、「ダークエネルギー」と呼ばれている。宇宙背景放射の観測など、ほかの観測結果と組み合わせると、現在の宇宙を構成するのは、約73%のダーク（暗黒）エネルギー、約23%のダークマター（暗黒物質）、そして、わずか4%のふつうの物質ということになる。じつに宇宙の96%がダークである(図7)。

このダークエネルギーの正体は何か、どんな状態方程式をもっているのか、アインシュタインの導入した定数なのかどうかは、物理学の根幹に関わる疑問である。この疑問に答えるためには、さらに詳細な観測と理論研究によって「精密宇宙論」を構築する必要がある。

る。すなわち、さらに遠方の超新星を多数観測することによって、Ia型超新星の性質が出現する銀河の種類や赤方偏移によって系統的に変わっていないかなどの点を調べて、系統誤差をもっと小さく

する必要がある。次世代の天文観測衛星、宇宙望遠鏡と地上の巨大望遠鏡をうまく組み合わせることで、精度のよい観測を積み上げていく必要がある。

IPMUでは、こうした観測研究と、理論的研究すなわちIa型超新星を生み出した連星系をつきとめ、その母銀河のタイプとの関係を明らかにし、爆発の異方性の効果や爆発による元素合成などをシミュレーションによって調べていくなどの研究とを組み合わせ、「精密宇宙論」の構築に向けて、Ia型超新星の正体に迫ろうとしている。

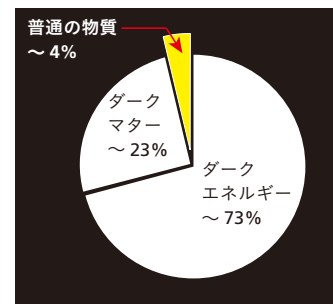


図7 宇宙の組成。

# Our Team

## 松本 重貴 まつもと・しげき 専門分野: 宇宙論

IPMU 准教授

宇宙の暗黒物質問題は、素粒子物理学のみならず天文学・宇宙論の分野においても重要な問題です。しかし、暗黒物質の存在は近年の宇宙観測により確立しましたが、その正体については未だ不明です。私はこの暗黒物質の正体について、標準模型を超えるテラスケールの新物理模型の観点から研究を行ってきました。具体的には、超対称模型や、リトルヒッグス模型、ユニバーサル余剰次元模型等の具体的な新物理学模型において、暗黒物質がLHCやILC等の加速器実験及び暗黒物質の検出観測等で、どのように検出され得るかについて調べてきました。今回IPMUに移ったことを契機に、暗黒物質の正体を、加速器実験や検出観測を用いて、新物理模型の詳細によらず決定する方法を確立したいと考えています。また、これらの研究に加え、



初期宇宙における相転移現象や非平衡過程等の素粒子論的宇宙論の分野においても、研究を行う予定です。

## 立川 裕二

たちかわ・ゆうじ 専門分野:理論物理学

IPMU 助教

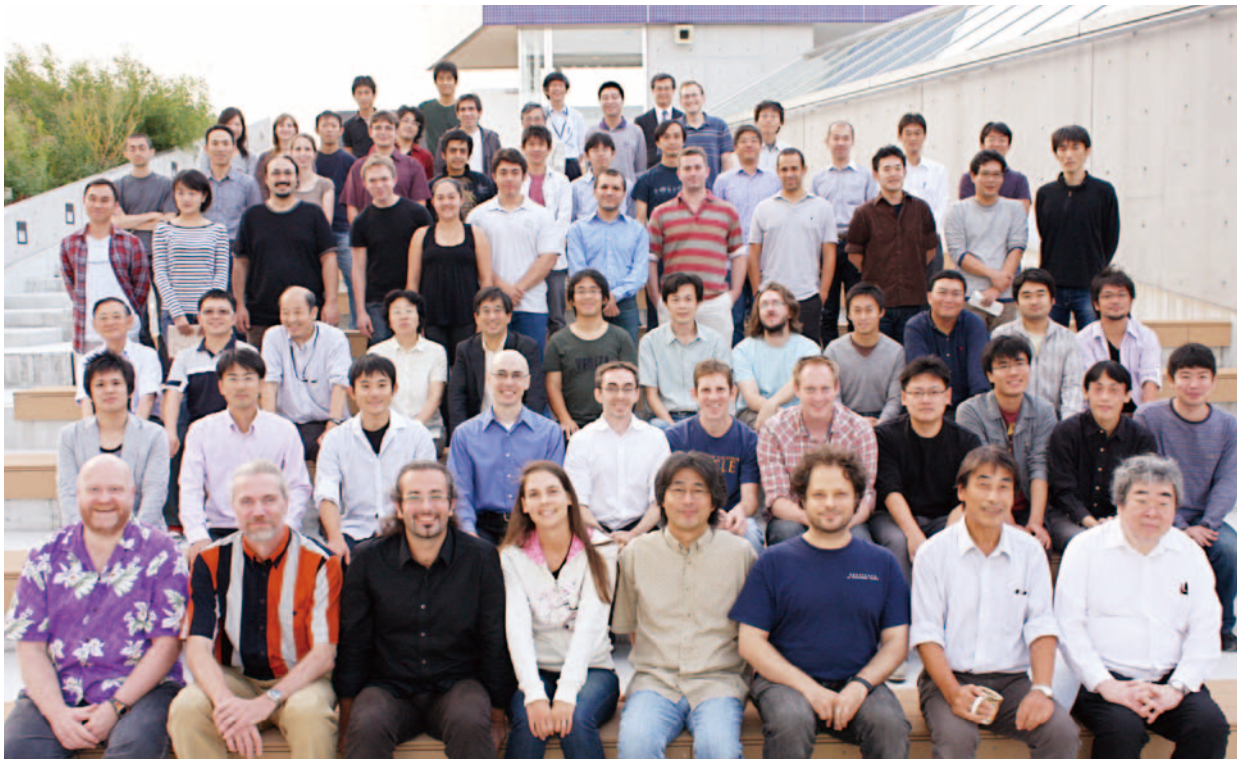


私の研究している超弦理論は、極微の世界を記述する量子力学と、強い重力を記述する一般相対論を同時に扱える数少ない理論のひとつです。また、自然の究極の構成要素を記述できる可能性のある最有力候補でもあります。しかしながら、正直なところ、私が超弦理論に魅かれる第一の理由は、それ自身の豊かな構造にあります。

弦理論の研究には、最先端の数学を使う必要があるだけでなく、その過程から新たな数学の一分野が生まれるということがこれまで何度もありました。例えば、弦理論の超対称な状態の構造を調べますと、代数幾何や表現論と深い関わりがあることが、最近徐々にわかってきています。

IPMU の物理の研究者の一人として、弦理論の鉤脈

から何か新しいものを掘り出し、それが同僚の数学者の皆さんによって磨かれてゆく、ということになることが理想です。そうして、「数物連携宇宙機構」の「数」学と「物」理の橋渡しになることができれば良いと思っています。



2010年10月にIPMUは3周年を迎え、研究棟の屋上に研究者が集まり、記念の写真を撮りました。

Our Team

## メリーナ・バーステン Melina Bersten 専門分野:天文学

博士研究員

私の主な研究対象は計算天体物理学と理論天体物理学で、特に超新星の研究を行っています。超新星は恒星進化の最終段階および銀河のエネルギー的進化、化学的進化と関係しており、天体物理学的に重要な意味をもつ研究対象であり、また、宇宙論でも距離の指標として重要な役割を果たしています。私は、重力崩壊型超新星爆発の流体力学的模型による計算と観測の



比較から、爆発を起こした恒星の物理的性質に関して、現在の知見を超える成果を得ることを目標としています。

## ガストン・フォラテリ Gaston Folatelli 専門分野:天体物理学

博士研究員

私の専門は超新星の観測天体物理学です。私がこのテーマに興味をもったきっかけは、Ia型超新星を宇宙の膨張の歴史を研究するために距離を測る強力な指標として用いたことによります。そして、距離の測定精度を向上させる手段として、分光と多波長測光を用いることに集中しました。この数年は、超新星を恒星進化論、爆発機構、および星間物質との相互作用と関



連した天体物理学的対象として理解することにも興味をもっています。そのため、私はあらゆるタイプの超新星爆発の早期探知観測に加わっています。

## アフメト・エミル・ギュムルクチュオル Ahmet Emir Gumrukcuoglu 専門分野:宇宙論

博士研究員

私が最も関心を抱いているのは宇宙のインフレーションで、中心的課題の一つは、新しい観測量を用いたインフレーションシナリオの研究です。例えば、統計的等方性の破れ、あるいは非ガウス性、またはその両方を用いれば、異なるモデルを区別する新たな判定基準が得られます。また、私は超対称理論のポテンシャルの平坦方向がインフレーション後の宇宙の進化に及ぼす影響についても興味を持っています。今進めている研究計画の一つは、平坦方向に凝縮した状態のプ



レヒーティング（大きな密度揺らぎが生じるインフレーションの終了期）の非線形的研究です。凝縮状態の急激な崩壊により、将来の実験で観測される周波数領域に重力波が発生した可能性があります。

## ヨハネス・シュムード Johannes Schmude 専門分野:理論物理学

博士研究員

私は幾何学とゲージ理論および超弦理論との関係に興味を持っています。これまで、私は主としてゲージ理論と超弦理論の双対性に関する問題、特にゲージ理論に基本表現に属する物質場が存在する場合について研究してきました。これらは超弦理論側では、一般化されたキャリブレーション\*によって特徴付けられるDブレーンを含む系として表されます。ちょうどキャリブレーションがDブレーンの物理を記述するのに用いられるように、超重力理論で記述される複雑な背



景時空を取り扱う上で、G-構造\*\*が基本的な概念として用いられます。

- \* キャリブレーションは、リーマン多様体上のある不等式を満たす閉微分形式
- \*\* ホロノミー群を一般化した概念

## サイモン・ウッド Simon Wood 専門分野:理論物理学

博士研究員

私は主として対数的共形場の理論を研究しています。共形場の理論は、角度を保存するが長さは保存しない変換に対して不変な量子場の理論です。この理論は超弦理論や統計力学に現れ、頂点作用素代数で記述することのできる豊かな数学的構造を有しています。対数的共形場の理論は標準的な共形場の理論を一般化したものであり、相関関数の対数的発散を許します。対数的共形場の理論の頂点作用素代数は、未だに僅かしか理解されていません。私は IPMU で、対数的共



形場の理論の頂点作用素代数とともに、その表現論の裏に潜む圏論的構造について、より良い理解を得ることを期待して研究を行います。

# 堀場国際会議 COSMO/CosPA 2010

向山信治 むこうやま・しんじ

IPMU 准教授

横山順一 よこやま・じゅんいち

東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター 教授、IPMU上級科学研究員

宇宙論・素粒子天体物理学の国際会議が、IPMUとビッグバン宇宙国際研究センターの共催により、去る9月27日から10月1日までの5日間に亘って、東京大学農学部弥生講堂一条ホールを主会場、小柴ホールおよび理学系研究科各教室を分科会会場として開催された。<sup>\*</sup> これは、欧州と米国でほぼ交互に毎年開かれてきたCOSMOと、台湾・韓国・豪州とアジア太平洋地区を巡回するCosPAという、二つの国際会議シリーズを一体的にホストした会議で、30ヶ国より290余名の出席を得た。以下では、29あった招待講演を宇宙史の順に紹介しよう。

宇宙は、過去にさかのぼると高温・高密度になり、分子はおろか原子も原子核もバラバラになる。さらにさかのぼれば、古典物理学では記述できない、量子揺らぎが支配的な世界となる。そこではアインシュタインの相対性理論も破綻し、量子論と相対性理論を融合する夢の理論、量子重力が必要になる。この会議は、新しい量子重力理論を提唱した、Horava氏の講演で始まった。

<sup>\*</sup> <http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/symposium/cosmocospa2010/index.php>

ここから現在に向かって時間を進めよう。量子揺らぎの世界を出た宇宙は、インフレーションと呼ばれる加速膨張によって急激に引き延ばされ、熱い火の玉宇宙に転じたと考えられる。インフレーションは、理論として美しいだけでなく宇宙背景輻射の観測結果を正しく説明するため、現代宇宙論の一大要素となっている。本会議でもインフレーションは主なテーマの一つだった。Silverstein氏の弦理論に基づく模型、高橋氏やStewart氏の超対称理論に基づく模型から、Kaloper氏による大きな場の模型についての議論、Senatore氏の有効理論に基づく観測量の議論まで、多くの講演があった。インフレーション直後の火の玉宇宙の温度については、浜口氏の講演があった。

インフレーション直後は、粒子と反粒子が同程度あった。私たちの体や地球などは主にバリオン粒子で作られているので、そこからバリオン粒子を余分に作る必要がある。バリオン生成と呼ばれるこの問題については、Buchmueller氏が講演した。その後の高温の宇宙では、ほとんどのバリオンは陽子と中性子であった。そこからどのように軽元素が形成されたか？ ビッグバン宇宙論は、この疑問に答えてくれる。元素合成と呼



ばれるこの題材については、Steigman氏の講演があった。

宇宙はさらに膨張し、その主な重力源は、輻射から物質に変わる。実は、宇宙の物質のほとんどは正体不明で、暗黒物質と呼ばれる。本会議でも暗黒物質について多くの講演があった。Mahapatra氏と小川氏は、暗黒物質の直接検出を目指す実験の現状と将来展望を報告した。梅津氏からは、銀河団中の暗黒物質の空間分布測定について報告があった。理論面では、加速器での検出についてRoszkowski氏、宇宙線による間接検出についてMarfatia氏、アクシオンについてSikivie氏、グラビティーノについてCovi氏、重力不安定性についてBernardeau氏が講演した。

物質優勢になったすぐ後、宇宙が十分冷えることで、陽子と電子が結合して水素原子を形成する。すると、それまでプラズマ中で散乱されてばかりいた光子が、真っ直ぐ進めるようになる。この時に解放された光子は、宇宙背景輻射として実際に観測されている。異なる方向からの光子の相関をとることで、宇宙を記述するパラメータをかなりの精度で決定できる。Dunkley氏や羽澄氏の講演にあったように、近い将来、宇宙についてのさらに詳細な情報が得られるだろう。インフレーションモデルを絞り込めるだけでなく、Brandenberger氏が講演したように、宇宙初期に形成された宇宙ひもの痕跡が見つかる可能性もある。

ここまでの宇宙は、自身の重力による減速を受けながら膨張してきた。驚くことに、宇宙背景輻射や超新星の観測は、現在の宇宙の加速膨張を示唆する。アインシュタインの相対性理論が正しいならば、反重力を生じる正体不明のエネルギーが宇宙を満たしていることになる。暗黒エネルギーと呼ばれる、この謎のエネルギーは存在するのか？ その正体は？ 相対性理論を修正するのならどうやって？ これは、宇宙論における最も重大な謎の一つである。宮崎氏とIPMUの村山機構長が講演したように、暗黒エネルギーの謎に挑むべく、日本でも強力な観測プロジェクトが立ち上がっている。理論面では、Chen氏が宇宙項問題について、Starobinsky氏が  $f(R)$  重力理論について講演した。

宇宙の歴史は、これで現在にたどりついた。現在は、新たな観測・実験データが次々に期待される、宇宙論研究にとって幸運な時期である。上述の観測・実験以外にも、大型加速器LHCについて浅井氏から、超高エネルギー宇宙線の観測についてRoulet氏から報告があった。関連する理論としてはそれぞれ、Kim氏の弦理論に基づく素粒子模型、Xing氏の宇宙からのニュートリノ振動についての講演があった。他の観測としては、Murphy氏からクエーサー観測の報告があった。宇宙規模の距離で物理定数が空間変化していることを示唆しており、もしも将来確立されれば歴史的発見となるだろう。

このように、宇宙論は、挑戦すべき謎や問題で満ちている。上述の招待講演だけでなく、約100あった一般講演や同じく約100あったポスターにも、様々な興味深い題材があった。参加者間の議論も活発で、新たな研究も芽生えたようである。本会議での交流・議論が、宇宙論研究の新たな進展につながることを願う。最後に、堀場国際会議制度により多額のご支援を下された堀場雅夫氏、そして日本学術振興会先端拠点事業暗黒エネルギー研究国際ネットワーク、アジア太平洋理論物理学センターの資金援助、日本物理学会とグローバルCOEの協賛に、組織委員一同、感謝の意を表したい。



## IPMU Interview

# 川口淳一郎教授に聞く

聞き手：エド・ターナー

「はやぶさ」はハイリスク・ハイリターンプロジェクト

**ターナー** 「はやぶさ」の素晴らしい成功、おめでとうございます。全世界から注目を集め、驚かせ、そして賞賛を得ました。

**川口** 正直なところ、びっくりするほど運が良かったと思います。

**ターナー** 私が割に良く知っている他の宇宙関係のミッション、主にはNASAですが、それと「はやぶさ」を比べてみて一番強く感じたことは、リスクの許容度が非常に高いこと、つまり失敗の可能性を

進んで受け入れたことです。そういった勇気のある大胆なアプローチは意図的な決定だったのですか？

**川口** 実際、リスクだらけでした。「はやぶさ」は、大きなリ

川口淳一郎さんは宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所 (ISAS) の宇宙航行システム研究系研究主幹・教授で、月・惑星探査プログラムディレクターを兼務すると共に、小惑星探査機「はやぶさ」のプロジェクトマネージャーとして、開発から打ち上げ、帰還までを指揮しました。1983年に東京大学大学院工学系研究科航空学専攻課程を修了し、工学博士。同年宇宙科学研究所助手。同研究所助教授を経て2000年に教授。主な研究対象は惑星探査機の軌道力学、航法・軌道決定論、姿勢・軌道制御など。

スクを冒す代わりに、成功すれば大きな成果が得られる類のミッションです。このミッションを政府に提案したのは1995年ですが、当時、私共の機関（宇宙科学研究所）は文部省に所属していました。一方、現在のJAXA（宇宙航空研究開発機構）の主要部分は、当時はNASDA（宇宙開発事業団）で、政府機関ではありませんでした。宇宙科学研究所は研究開発機関でしたので、このミッションは研究形式で提案されたのです。ミッションの本来の役割はただ一つで、イオンエンジンによる推進の実証でしたが、政府はこのプロジェクトの実施を認めてくれました。当時、私たちはイオンエンジンの1,000時間運転を最低限の成功基準として設定しました。また、このミッションは最初から最後までが一つながりで、途中で何かが故障するとその先は全てが失われてしまうというものです。ですから非常に大きなリスクを抱えていました。政府はミッションの提案時点でそれに留意し、承認しています。ですから、政府はある種のリスクを容認してくれたのです。

**ターナー** そして勿論、間一髪が何度もありました。公式にミッションが失敗する可能性を事前評価するようなことは行われましたか？ 実際は、例えば最終段階である試料の回収についてのどの程度成算があるか、工学的な事



前評価をされたのではないかと  
思いますが、いかがですか。

**川口** それほど厳密な手続きは  
実施していません。ただ、初の  
イオンエンジンによる推進、自  
律的な小惑星への着地、試料採  
取、探査機の大気圏への再突入  
から成るミッションの概念的、  
定性的な議論といったようなも  
のは行いました。ま、どの要素  
も50%くらいの成功確率と想定  
されましたから、最終的にミ  
ッションを完遂するチャンスはも  
のすごく低くなります。私たち  
はそれを承知し、政府も承知し  
ていました。正直なところ、私  
たちでさえこのミッションを完  
遂できるという確信はそれほど  
もっていませんでした。です  
から、これは大きな挑戦でした。

**ターナー** 勇敢に挑戦されたこ  
とに感嘆しています。イオンエ  
ンジンの試験をもってミッシ  
ョンの成功と定義することは可  
能ですが、あなたやミッション  
に関わった多くの人たちが何年  
もの努力を傾けた後では、是非  
完全な成功を得たいと切望する  
に違いないのですから。

**川口** その通りですね。ありが  
とうございます。

#### 通信途絶から奇跡的に回復

**ターナー** ほとんど絶望的な状  
況が何度も発生し、その度に見  
事に切り抜けたことにより、こ  
のミッションは極めて劇的なも  
のとなりました。その中で、何  
が最も満足のゆく成功だったと  
お考えですか？これが最高だ  
つたと感じるのは、どの時点、ど  
のときごとでしたか？

**川口** 幾つかありましたが、極  
めつけはカプセルが回収された  
ときですね。しかし、大気圏再  
突入に向けての帰還途中でさ  
え、探査機との交信が5、6週間

完全に途絶えたことがありまし  
た。通信が約7週間中断した後  
に再び探査機から電波を受信し  
た、この時もやはり最高でした。

**ターナー** それはアンテナの方  
向を制御できなくなったため  
ですか？

**川口** いえ、探査機と通信シ  
ステム全体がダウンしたのです。  
私たちは一つ一つ徐々に機器を  
立ち上げ、探査機にいろいろな  
コマンドを送信してみたので  
す。私たちにとっても奇跡のよ  
うなもので、実に大きなでき  
ごとでした。その次は、イオン  
エンジンシステムの新しい構成を  
工夫してエンジンを再スタート  
できたときです。

**ターナー** その記事は  
読みました。すごい  
ことですね！

**川口** 実際にその組み  
合わせが機能したとき、私たち  
はこれで探査機を地球に帰還さ  
せられるかもしれないと悟った  
のです。それが最高に次ぐ2番  
目ですね。

**ターナー** 実に素晴らしい。で  
は、対になる質問ですが、ミ  
ッションで一番がっかりした故障  
あるいは損失は何でしたか？

**川口** 極めて複雑な技術である  
イオンエンジン、自律的な航法  
誘導、それから大気圏再突入は、  
多分私たちの予想に反して、非  
常にうまくゆきました。ところが、  
リアクションホイールのよ  
うな、いわばローテクとって  
良いようなものが航行中に故障  
しました。こういった基本的な  
ものが故障しやすいとは予想し  
ません。ですから、これにはと

エド・ターナーさんはプリンスト  
ン大学の天体物理科学科教授で、  
IPMUの客員上級科学的研究員です。  
太陽系外惑星、宇宙生命科学、宇宙  
論、重力レンズ、クエーサー、天体  
物理学における統計的問題など、広  
範囲の研究を手がけています。



てもがっかりしました。

**ターナー** 小惑星の上を跳ね回るはずだった小さなロボット\*についてはいかがですか？

**川口** そうですね。探査機が上空にある間に着陸探査ロボットを放出しなければなりません。私たちは探査機が着地する際に放出することを意図しましたが、余り複雑な運用は避けるべきであると考え、その結果ロボットは探査機の着地という重要なイベントの前に分離されることになりました。しかし、当時、私たちの航法制御技術は、そのような分離を可能とする域に達していませんでした。

\*「はやぶさ」に掲載されていた小型探査ロボット「ミネルバ」

ですから、あれは私たちの失敗です。今回学んだ教訓は、次のミッションに生かされるでしょう。それから、サンプル採取のための弾丸が発射されませんでした。探査機が小惑星表面からサンプルを採取しようとする、表面に向けて弾丸を発射するはずでしたが、実際はプログラミングの誤りにより発射されませんでした。あれも人為的なミスです。

**ターナー** ミッションで特に驚かされたこと、まさか起きるとは予想もしなかったことはありますか？

**川口** 実際は、私たちは困難や重大な結果につながりかねないできごと全てに対して適切な対

応策を講じました。それは、推定に基づいて考え出されたものであり、実際、通信の回復を図った時でさえそうだったので。私たちは、対応策が有効な範囲や限界を種々検討しました。しかし、推定が正しいという保証はありませんでした。推定が実際に正しいかどうかは、人間や私たちのプロジェクト自身ではコントロールできなかったので。ですから、私達は実に大きな幸運に恵まれたと思います。

#### 宇宙探査における科学と工学の相互関係

**ターナー** 通常、この種の宇宙探査では、科学と工学のそれぞれの観点から、ある程度緊張関係が生じます。科学者はある種のデータをほしがるであろうし、工学者は制約条件が課されているので、実際に考えます。両者の境界は非常に複雑で微妙なバランスになり得ます。「はやぶさ」のミッションでは、これはどのように扱われたのでしょうか。

**川口** 「はやぶさ」は工学実験の探査計画であり、技術の実証を目的として提案されました。しかし、単に技術の実証だけを望むとするなら、実際は小惑星まで飛行する必要はありませんでした。地球の近傍で探査機をイオンエンジンで推進し、そこから大気圏再突入もできるわけです。しかし、私たちはこう考えます。どのような技術実証試験のミッションであっても、科学的成果を目指すべきであり、貴重な機会を利用するべきであると。そこで、私たちは小惑星「イトカワ」への宇宙飛行をすることに決定しました。ただし、これは私たちの場合についてのことです。普通は、科学目的による

推進、工学目的による推進の2種類のミッションがあります。

多分30年以上にわたる個人的な経験に基づいて言いますと、私は科学研究の実施は工学的ミッションの範囲内で可能になるという印象をもっています。ミッションは科学的目的によって推進されるべきであると主張し、そのために必要な技術を求める科学者もおります。しかし、往々にして技術は適切でないか、十分に成熟していません。その場合、計画された科学的ミッションは取り消される危険があります。宇宙開発は大きな予算を必要とし、それは政府による巨大な投資なのです。ミッションの安全な実施を確実にするため、科学的ミッションは工学的基盤を見渡して計画されるべきです。つまり、科学者は極度に複雑なミッションを要求すべきではありません。ある意味で、工学的目的で推進されるミッションは科学のためにも良い方法と言えます。私はそう考えます。

**ターナー** 「はやぶさ」のケースに特有なことですが、小惑星を探査するという科学的推進目標が、信号の伝達に長い時間遅れがある運用を行うという、容易ではない工学的複雑性をもたらしたいと思います。工学的な観点から見て、そのために運用がさらに著しく困難なものになりましたか？

**川口** そうですね、工学的な観点からでさえ、交信に要する時間が長いことが探査や科学的観測を困難にします。しかし、私たちは、運用担当者も研究者も、皆、容易にそのような運用に慣れるということに気がつきました。小惑星の周囲に滞在した最初のうちは、実際に困難に遭遇しました。しかし、実際は徐々にうまく扱えるようになったので



「はやぶさ」は2003年5月9日に打ち上げられ、小惑星「イトカワ」探査に向けて旅立ち、2005年9月にイトカワに到着しました。この図はイトカワに接近して着地の目標となるターゲットマーカーを放出した瞬間の想像図（提供：池下章裕）です。はやぶさはイトカワに着地し、試料採取後、数々の困難を乗り越えて2010年6月13日に地球に帰還しました。

す。私たちは、もっとずっと遠くでもあのミッションの運用は可能だと思います。ですから、困難は困難ですが、とんでもなく大きなものではないと思います。

**ターナー** では、重要なことを学んだわけですね。

**川口** 多くのことを学びました。

**ターナー** 信号の往復にかかる時間は？

**川口** およそ35分から40分です。まだそれほど大きいものではありません。しかし、探査機がさらに先へ5～6年飛行を続けられれば、信号の往復にかかる時間はかなりのものになります。

**ターナー** そうですね、今後の太陽系の探査にとって、それが重要な問題になります。仮に、再度ミッションを繰り返すとしたら、打ち上げ前でも後でも、重要な点で異なるやり方をするであろうということはありませんか？ 特定の問題というより、ミッションの全体計画、あるいはミッションの選択といったようなことまで、いかがでしょうか。結局は、満足されましたか？ 勿論、最後は大成功を収めたのですから、とても満足されているに違いないと思いますが。

**川口** 今のところ、探査機がこんなにひどく傷ついても何とか切り抜けて帰還できたことで、私は比較的満足しています。それは、どの部分が頑丈であるべきか、従って今後のミッションでは手当しななければならないか、言うことができることを意味しています。これは非常に大きな強みです。もしミッション

\*\*このインタビューは2010年10月16日に行われましたが、その後JAXAから「はやぶさ」の持ち帰った微粒子の起源が発表されました。微粒子は岩石質で、ほとんどが地球外物質であり、確実に小惑星イトカワ起源であると判断されました。[http://www.jaxa.jp/press/2010/11/20101116\\_hayabusa\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2010/11/20101116_hayabusa_j.html)



はやぶさは2010年6月13日に地球の大気圏に再突入し、その直前に切り離された試料カプセルはオーストラリアのウーメラ砂漠で回収されました。写真(提供:JAXA、ウーメラで撮影)は左下から大気圏に突入し、燃え尽きるはやぶさ本体の火球。右上方に切り離されたカプセルの光跡が伸びています。

が途中で中断されたらこういうことを言うことはできません。

**ターナー** 「はやぶさ」ミッションは今や幾つか世界記録を保持しています。持ち帰ったサンプルは、今までで一番遠くから地球に持ち帰った物質に違いありません。

**川口** そう願っています。詳細な解析結果の一部は数ヶ月の内に得られると思います。まだその結果を待たなければなりません。たとえ得られたものが極めて小さく、微粒子ばかりでも、中には小惑星起源の化合物を含む粒子があると私は確信しています。\*

**ターナー** 既にテレメトリーによって送信されたデータから、2005年から2006年のサイエンスの特集号に主な結果が発表されています。今回持ち帰ったサンプルの解析から、大量の成果が同じように発表されるのでしょうか？

**川口** そう思います。来年の早い時期に分かるのは、多分、初

期の解析結果だけでしょう。しかし、多分それは世界に新しい結果として示せるものでしょう。また、私たちは世界に向けて研究の提案を呼びかける公募を計画しています。サンプルと得られた結果を科学者に提供します。

**ターナー** 世界中の科学者が、小惑星の物質を研究する機会を得られるということですね。

**川口** 沢山の粒子が得られていれば、そうなります。

#### 夢がかなう

**ターナー** 次にもう少し個人的なことを伺いたと思います。このような素晴らしい探査プロジェクトを率いることは、何ともロマンティックに感じられます。子供の頃や青年時代に、こういうことをするようになると想像しましたか？

**川口** それが夢だったのです。私の小さかった頃から小学校の頃はアポロ、ジェミニ、マーキュリーなど、つまりジェミニ・

アポロ時代と完全に重なっていました。多くの機会に恵まれた時代でした。冷戦中、ロシアとNASAは宇宙レースを競っていました。私は月面からのテレビ中継を、本当にリアルタイムで見たのです。

**ターナー** 私も鮮やかに記憶しています。

**川口** あれは歴史的に重要なできごとで、私は大きな感銘を受けました。アポロ11号のミッションは1969年で、日本の最初の小さな人工衛星が一番低い軌道に打ち上げられたのは翌年のことです。日本は世界で4番目に人工衛星打ち上げに成功したのですが、それでも世界では先頭を走っている方でした。とは言え、NASAやロシアには大きく引き離されていました。私は宇宙開発で我々には何ができるのだろうと考えたものですが、高校時代は日本の宇宙開発計画の将来に懐疑的でした。しかし、宇宙の探究にはとても興味があったのです。まだ先の見

通しは全く立たなかったのですが、私は大学院で宇宙開発の研究を手がけることを決意しました。この時期、1985年に日本がハレー彗星を目指して最初の惑星間探査機の打ち上げを試みるという機会に恵まれました。これが大きな契機となって、私はそれまでの観点とは異なる方向に踏み出したのです。つまり、それまでは懐疑的だったのですが、以後、宇宙開発に専念する決意を固めたのです。その後、バイオニア10号と11号、バイキング1号と2号、ボイジャーから大きな影響を受けました。これら深宇宙探査機が目標に向けていかに正確に航法誘導されたか、実感したのです。これは私の人生にとって、もう一つの大きな衝撃でした。それで、私は遠隔的あるいは自律的な操作、制御、誘導について考え始めました。探査機を極めて遠い地点まで制御し、ロボットのあるいは自律的に働かせ、そして地球に帰還させる、それこそ私がやりたかったことです。長年の後、私の夢は本当に成功を収めました。

**ターナー** 人生を賭けた夢を実現することができた。素晴らしいことですね。

**川口** 全く幸運でした。

**ターナー** 小惑星に到達して着陸するとは、実に素晴らしい夢です。そして、あなたの夢はミッションの期間を通して、また、特にミッションの終了後、人々の賞賛を博しました。「はやぶさ」は驚くほど多くの人々に愛されています。多分、火星着陸探査機や、有人月面着陸が似ているかもしれませんが、「はやぶさ」は多くの点でこれまでの宇宙ミッションで最も人気を博したものの一つに数えられます。

**川口** 特に日本ではそうです。

**ターナー** いや、世界中ですが、特に日本ではそうですね。それを予期しましたか？あなたにとっても驚きですか、それとも当然のことでしょうか？

**川口** こういうことになるとは思いませんでした。一般の人たちからこういう反応を得ようと計画したことはありません。しかし、私たちの活動が、特に小惑星に着陸の時はそうでしたが、外部の世界から良く見えるように試みしました。インターネットを通じて、また通信の公開により、私たちがしていることを、ありのままに見せたのです。地球への帰還の旅も大気圏再突入も同様です。全て外部からはっきり見ることができました。

ただの機械とは思えない「はやぶさ」

**ターナー** 往って還るということでしょうか、このミッション全体に人間の感情に訴えるものがあります。旅に出た人が数々の苦難を乗り越えた末に戻る、小説か民話の筋書きのようです。人々が「はやぶさ」に感動を覚えるのも当然だと思います。勿論、プロのエンジニアや科学者としてはそれがテープレコーダーや携帯電話や自動車のような単なる機械であることは承知しています。しかし、同時に、個性を持っているかのように感じてしまいがちでもあります。つまり、探査機の「擬人化」です。あなた方の運用チームも、ある程度は「はやぶさ」が単なる機械ではなく、本物の鳥のように感じたのではないですか？

**川口** 打ち上げ以前、探査機の開発中はそういう感覚はありませんでした。しかし、打ち上げ直前に、思いがけなくある音楽家がジャズでミッションのテー

マ曲を作曲してくれました。彼らはそれをCDにして、ミッションがどういうものであるか、彼らが感じたことを私たちと共有してくれたのです。ジャズを作曲することにより、彼らはミッションが単なる機械あるいは探査機についてのものではないという感覚を伝えてくれました。幼い子供のように地上に戻ってくるというような。彼らは既にそれに気がついていたのですが、私たちはそういう印象を持っていませんでした。しかし、打ち上げ後、探査機は高度の自律性をもったのです。自律性はプログラムによって与えられるので、私たちは数々の規則をプログラム化して探査機に組み込みました。この自律性がなければ、イオンエンジンさえ駆動できませんでした。探査機には、多分、何百、何千という非常に多くの規則が徐々に蓄積されました。私たちは探査機が自律的に規則に従うことを期待するしかなかったのです。つまり、私たちは7年間にわたり探査機を育てたのです。徐々にプロジェクトチームは「はやぶさ」を機械ではなく、育て上げた子供のように考え始めました。

**ターナー** まさに育てたのですね。それは人間のとても自然な反応だと思います。さて、このミッションの間、あなたはほとんどの時間をそのために使ったと思います。一方、あなたは、JAXAの月・惑星探査プログラムのディレクターでもあります。ミッション終了後はどのようにされているのですか？今後の目標、あるいは将来に向けてこうしたいということをお聞かせ下さい。

**川口** まず第一に、次のミッションを担うのは次の世代です。従って、この種の活動に従事

する専門家を増員することはできませんが、次の世代の養成に極めて重要な点は、技術や知識といったものの継承です。私は次のミッションにはっきりした形で参加することはありませんが、アドバイザーとして働くことは可能です。私は第一世代だと思われているようです。「はやぶさ」の第一世代は探査機を製作して運用することを求められました。多分、これは簡単だったと思います。しかし、それは次世代のコミュニティの力をつけることにはつながりません。私は定年までまだ8年から10年ありますが、次のミッションを提案しようとしています。それは簡単には政府に認められないかもしれません。しかし、新たなミッション、新たなプログラムの提案こそ私たちがすべきことなのです。プロジェクトチームに、新たなミッションの実施に責任をもつ次の世代が育つことを切望しています。

**ターナー** 最後の質問は「はやぶさ」という名前についてです。猛禽類の鳥で、英語ではファルコンですが、その名前を選んだ理由を聞かせて下さい。

**川口** 探査機がサンプルをつかむ様子から名付けました。はやぶさは急降下して着地し、獲物を捕らえます。探査機の任務とサンプル採取も、着地して飛び立つというやり方で実施されます。それが探査機を「はやぶさ」と名付けた理由です。

**ターナー** なるほど、そういうことですか。さて、「はやぶさ」についていろいろなお話を直接伺い、大変楽しい一時を過ごさせていただきました。実に素晴らしい物語です。どうもありがとうございました。

## 東京大学柏キャンパス一般公開

2010年10月29日-30日に東京大学柏キャンパスが一般に公開されました。東京大学としては例年通りでしたが、IPMUにとっては完成した研究棟で行う初めての一般公開でした。2日間を通して研究棟1階で研究内容を示すパネル展示等を行うと共に、完成したばかりのIPMU紹介ビデオを上映しました。大講義室では29日に小澤みどり国際交流係長が「外国人研究者受け入れの舞台裏」と題してIPMUの取り組みを紹介し、その後上演された外国人研究者による日本語劇「新説・桃太郎」は大喝采を浴びました。また、30日には野本憲一主任研究員が「超新星で探る宇宙の進化」と題して講演しました。29日には地元千葉県のマスコットキャラクター「チーバ君」も登場し（27ページの写真参照）、IPMUには2日間で延べ630名が訪れました。



野本教授の講演風景



外国人研究者による日本語劇

## 女子中高生理系進路選択支援事業 柏キャンパス3拠点合同イベント「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9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。今年度、IPMUは柏キャンパスの新領域創成科学研究科および物性研究所と協力して合同イベント「未来をのぞこう!」をキャンパス一般公開中の2010年10月30日に開催しました。約60名の女子中高生が、午前中は各研究機関に分かれて見学を行い、IPMUでは約20名が田中雅臣特任研究員によるワークショップ「宇宙の大きさを実感してみよう!」に参加、自分たちで宇宙の大きさを計算してみるという初めての経験を楽しみました。午後は3研究機関の合同イベントとして、先輩研究者によるパネルディスカッションとティータイムが行われました。女子中高生にとっては、研究の面白さや研究生生活を身近に感じる良いきっかけとなったようです。



## 宙博（そらはく）2010に協力

2010年10月29日-31日の3日間、東京都千代田区の科学技術館で「宙博（そらはく）2010」が開催され、31日には村山機構長が「宇宙に終わりはあるか」の講演を行いました。宙博2010は「宇宙・天文」分野と「環境エネルギー」分野をつなぐという新しい観点から、子どもたちの夢と希望と好奇心を育て、新しい時代の案内役となるイベントで、3日間で延べ31627名が訪れました。

## 国立大学フェスタ2010 IPMU・ICRR合同一般講演会「宇宙を旅する」

2010年11月14日に東京大学本郷キャンパスの「小柴ホール」を会場として、IPMUと宇宙線研究所（ICRR）の4回目の合同一般講演会「宇宙を旅する」が開催され、約130名が聴講しました。IPMUからは向山信治特任准教授が「四次元を超える宇宙」、ICRRからは宮原ひろ子特任助教が「宇宙の天気と地球の天気」と題して講演を行いました。講演後には、ホワイエで2人の講師を囲む懇談会が催され、長時間、熱心な質疑応答が交わされました。



## サイエンスアゴラ2010に協力

2010年11月19日-21日の3日間、東京都江東区お台場にある国際研究交流大学村で、一般向けにサイエンスを伝えるイベント「サイエンスアゴラ2010」が開催されました。5つの世界トップレベル研究拠点（WPI）と日本学術振興会が共同で参加し、20日にワークショップ「一緒に考えよう!日本の未来戦略」を開催しました。多摩六都科学館の高柳雄一館長が進行役を務め、参加者は日本の科学・技術の未来のために今、何が必要かを、世界の研究現場をよく知る4名の話者提供者と一緒に考えるという機会を持ちました。

## SuMIReプロジェクトwebサイト公開

内閣府・総合科学技術会議により採択された「最先端研究開発支援プログラム

ラム」30件のうちの1つで村山機構長が中心研究者となっている「SuMIRe」プロジェクトの web サイト (URL: <http://sumire.ipmu.jp/>) が公開されました。この web サイトは、SuMIRe プロジェクトの目的や成果などを一般の方に広く周知するために開設されました。今後のサイトの更新にご期待ください。

#### 小松英一郎上級科学研究員、西宮湯川記念賞を受賞

テキサス大学オースティン校天文学科教授でIPMU上級科学研究員の小松英一郎さんが第25回西宮湯川記念賞を受賞しました。受賞理由は、NASAのウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機 (WMAP) のデータを用い、宇宙の年齢・ダークエネルギーなどの宇宙論パラメータの制限、及びインフレーション宇宙モデルなどの初期宇宙モデルを制限した功績「宇宙マイクロ波背景輻射を用いた初期宇宙理論の検証」です。授賞式は11月4日に行われました。

#### 高柳匡特任准教授、湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞を受賞

高柳匡 IPMU 准教授が、平成22年第4回湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞を受賞しました。受賞業績は「超弦理論のホログラフィーとタキオン凝縮」で、授賞の対象となった研究は「厳密に解ける2次元超弦理論を与える行列模型」、「エンタングルメント・エントロピーのホログラフィー対応からの導出」、「タキオン凝縮の超弦理論による記述」です。授賞式は2011年1月19日に予定されています。

#### 小林俊行上級科学研究員、井上學術賞を受賞

東京大学数理科学研究科教授でIPMU上級科学研究員の小林俊行さんが「無限次元の対称性の解析」の業績

により、第27回井上學術賞を受賞しました。リーマン幾何学の枠組みを超えた不連続群論の創始、無限次元表現論における離散的分岐則の基礎理論の創出、特異なユニタリ表現と非可換調和解析における独創的業績などの業績が数学の多くの分野に多大なインパクトを与え、新たな研究領域を切り開くものであると評価されました。授賞式は2011年2月4日に行われます。

#### 高橋史宜特任助教、日本物理学会若手奨励賞を受賞

高橋史宜 IPMU 助教が、第5回(2011年)日本物理学会若手奨励賞を受賞しました。高橋氏が受賞したのは宇宙線・宇宙物理領域で、「インフラトン崩壊におけるグラビティーノ過剰生成」、「インフレーション宇宙におけるグラビティーノ問題」、「超重力理論におけるインフラトン崩壊」の3つの論文が評価されたことによるものです。授賞式は2011年3月25日に日本物理学会春大会で行われる予定です。

#### ドメニコ・オルランド博士研究員とスザンネ・レフフェアト博士研究員、「古典量子重力」誌の年間ハイライト論文に選出

IPMUの博士研究員ドメニコ・オルランドとスザンネ・レフフェアトの共著論文「ホジャバ・リフシツ型重力理論の繰り込み可能性」が「古典量子重力 (Classical and Quantum Gravity)」誌の2009-2010年の年間ハイライト論文に選出されました。「古典量子重力」誌は、重力と時空理論分野に関する物理学、数学及び宇宙論で由緒ある学術誌で、今回取り上げられた論文は、IPMUが強調する宇宙の謎を解明するための物理学と数学の融合が評価されたものです。

#### 東京大学プレジデント・カウンシル、IPMU来訪

東京大学プレジデント・カウンシルは、東京大学の国際的プレゼンスの向

上を目的として、総長が世界の要人と意見交換し交流を深める場として、各国の有力企業人、学識経験者、国際機関関係者などが委嘱されています。その委員が2010年11月19日に IPMU 研究棟を訪問し、IPMUについて村山機構長の概要説明を聞き、その後研究者との懇談などを行いました。



#### 村山機構長「宇宙は何でできているのか」を出版、印税をIPMUに寄付

幻冬舎より、一般向けの村山機構長の著書「宇宙は何でできているのか -素粒子物理学で解く宇宙の謎-」が刊行されました。「宇宙はどうやって始まったのか」「私たちはなぜ存在するのか」「宇宙はこれからどうなるのか」という疑問に素粒子物理学の観点から迫る素粒子宇宙論入門書ですが、2010年12月末現在で売り上げ部数が22万部を突破しています。この本の印税はIPMUに寄付され、活動資金に充てられます。

#### どんぐり保育園にIPMUからサンタクロースがやってきた!

2010年12月17日、柏キャンパス内にあるどんぐり保育園のクリスマス会に、IPMUのマーク・ヴェイギンス特任教授が夫人と生後半年の長男を伴い、サンタクロース一家になって現れ



ました。子どもたちにプレゼントを手渡しし、一緒に歌を歌うと、子どもたちは本物のサンタさんを目の前にしたように喜んでいました。

#### フォーカスウィーク： 弦理論的宇宙論

2010年10月4日 - 8日の5日間、IPMUにおいて「フォーカスウィーク：弦理論的宇宙論」が開催されました。究極の理論の有力な候補である超弦理論によって、宇宙の謎に挑むのが「弦理論的宇宙論」です。宇宙創成からインフレーションの起源、宇宙背景輻射等による観測可能性など、様々な議論が展開されました。

#### ワークショップ： Astro2010レポート後のダークエネルギー探査

2010年10月7日 - 8日の2日間、カリフォルニア工科大学で、IPMUも支援する国際研究会「Astro2010レポート後のダークエネルギー探査」が開催されました。この研究会の目的は、8月13日に全米科学アカデミーが発表した、今後10年の天文・宇宙物理分野の観測計画の展望をレポートした「Astro2010」を受けて、様々なダークエネルギー探査のための最善の方法を議論することです。ダークエネルギーを制限するための様々な方法、それを実行する現在、あるいは計画中の地上、衛星サーベイ計画について議論しました。

#### ワークショップ：Evolution of Massive Galaxies and Their AGNs with the SDSS-III/BOSS Survey

2010年10月25日 - 28日の4日間、IPMUにおいて「Evolution of massive galaxies and their AGNs with the SDSS-III/BOSS survey」が開催されました。

IPMUは遠方銀河の大規模な分光サーベイ観測を行うSDSS-III/BOSSプロジェクトのメンバー研究機関です。こ

のワークショップにはBOSSのデータを使った研究のうち、明るい銀河と活動銀河中心核（AGN）に興味を持った関係者が集まり、観測手法、データ解析、初期データを使った科学的成果、さらに、将来の共同研究にわたる幅広い議論が行われました。参加者は東京湾の屋形船も堪能しました。

#### ニュートリノに関するミニワークショップ

2010年11月8日 - 11日の4日間、IPMUにおいて「Mini Workshop on Neutrinos」が開催されました。ニュートリノはこれまで多くの実験によってその性質が調べられてきましたが、依然として謎の多い粒子です。特に、宇宙の物質の起源や標準理論を超える物理との関連が期待されています。本研究会においては、ニュートリノ実験の現状と将来に関する認識の共有と新しいアイデア、及び情報の交換を目的として、理論及び実験の専門家を8名招待し、活発な意見交換を行うことができました。

#### ワークショップ： Population III Gamma-Ray Burst

2010年11月15日、IPMUにおいて「Workshop on Population III Gamma-Ray Burst」が開催されました。主に国内の理論天体物理学研究者10名が集まり、初期宇宙におこるガンマ線バースト（GRB）の特徴について議論しました。これまでに赤方偏移 8.2、宇宙年齢にすると6億歳の頃におこったGRBも捉えられており、今後の観測でも多くの遠方GRBが検出されると期待されています。研究会では、X線から電波にいたるまでのエネルギー分布特徴について活発に議論されました。

#### ワークショップ： Supernova Explosions and Nucleosynthesis

2010年12月1日、IPMUにおいて

「The 4th meeting of OMEG “Supernova explosions and nucleosynthesis”」が開催されました。OMEG (Origin of Matter and Evolution of the Galaxies) Institute は、宇宙核物理連絡協議会 (Japan Forum of Nuclear Astrophysics) を中心として開催されている、宇宙核物理学に関する講演会です。その第4回講演会が、IPMUとの共催で12月1日に開催されました。CaltechのChristian D. Ott 博士が最新の超新星シミュレーション研究について、University of BaselのFriedrich-K. Thielemann 教授が超重原子核形成について講義を行いました。

#### 今後の研究会： IPMU Workshop on Black Holes

2011年2月21日 - 25日の5日間、IPMUにおいて、「IPMU Workshop on Black Holes」が開催されます。ブラックホールは、天体観測から量子重力理論（超弦理論やループ重力理論など）に至るまで、幅広い範囲で、現在、盛んに研究されています。したがって、関連する異分野の研究者を集めて交流し議論を深めることは、大変有意義であり、新しいアイデアを生むことが期待されます。

#### 人事異動報告

IPMU博士研究員のジェイミアン・イーサンさんがアリゾナ州立大学の助教教授に転出しました。IPMUの滞在期間は2008年8月8日 - 2010年12月15日でした。

また、日本学術振興会の外国人特別研究員として2008年11月13日 - 2010年11月13日の間IPMUに滞在したマルコ・バルデスさんが、イタリアのScuola Normale Superiore di Pisaの博士研究員として転出しました。



## Qボール

川崎 雅裕 東京大学宇宙線研究所教授、IPMU上級科学研究員

QボールはグローバルなU(1)対称性を持つスカラー場の理論に存在するノンポジカル・ソリトン解で、その名の通り、ある保存チャージQを持った球状のオブジェクトです。1990年代後半になって超対称化された素粒子の標準模型にQボール解が存在し、宇宙初期に数多く生成される可能性があることが分かり、注目されるようになりました。この場合Qボールのチャージはバリオン数やレプトン数で、宇宙の物質・反物質非対称性に密接に関係しています。また、Qボール暗黒物質になる可能性もあります。

