

IPMU NEWS

Feature
Grand Unification and the Search for Proton Decay
Interview with Hiroshi Komiyama
Focus Week: New Invariants and Wall Crossing



IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Unification
- 4 **Feature** Henry Sobel
Grand Unification and the Search for Proton Decay
- 8 **IPMU Interview** with Hiroshi Komiyaama
- 13 **Our Team** José M. Figueroa-O'Farrill
Sergey Galkin
Dongfeng Gao
Tsz Yan Lam
Rajat Mani Thomas
- 16 **Workshop report**
Focus Week: New Invariants and Wall Crossing
- 18 **News**
- 22 **Seesaw Mechanism** Tsutomu Yanagida

Japanese

- 23 **Director's Corner** 村山 斉
統一
- 24 **Feature** ヘンリー・ソーベル
大統一と陽子崩壊の探索
- 28 **IPMU Interview** 小宮山 宏・前東大総長に聞く
- 33 **Our Team** ホセ・フィゲロア-オフアリル
セルゲイ・ガルキン
高 东峰
林 梓仁
ラジャット-マニ・トーマス
- 36 **Workshop report**
フォーカスウィーク：新しい不変量と壁越え
- 38 **News**
- 40 **シーソー機構** 柳田 勉



Henry W. Sobel is Professor of Physics & Astronomy at UCI (University of California, Irvine), and is a Principal Investigator of IPMU. He received his Ph.D. at Case Institute of Technology in 1968, and, in the same year, joined the UCI Physics Department. He has been US co-spokesperson for the Super-Kamiokande experiment since 1992.

ヘンリー W. ソーベル：カリフォルニア大学アーバイン校物理学・天文学科教授。IPMU主任研究員を兼ねる。1968年にケース工科大学（現在ケース・ウェスタン・リザーブ大学）で博士の学位を取得。同年、カリフォルニア大学アーバイン校物理学教室のメンバーとなる。1992年以來、スーパーカミオカンデ実験のアメリカ側共同代表者を務める。

Unification

Director of IPMU

Hitoshi Murayama

I lived in West Germany for four years in my childhood. In the year 1978, teachers organized a school trip to Berlin. We took *Pan Am* flights for the trip, because the East Germany did not allow Lufthansa to fly over its territory. We visited the section of the Berlin wall where many from East Berlin threw themselves from apartment windows to reach West Berlin and died. Eleven years later, I was overjoyed watching the crowd crashing down the wall on TV. Germany became unified.

Unification has also been very important in our understanding of the universe. Newton unified apples with planets with his theory of gravity. It was a revolutionary theory that applies both to earthly and heavenly bodies, and changed the human conception of the universe forever. Maxwell unified the theories of electricity and magnetism, and proposed that light must be a dance between electric and magnetic fields. Without his theory, much of modern technology would not have existed, such as radio, TV, microwave oven, or DVD.

Since then, physicists discovered two other forces of nature beyond gravity and electromagnetism: *weak* and *strong*, both needed for our daily life. The strong force is needed to keep the atomic nuclei from falling apart, making chemistry and biology possible. The weak force allows the Sun to burn by turning ten billion pounds of mass every second into energy, allowing for Earth to sustain life. But we are not familiar with them because they do not go very far. The weak force goes only over a *billionth* of a *nanometer*!

Physicists are optimistic that we can unify all of these forces that look so different from each other and come up with a truly *unified theory*. In this issue of IPMU News, Hank Sobel talks about his lifelong attempt to prove the unification of forces by discovering that every atom is ultimately unstable. Hank and many other members of IPMU built the Super-Kamiokande experiment and could show that a hydrogen atom lives longer than a million billion billion billion years. It is amazing that they could show it lives *much much* longer than the age of the universe, which is *only* 13.7 billion years! This quest still continues, and we hope to build a new experiment some twenty times larger than SuperK.

Theoretically, unifying gravity with other forces proved very difficult. The main problem is that we believed elementary particles are *points*, and when two points meet, they go *bang* and give us infinities that don't make sense. If the particles are spread out like little rubber bands, they would rarely overlap exactly with each other and the theory is safer. Hirosi Ooguri in this issue tells you how the ambitious attempt to restructure the whole physical theories in terms of strings need help from mathematicians, who in turn get inspiration for their own research. IPMU held a very fruitful joint workshop of physicists and mathematicians, with the added excitement of new influenza, masks, sterilizing alcohol, and thermographic camera.

We are all looking forward to the day when the Berlin wall between forces and matters in nature will come tumbling down, and IPMU wishes to play a major role in this endeavor.

Grand Unification and the Search for Proton Decay

Proton Decay Search Tests Grand Unified Theories

One of the long standing goals of physicists is the unification of the forces of nature by using a single mathematical description. The electromagnetic and weak forces already have a single description (the electroweak theory) and the next step is the inclusion of the strong force. The various attempts at this unification are called GUT's (Grand Unified Theories). The energy at which this unification occurs is unknown, but is expected to be at about 10^{16} GeV. Exploration of this energy scale is a challenge since this energy is far beyond that which we could explore with accelerators. However, in most grand unified theories, the proton is predicted to decay. The observation of the decay and the study of the particles that it decays into could establish grand unification and distinguish between models. Thus, the search for proton decay provides one of the few approaches to the problem of confronting grand unified theories with experimental data and any progress toward this goal has unique value for the future development of physics.

The early searches for the decay of the proton were motivated by the testing of conservation laws. In physics, conservation laws are powerful tools which allow us to understand the behavior of matter. Some of these laws, such as conservation of energy,

conservation of linear and angular momentum, conservation of charge and others, are familiar from classical physics and are exact and based on general theoretical principles. Others, are purely empirical, in other words, they have no obvious theoretical justification and are proposed to account for the experimentally observed absence of some reactions. This second group includes the conservation of baryon number, the conservation of lepton number and others. In general, we expect any reaction not forbidden by a conservation law to occur, although perhaps not very often. The exact conservation laws correspond to symmetries in nature. For example, the conservation of momentum and angular momentum

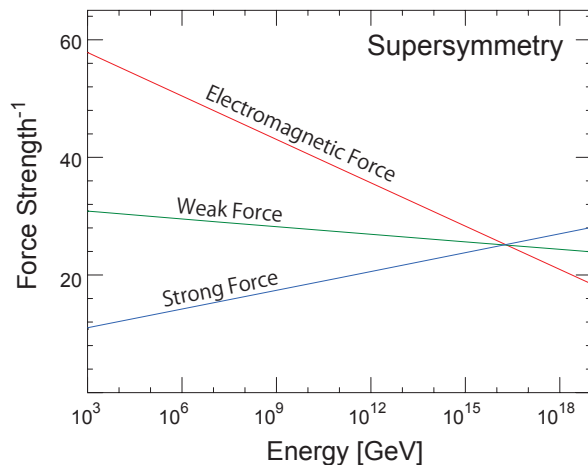


Figure 1. The unification of forces

can be traced to translational and rotational symmetry.

The absolute stability of the proton was first suggested by Weyl in 1929. In 1954, Goldhaber, arguing on very general grounds showed that the lifetime of the proton had to be greater than 10^{18} years and also in 1954, the first experimental limit on the lifetime of the proton, greater than 10^{20} years, was obtained. From 1954 to 1974, these limits were gradually improved by making use of larger and larger detectors which were built for other purposes. In 1974 the situation changed. The first promising grand unified theory, SU(5), was published which predicted the lifetime of the proton to be between 10^{27} and 10^{31} years, comfortably above the latest lifetime limit, but within reach of a dedicated experiment.

Gigantic Detectors Required for Proton Decay Search

While the community now had a predicted lifetime to test, the scale of the required experiment presented a challenge. Proton decay is a statistical process. If you watch a single proton you would have to wait 10^{31} years to see it decay. On the other hand, if you have a container with 10^{31} protons in it, on the average, one proton will decay per year. There are about 6×10^{29} protons (and neutrons) in a ton

of material so the required detector size is 100 ton-scale. To be conservative, a kiloton scale detector would be necessary. The first of these detectors, IMB in the U.S. and Kamiokande in Japan, turned on and gave results in the 1980's. Unfortunately, they did not observe the predicted decay rate and thus set lower limits on the proton lifetime that were higher than that predicted by SU(5). In this way, the first of the grand unified theories fell victim to experiment.

Since the time of IMB and Kamiokande, a wide variety of alternative grand unified theories have been developed. These include the assumption that the fundamental mathematical symmetry is larger than SU(5) and the possibility of supersymmetry. Some attractive models stress the connection between neutrino masses, mixing and proton decay. In general they predict new modes of decay and longer lifetimes.

Thus, continued progress in the search for proton decay inevitably requires larger detectors. Since the lifetime of the proton is unknown, *a priori*, and could range from just above present limits to many orders of magnitude greater, increases in sensitivity by factors of a few are insufficient to motivate new experiments. An order of magnitude improvement can only be achieved by running Super-Kamiokande for many, many more years, or by constructing an order of magnitude larger experiment.

Super-Kamiokande Holds the Current World Records

The “classical” proton decay mode, $p \rightarrow e^+ \pi^0$, can be efficiently detected with low background. At present, the best limit on this mode ($\tau/\beta > 8 \times 10^{33}$ yr, 90% CL) comes from Super-Kamiokande. Supersymmetric theories favor the mode $p \rightarrow \nu K^+$, which is experimentally more difficult due to the unobservable neutrino. The present limit from Super-Kamiokande is $\tau/\beta > 2 \times 10^{33}$ yr (90% CL). However, the actual decay modes of the proton are also unknown, *a priori*, and can produce quite different experimental signatures, so future detectors must be sensitive to most or all of the kinematically allowed channels. Moreover, the enormous mass and exposure required to improve significantly on existing limits (and the uncertain prospects for positive detection) underline the importance of

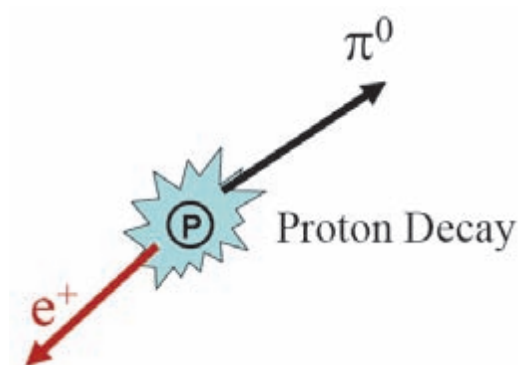


Figure 2. A schematic of the proton decay mode $p \rightarrow e^+ + \pi^0$

any future experiment’s ability to address other important physics questions while waiting for the proton to decay. Proton decay experiments have made fundamental contributions to neutrino physics and particle astrophysics in the past, and any future experiment must be prepared to do the same.

A variety of technologies for discovery of proton decay have been discussed. Of these, water Cherenkov appears to be the only one capable of reaching lifetimes of 10^{35} years or greater. Other techniques, for instance liquid Argon or liquid scintillation, have been discussed but their putative advantages are largely speculative and the feasibility of their employment on the scales required is far from proven.

Global Efforts toward Next-Generation Experiments

In order to carry the search forward it will require a renewed commitment to this essential physics, ideally as part of a global effort. Research groups in Europe, Japan and the United States are fully cognizant of the need to work together (and indeed are already doing so). Cooperative, parallel studies of future underground water Cherenkov proton decay experiments are underway in the U.S. (at the new DUSEL site), Japan (Hyper-Kamiokande) and in Europe (MEMPHYS). The proposed designs are at the megaton scale. Detailed Monte Carlo studies, including full reconstruction of

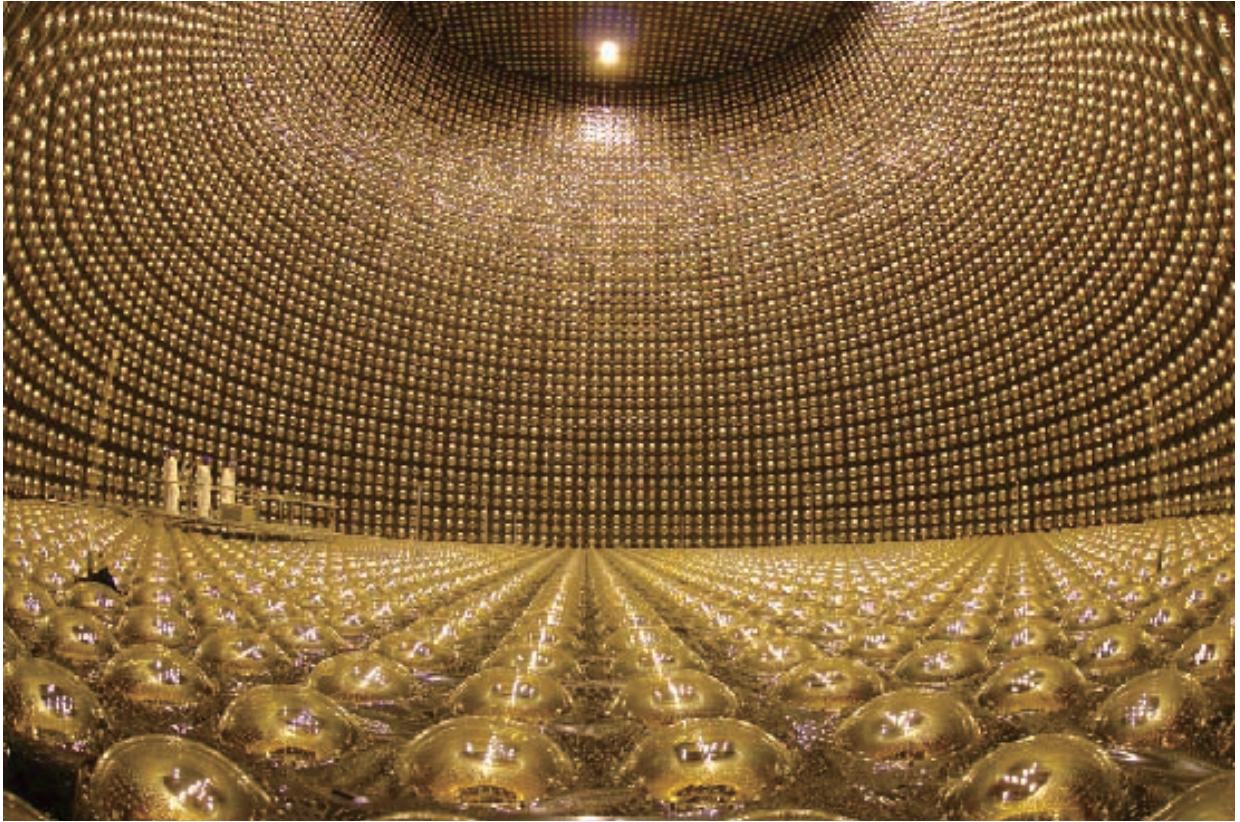


Figure 3. The Super-Kamiokande detector after replacing damaged tubes and before filling with water.

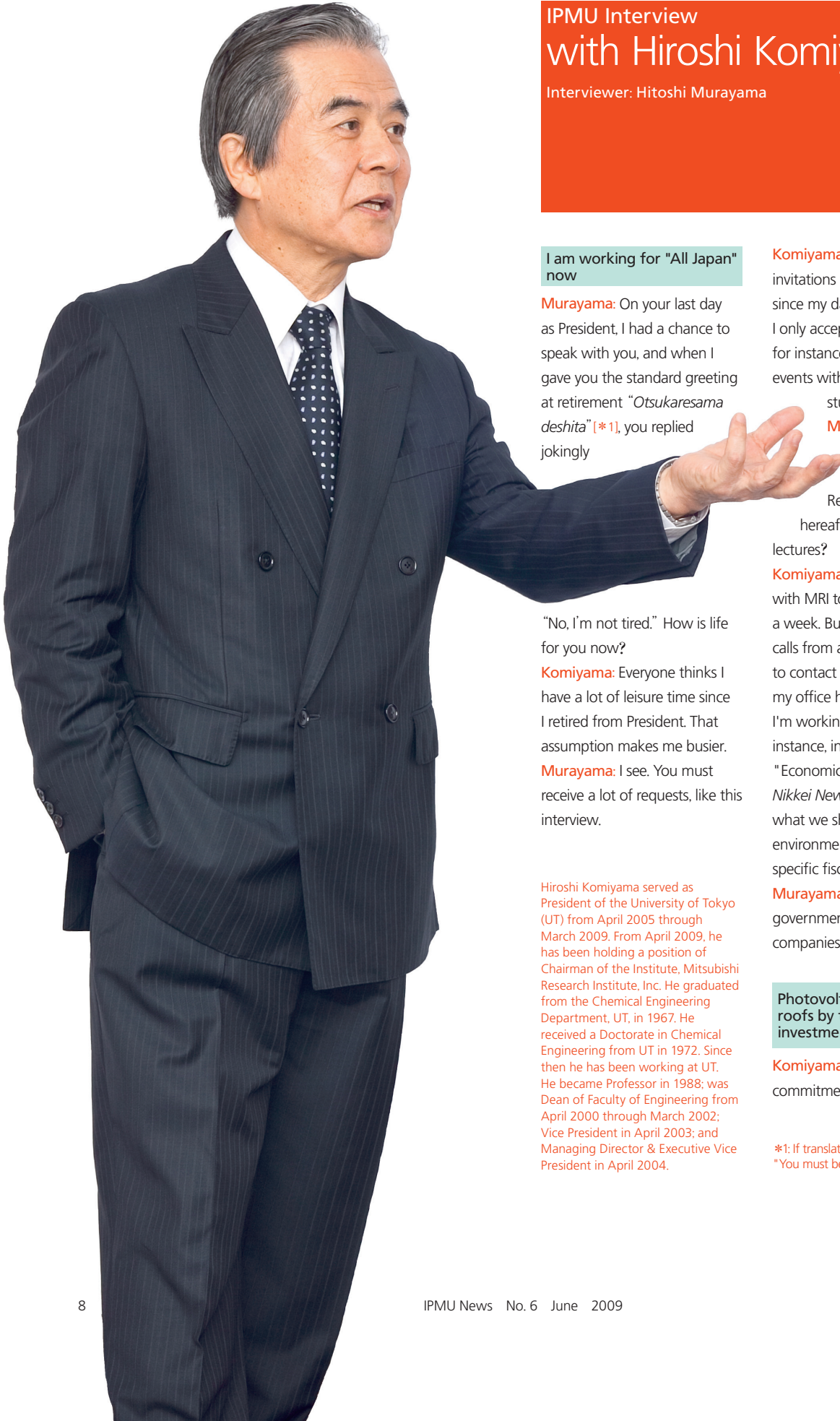
simulated data, indicate that the proposed detectors could reach the goal of an order of magnitude improvement on anticipated proton decay limits from Super-Kamiokande. With sufficient exposure, clear discovery of proton decay would be possible even at lifetimes of $(\text{few}) \times 10^{35}$ years. A detector with mass $O(1 \text{ Mton})$ would also be a powerful tool for studying neutrino physics.

Super-Kamiokande continues to produce superb and exciting results. There is every reason to expect that the next generation proton decay experiment will accumulate an equally impressive list of accomplishments, if support commensurate with its physics potential is forthcoming.

R&D towards more efficient and economical photo-detection – both improved conventional photo-multiplier tubes and more novel technologies –

while not required to build the next large detector, could reduce its cost and increase its physics reach considerably. This R&D should be strongly supported, since they will also benefit a host of other research efforts.

Finally, the search for proton decay is only one of many particle physics and astrophysics activities requiring extensive, modern underground infrastructure. A national underground laboratory being planned in the U.S. would greatly facilitate not only proton decay, but a whole spectrum of large and small experiments now being planned or discussed. Such a laboratory would undoubtedly achieve tremendous economies, by providing a single, centralized infrastructure for many experiments, each of which would otherwise be forced to duplicate it themselves.



IPMU Interview with Hiroshi Komiyama

Interviewer: Hitoshi Murayama

I am working for "All Japan" now

Murayama: On your last day as President, I had a chance to speak with you, and when I gave you the standard greeting at retirement "Otsukaresama deshita" [*1], you replied jokingly

"No, I'm not tired." How is life for you now?

Komiyama: Everyone thinks I have a lot of leisure time since I retired from President. That assumption makes me busier.

Murayama: I see. You must receive a lot of requests, like this interview.

Hiroshi Komiyama served as President of the University of Tokyo (UT) from April 2005 through March 2009. From April 2009, he has been holding a position of Chairman of the Institute, Mitsubishi Research Institute, Inc. He graduated from the Chemical Engineering Department, UT, in 1967. He received a Doctorate in Chemical Engineering from UT in 1972. Since then he has been working at UT. He became Professor in 1988; was Dean of Faculty of Engineering from April 2000 through March 2002; Vice President in April 2003; and Managing Director & Executive Vice President in April 2004.

Komiyama: The number of invitations to speak has tripled since my days as President. But I only accept special requests: for instance from old friends or events with 3,000 or so college students attending.

Murayama: I see. So, you are basically here [Mitsubishi Research Institute, Inc., hereafter MRI] except for lectures?

Komiyama: I have a contract with MRI to work here two days a week. But they also handle calls from anyone who wants to contact me. Therefore, I keep my office here and, in a way, I'm working for "All Japan." For instance, in the editorial column "Economic Lesson" of the *Nikkei News Paper*, I proposed what we should do with environmental energy including specific fiscal measures.

Murayama: Was that for the government or for private companies?

Photovoltaics for home roofs by the initial national investment

Komiyama: As the first commitment period of the

*1: If translated literally, this means "You must be tired."

Kyoto Protocol will expire in 2012, a new international framework will need to be negotiated. How can Japan reduce emissions of CO₂? Japan is weathering a rough spell financially. So I presented a proposal to reduce emissions of CO₂ without posing a large financial burden. On the contrary, we will be able to grow our economy. I called them "self-sustaining government bonds." The premise is to issue government bonds and purchase photovoltaics, for instance. The government will make contributions towards putting photovoltaic solar panels on the roofs of homeowners who want to join this system. If the photovoltaics are nationally owned, the electricity revenues will be national income. Then, even at its current price, initial investments can be recouped in about 15 years.

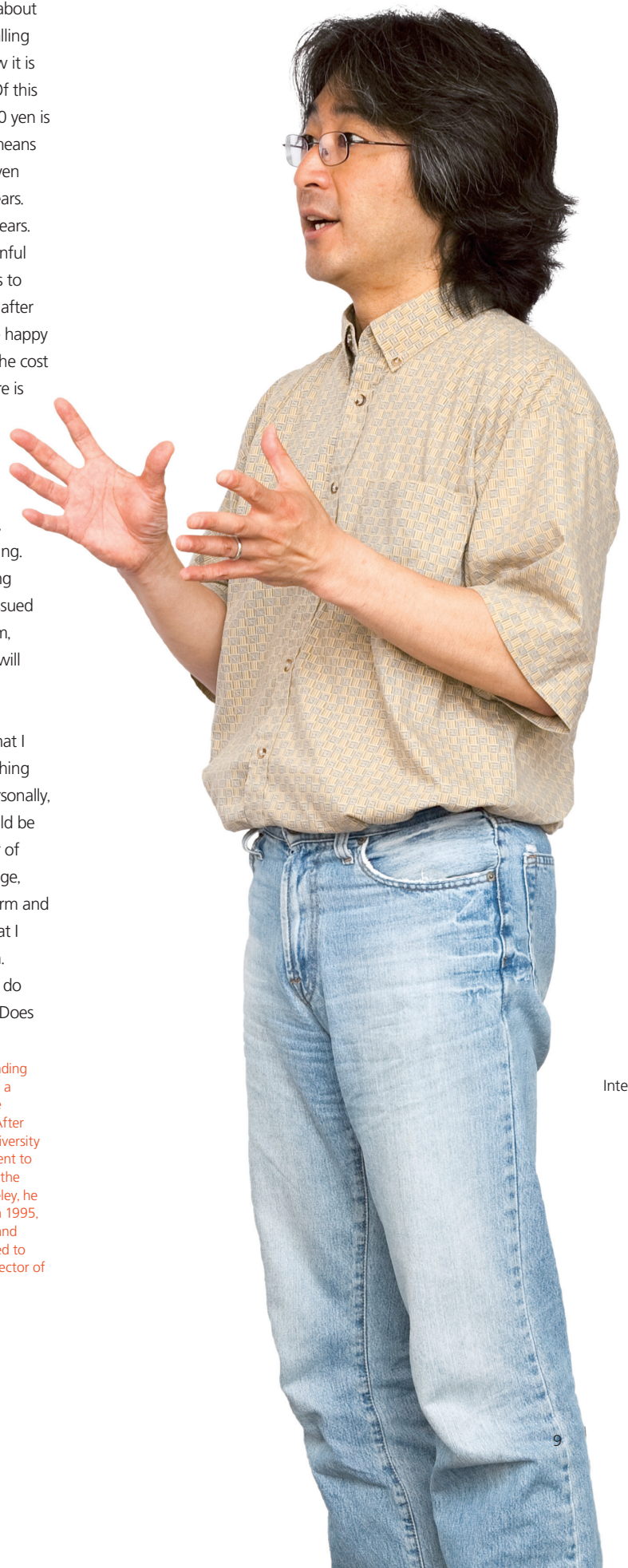
Murayama: Will the electricity expenses be what we usually pay to the power company?

Komiyama: In the beginning, they will be set a little higher than your regular electricity bill. Fifteen years later, the photovoltaic panels will become the property of the homeowner. So, no one loses money. And, there will be photovoltaic solar panels on the roofs of homes throughout Japan. I'll tell you why it is possible – because the government will grant loans towards the initial investment. The private photovoltaic panels on my roof was a 2 million yen investment. That was seven years ago. The

annual energy cost was about 300,000 yen before installing the photovoltaic, but now it is only about 50,000 yen. Of this difference, about 110,000 yen is from photovoltaic. This means I could get my 2 million yen investment back in 18 years. Now it is possible in 10 years. Still, 2 million yen is a painful amount for most families to pay now and get it back after 10 years. But they will be happy if the government pays the cost in advance. In Japan, there is about 1.5 quadrillion yen in personal assets. Because people are concerned about finances after retirement, they save without spending. But, if these self-sustaining government bonds are issued with a 1% extra premium, people will invest in it. It will simultaneously stimulate the economy and create new industries. This is what I proposed. It is not something that involves only me personally, but something that should be discussed with a number of people to share knowledge, consolidate ideas, and form and initiate policy. That is what I want to do from now on.

Murayama: How exactly do you make that happen? Does

Hitoshi Murayama is the founding director of IPMU. He received a Doctorate in Physics from the University of Tokyo in 1991. After having worked at Tohoku University as a research associate, he went to the United States in 1993. At the University of California, Berkeley, he became assistant professor in 1995, associate professor in 1998, and professor in 2000. He returned to the University of Tokyo as director of IPMU in January 2008.



the government consult you, or will you submit a proposal with the group members?

Komiyama: That's a good point and it's also my biggest concern. Do you know we had a council of advisers to the Prime Minister? About a month ago, the Prime Minister invited about 80 specialists from a wide range of fields and sought advice from them. I was invited as a specialist in the environmental energy-related field and conveyed my idea. But nothing happened, even though I received media coverage and my suggestions were reported. It made the front page of the *Nikkei News Paper*, too. I received enthusiastic responses like, "What you said was really great!" Still, Japan doesn't move. Why is this? When my retirement from the presidency was approaching, I thought to myself, "What should I do for Japan?"

Murayama: You mentioned you felt like you were Al Gore.

Komiyama: But you know, Al Gore lost the election so I don't want to be Al Gore.

Murayama: [Laughs]

Komiyama: Just kidding. I debated myself whether playing full out for one organization would give me enough incentive to keep going. No, I couldn't do it for long except from a global perspective for Japan and I want to make a difference with my life, which is shorter than yours. That is why I picked the think tank, MRI. Of course, I don't believe we can solve everything with MRI. If I want to work on

"global perspective Japan," networking is important. The University of Tokyo is a very important network hub, so MRI is by extension important, and I myself became a node involved in the process that will help Japan take the lead.

Murayama: You have been right in the middle of the University of Tokyo. Do you have a different impression of the university now by observing it from outside?

Komiyama: So far, I think the new administration is still looking for a concrete direction. I suppose the University of Tokyo has a responsibility to meet certain expectations yet maintain direct contact with society through a practical branch of learning.

Murayama: What is the practical branch of learning?

Learning originates from human needs

Komiyama: For instance, the current environmental problems, sustainability, and making an aging society in the 21st century more active are major issues affecting all mankind. Japan is a country with one of the largest aging populations and so there is learning for this issue. Learning originates from practice. Your subject can have a different framework but the most of learning originates out of needs, creates specific actions; those actions are systematized, and the framework of learning will be established. Very typical is Engineering.

Murayama: It has been said

that mathematics was born from the need to survey the boundaries of the land in the Nile Delta region after floods.

Komiyama: Then, all learning was born to meet human needs. I think there are three major issues for the mankind in the 21st century; an "explosion of knowledge," the finite and shrinking earth in comparison with human activities, and an aging society. I expect effort to address them will create new learning. When we talk about "structure of knowledge," it often reminds me of the Nobel Prizes awarded to Dr. Yukawa and Dr. Koshiba. Both are most prestigious Nobel laureates who created new fields in physics. Dr. Yukawa's work is easy to understand for me. In all, the reason why electrically positive protons stick together without coming apart is explained as due to playing catch or an interaction. I can understand that intuitively. But, when talking about neutrino, I would not understand it as intuitively as Dr. Yukawa's work. For instance, I would not understand its value unless someone explains to me the reason and impact of probable neutrino's mass in an easy-to-understand structural way. In the time of the explosion of knowledge, physics has many things that all people want to know from curiosity, such as what the root of the universe is. The media gives good explanations for them by using easy-to-understand expressions, but I don't think that is enough. I wish someone would explain it in a more a

structural manner – it may not be presented by means of papers only but also by utilizing other means, such as virtual-reality technology and the like. I hope someone can make the whole thing a little easier, as was done for explaining Dr. Yukawa's Nobel Prize work.

Murayama: I see. I think it is extremely interesting that the reason why the neutrino should attract everyone's attention is because it is the reason why we, human beings, exist in the universe – I think it is quite a strong argument. All matter has corresponding antimatter. Here is a problem specific to the neutrino: how can we distinguish between neutrinos and antineutrinos when they do not have electric charges? – It may well be that there is no distinction. Then, they could be interchanged. At the time the universe was born, a large quantity of matter and antimatter was created, but, unless a tiny bit of anti-matter was turned into matter, there will be nothing left in the Universe. Neutrinos and antineutrinos look the same, so they may have caused it. It may well have been that neutrinos played the crucial role of turning a billionth part of anti-matter into matter.

Komiyama: I see.

Murayama: I am often asked if research at IPMU is useful at all, and I answer "No, I don't think so." How does that sound to you?

Structuring of knowledge links value with knowledge

Komiyama: We need to take a

step forward to ask what the word “usefulness” means. I think it means values for human beings. There is a theory called “value theory” and it is said that there are four or six values in total. But the only value having genuine value is “knowledge value.” Also there is “public value,” “economic value,” and the like. Normally when we talk about the values, the economic value is highlighted, but it is only one of the values. In the past, knowledge value, economic value, and public value were rather simply tied together and were integrated. For example, once penicillin was discovered, no one died from infection anymore; Pfizer made a fortune and at the same time a knowledge value of antibiotics emerged. The same was true for semiconductors and lasers. However, because of the underlying explosion of knowledge, now these three values get separated from each other rapidly. This situation is the same for any field.

Murayama: What do you think is needed to integrate them?

Komiyama: For example, talking about the neutrino, what may be needed is to explain it like you have just done.

Murayama: Did you feel it was useful?

Komiyama: Yes, I did.

Murayama: I’m glad to hear that.

Komiyama: I remember I heard part of the story somewhere before – there existed a little bit more matter, or the other way around, and so it survived to form the present world. You’ve

explained beyond that – neutrinos might be responsible for it, because they have no electric charges, neither plus nor minus. It makes me feel as if I understand the story, quite apart from whether I really understand it at all.

Both: [Laughs]

Komiyama: That’s an example of integration of values. But, it is possible because physics is simple. Once the unified theory is established, physics comes to an end. This is peculiar to physics. Other disciplines diversify toward human beings. Let’s think about, say, energy.

IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change) was awarded the Nobel Peace Prize. But, the only thing IPCC achieved was that it discovered that the Earth’s temperature was rising in the 20th century.

Murayama: And apparently it will continue to rise.

Komiyama: Correct. How did they do it? About 200 top-class scientists read 20,000 articles altogether in such a way that each article was read by several of them. The issue is so complicated that they barely managed to reach the conclusion only after this work.

However, global warming is a physical phenomenon controlled by only heat and material balances. For all that, the energy studies such as wind power, nuclear power, photovoltaics, geothermal power, and wave energy are about 10,000 times more complicated. But, unless ordinary people can understand by intuition what is truly

correct, it is impossible to understand the essentials. It would be overwhelming task to make things understandable by intuition. I think 2050 will be a time when half of researchers will be working on the structuring of knowledge, that is, to combine knowledge with value for human beings. Otherwise, there would be no relation between knowledge and human beings.

Murayama: Is that a university’s role?

Komiyama: Yes, that is exactly a university’s role. When *The University of Tokyo Newspaper* carried serial articles, “The University of Tokyo in 2050,” I wrote the first installment in the series. One of the topics I wrote was about diversity; a third of students will be those who are similar to the present students, another third will be those who are working in society, and the other third will be those of foreign nationality. The other topic was, as I just said, half of researchers will be those similar to the present researchers and another half will be researchers working on the structuring of knowledge.

Murayama: So far, researchers have focused on producing knowledge, but now they are requested to take another step forward to clarify its value. Is this what do you mean?

Komiyama: That’s right. Although physics, in particular your field, is an exception because it converges towards unified theory, all knowledge of other disciplines is heading towards 1ppb. This is something

that I say very often these days. They are heading more and more towards the tip of a needle. The probability of this needle point connecting to value for human beings is zero. Infinity and nothing are identical and infinite information means you have no information. I think this kind of situation will come sooner or later.

Murayama: What action are you taking to overcome it?

Komiyama: We have established the Center for Knowledge Structuring

Murayama: Has it been moving in a good direction?

Komiyama: Well, I don’t know. Engineering is a discipline that should be most sensitive about it. So the Faculty of Engineering has been seriously discussing this formidable situation for the past decade or so. As I have said earlier, three issues that we have in the 21st century are the finite and shrinking earth, aging society, and the explosion of knowledge. I strongly believe that universities should take responsibility for the explosion of knowledge.

Internationalization of university: why and how

Murayama: You have suggested that each one third of the university students will be those who are similar to the present students, those who work in the society, and those of foreign nationality. It is especially difficult to bring in foreigners, but why do universities have to internationalize and how can they achieve this?

Komiyama: Now we are living in the age of globalization. More people are coming and going, and information reaches everywhere in the world instantly through the Internet. In this situation, I think one of the important roles of universities is to work towards maintaining the diversity of human beings. This is because one aspect of the universities is to represent the local needs. To put it very simply, low carbonization is the common aim for humankind. This does not mean that we should make all the buildings in the world identical. It's ridiculous. Our buildings should go well with monsoonal climate of Japan, the climate of Tokyo. It is the University of Tokyo that can achieve low carbonization to the satisfaction of people living in the Tokyo area. Torino in Italy has a different climate and life style. People living in Torino can also achieve something suitable there. Yet there is something in common. For instance, we know that certain kinds of glass windows give better thermal insulation, so it's better to use them. Even when we deal with extremely physical issues such as global warming, we share something in common yet can still maintain diversity. This is the role that universities have to assume.

Murayama: Do you mean that people should dare to go out and come in for maintaining the diversity?

Komiyama: You are right. Also, experiencing something different makes young people

more motivated. The best thing is to have various experiences from childhood, but in reality, they have few experiences. But you can't blame the young for it. How can we put the young through diverse experiences? There will be no diversity in a group of 40 people each with similar experiences. What makes diversity is the presence of a person who has grown up in a different world and this is crucial. Students, faculties too, can enrich their experiences by interacting with a variety of people.

Murayama: I see. Then I should mention about bringing foreigners to universities in Japan. How should we do it?

Komiyama: There are a number of strategies. I have implemented some of them at the University of Tokyo when I was there. One was to create a curriculum you can finish using only English. It will start soon. In addition, there is *Recruitment & Scholarship*. The point is to adopt a system to Master's and Doctoral courses where candidates will be tested in local areas and recruited to Japan with guaranteed scholarships. Another important strategy is to establish Japanese language schools in India or somewhere in the Middle East. When I visited India and Middle East, I was asked to establish Japanese language schools. The elites in India can speak English since their childhood. So if we build Japanese language schools, lots of them will come to learn there. When those students come to Japan after learning

Japanese, they can take courses in Japanese. Considering Japan as a whole, I believe that this will work as a good tool for internationalization. It is actually tough to teach in English. Some faculty members may be able to maintain the quality of teaching even when they teach in English, but students can't keep up.

Murayama: This will be the last question. Now that IPMU has been established - and I believe it was your product - what do you think of it so far?

Komiyama: It has been working effectively far beyond my expectations. To my mind, internationalization is the front-runner in getting answers to many different problems in Japan. Take mobility of people between universities. It is not easy at all to activate personnel exchanges between the University of Tokyo and Kyoto University. It is easier to do it with foreign universities. It will come back to us in the end and have influence on increasing mobility in Japan. In this way, I believe, that internationalization will be the most effective specific measure to address all problems we face. In this sense, what IPMU has been doing is good for everything. Thanks to IPMU, the percentage of foreigners has increased dramatically. This enabled us to build the International Guest House and begin vitalizing Kashiwa Campus. And IPMU catches attention. It has made people to think "We didn't know we could do this," or "We didn't know we were allowed to do this." As a result of

corporatization, the university has discretionary power. If you are certain that you are free, you are free and if you think you are not free you are not. What is important is that strong organizations state they are free and demonstrate that they are free to do what they want to do. This can only be done by strong organizations. IPMU is doing a good job on this as well.

Murayama: IPMU is at the moment regarded as special zone inside the University of Tokyo and has been allowed to challenge a variety of things. Meanwhile it has become a so-called Dejima [*2] with barriers around it. What could be done to take them down?

Komiyama: It is fine to begin with a Dejima.

Murayama: Do you think so?

Komiyama: When I was Dean of the Faculty of Engineering, I built with the help of donations the VLSI Design and Education Center located in Asano Campus, away from the main territory of the Faculty of Engineering, and called it Dejima, a place you could do anything. It did not go very well at first, but now it has become an extremely good cycle. So, there is no use in feeling rushed.

Murayama: I understand. I will enjoy myself inside Dejima for the time being.

Both: [Laughs]

Murayama: Thank you very much for your time.

*2 : During the 16th century, Japan's shogunate adopted the national seclusion policy. Dejima in Nagasaki was constructed as an artificial, isolated island for severely restricted trading with only Dutch and Chinese merchants.

Our Team

José M. Figueroa-O'Farrill

IPMU Professor

My research may be described as an exploration of the mathematical landscape of M-theory. Much of it deals with supersymmetry, which can be understood as adding extra quantum dimensions to spacetime. The bulk of my work touches upon the gauge/gravity correspondence, most recently on the one associated to M2-branes, whose understanding might shed light on one of the outstanding problems in string theory: to find a formulation of eleven-dimensional M-theory. Currently I am involved in a research programme based on a recent proposal for a nonabelian theory of membranes. The current view is that membranes are described by three-dimensional superconformal Chern-Simons theories, which can be formulated in terms of somewhat exotic mathematical objects known as 3-algebras. Together with my collaborators

Research Area: **Theoretical Physics**



I have obtained a number of structure results about these objects and continue to apply them to the study of the superconformal theories.

Sergey Galkin

Research Area: **Mathematics**

Postdoc

I work with the Fano varieties and their properties prescribed by the Mirror Symmetry. In particular I do the degeneration of Fano varieties to toric ones and try to describe Fano varieties by their quantum D-module (Gromov-Witten invariants). For these I use (and sometimes justify) things like recently constructed hidden integral structures in the quantum cohomology, homological mirror symmetry and



arithmetic of Landau-Ginzburg models mirror dual to Fano varieties.

Dongfeng Gao

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

String theory is believed to be a promising candidate for a theory of everything. There are five consistent superstring theories in 10-dimensional spacetime. To make contact with the real world particle physics, the six extra dimensions have to be so tiny that they are undetectable. This is called the string theory compactification. In the past, we have studied the structure of D9-brane Chan-Paton factors



in Type II orientifold theories. This provides important information on string theory compactification. I am now working on the string theory phenomenological model building.

Tsz Yan Lam

Research Area: **Astrophysics**

Postdoc

My research focuses on the formation and the evolution of large scale structure. I showed how to use simplified analytical models to study the non-linear gravitational effect. It is essential to understand how gravity modifies cosmological signals in order to achieve the percent level precision constraint in the next generation of sky surveys. I am also interested in constraining primordial non-Gaussianity using



large scale structure. Such detections will have big implications for discriminating inflation models.

Rajat Mani Thomas

Research Area: *Cosmology*

Postdoc



Detailed observations in multi-wavelengths of our Universe up to a redshift of 6 and precise measurements & analysis of the cosmic microwave background (CMB) has left us with only a small fraction of the visible Universe that is not observed. This is the so called "dark ages" and the "Epoch of Reionization" (EoR). My interests are, on the astrophysical side, in efficient modeling of the $21(1+z)$ -cm from this epoch and on the technical

aspect, signal processing techniques for the extraction of these signals from the much higher galactic & extragalactic foreground contamination. On a completely different note, I also work on theoretical neuroscience & neuroimaging.



An image of the completed IPMU Research Building (center) superimposed on the present campus view. Right: Building of the Institute for Cosmic Ray Research. Left: Building of the Institute for Solid State Physics.

Our Team

Focus Week: New Invariants and Wall Crossing

Hiroshi Ooguri

Principal Investigator

Yukinobu Toda

IPMU Associate Professor

Domenico Orlando

IPMU Postdoctoral Fellow

Susanne Reffert

IPMU Postdoctoral Fellow

This year marks the 80th anniversary of quantum field theory. Quantum field theory is a program to apply the principles of quantum mechanics to “fields” such as the electromagnetic field, and it is the fundamental language of elementary particle physics. However, it is incomplete as a mathematical theory. The mathematical formulation of the Yang-Mills theory (an important example of quantum field theory) has been posed as one of the 7 Millennium Problems by the Clay Mathematics Institute along with the Poincaré Conjecture, the Riemann Hypothesis and the P versus NP Problem.

Although quantum field theory has not yet become a part of mathematics, some approximate results by physicists have been made into precise mathematical conjectures, and they have inspired developments in modern mathematics. For example, roughly 40% of Fields Medalists in mathematics since 1990 have worked in areas closely related to quantum theory. In return, such developments have provided powerful new tools to study quantum field theory and superstring theory. Since one of the stated goals of IPMU is to generate new mathematics by enhancing collaborations between mathematicians

and physicists, the research opportunity in quantum field theory has not escaped our attention.

Though physicists use integrals over infinite dimensional spaces of field configurations to perform computations in quantum field theory, such integrals are not well-defined. Fortunately, for certain quantities in supersymmetric field theories, the infinite dimensional integrals reduce to finite dimensional integrals, for which precise mathematical approaches are possible. This Focus Week has gathered leading mathematicians and physicists working on “quantum invariants” defined by such integrals. The “wall crossing” in the title of the Focus Week refers to a phenomenon where the values of quantum invariants change by some kind of phase transition. It has important consequences both in mathematics and in physics. In mathematics, it has provided new insights into the classification of higher dimensional geometry. In physics, it has played fundamental roles in deriving low energy effective theories from superstring theory, in analyzing quantum states of black holes, and in studying strongly coupled effects in gauge theories.

In response to the rapid progress in the field,



"Conference in the Time of Influenza"

this Focus Week was quickly put together in three months by the organizational committee consisting of 1 mathematician and 3 physicists. It gathered 11 invited lecturers from all over the world, among whom 7 were mathematicians and 4 were physicists. The organizers made various arrangements to enhance interactions between mathematicians and physicists. For example, each invited lecturer was asked to prepare two hour lectures. The first hour of each lecture was to aim at a broad audience. After a 10 minute break, latest results were presented in the second hour. This format turned out to be very popular. Here is a typical quote from the comments sent by one of the invited lecturers after the meeting: "I really liked the idea of the format of the talk with two hours, one geared to the general audience and one more specialized. Personally I've learned a lot from the first hours of the lectures."

In addition to invited lectures, we solicited talks by young researchers. Among them, 4 mathematicians and 4 physicists were selected to give a 45 minute talk each. The total number of registered participants was 66, among whom 32 were mathematicians and 34 were physicists. It was genuinely an

interdisciplinary meeting, "crossing walls" between mathematics and physics.

Since the Focus Week was held in the midst of the H1N1 Influenza pandemic, every possible step was taken to ensure the health and well-being of the participants. We placed alcohol-based hand sanitizers at the 2 entrances of the conference building and asked everybody to use them. We bought 700 surgical masks for the conference, encouraged participants to get new masks every day and reminded them to wear them. In the opening address, we made a special presentation to demonstrate how to wear and dispose of the masks properly. In addition to asking all the participants to measure their body temperatures in every morning and evening, we set up a thermographic camera at the exit of the conference hall and measured the body temperatures of all the participants before lunch every day. Participants cooperated with us with a sense of humor; some called the meeting as "Conference in the Time of Influenza" making a parody of the famous novel* by Gabriel García Márquez.

* *Love in the Time of Cholera*

News

Second WPI Follow-up Meeting

The WPI Program Committee held its Second Follow-up Meeting on March 17, 2009. The Committee reviewed the progress of the WPI project based on a summary report by Program Director, Dr. Kuroki, and a progress report from each WPI center presented by the center director, followed by site visit report of the corresponding program officer. At each Follow-up Meeting, attendees hear scientific presentations after the Committee's closed discussion. This time, IPMU Associate Prof., Naoki Yoshida, and IPMU Principal Investigator, Hiroshi Ooguri, gave talks entitled "Physics of the Universe –The First Light–," and "Mathematics of the Universe," respectively.

The Follow-up results have been made public at http://www.jsps.go.jp/english/e-toplevel/data/08_followup/Followup_e.pdf. The Committee evaluated IPMU highly, as it is becoming an "internationally visible WPI research center" within a short time after its launch. The Committee also pointed to the strong and effective leadership of Director Murayama. On the other hand, the Committee mentioned some points that need improvement. Among them are fruitful collaboration between mathematics and physics, the need for tenured positions for researchers, and access to graduate students.

Current Construction of IPMU Research Building

The IPMU Research Building is under construction. Its unique design is thanks to Professor Hidetoshi Ohno of the University of Tokyo and KUHARA Architects. A perspective view of the building is shown on page 15. Construction, begun on February 9, 2009, is currently ongoing at the 3rd and 4th floor level. Its expected completion date is in December, 2009.



Construction area of the IPMU Research Building as of June 10

PR Presentation in the Lobby of the Head Administration Building

Each department of the University of Tokyo takes turns to conduct a presentation in the lobby of the Head Administration Building. The IPMU PR presentation is scheduled from May 15 to mid-July, 2009. It includes a video introduction of IPMU by Director Murayama, and "HATENA Universe" footage, which simplifies technical terms about the universe, by IPMU researchers. There is also an exhibition in the showcase: a computer simulation by IPMU Associate Prof. Naoki Yoshida



Exhibition in the showcase

entitled "The Growth of the Large-Scale Structure of the Universe." Panels detailing IPMU activities are also exhibited.

IPMU Joint Public Lecture with the Institute for Cosmic Ray Research "Telling the Story of Universe"

On April 18, 2009, a joint public lecture entitled "Telling the Story of the Universe" was held for Kashiwa City residents at Amuser Kashiwa Crystal Hall. It was the first time to try co-hosting the lecture with the Institute for Cosmic Ray Research, and it was mutually agreed that two lectures a year would be held (one for Kashiwa City residents). Takaaki Kajita, ICRR Director and IPMU Principal Investigator, hosted the event; Kazuaki Kuroda, ICRR professor, gave a speech entitled "The Mysteries of the Universe Explored using Gravitational Waves"; and IPMU Associate Professor, Naoki Yoshida, gave a speech entitled "Stars and Galaxies Born in the Dark Universe." The lecture drew 233 people, and, in a survey, participants expressed the wish that this kind of event continues, and satisfaction with the front-line stories.

Particle Physics Special Talk Show "Is Missing Antimatter the Largest Magic Show in the History of the Universe?"

On April 18, 2009, the Particle Physics Special Talk Show "Is Missing Antimatter the Largest Magic Show in the History of the Universe?" was jointly hosted with the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) at Epochal Tsukuba. It was a predigested show that even elementary school pupils could enjoy, and many families and groups of children gathered for it. During the lecture, "Where did antimatter go?" the audience applauded enthusiastically after IPMU Director Murayama had explained antimatter using character dolls. Afterwards, KEK Assistant Professor,

Takeo Higuchi, introduced the KEKB High-Energy Accelerator in an easy-to-understand manner. Finally, Close-Up Magician, Tomohiro Maeda, performed the “Rules of Energy” magic show, and participants enjoyed taking in the mysteries of both particles and the magic.

Director Murayama’s Talk on Singularities in the Universe at 110th University of Tokyo Public Lecture on *Tokui*

Every Saturday between April 4 and May 16, the University of Tokyo held Public Lectures on *Tokui* at its Yasuda Hall. The Japanese word *tokui* means peculiarity, singularity, or uniqueness. On April 25, IPMU Director, Hitoshi Murayama, gave a lecture entitled “The Singularities in the Universe, the Big Bang and Black Holes.” The lecture was well received by an audience of over one thousand people.

Talk Given to Elementary School Pupils by IPMU Researchers of Various Nationalities

A talk was held on May 22, 2009, at the Tokatsu Techno Plaza in Kashiwa City. Three IPMU researchers of various nationalities, Marcos Valdes, Guillaume Lambard and Susanne Reffert, gave a 10-minute talk each to 5th graders of the local Toyofuta Elementary School, interpretation provided by the IPMU administrative staff. They addressed mysteries of the universe such as what the universe is made of and how it began. They also talked about what researchers are doing at IPMU. The sense of humor they maintained throughout the talk kept the pupils listening with



great curiosity. Among other unique questions, one pupil asked: “If we were sucked down to the middle of a black hole, where would we go?” Pupils became aware of IPMU as a place where many researchers from abroad do research.

Hiroshi Ooguri Uses 3-Dimensional Crystals to Decode Quantum Information in Black Holes

Hiroshi Ooguri (IPMU Principal Investigator) and Masato Yamazaki (School of Science, the University of Tokyo) have shown that each quantum state of a particular class of black holes in string theory corresponds one-to-one to a molten crystal in three dimensions. For example, an ice crystal is formed by water molecules. When it melts, it starts losing molecules from its corners. Similarly, space-time without a black hole is a perfect crystal. As the crystal loses molecules, the black hole grows larger. At the thermodynamic limit, where the size of individual atoms becomes negligible, they showed that smooth space-time emerges and Hawking’s prediction is reproduced. The result of this study was published in the April 24 issue of *Physical Review Letters*.

IPMU Hosts a Meeting of the “InterAction Collaboration” of Particle Physics Laboratories

On April 14 and 15, 2009, a meeting of the “InterAction Collaboration,” whose members represent the world’s particle physics laboratories such as CERN and FERMILAB, was held in the conference room of the University of Tokyo’s Kashiwa Library. The collaboration developed and jointly maintains the interactions.org web site, which serves as a central resource for communicators of particle physics. IPMU joined the collaboration last year and hosted the event this year. During the meeting, the participants exchanged

information on public relations in their countries, and discussed the resolution of foreseen problems and overviews of public relations. A participant from CERN gave an interesting presentation on how to deal with the media, using the movie *Angels and Demons* as an example.

Conference Report

Focus Week: non-Gaussianities in the sky

“Focus Week: non-Gaussianities in the sky” was held at IPMU for five days: April 6-10, 2009. Our universe has various structures at different scales, such as planetary systems, galaxies, clusters of galaxies, and so on. According to the latest theory, this rich array of structures originates from quantum fluctuations in the early universe. In this focus week, leading researchers working on the non-Gaussianities of fluctuations in cosmology gathered together from all over the world and discussed many aspects of the subject, including theories and observations related to inflationary cosmology, the cosmic microwave background, and the large-scale structure of the universe. In a very timely way, a new satellite, “Planck,” was launched on May 14, not long after the end of the workshop. This new observatory is believed to have the potential to detect the non-Gaussianities of fluctuations in the early universe; so, some of the predictions heard during the focus week may be proved in the near future.

Conference Report

Focus Week: New Unchangeable Quantity and Wall Crossing

This focus week was held between May 19 and 22, 2009, in the Media Hall of the Kashiwa Library. The IPMU administrative staff was dealing with

the New Flu precautionary measures, which were taken with regard to all the participants and people concerned. These early precautionary measures and the introduction and use of thermographic measurements meant that the research conference ran smoothly. Further details are reported on page 16.

Future Conference

Dark Energy: Lighting up the Darkness!

The IPMU International Conference "Dark Energy, Lighting up the Darkness!" will be held for five days, June 22-26, 2009, at the Media Hall of the Kashiwa Library on the University of Tokyo Kashiwa campus.

The aim of the conference is to take on the topic of dark energy, which is the biggest mystery of modern cosmology and particle physics. Invited speakers will address such topics as models of dark energy, modified gravity, Ia SNe survey, temperature anisotropies of the cosmic microwave background, gravitational lensing, baryon acoustic oscillation, and surveys of clusters of galaxies using the Sunyaev-Zeldovich effect and X-ray observations.

Seminars

IPMU hosts regular seminars every Wednesday at 3:30 pm. Information is posted on the IPMU website at http://db.ipmu.jp/seminar/?mode=seminar_recent.

Separate seminars are also held for each research fields. At present, seminars for particle physics and astrophysics are held every Thursday at 1:30 pm, mathematics and mathematical physics every Thursday at 3:30 pm. Mathematics seminars are also held at Komaba Campus. (See IPMU Komaba Seminar)

IPMU Seminars

1. "A roadmap to the stars: towards a global strategy for astroparticle"
Speaker: Stavros Katsanevas (IN2P3 / CNRS and IPMU)
Date: Mar 02, 2009
2. "The stellar initial mass function in low metallicity gas"
Speaker: Simon Glover (ITA, Heidelberg University)
Date: Mar 04, 2009
3. "Precision Measurements at Hadron Colliders"
Speaker: C.-P. Yuan (Michigan State University)
Date: Mar 05, 2009
4. "AdS Vacua, Attractor Mechanism and Generalized Geometries"
Speaker: Tetsuji Kimura (YITP)
Date: Mar 05, 2009
5. "A holographic perspective on non-relativistic defects"
Speaker: Andreas Karch (Washington University)
Date: Mar 12, 2009
6. "Pulsars: excellent systems for testing particle acceleration theories"
Speaker: Kouichi Hirotsu (National Tsing Hua University)
Date: Mar 16, 2009
7. "In situ commissioning of the ATLAS electromagnetic calorimeter and early Z⁰ to ee discovery potential"
Speaker: Pierre-Simon Mangard (CPPM)
Date: Mar 18, 2009
8. "Introduction to the 2-categorical homological algebra"
Speaker: Hiroyuki Nakaoka (The University of Tokyo)
Date: Mar 19, 2009
9. "Dynamics of Hyperpolarized ¹²⁹Xe Production"
Speaker: Geoffrey Schrank (University of Utah)
Date: Mar 24, 2009
10. "Development of segmented germanium detectors for neutrinoless double beta decay experiments"
Speaker: Jing Liu (Max Planck Institut für Physik)
Date: Mar 24, 2009
11. "Splitting Kaluza-Klein spectrum and its phenomenology"
Speaker: Seong Chan Park (IPMU)
Date: Mar 25, 2009
12. "Quantum Resolution of Cosmological Singularities"
Speaker: Neil Turok (Perimeter Institute)
Date: Mar 26, 2009
13. "The Strong Gravity Theorem"
Speaker: Simeon Hellerman (IPMU)
Date: Mar 26, 2009
14. "Is there eternal inflation in the cosmic landscape?"
Speaker: Henry Tye (Cornell University)
Date: Apr 01, 2009
15. "Holography and braneworld black holes"
Speaker: Ruth Gregory (Durham University)
Date: Apr 02, 2009
16. "The Kerr/CFT Correspondence"
Speaker: Wei Song (The Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences)
Date: Apr 02, 2009
17. "Dark energy or light gravity?"
Speaker: Ruth Gregory (Durham University)
Date: Apr 08, 2009
18. "Improved Holographic QCD"
Speaker: Elias Kiritsis (University of Crete)
Date: Apr 09, 2009
19. "Studying Galaxies and Reionization with 21-cm Cosmology"
Speaker: Rennan Barkana (Tel Aviv University)
Date: Apr 14, 2009
20. "Composite Higgs Physics"
Speaker: Christophe Grojean (CERN)
Date: Apr 15, 2009

21. "Supersymmetry without Prejudice"
Speaker: Joanne Hewett (SLAC)
Date: Apr 16, 2009
22. "On the strong coupling behavior of Wilson loops in N=2 superconformal gauge theories"
Speaker: Takao Suyama (Seoul National University)
Date: Apr 16, 2009
23. "New Insights into Cosmological Gravitational Clustering"
Speaker: Francis Bernardau (Saclay)
Date: Apr 17, 2009
24. "The Landscape of Intersecting Brane Models"
Speaker: Florian Gmeiner (NIKHEF)
Date: Apr 21, 2009
25. "Co-evolution of supermassive black holes and galaxies within their larger-scale structures"
Speaker: John Silverman (EHT-Zurich)
Date: Apr 22, 2009
26. "Duality cascade of softly broken supersymmetric theories"
Speaker: Tetsutaro Higaki (Tohoku University)
Date: Apr 23, 2009
27. "Future foam: Nontrivial topology from bubble collisions in eternal inflation"
Speaker: Yasuhiro Sekino (OIQP)
Date: Apr 23, 2009
28. "Some research on the BESIII experiment offline software"
Speaker: Jike Wang (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences)
Date: Apr 27, 2009
29. "Gromov-Witten Theory and Integrable Hierarchies"
Speaker: Todor Eliseev Milanov (North Carolina State University)
Date: Apr 27, 2009
30. "Investigation of the sources of the highest energy cosmic rays and neutrinos"
Speaker: Hajime Takami (IPMU)
Date: Apr 30, 2009
31. "Four point functions of higher weight operators in the AdS/CFT Correspondence."
Speaker: Linda Uruchurtu (DAMPT)
Date: Apr 30, 2009
32. "Ghost of massive gravitation in de Sitter space"
Speaker: Keisuke Izumi (IPMU)
Date: May 07, 2009
33. "Landau-Ginzburg model and integrable hierarchies"
Speaker: Yongbin Ruan (University of Michigan)
Date: May 07, 2009
34. "Lecture Series on Topological Strings and Mirror Symmetry at Landau-Ginzburg-Orbifolds"
Speaker: Yongbin Ruan (University of Michigan)
Date: May 08, 2009
35. "K3 surfaces with involution and Borchers products"
Speaker: Ken'ichi Yoshikawa (the University of Tokyo)
Date: May 08, 2009
36. "Lecture Series on Topological Strings and Mirror Symmetry at Landau-Ginzburg-Orbifolds"
Speaker: Yongbin Ruan (University of Michigan)
Date: May 11, 2009
37. "Neutrino Probes of Supernovae"
Speaker: S. Horiuchi (IPMU)
Date: May 14, 2009
38. "Surface operators and AdS/CFT correspondence"
Speaker: Satoshi Yamaguchi (Seoul National University)
Date: May 14, 2009
39. "Residues of Chern classes"
Speaker: Tatsuo Suwa (Hokkaido University)
Date: May 15, 2009
40. "Index and residue theorems in holomorphic dynamics, an overview and some recent developments"
Speaker: Isaia Nisoli (University of Pisa)
Date: May 15, 2009
41. "The elusive neutrino: how double beta decay and the EXO experiment may help unlock its secrets"
Speaker: Andreas Piepke (University of Alabama)
Date: May 20, 2009
42. "Neutrino masses in R-parity violating supersymmetry"
Speaker: Avelino Vicente (IFIC)
Date: May 20, 2009
43. "Search for Dark Matters and Axios"
Speaker: JongHee Yoo (FNAL)
Date: May 21, 2009
44. "The n-category of cobordisms and TQFTs"
Speaker: Alexander Voronov (University of Minnesota)
Date: May 25, 2009
45. "The first generation of galaxies and 21cm fluctuations"
Speaker: Smadar Naoz (Tel Aviv University)
Date: May 28, 2009

IPMU Komaba Seminar

1. "Multiplication in differential cohomology and cohomology operation"
Speaker: Kiyonori Gomi (Kyoto University)
Date: June 08, 2009

Personnel Changes

Changes of Principal Investigators

Two mathematicians, Akihiro Tsuchiya and Michio Jimbo, stepped down as IPMU Principal Investigators on March 31, 2009. IPMU Professor Tsuchiya continues his research at IPMU. Professor Jimbo moved from the Graduate School of Mathematical Sciences, the University of Tokyo, to Rikkyo University, and also left IPMU.

As a result of these changes, IPMU is in the process of finding new Principal Investigators in the area of mathematics.

Seesaw Mechanism

Tsutomu Yanagida Principal Investigator of IPMU

When spin 1/2 fermions are massless, there are two independent fermions. One is the left-handed fermion and the other the right-handed fermion. If they couple with each other, they may have a mass m , together, as a devoted couple. In this way the electron has a mass. However, in the case of neutrinos there is an anomaly, since they are electrically neutral. The right-handed neutrino can have a mass together with its anti-particle, since it is left-handed and neutral. This mass M with an anti-particle may be very large compared with the normal mass m . The left-handed neutrino will then feel alone. If the mass M is infinity, practically speaking it is as if the right-handed neutrino has gone away and the left-handed neutrino remains massless. However, the mass M is finite and hence the left-handed neutrino has a small mass m^2/M . This mechanism which generates small neutrino masses is called the seesaw mechanism.



Seesaw Mechanism

$$(\text{neutrino mass}) \simeq m^2 / M$$

統一

IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし

私は子供時代に西ドイツに住んでいて、1978年の修学旅行の行き先はベルリンでした。東ドイツは領空をルフトハンザが飛ぶことを許さなかったので、パン・ナム便で行ったのです。訪れたベルリンの壁の一部には、東ベルリン側のアパートの窓から沢山の人が西側に飛び降り、命を失った場所があります。11年後、群衆が壁を壊している様子をテレビで見て感動しました。ドイツは統一したのです。

統一は宇宙の理解にもとても大事です。ニュートンは重力の理論を築いてリンゴと惑星を統一しました。一つの理論が地上と天上のものに共通して当てはまるというのは革命的な考えで、宇宙についての人類の見方を永遠に変えてしまったのです。マックスウェルは電気と磁気を統一し、光は電場と磁場のダンスのようなのだと提唱しました。彼の理論抜きには、ラジオ、テレビ、電子レンジ、DVDなど、現在のテクノロジーのほとんどはあり得ません。

その後、自然界には重力と電磁気力以外に二つの力があることが見付き、「弱い力」と「強い力」と呼ばれ、どちらも私たちの日常生活に必要なとわかりました。強い力は原子核がバラバラにならないようにまとめ、化学と生命を可能にしています。弱い力は太陽を燃やし、毎秒50億キロの重さをエネルギーに転換することで地球上の生命を支えています。しかしこの二つの力に余りなじみがないのは、遠くへ届かないからです。弱い力はなんとナノメートルの更に10億分の一程しか届きません。

物理学者はこのように全く違って見える力を統一す

る真の統一理論を見つけようと頑張っています。今号のIPMU Newsでは、全ての原子がいつかは壊れてしまうことを発見して力の統一を証明しようと人生を掛けて努力して来た様子を、ハンク・ソーベルが語っています。ハンクとIPMUの多くのメンバーはスーパーカミオカンデ実験を建築し、水素原子の寿命は一兆年の一兆倍の更に十億倍よりも長いことを示しました。宇宙の年齢がたったの137億年だということを考えると、これはとんでもない実験結果です。この探索はまだ続いており、スーパーカミオカンデの更に二十倍も大きい装置を作ろうと考えています。

理論的には、重力と他の力を統一するのは非常に難しいことがわかりました。問題の本質は素粒子を「点」として扱って来たことで、二つの点が「バン」とぶつかる訳のわからない無限大がでてくるのです。もし素粒子がゴムひものように広がりを持っていると、二つのひもがぴったり重なるということは滅多にないでしょうから、理論がもっと安全になります。今号の大栗博司氏の記事では、物理理論全体をひもを使って書き換えてしまおうという野心的な試みには数学者の助けが必要で、数学者自身もひも理論からインスピレーションを受けることがわかります。IPMUでは物理学者と数学者が共同で実りの多い研究会を持ちました。更に新型インフルエンザ、マスク、殺菌用アルコール、サーモグラフィーというおまけ付きで。

様々な力や物質の間のベルリンの壁が崩れ落ちる日が楽しみです。そしてIPMUは壁を崩すのに大きな貢献をしていきたいと思っています。

大統一と陽子崩壊の探索

陽子崩壊で大統一理論をテストする

自然界の力を単一の数学的記述によって統一することは、物理学者の長年の目標の一つである。電磁的な力と弱い力は既に電弱理論として統一され、次のステップは強い力を含む統一である。これを目指す種々の試みは大統一理論 (GUT's) と呼ばれる。大統一の起きるエネルギーは未知ではあるが、 10^{16} GeV程度と予想されている。このエネルギー領域は加速器で到達可能なエネルギーより遙かに高い。そのため、この領域での研究は挑戦そのものである。しかし、大抵の大統一理論は陽子崩壊を予言する。陽子崩壊を観測しどのような粒子に崩壊するか調べることで、大統一を

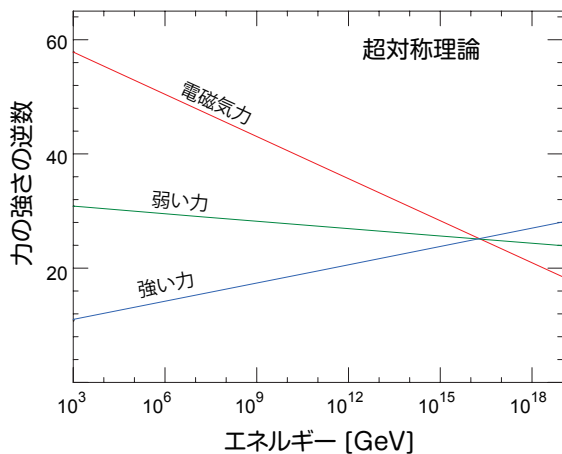


図1 力の統一。力の強さはエネルギーと共に変わる。力の強さの逆数をエネルギーの関数としてプロットすると、 10^{16} GeVで3つの力の強さが等しくなる(統一される)ように見える。

立証し、理論模型の区別が可能となる。従って、陽子崩壊の探索は大統一理論を実験データと比較検討できる限られた手段の一つであり、この目標に向けての進歩はどのようなものであれ、将来の物理学の進展にとってユニークな価値を有する。

初期の陽子崩壊探索の動機は、保存則のテストであった。物理学において、保存則は我々が物質の振る舞いを理解するための強力な手段である。保存則のうち、エネルギー保存、運動量保存、角運動量保存、電荷の保存、等は古典的物理学の時代から良く知られている。これらは一般的な理論原理に立脚しており厳密に成り立つ。他の保存則は純粋に経験則であり、言い換えれば、明確な理論的根拠をもたず、実験的にある反応が起きないことを説明するために提唱されたものである。この第2のグループにはバリオン数の保存やレプトン数の保存がある。一般的には、保存則で禁止されない反応はどんなものであれ、頻度は高くはないかもしれないが、起きることが期待される。厳密な保存則は自然の対称性に対応するものである。例えば、運動量と角運動量の保存は、それぞれ並進対称性と回転対称性に由来する。

ワイルが初めて陽子の絶対的安定性を示唆したのは1929年のことであった。1954年にゴールドハーバーは非常に一般的な根拠に基づき、陽子の寿命は 10^{18} 年より長いことを示し、また同年、最初の実験的な陽子寿命の下限として 10^{20} 年を得た。1954年から1974年にかけて、他の目的で作られた、より大きな測定器を用いることにより陽子寿命の下限は、徐々に

改善された。状況が一変したのは1974年のことである。最初の有望な大統一理論であるSU(5)理論が発表され、陽子の寿命が 10^{27} 年と 10^{31} 年の間であることを予言した。うまいことに、その予言は当時得られていた寿命の下限より長く、しかし陽子崩壊探索に特化した実験であれば到達可能な範囲にあった。

巨大測定器が必要

とはいえ、この予言をテストするために必要な実験のスケールは、挑戦的な課題を突きつけるものであった。陽子崩壊は統計的な過程である。もしたった1個の陽子に注目するなら、その崩壊を観測するためには 10^{31} 年待たなければならぬ。一方、 10^{31} 個の陽子を閉じこめた容器の中では平均して毎年1個の陽子が崩壊する。1トンの物質中には約 6×10^{29} 個の陽子（と中性子）があるので、必要とされる測定器の大きさは100トン級であるが、安全を図れば1,000トン級の測定器が必要であろう。アメリカのIMBと日本のカミオカンデは第1世代の測定器であり、1980年代に稼働し、結果を出した。しかし、残念ながらSU(5)により予言された寿命で陽子崩壊は発見されず、予言より長い陽子寿命の下限値を得たのみである。かくて、最初の大統一理論は実験により葬り去られたのである。

IMBとカミオカンデの時代以来、SU(5)に替わる多様な大統一理論が発展した。これらはSU(5)より大きな基本的な数学的対称性を仮定し、また超対称性の可能性を含むものである。幾つかの魅力的なモデルは、

ニュートリノの質量及び混合と陽子崩壊の関係を強調する。一般的に、これらの理論は新たな崩壊の様式と、より長い寿命を予言する。

従って、陽子崩壊探索実験は、進歩が続く限り必然的により大きな測定器を要求する。陽子の寿命は先験的には知られておらず、現在の下限値のすぐ上から何桁も大きな値までのどこかにあるかもしれないので、測定器の感度を高々数倍にする程度では新しい実験の動機付けとしては不十分である。しかし、寿命の下限を1桁改善するにはスーパーカミオカンデを更に10倍以上運転するか、1桁大きな測定器を建設するしかない。

スーパーカミオカンデが保持する世界記録

今や「古典的」な、陽子が陽電子と中性パイ中間子へ崩壊する過程、 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ はバックグラウンド（本物と混同するような他の事象）が少なく、効率の良い検出が可能である。現在、スーパーカミオカンデがこの崩壊様式について最良の制限 ($\tau/\beta > 8 \times 10^{33}$ 年, 90% CL; 脚注*参照) を与えている。超対称理論によれば $p \rightarrow \nu K^+$ 崩壊が主であるが、ニュートリノは検出できないので実験的に

* 陽子が崩壊してどのような粒子になるか（崩壊様式）は、いろいろな可能性がある。全崩壊確率を1とすると、それは全ての可能な崩壊様式への崩壊確率の総和である。一つの崩壊様式*i*への崩壊確率 β_i は当然1より小さい。理論モデルは β_i についても予言するが、実験的に測定されるまでは未知の量である。一つの崩壊様式だけを調べると、陽子の寿命 τ そのものではなく、 τ/β_i を調べていることになる。ここでは*i*を省略して τ/β で代表させる。測定から得られる τ/β に対する制限は、通常90%信頼限界(CL)という統計的な量で表される。この意味は、仮想的に何度も同じ実験を繰り返したとして、毎回の結果は統計的にふらつくが、90%の場合はこの制限内に収まるというものである。逆に言えば10%の場合はこの制限に収まらない結果になり得る。

はずっと難しい。スーパーカミオカンデによる現在の制限は $\tau/\beta > 2 \times 10^{33}$ 年 (90% CL) である。しかし、陽子の本当の崩壊様式は先験的には未知であるため、実験的に得られる崩壊の信号は多様で有り得る。従って、将来の測定器は、運動学的に許されるほとんど全ての崩壊様式に感度を持つ必要がある。さらに、次のことが強調される。現在の制限を大幅に改善するためには巨大な測定器の質量と長い測定期間を要するため（また、本当に陽子崩壊を観測できるか、不確定要素が大きいため）、陽子の崩壊を待ちつつ他の重要な物理的問題を研究することができるような能力を持つべきである。過去、陽子崩壊実験はニュートリノ物理と天体物理学に重要な貢献をしてきた。当然、将来の実験も同様の研究に備えなければならない。

陽子崩壊発見のための測定技術については、いろいろな方法が議論に上っている。その中で、 10^{35} 年あるいはそれ以上の寿命を測れるのは水チェレンコフ検出器だけと思われる。他に、液体アルゴンや液体シンチレーターを用いる技術も議論はされてきたが、それらが優るとされる点の大部分は推測によるものであり、必要とされる巨大なサイズでちゃんと働くのかどうかは証明されたというには程遠い。

次世代実験に向けて

根本的な物理である陽子崩壊の探索を前進させるには、理想的には全世界的な協力の一環としての新たな参加表明が必要となるであろう。欧州、日本、米国の

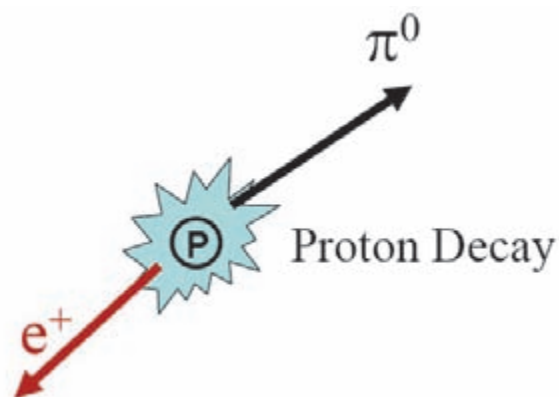


図2 代表的な陽子の崩壊様式 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$

研究グループは共同作業の必要性を十分に認識しており、実際、既にそのように動いている。将来の水チェレンコフ検出器による陽子崩壊探索地下実験について、大筋で協力しながら各地域でそれぞれのプロジェクト（米国の新しい国立地下研究所DUSELにおける計画、日本のハイパーカミオカンデ計画、欧州のMEMPHYS計画）の検討が進められている。提案されているのは全て100万トン級の計画である。モンテカルロ法による詳細なシミュレーションによれば、提案されている測定器によりスーパーカミオカンデの与えた陽子崩壊に対する制限を1桁改善する目標は、達成可能であると考えられる。測定に十分時間をかければ、 10^{35} 年の数倍の寿命でも陽子崩壊の明確な発見が可能であろう。また、100万トン級の測定器はニュートリノ物理の研究にも強力な手段となる。

スーパーカミオカンデは、引き続き素晴らしいエキ

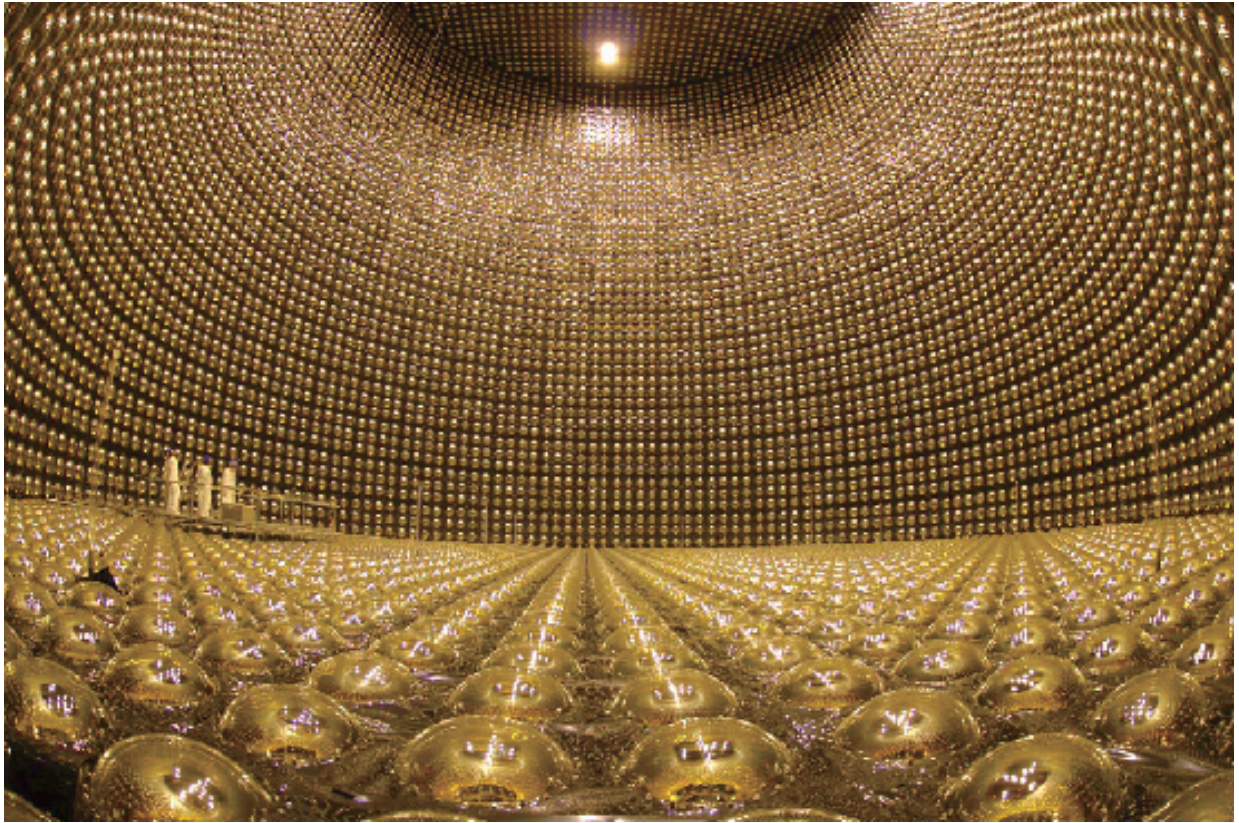


図3 スーパーカミオカンデの内部（2006年の改修後、純水を満たす前に撮影）

サイティンクな結果を出し続ける。次世代の陽子崩壊実験は、期待される物理を展開するのにふさわしい規模（スーパーカミオカンデの10倍以上）の支援が得られれば、スーパーカミオカンデが上げてきた成果に匹敵するような重要な成果を続々と上げるであろう。そう期待するだけの十分な理由がある。

効率的で安価な光検出器の開発研究（通常の光電子増倍管の改良と新規技術の開発の両面がある）は、次世代の巨大測定器建設の必要条件ではないが、経費を低減できると共に測定能力を大幅に高められるであろう。この開発研究は、他の多くの研究にも役立つことから、強

く支援されて然るべきである。

最後に、陽子崩壊の探索は、大規模かつ現代的な地下実験施設を必要とする多くの素粒子物理、天体物理研究の一つに過ぎないことを指摘したい。アメリカで計画中の国立地下研究所は、陽子崩壊だけでなく、現在計画中ないしは検討中の大小さまざまな実験全てを促進するであろう。このような研究所は多くの実験に対して集中的研究施設を提供する。これがなければ各実験がそれぞれ重複して実験施設を用意せざるを得ないことを考えると、間違いなく非常に経済的である。



IPMU Interview

小宮山 宏・前東大総長に 聞く

聞き手：村山 斉

今はオールジャパンのために働いています

村山 総長最後の日に、挨拶に伺いました。「お疲れ様でした」と言ったら、「疲れてないよ」という御返事が凄く印象に残っています。その後いかがですか？

小宮山 正直に言って、そんなに疲れてないですよ。

村山 今はどんな生活ですか。

小宮山 皆、総長が終わって僕が暇になったと思っているのですね。それで余計忙しくなった。

村山 なるほど、こういう依頼がたくさん来るわけですね。

小宮山 講演依頼などが総長時代の3倍くらいになったので、実はほとんど断っています。昔からの友達とか、高専の学生が

3000人集まるとか、そういう特別なものしか引き受けていません。

村山 なるほど。では講演以外の時間は基本的にここにいらっしゃるのですか？

小宮山 ここ（三菱総研）との約束は週2回仕事をするとことです。しかし

小宮山とコンタクトを取りたいというときの連絡先はここをお願いします。ですから、オフィスはいつもここで、ある意味ではオールジャパンのために仕事をしています。たとえば、日本経済新聞に経済教室という一面程度の欄がありますが、先日、そこに環境エネルギーのために何をしなくてはいけないかという、具体的な財政の方法まで含めた提案をしました。

村山 それは、官庁に対してですか。企業に対してですか。

国の初期投資で
家庭の屋根に太陽電池を

小宮山 世界で二酸化炭素をどれだけ減らさなくてはいけないかという京都プロトコルが2012年に終わるので、今、ポスト京都の枠組みをどうするかと議論されています。それで、日本はどうすると減らせるのか。そこで、次のような提案をしました。それは、今日本の財政は大変ですから、財政に負

小宮山宏さんは第28代東京大学総長の任期（2005年4月～2009年3月）を終え、2009年4月からは三菱総合研究所理事長の職にあります。1967年に東京大学工学部化学工学科卒、1972年に東京大学工学系研究科博士課程修了、工学博士。専門は化学工学。以来、東京大学で教育・研究に従事し、1988年に教授。工学部長（2000年4月～2002年3月）、副学長（2003年4月）、理事・副学長（2004年4月）を歴任。大学時代はアメリカンフットボール部に所属したスポーツマン。

担をかけず、逆に経済を成長させつつ二酸化炭素の削減を図れるというものです。これを「自立国債」と名付けました。自分で立つ自立です。それは、国が国債を発行して例えば太陽電池を買い、希望者の家庭の屋根に乗せるところまで国がするのです。その太陽電池は国のものですから、国が電気代をいただきます。そうすると、今の価格でも15年で償還できます。

村山 家庭が払う電気代は、普段電気会社に払うのと同じくらいに設定するのですか。

小宮山 最初はその制度を利用して、少し高く設定するという感じですね。15年経つと、その電池を家庭が貰えるわけです。そうすると誰も損しない。そして日本中の家の屋根に太陽電池が乗っていることになります。なぜそんなことができるかということ、回収できる初期投資を国が立替えるからです。僕の家の太陽電池は200万円投資して買いました。7年前ですが、それまで払っていた年間30万円の年間のエネルギー代が、今5万円です。そのうち11万円が太陽電池による分です。そうすると200万円を18年で取り戻せることになります。今なら10年です。しかし、いくら10年経ったら取り戻せるといっても、今200万円出すのは、多くの人にとって辛いでしょう。なので、それを国が立替えればいいのです。日本には、世界一と言われる1500兆円の個人資産があります。皆老後が心配だから使わないで貯めているわけです。それが、「自立国債」では、例えば利息を1%割り増しするような国債を発行すれば、人は投資をするでしょう。これは間違いなく経済の活性化であり、将来に向けた新産業の創造で

す。それが僕の提案です。僕ひとりではなく、数人で議論し、知恵を具体的な形に集約し、提案するという、そういうことがこれからやりたいことです。

村山 具体的にはどう動くのですか？ 国から知恵を貸してほしいと話が来ているのか、小宮山さんがそのグループと提案書を突きつけるのですか。

小宮山 それは非常にいい質問で、いま私が一番悩んでいるところです。有識者会議というのがあったのをご存じですか。一月くらい前に、首相がいろいろな分野から有識者80人くらいを呼んで意見を聞くという会がありました。環境エネルギー関連で私も呼ばれ、今のことを申し上げました。でも何も動かないですね。しかし、マスコミは非常に興味を持って、私の今の提案なども報道されています。それから日本経済新聞で1面に。それで「小宮山さんの言っているあれは良いじゃない」という反響は非常にあります。しかしそれでも動かないですね、日本は。どうしてだろう。僕は東大総長の任期が終わるとき、日本という国に何をしようかと思って、そのときいろいろお誘いは頂いたのですが。

村山 日本のアル・ゴアになるという気分だとお伺いしたことがありました。

村山齊さんは東京大学数物連携宇宙研究機構(IPMU)の機構長で、素粒子理論の世界的なリーダーの一人であるとともに、基礎科学分野における若き指導者の一人でもあります。1991年に東京大学で博士の学位取得後、東北大学助手を経て1993年に渡米、1995年にカリフォルニア大学バークレー校助教授、1998年に同准教授、2000年に同教授。2008年1月にIPMU機構長、東京大学特任教授に就任。





小宮山 でもね、アル・ゴアは大統領選挙で負けたよね。だからアル・ゴアにはなりたくない。

村山 (笑い)

小宮山 いや、それはうそ。僕が考えたのは、一つの組織のために全力を尽くすことで、自分のインセンティブが続くだろうか、いや、これは続かない、やはり世界を視野に入れた日本のためでない。それから、村山さんほど長くはない人生を一生懸命やれること。それでシンクタンク。でも、三菱総研だけで何ができるとは思っています。やはり世界を視野に入れた日本というなら、ネットワークだと思う。東大は非常に重要なネットワークのハブの一つで、三菱総研もある種のハブになって、個人としてもネットワークの重要なノードになって、それで、もしかしたら、そうやったら日本が動くか、というような思いなのです。

村山 そうすると、今まで東大の中で本当に真ん中にずっといらっしやっただけですが、東大という組織から出て外から見

た東大は、中から見たとときと印象が違いますか。

小宮山 今、まだ新執行部がこういうかたちでこういう方向へ行くということがはっきり見えてないと思います。東大に対する期待にもっと応えなくてはいいのではないかと、特に実学の部分をもっと社会と直接的なコンタクトをもちながらやっていくことを期待されているのではないかと僕は思います。

村山 実学の部分とは具体的に何ですか。

学問は人間の必要性から生まれてくる

小宮山 たとえば今の環境の問題、サステナビリティ、それから、21世紀は高齢化が世界の重要な背景となるので、高齢化社会をどうやって生き生きとしたものにしていくかが人類の課題になります。日本はまだに高齢化では先陣を切っている、そのための学問。学問は実践の中から生まれてくる要素が強いのです。村山さんの分野はもう少し違った形だけれども、

学問のほとんどは必要とされる中でアクティビティになり、それが体系化されて学問のフレームができていくところがあり、工学なんか典型的です。

村山 数学も、ナイル川の氾濫で土地の境界がわからなくなったから、測量するために生まれたとか言う人がいます。

小宮山 全ての学問は、人間の必要性から生まれてきたということですね。僕は、21世紀の人類の背景には三つあると思っています。知の爆発、小さくなった地球、つまり人類の活動に対して地球が有限になってしまったということ、それからもうひとつは高齢化。そのための活動がなされて、そのための学問が生まれてくるというのは、とても自然だと思っています。知の構造化とは何かという話をするとき、僕はよく湯川先生と小柴先生のノーベル賞を思い浮かべます。どちらも、物理学の中でも新しい分野を創造するような格の高いノーベル賞ですね。湯川先生の話は僕でもわかりやすい。要するにプラス同士

の陽子がなんで固まってしまうばけかないのかというと、キャッチボールやインタラクションによって固まるからだというような。ここは直感で理解できる。でもニュートリノと言われても、僕には湯川先生の話ほど直感的にはわからないですね。例えばニュートリノに質量があるというのはこういうことなのだと、構造的にわかりやすく説明してくれないと僕には価値がわかりません。要するに価値と結びつかない。知の爆発という時代に、好奇心から宇宙の根源を知りたいとか、誰でも知りたいたいと思っていることが物理にはあるわけです。その説明は、ただメディアが上手に書くとか、わかりやすい言葉で表現するというだけではないような気がします。もう少し構造的にわかるような、それはもしかしたら紙だけではないかもしれない、バーチャリアリティだの、いろんな表現の方法があって、ともかく、もう少し湯川先生のノーベル賞並にわかるようにしてほしいと言いたいです。

村山 なるほど。ニュートリノが注目されている理由は、我々が宇宙に存在する理由になっているという説がかなり有力で、それですごく面白いと思っています。全ての物質には反物質があるのですが、ニュートリノには電気がありませんので、ニュートリノと反ニュートリノをどうやって区別するかという問題があります。もしかしたら区別がないかもしれません。物質と反物質に区別がなければ、入れ替えることもできますね。宇宙が生まれたときに物質と反物質がたくさんできて、そのままだったら全部消滅してなくなっていたはず。何かの方法で物質をちょっと反物質と入れ

替えてくれないと、物質が残らない。ニュートリノと反ニュートリノどちらも同じに見えるからそれができる可能性があるわけです。ちょっと反物質をつまんで、10億分の1ぐらい物質に移す、その役割をニュートリノがやってくれたかもしれないのです。

小宮山 なるほど。

村山 IPMUでやっているような研究分野は、何の役に立つのですかとよく聞かれて、「いや、役に立ちません」とはっきり答えているのですが、どうでしょうか、これは。

価値と知識を結びつける 知の構造化

小宮山 役に立つとはどういう意味なのかともう一歩進めないと。人間にとって価値があるかということではないですか。価値論というものがあり、6つ価値があるとか4つあるとかいろいろな価値の中で明確に価値があるのは知的価値です。それから公共的価値とか、経済的価値とかがあります。普通、役に立つというと経済的価値ばかり注目されますが、経済的価値は価値の一つでしかない。昔は知的価値と経済的価値と公共的価値が割合単純に結びついて一体化していました。例えばペニシリンが発見されると、化膿によって人が死ななくなり、それでファイザーという会社が儲け、同時に抗生物質という知的価値が生まれたのです。半導体もレーザーも同じです。それが今はどこの分野でも同じですが、知の爆発という背景があるためどんどん離れてきています。

村山 結びつけられないのは何が欠けているのでしょうか。

小宮山 例えばニュートリノ。今の君のように説明することが



欠けているのかもしれない。

村山 あれだと役に立つ感じがしますか。

小宮山 するよ。

村山 ああ、良かった。

小宮山 物質と反物質のどちらかが少し多いから残って今の世界があるというところまで、僕はどこかで聞きました。それはもしかするとニュートリノが媒介しているのかもしれない、それはマイナスもプラスもないからだ、という話は、本当にわかったかどうかは別にして、わかったような気にはさせてくれる。

両者 (笑い)

小宮山 例えばそういうことですね。それは、物理だから、単純だから。もし統一理論ができたらおしまいという学問は物理だけで、他の学問はどんどん人間に向かって多様化していくのです。例えば、エネルギー。ノーベル平和賞を受賞したIPCC (気候変動に関する政府間パネル) がある。IPCCがやったことは、要するに20世紀には地球の温度が上がったと言っただけ

です。

村山 これからも上がるでしょうとも。

小宮山 それだけだが、そのために何をしたかという、200人くらいのトップクラスのサイエンティストが、数名で一つを読むかたちで二万の論文を読んだのです。それで漸くあれだけのことが言えるくらい複雑なのです。しかし、温暖化は物理現象としては熱収支と物質収支だけです。それが、風力とか、原子力、太陽電池、地熱、波のエネルギーだとかいうエネルギー論になると多分一万倍くらい複雑になります。でも、何が本当に正しいのかを普通の人が直感でわからないと、根本的なことはわからないのではないのでしょうか。この直感でわかるようにするのは大変な作業だと思います。そこで、2050年には研究者の内、知の構造化をしている人たち、つまり人間にとっての価値と知識を結びつける、そのための仕事をしている人たちが半分くらいの時代がくるのではないかと僕は思っています。そ

うしないと、知識と人間とが関係ないものになってしまいます。

村山 それは大学の役割ですか。

小宮山 そう、それこそ大学ではないか。僕は東京大学新聞が「2050年の東大」というリレー連載を作ったとき第一回を書きました。その内容の一つは多様性についてで、今のような学生が三分の一、社会人が三分の一、外国人が三分の一となると、もう一つが今言った、半々が現在のような研究者、半々が知の構造化の研究者ということです。

村山 研究者は今までは知識を生み出せばいいと思っていたのが、もう一歩踏み込んで、それがどういう価値になっているかということまでやる必要があるということですか。

小宮山 そうです。物理は、中でも君の所の物理は統一論に向かって集約していく領域だから、そこだけは特殊だけれども、他の所では全て知識は1ppbに向かっている。これは僕が最近よく言っていることです。どんどん針の先に向かっている。こ

の針の先と人間の価値が結びつく確率はゼロです。無限と無は同一で、無限の情報があれば情報は無いのと同じになる。そういう状況がくると思っています。

村山 それをどうやって働きかけるのですか。

小宮山 知の構造化センターを作りました。

村山 良い方向に向かっていきますか。

小宮山 どうか。工学がそういうところが一番敏感であらざるを得ない学問だということがあると思うのですが、工学部では十数年前からこりゃどうしようもないぞという議論をやっています。

人間の21世紀に抱えている3つの問題が、ざっくり言った、小さくなった地球と、高齢化と、知の爆発。で、知の爆発については大学が責任を取るのでしょうかというのが私の確信です。

大学の国際化：why and how

村山 さっき大学がすべきことでもう一つ言われたのは、学生が三分之一、社会人三分之一、外国人三分之一。外国人はすごくバリアが高くてなかなかうまくいきませんが、大学はそもそもどうして国際化すべきで、またどうやったらできるのでしょうか。

小宮山 それは、グローバリゼーションが当たり前で、人々の行き来がものすごく多くなる、それからインターネットを通じて情報があつという間に世界中の隅々まで行く。その中でどうやって人類の多様性をキープしていくかが大学の果たすべき重要な役割の一つになっていくだろうと思っています。というのは、大学はやはり、地域を

代表しているところがあるからです。非常に単純に言えば、低炭素化は人類の果たさなくてはならない共通の目的です。だからといって、世界中のビルをどこかの一個のビルと同じものにしてしまうのはおかしいわけで、やはり、日本のモンスーン気候、東京の気候に合うようなものにならなくてはならない。我々が好きなように低炭素化ができるのは東大です。イタリアのトリノでは気候が違い、住んでいる文化も違うわけです。だからトリノもそこに合ったことができる。しかし共通なところもある。例えば窓の断熱です。つまり、こういうガラスを使う方が良いとかです。温暖化という極めて物質的な問題でも、共通なところを共通で、守るべき多様性は守っていくというところはあるわけです。そういうことは大学が果たす役割だと思います。

村山 多様性をキープしていくために、あえて出て行かなければいけない、出てこなければいけない。

小宮山 そう。それと、違う物に触れることが若者を元気にすると思います。小さい頃から多様な経験をするのが一番良いのですが、皆経験が少なすぎる。でもこれは若者の責任ではない。どうやって若者に多様な経験をさせるかということ、同じ経験を持った人が40人そろって、多様性があるわけがない。そこに違う世界で育った人が一人いることによって多様になるわけで、それが重要なのです。学生、あるいは教員も、多様な人々と接することで、自分の経験を豊かにするということができないでしょうか。

村山 なるほど。それで、日本の大学に外国人を連れてくる話

ですが、それはどうやったら良いのでしょうか。

小宮山 やれることは色々あって、僕が東大にいた頃いくつか新しく取り組んだことがあります。一つは英語だけで卒業できるコースをつくること。これはもうすぐ始まります。それから、これはアメリカがやっていることですが、リクルートプラス奨学金という、要するに現地で試験して、そのときに奨学金を保証して連れてくるという制度を修士・博士に導入すること。もう一つは、インドとか中東に日本語学校を作ることです。僕がインドや中東に行って話をしたときのことで、彼らが日本語学校を作れと言うのです。インドのインテリたちは最初から英語を話せます。そこで、日本語学校を作れば、たくさん学生が行く。その上で日本でも日本語で教えるのです。僕は、実は日本全体で考えるとこれが国際化の良いツールになると思う。英語で教えるのは、実は大変なのです。先生の中には英語で教えても教育のレベルが下がらない人たちはいますが、学生がついてこれない。

村山 これで最後の質問になりますが、IPMUができて、これは小宮山さんのプロダクトだと思っていますが、今まで見ていていかがですか。

小宮山 それはもう、期待以上です。僕は国際化が日本の色々な問題の答えを出していく最有力な方法だろうと思っています。大学間の流動性に対しても、東大と京都大学の間で人事交流をもっと活発にと言ってもなかなかできないわけで、外国とのほうがやりやすい。回り回って、日本の流動性の増大にも影響してくるといったかたちで、国際化があらゆるものをうまく進め

るための一番良い具体策になるのではないかとと思っています。その意味で、IPMUが実施してくれていることは、あらゆることに良いですね。IPMUができたおかげで外国人の割合がすごく増えて、おかげでインターナショナルゲストハウスが作れ、柏を活性化できつつある。それと目立つこと。そんなことができるのか、こんなことやっていいのかと。法人化して大学が自由になったのですが、自由だと自分が確信すれば自由、自由じゃないのだと思っていれば自由じゃないのです。大事なことは、強いところが自分は自由だと言い、自由にやれるのだということ、事実をもって示していくことで、それはやはり強いところしかできないのです。それをやってくれていることもとても良いことの一つでしょうね。

村山 今のところは東大の中で特区といって色々やらせてもらっているのですが、いわば出島になっていて、周りに垣根があるわけです。それはどうやったら取り払われますか。

小宮山 最初は出島で良いですよ。

村山 そうですか。

小宮山 僕は工学部の時に、寄付を頂いて工学部の主なテリトリーの向こうの浅野キャンパスに武田先端知ビルを作り、そこを「何をやっても良い出島」と呼んでいました。なかなかそうはいかなかったけれど、今は非常に良い循環になっています。だから、あまり焦っても無理ですよ。

村山 わかりました。当分、出島で楽しくやります（笑い）。

小宮山 （笑い）

村山 お時間いただきまして本当にありがとうございました。

Our Team

ホセ・フィゲロア-オフアリル José M. Figueroa-O'Farrill 専門分野: 理論物理学

IPMU 教授

私の研究は、M理論の数学的ランドスケープの探査であるといえるかも知れません。多くは、時空に余分な量子的次元を加える超対称性についての仕事です。私の研究の大部分はゲージ/重力対応（ゲージ理論と重力理論・弦理論との等価性）に関わっています。一番最近ではM2ブレーンに関するゲージ/重力対応で、それを理解すれば、11次元M理論の定式化を見出すという、弦理論における顕著な問題の一つを解明することになるかもしれません。現在、私は、メンブレーションの非アーベリアン理論に対する最近の提案に基づく研究プログラムに携わっています。現在の考え方では、メンブレーションは、三項演算代数というやや風変わりな数学的対象を用いて定式化できる3次元超共形チャーン・サイモンズ理論により記述されます。私は共同研究者と共にこれらの数学的対象の構造に関して多くの



結果を得ました。それを超共形場理論の研究に応用する仕事を続けています。

Our Team

セルゲイ・ガルキン Sergey Galkin 専門分野: **数学**

博士研究員

私はミラー対称性により規定されるファノ多様体の性質について研究しています。特に、ファノ多様体のトーリック多様体への退化を扱い、ファノ多様体をその量子D加群（グロモフ・ウィッテン不変量）により記述することを試んでいます。この目的のために、最近構成された量子コホモロジーの隠された整構造や、ホモロジー的ミラー対称性、および、ファノ多様体にミラ



ー双対なラングウ - ギンツブルグ模型の性質を用います（また、ときには、数学的に厳正な構成を与えています）。

高 东峰 ガオ・ドォンファン 専門分野: **理論物理学**

博士研究員

弦理論は万物の理論（theory of everything）の有望な候補であると信じられています。10次元時空には5つの無矛盾な超弦理論が存在しますが、現実の世界の素粒子物理学と折り合うためには余分な6つの次元は検出不可能なほど小さくなくてはなりません。これは弦理論のコンパクト化と呼ばれます。以前、私達はType II orientifold という種類の超弦理論におけるD9-ブレーンのチャン-パトン因子の構造について研究し



ました。これは弦理論のコンパクト化に関して重要な情報を与えてくれます。現在、私は弦理論に基づく現象論模型構築に関する研究を行っています。

林 梓仁 ラム・ズー・ヤン 専門分野: **天体物理学**

博士研究員

私の研究は、宇宙の大規模構造の形成と進化に焦点を合わせています。特に、単純化した解析的モデルを用いることで、非線形重力進化過程を調べることができることを示しました。次世代の銀河サーベイからパーセントレベルの宇宙論的制限を達成するためには、どのように重力過程が宇宙論信号に影響を及ぼすかを理解することが重要になります。また、宇宙の大規模構造を用いて、宇宙初期に生成される「原始ゆらぎ」



の非ガウス性を制限することにも興味を持っています。非ガウス性の検出は、インフレーション宇宙の様々なモデルを区別するための強力な手掛かりをもたらすと期待されています。

ラジャット・マニ・トーマス Rajat Mani Thomas 専門分野: 宇宙論

博士研究員

我々の宇宙の赤方偏移 $z=6$ までの多波長による詳細な観測と、宇宙マイクロ波背景放射の精密な観測と解析結果により、望遠鏡で観測可能な宇宙のなかで、まだ観測されずに残っている部分はあと少しだけとなりました。それはいわゆる（星、銀河がまだ生まれていない）「宇宙の暗黒時代」と「再イオン化の時代」(EoR)です。私が興味を持っているのは、天体物理学的側面では、この時代における中性水素の $21(1+z)$ -cm放射メカニズムのモデル構築であり、また技術的側面では、天の川

銀河あるいは系外銀河からの大きな前景放射成分から、この宇宙論的信号を引き出すための処理法の開発です。話は変わりますが、私は神経科学の理論的研究とその可視化法についても研究しています。



IPMU研究棟の完成予想図（中央）。両側の建物は既存の宇宙線研究所棟（右）と物性研究所棟（左）。

Our Team

フォーカスウィーク：新しい不変量と壁越え

大栗博司 おおぐり・ひろし

IPMU主任研究員

戸田幸伸 とだ・ゆきのぶ

IPMU准教授

ドメニコ・オルランド Domenico Orlando

IPMU博士研究員

スザンネ・レッフエアト Susanne Reffert

IPMU博士研究員

今年は場の量子論の生誕80周年に当たります。場の量子論とは、電磁場のような「場」の自由度に量子力学の原理を適用しようとするもので、素粒子物理学の基礎となる考え方です。しかし、数学としては未完成の理論です。ヤン-ミルズ理論と呼ばれる場の量子論の数学的定式化は、ポアンカレ予想、リーマン予想、P対NP問題などと並んで、クレイ数学研究所の7つのミレニアム問題の1つとして出題されています。

場の量子論の数学的定式化は完成していませんが、物理学者の近似的結果のいくつかは数学的な予想となり、現代数学の発展に大きな影響を与えてきました。これは、1990年以降のフィールズ賞受賞数学者の4割近くが、量子論に関連する数学の研究に深くかかわっていることからわかります。逆に、このような数学の成果は、場の量子論や超弦理論の研究に強力な道具となりました。数学者と物理学者の交流を促進することで新しい数学を創造することを目標の1つとするIPMUは、場の量子論に関連する数学を重要な研究分野と捉えています。

物理学者は、場の量子論の計算を、場の自由度を表す無限次元の空間の上の積分と考えますが、これは数

学的な定義にはなっていません。しかし、超対称性を持つ場の量子論のある種の計算では、この計算が有限次元の空間の上の積分に帰着することがあり、そのような場合には数学的な理解が可能になります。今回のフォーカス・ウィークでは、こうした有限次元積分で計算される「量子不変量」を研究している最先端の数学者と物理学者を集結させました。フォーカス・ウィークの題名にある「壁越え」とは、理論のパラメータを変えていくと、ある種の相転移が起こって、一定であるはずの量子不変量の値が変わってしまうという、数学的にも物理学的にも深い内容を持つ現象を指します。量子不変量は、数学においては、高次元の幾何の分類問題に新しい見方をもたらしています。また、物理学においては、超弦理論の低エネルギー有効理論の導出、ブラックホールの量子状態の分析、そしてゲージ理論の強結合現象の理解など、理論物理学の最先端の話題に重要な役割を果たしています。

この分野の急速な進歩を反映して、今回の会議は3ヶ月と言う短い準備期間で緊急に開催されました。IPMUの数学者1名と物理学者3名からなる組織委員会は、世界各地から気鋭の研究者11名を講演者として



「インフルエンザの時代の会議」

招聘し、そのうち数学者は7名、物理学者は4名でした。会議では数学者と物理学者とがうまく交流できるように様々な工夫をしました。たとえば、各講演者には約2時間の講演を依頼し、最初の1時間は幅広い聴衆に向けた解説を、そして10分間の休憩をはさんで残りの1時間で最新の研究結果の発表をお願いしました。この講演形式はとても好評で、数学者と物理学者の交流に大きく貢献したと思います。招聘講演者の1人は、会議の後で次のような感想を送ってきました：「2時間の講演で前半は一般向け、後半は専門向けとするアイデアは素晴らしいと思いました。私自身、前半の部分から多くのことを学びました。」

このほかに、若手研究者の講演を公募し、その中から数学者4名、物理学者4名が選ばれて、各々45分間の講演を行いました。参加者総数は66名で、そのう

ち数学者が32名、物理学者が34名と、まさに分野の「壁を越えた」数物連携を象徴する会議となりました。

今回のフォーカス・ウィークは、新型インフルエンザの世界的流行の中で行われたので、参加者の健康管理のために万全の対策をしました。会場の2つの入り口では消毒用アルコールによる手の洗浄をお願いし、医療用マスクを700個用意して、会議の冒頭の挨拶ではマスクの正しい使い方を指導しました。また、参加者全員の朝晩の体温確認のほかに、会場の出入り口に赤外線カメラを設置し、昼食前に参加者全員の検温をしました。参加者はユーモアを持って協力してくださり、ガブリエル・ガルシア・マルケスの小説の題名*をもじって『インフルエンザの時代の会議』と呼ぶ人もいました。

* コレラの時代の愛

WPIプログラムの 第2回フォローアップ委員会

2009年3月17日にWPIプログラムの第2回フォローアップ委員会が開催され、黒木PDによる概要報告、各拠点長からの報告、及び各拠点担当POによる現地視察の報告に基づき、プログラム委員会による評価が行われました。また、委員会の審議終了後に拠点研究者による特別講演が企画されますが、今回はIPMUの吉田直紀特任准教授が「宇宙の物理－最初の光－」、大栗博司主任研究員が「宇宙の数学」と題する講演を行いました。

後日発表されたフォローアップの結果は http://www.jsps.go.jp/j-toplevel/data/08_followup/Followup_J.pdf に公表されていますが、IPMUは短期間の間に「世界に目に見える拠点」となりつつあることや、村山機構長の指導力などについて高い評価を受けました。一方、数学と物理の実りある連携や、研究者のテニュア問題、大学院生受け入れ等の改善点も指摘を受けました。

IPMU研究棟建設の現状

現在建設中のIPMU研究棟は、東京大学の野野秀敏教授とクハラ・アーキテクツの設計による斬新なデザインの建物で、35ページに完成予想図が示されています。2009年2月9日に着工され、現在3階、4階部分の工事が進

んでいます。現状では2009年12月完成予定です。



6月10日に撮影した工事現場

東京大学本部棟1階ロビーでのPR展示

東京大学本郷キャンパスの本部棟1階ロビーでは学内各部局が交代でPR展示を行います。2009年5月15日より約2ヶ月間の予定で、IPMUが担当しています。村山機構長のIPMU紹介やIPMU研究者が専門用語を解説した「はてな宇宙」が映像で流れているほか、ショーケースには吉田直紀IPMU准教授による宇宙の大構造形成のコンピューター・シミュレーションなどをモチーフにした展示が飾られ、またパネルによりIPMUの活動が紹介されています。



ショーケースの展示

宇宙線研究所との合同一般講演会 「宇宙を語る」

2009年4月18日、柏市のアミュゼ柏クリスタルホールにおいて、宇宙線研究所（以下ICRR）との柏市民向け合同一般講演会「宇宙を語る」が開催されました。宇宙線研究所と共催の講演

会は初めての試みですが、今後年に2回の開催（内、1回は柏市民向け）が合意されています。

IPMU主任研究員を兼ねる梶田隆章ICRR所長が司会を務め、ICRRの黒田和明教授が「重力波で探る宇宙の謎」、吉田直紀IPMU准教授が「暗黒宇宙にうまれる星と銀河」と題して講演を行いました。参加者は233名で、アンケートでは「今後もこのようなイベントを継続して行ってほしい」、「最先端の話が聞けて満足」といった声が多く寄せられました。

素粒子物理スペシャルトークショー 「反物質の消滅は宇宙史上最大のマジック？」

2009年4月18日、つくば国際会議場（エポカルつくば）大ホールにおいて、高エネルギー加速器研究機構（以下KEK）との共催で、素粒子物理スペシャルトークショー「反物質の消滅は宇宙史上最大のマジック？」が開催されました。小学生でも楽しめる内容となっており、参加者には家族連れが目立ちました。村山機構長の講演「反物質はどこに消えたのか？」では、キャラクターを使った反物質の解説に子どもたちの歓声があがり、その後、樋口岳雄KEK助教がKEKB加速器について丁寧に紹介しました。また、クローズアップ・マジシャンの前田知洋氏が「エネルギーの法則」マジックなどを披露し、参加者は素粒子とマジックの不思議を楽しみました。

第110回東京大学公開講座 「特異」で村山機構長が講演

2009年4月4日から5月16日までの毎週土曜日、東京大学安田講堂において第110回東京大学公開講座「特異」が開催され、4月25日には村山機構長が「宇宙の特異点、ビッグバンとブラックホール」と題して講演しました。1000人を超える申込があり、あいにくの悪天候でしたが、多くの参加者が講演会を訪れました。

IPMUの外国籍研究員、小学生に宇宙を語る

2009年5月22日、柏市の東葛テクノプラザにおいて、外国籍のIPMU研究員3名が地元の十余二小学校から見学に来た5年生の生徒たちに向けてそれぞれ約10分間、IPMU事務職員の通訳により宇宙についての話をしました。宇宙はどのようにして始まったのか、何からできているのか、IPMUでは何を研究しているのかなど、ユーモアを交えながらの話に生徒たちは熱心に聞き入り、「ブラックホールに吸い込まれるとどこへ行くのですか」といった質問も飛び出しました。生徒たちはIPMUで多くの外国籍研究者が活躍していることを実感してくれました。



結晶の模型を使って、ブラックホールの量子情報を解読

IPMUの大栗博司主任研究員と東京大学理学系研究科物理学専攻の大学院生、山崎雅人氏は、素粒子の究極理論とされる超弦理論の計算に、3次元の結晶模型を使う方法を開発し、ブラックホールの内部構造を「紙と鉛筆」で解明しました。今回の研究では、ブラックホールの一つ一つの量子状態を3次元の結晶の融け方として特定し、ブラックホールの内部構造の理解をさらに前進させました。この成果は2009年4月24日に米国科学誌『Physical Review Letters』に掲載されました。

素粒子物理学研究機関の広報担当者がIPMUで会合

2009年4月14日と15日に、CERNやFermilabなどに代表される世界中の素

粒子物理学の研究所の広報担当者によって組織されるInterAction共同チームのミーティングが、東京大学柏キャンパス図書館のカンファレンスルームで行われました。IPMUは前回のミーティングから共同チームに参加し、今回はホストを務めました。ミーティングでは、それぞれの国の広報やコミュニケーションに関する情報が交換され、問題解決法や今後の展望について話し合いました。CERNの広報担当者からは、映画『天使と悪魔』を例にとったメディアとの付き合い方などの興味深い発表がありました。

研究会報告 ——フォーカスウィーク： 宇宙論における非ガウス性

2009年4月6日から10日の間、東京大学柏キャンパス図書館メディアホールにて「フォーカスウィーク：宇宙論における非ガウス性」が開催されました。

宇宙には、惑星系・銀河・銀河団など、様々なスケールの構造が存在します。現在の理論では、これらの豊かな構造は宇宙初期の量子揺らぎを起源として作られたと考えられています。このフォーカスウィークでは、宇宙の揺らぎの非ガウス性について、第一線で活躍する研究者が世界各地から集まり、インフレーション宇宙・宇宙背景放射・宇宙の大規模構造などの理論から観測に至るまで、様々な角度から議論を展開しました。タイムリーなことに、5月14日には、私たち研究者の期待を一身に背負った新観測衛星「Planck」が、無事に打ち上げられました。新しい観測データにより、宇宙初期の揺らぎの非ガウス性が確かめられる可能性もあると考えられています。もしかすると、この研究会で発表された予言の中のどれかが、検証されるかもしれません。

研究会報告 ——フォーカスウィーク： 新しい不変量と壁越え

2009年5月18日から22日の5日間、東京大学柏キャンパス図書館メディア

ホールにて「フォーカスウィーク：新しい不変量と壁越え」が開催されました。事務部門は新型インフルエンザの対策に追われましたが、サーモグラフィーを導入するなど迅速に対応し、研究会を滞りなく運営することができました。詳しくは36ページをご覧ください。

今後の研究会 ダークエネルギー・暗黒を照らす

2009年6月22日から26日の5日間、東京大学柏キャンパス図書館メディアホールにおいて、IPMU国際会議「ダークエネルギー・暗黒を照らす」が開催され、現代宇宙論最大の謎、ダークエネルギーにさまざまな角度から挑みます。理論研究からは、真空のエネルギーを生み出す機構、重力理論の変更などについて招待講演をお願いしています。また、観測的には、ダークエネルギーの存在の証拠となるとともに、今後、その正体に迫ることができると可能性のある多くの計画について招待講演をお願いしています。Ia型超新星探査、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎ、宇宙大規模構造が生み出す重力レンズ効果やバリオン音響振動、さらに銀河団のスニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果やX線による観測などです。

人事異動

主任研究員の異動

平成21年3月31日付けで数学分野の主任研究員に次の異動がありました。

土屋昭博IPMU教授はIPMU主任研究員を退任されましたが、今後もIPMU教授として研究を継続されます。

また、IPMU主任研究員の神保道夫東京大学数理科学研究科教授は、立教大学へ転出したため、主任研究員を辞退されました。

これらの異動に伴い、現在、数学分野の新たな主任研究員候補者に就任を打診中です。



シーソー機構

柳田 勉 IPMU主任研究員

ニュートリノのようなスピン1/2のフェルミオンは質量が0であると、運動方向に対するスピンの向きによって左巻き成分と右巻き成分に分けられる。この左巻きと右巻きが手をつなぐと質量 m をもつことができる。電子のような荷電粒子はこのようにして質量をもつ。ところが電氣的に中性なニュートリノには異変が起きる。左巻きと右巻きが手をつなぐのは同じだが、中性な右巻きニュートリノは自分の反粒子（左巻き）とも手をつなぐことができる。その反粒子と一緒にもてる質量 M は、左巻きニュートリノともつ質量 m より極めて大きいと考えられる。すると左巻きニュートリノは、その相棒の右巻きニュートリノが非常に重くなるため、別れ別れになってしまう。右巻きニュートリノの質量が無量大の極限では、もはや右巻きニュートリノがないことと同じであり、左巻きニュートリノは質量をもてない。しかし実際は右巻きニュートリノの質量 M は有限のため、左巻きニュートリノは小さな質量 m^2/M をもつ。このようにしてニュートリノに極めて小さい質量が生まれる。これをシーソー機構と呼ぶ。



シーソー機構

$$(\text{ニュートリノの質量}) \simeq m^2/M$$