

# IPMU NEWS

**Feature**  
KamLAND-Zen Project  
**Interview with** Jerome I. Friedman



# IPMU NEWS CONTENTS

## English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama  
Receiving "S" Grade
- 4 **Feature** Kunio Inoue  
KamLAND-Zen Project
- 10 **Our Team** Toshiyuki Kobayashi  
Jyotirmoy Bhattacharya  
Valentin Tonita  
Marcus Werner
- 12 **Talking IPMU**  
Three Years at IPMU
- 18 **Special Contribution**  
Heisenberg's Hand-Written Manuscript  
—Heisenberg and Nishijima  
Masataka Fukugita
- 21 **Research Report**  
The First Phase of the XMASS Experiment  
Kai Martens
- 22 **IPMU Interview** with Jerome I. Friedman
- 30 **Workshop Report**  
2011 IPMU-YITP School and Workshop on Monte Carlo  
Tools for LHC  
Mihoko Nojiri
- 31 **News**
- 34 **Holographic Principle**  
Tadashi Takayanagi

## Japanese

- 35 **Director's Corner** 村山 斉  
S 評価を得て
- 36 **Feature** 井上 邦雄  
カムランド禅
- 42 **Our Team** 小林 俊行  
ジョティルモイ・ボッタチャージョー  
ヴァレンティン・トニタ  
マーカス・ワーナー
- 44 **Talking IPMU**  
IPMUでの3年間
- 50 **Special Contribution**  
ハイゼンベルグの手書き原稿  
—ハイゼンベルグと西島  
福来正孝
- 53 **Research Report**  
XMASS実験の第一フェーズ  
カイ・マルテンス
- 54 **IPMU Interview** ジェローム・フリードマン教授に聞く
- 61 **Workshop Report**  
LHCのモンテカルロ・スクールを京都で開催  
野尻 美保子
- 62 **News**
- 64 **ホログラフィー原理**  
高柳 匡



**Kunio Inoue** is Director of the Research Center for Neutrino Science (RCNS), Tohoku University, and a principal investigator at IPMU. He is a leading scientist in the fields of neutrino astronomy and neutrino physics. He received the 5th JSPS Prize for "Precision Measurement of Reactor Neutrino Oscillations" (for FY2008). He received his Ph.D. from the University of Tokyo in 1994. He became a research associate at the Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo in 1992. He moved to Tohoku University as Associate Professor in 1998. He became Professor in 2004. Since 2006, he has been Director of RCNS.

**井上邦雄**：東北大学ニュートリノ科学研究センター長・大学院理学研究科教授でIPMU主任研究員を兼ねる。ニュートリノ天文学、ニュートリノ物理学分野における世界的なリーダーの一人であり、カムランド実験の責任者を務める。「原子炉を用いたニュートリノ振動の精密測定」により第5回日本学術振興会賞(2008年度)を受賞。1994年に東京大学から博士の学位を取得。1992年、東京大学宇宙線研究所助手、1998年、東北大学大学院理学研究科助教授、2004年、同教授、2006年からニュートリノ科学研究センター長。

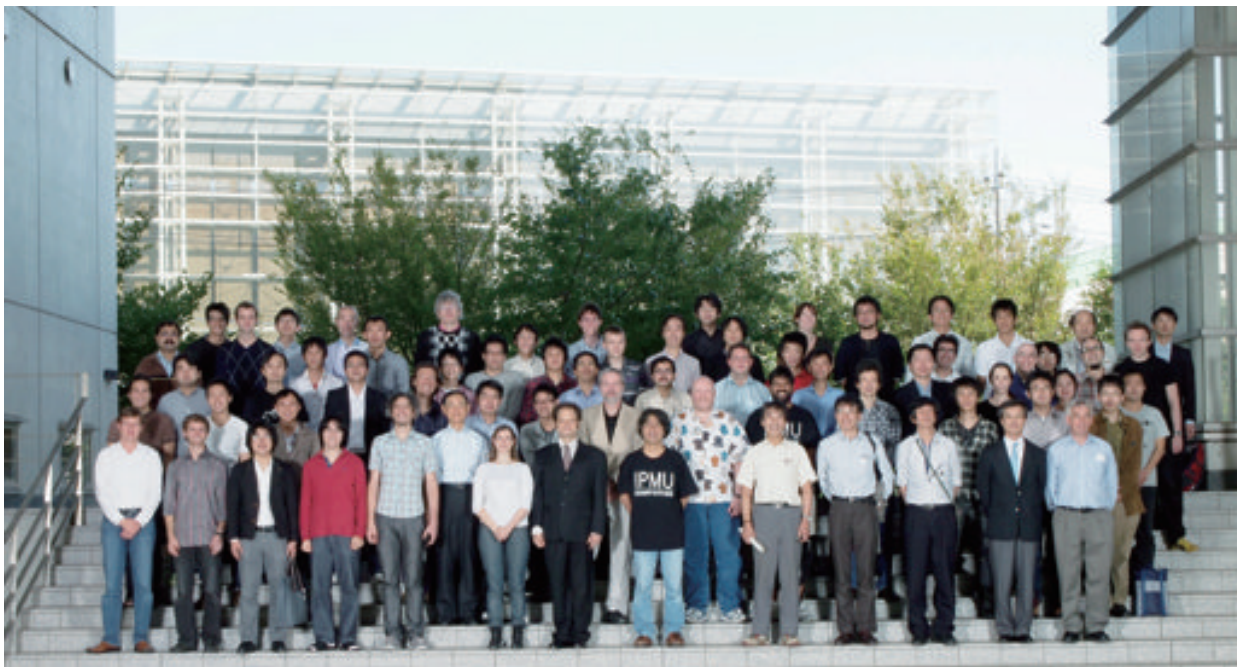
## Receiving "S" Grade

Director of IPMU  
Hitoshi Murayama

IPMU has been through an interim evaluation by the MEXT this year. It is a part of the process in the WPI program that supports six research centers in Japan including IPMU, given that four years have passed since the launch of the initially selected five research centers. The result of the interim evaluation was announced on December 14, 2011, and IPMU was given the highest grade "S" (superior). According to MEXT, the definition of this S grade is "Progress being made in establishing the center exceeds its initial goals. Even greater progress in developing itself as a 'top world-level research center' is anticipated." It sounds great!

I'm so happy to receive the highest grade after the rigorous review process from the summer to the

fall this year. It is a very ambitious goal for young WPI centers to attain a high visibility in the world comparable to world-leading research centers with long traditions. We have focused intensively on building an attractive and exciting research institute that pays a lot of attention to accommodate researchers comfortably, especially those from other countries. This strategy seemed to have paid off handsomely. This would not have been possible without a strong support from the University, competent administrative staffs, and from the public at large. We have been ramping up several big projects that are coming to the phase of producing data and science. The next five years are when we have to work hard to truly shine.





# KamLAND-Zen Project

## Dirac or Majorana?

The average neutrino density is about  $300/\text{cm}^3$  and it is the most abundant known matter particle in the universe. It rarely interacts and thus it is not very familiar in our daily lives. It also took a long time to investigate its properties for the same reason. Its root is the theoretical invention by Pauli in 1930 for explaining the energy and angular momentum conservation in beta decays. Neutrino is the first particle which is theoretically introduced before an experimental discovery. The Majorana neutrino hypothesis, the main subject of this article, already appeared in 1937, but it is not established or excluded yet. Even after the successful observation of neutrinos, it always puzzled researchers with the solar neutrino problem, the atmospheric neutrino anomaly, and so on. These problems have been solved in several years after 1998 through the observations of neutrino oscillations. The studies of the neutrino oscillation in which neutrinos change their kinds during their propagation have extensively developed the understating of neutrino properties such as neutrino flavor mixing and squared mass differences. An experiment, KamLAND, has also contributed and measured the parameter  $\Delta m_{21}^2$  at a precision of 2.6% using the reactor anti-neutrinos. Neutrino oscillation is the definite evidence of the

mass of neutrinos and it requires a theoretical framework beyond the standard theory of particles in which the neutrino mass is assumed to be zero. At the same time, the upper limits of neutrino mass provided by cosmological observations and beta decay experiments showed a significantly lighter mass of neutrinos than that of quarks and the other leptons. Neutrino mass confronts a big problem in two meanings, finite but extraordinary light mass. Moreover, only left-handed (rotating to the left) neutrino and right-handed anti-neutrinos are found so far, in spite of the fact that the rotational direction of the massive (slower than light speed) particle changes in the faster coordinate system, as special relativity states. Thus, the right-handed state of neutrinos and left-handed state of anti-neutrinos must be considered as the neutrino oscillation measurements established masses of neutrinos. Charged particles and anti-particles are apparently distinguishable as their charges are opposite. On the contrary, neutral neutrinos have two choices for their relation between neutrinos and anti-neutrinos. One is the Dirac neutrino and another is the Majorana neutrino. If neutrinos are Dirac particles that are the same as charged particles, the undiscovered right-handed neutrino should have the same mass with the known left-handed neutrino and its interaction should be considered to be much

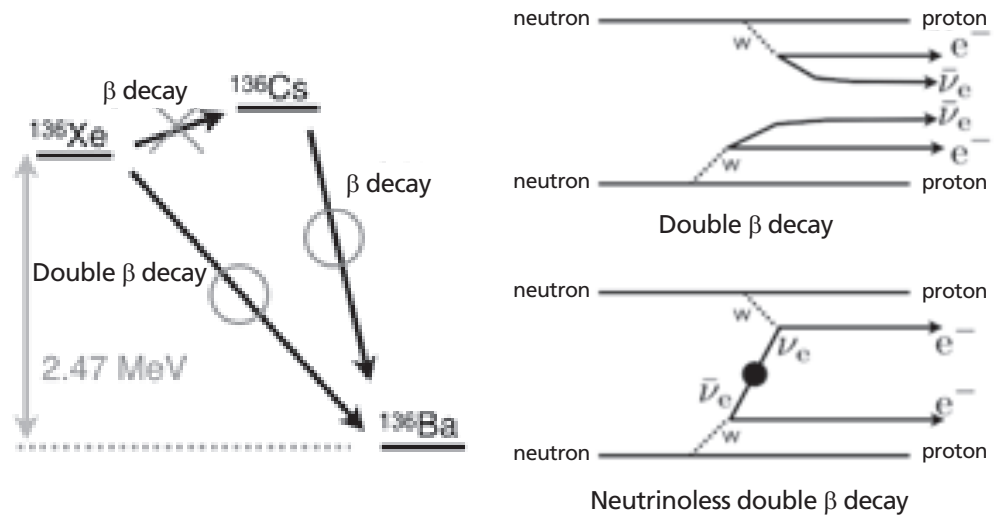


Figure 1. Left: Energy level of a double-beta decay nucleus. Right: Feynman diagrams of double beta decay and neutrinoless double beta decay.

smaller than ordinary neutrinos. It is also known that a particle and its anti-particle have the same mass. Consequently, four states of neutrinos (particle, anti-particle and right-, left-handed for each of them) should have the same mass. On the other hand, the Majorana neutrino doesn't distinguish neutrinos and anti-neutrinos other than their rotational directions and a right-handed neutrino means a right-handed anti-neutrino. In this case, we can separately define a right-handed neutral particle with different mass in the same category. In a so-called *Seesaw model*, a very heavy right-handed "neutrino" at the mass scale close to the grand unified theory is introduced and it explains why ordinary neutrinos are so light. The Majorana nature of neutrinos also includes an apparent violation of B-L (difference of baryon number B and lepton number L) which is necessary for explaining the matter domination of the universe. And the heavy light-handed neutrino introduced in the Seesaw model may also play an important

role in creating a non-zero baryon number of the universe through its decay in the early universe as actively discussed with *Leptogenesis theory*.

### Neutrinoless double beta decay

Despite the fact that the Majorana nature of neutrinos is a key to addressing the big open questions of cosmology and particle physics, "matter dominance in the universe" and "light neutrino mass," concrete examination has not been achieved. A naïve way would be to look for anti-neutrino interaction by shooting neutrinos, for example. It is not feasible, however, because the fraction of alternative helicity is only about  $1/2(m/E)^2$ , whereas we know mass is very small and energy should be high to gain the interaction cross section. Luckily, there is one good system in nature. The so-called double beta decay nuclei with which single beta decay is energetically forbidden can go to two

Feature

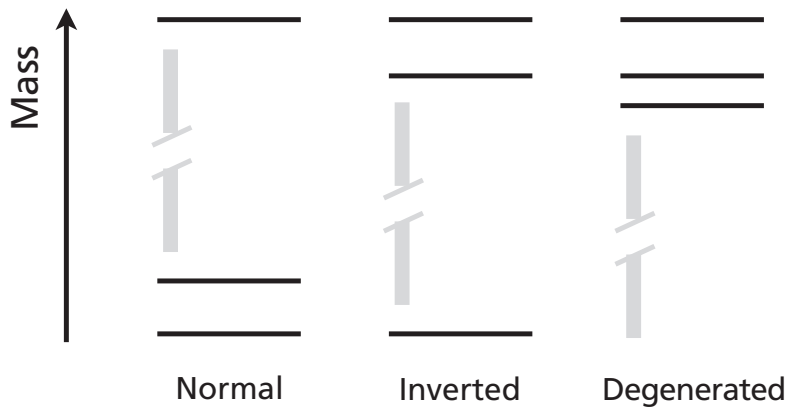


Figure 2: Possibilities of three neutrino mass hierarchies. There are three types of neutrinos, electron neutrino ( $\nu_e$ ), muon neutrino ( $\nu_\mu$ ), and tau neutrino ( $\nu_\tau$ ). From the results of neutrino oscillation experiments, they are known to be linear combinations of the three mass eigenstates,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ , and  $\nu_3$ , which have definite masses  $m_1$ ,  $m_2$ , and  $m_3$ , respectively. Though the absolute values of  $m_1$ ,  $m_2$ , and  $m_3$  are yet unknown,  $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$  and  $\Delta m_{32}^2 = |m_3^2 - m_2^2|$  have been measured by neutrino oscillation experiments, indicating the three possible relations between the neutrino masses  $m_1$ ,  $m_2$ , and  $m_3$ : normal ( $m_1 < m_2 \ll m_3$ ), inverted ( $m_3 \ll m_1 < m_2$ ), and degenerated ( $m_1 \approx m_2 \approx m_3$ ) hierarchies.

simultaneous beta decays. In the nucleus, two anti-neutrinos are created in the very small region, and they can annihilate only if neutrinos are massive Majorana particles (see Fig. 1). The annihilation probability is proportional to the squared neutrino effective mass under a popular assumption that light Majorana neutrino exchange dominates the reaction. Thus, the discovery of neutrinoless double beta decay ( $0\nu 2\beta$  hereafter) is evidence of a Majorana neutrino and also that an effective neutrino mass can be derived from its decay rate. This is so far the only feasible method to investigate the Majorana nature. In spite of the vigorous searches motivated by its physical importance, there is no established evidence for  $0\nu 2\beta$  except for the one (KKDC claim) with  $^{76}\text{Ge}$  nuclei, which claims an effective neutrino mass of about 320 meV at  $6\sigma$  confidence level. However, possible background candidates and a strange behavior of the signal are argued and further investigation is still necessary. On the other hand, precise measurement of neutrino oscillation

provided three possibilities of a three-neutrino-mass hierarchy, *degenerated*, *inverted*, and *normal* hierarchies (see Fig.2). And the effective neutrino mass ranges  $> 60$  meV,  $20 - 60$  meV and  $< 20$  meV in the three hierarchies, respectively. Based on the possibilities, recent major projects are designed to have sensitivities well below the KKDC claim, to cover the degenerated mass hierarchy, and also to have the potential for an extension to cover the inverted hierarchy. In order to investigate a lifetime of  $10^{26-28}$  years for such targets, it is necessary to contain 100 – 1000 kg of double beta decay nuclei which is much more massive than the previous experiments with only up to about 10 kg.

## KamLAND-Zen

Searching for rare phenomena with massive target nuclei is a method common to a proton decay search and neutrino observation. Considering the Q-value of double beta decay is only up to

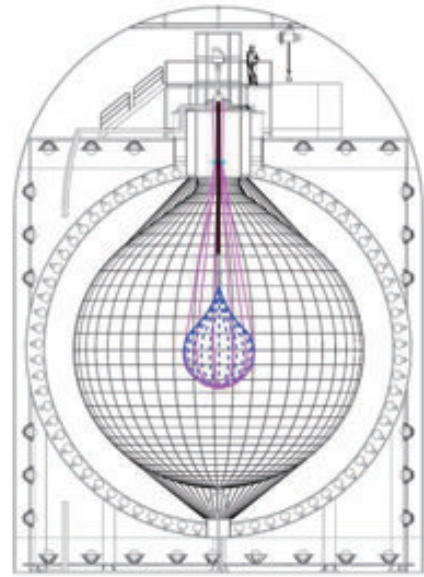


Figure 3: A schematic of the KamLAND-Zen detector.

4.3MeV, the search should also have a feature of ultra-low radioactive impurities. KamLAND detects low energy anti-neutrinos with 1,000 tons of ultra-low-background liquid scintillator (LS) and such an environment is adequate for the  $0\nu 2\beta$  search. In order to maximize the feature, deployment of unnecessary material in the detector should be avoided. Among various double beta decay nuclei, Xenon-136 ( $^{136}\text{Xe}$ ) is soluble in the LS up to 3wt% and centrifugal isotopic enrichment and purification methods are well established. The Q-value of  $^{136}\text{Xe}$  is 2.476 MeV and is not the highest energy. But the problematic background candidates with high-Q nuclei,  $^{214}\text{Bi}$  and  $^{212}\text{Bi}$ , can be rejected by delayed coincidence with  $^{214,212}\text{Po}$ . KamLAND as a big active shield captures entire signature from  $^{208}\text{Tl}$ , 2.615 MeV and 0.583 MeV gammas and additional beta, and the total energy from  $^{208}\text{Tl}$  decay becomes much higher than that of  $0\nu 2\beta$  signals. The other worrisome backgrounds are cosmogenic  $^{10}\text{C}$ , solar neutrinos, and ordinary double beta decays ( $2\nu 2\beta$ ).

The former two are proportional to the target volume and dissolving isotopically enriched  $^{136}\text{Xe}$  at the highest concentration is effective. In order to reduce  $2\nu 2\beta$  backgrounds, energy resolution should be improved. But the light yield of the xenon-loaded LS cannot be increased independently with KamLAND LS in order to have uniform energy response around the boundary.

Under these considerations, it was decided to suspend a mini-balloon containing  $^{136}\text{Xe}$ -LS (enriched from natural abundance of 8.9% to more than 90%), see Fig. 3. Its light yield is adjusted with the KamLAND LS and also the density is controlled to slightly heavier than the KamLAND LS in order that the mini-balloon does not float nor receive stress. The balloon film is very thin, 25 $\mu\text{m}$ , in order to minimize radioactive impurities in the material and in order to increase the efficiency to detect alphas from Bi-Po sequential decays. Production and installation of the mini-balloon become difficult by using the thin balloon. The new dead-time-



Figure 4. The logo of the KamLAND-Zen project. A kanji, logographic Chinese character, indicating 'Zen' is surrounded by alphabetical characters.

free electronics with 1 GHz flash ADC is used for tagging muon-neutron- $^{10}\text{C}$  coincidence where  $^{10}\text{C}$  backgrounds accompany neutrons at more than 90% when created from  $^{12}\text{C}$  by muon spallation.

The project is designed to cover the degenerated hierarchy first and later modified to cover the inverted hierarchy. In order to cover the degenerated hierarchy in two years, it turned out by a simulation study that about 400 kg of  $^{136}\text{Xe}$  is necessary but light yield of KamLAND is good enough. At the time of the design stage,  $2\nu 2\beta$  half life was known to be very long, more than  $10^{22}$  years, and only moderate energy resolution was required. It was rather shocking when the EXO-200 experiment in the United States reported that the  $2\nu 2\beta$  half life is  $2.11 \times 10^{21}$  years (factor five contradiction!). Luckily the impact was not very big. For covering the degenerated hierarchy, 3 to 4 years of data accumulation is necessary or the sensitivity with two years became about 80 meV. Anyway, demand for the better energy resolution became stronger.

We named the project as KamLAND-Zen. Zen primarily stands for Zero neutrino double beta decay

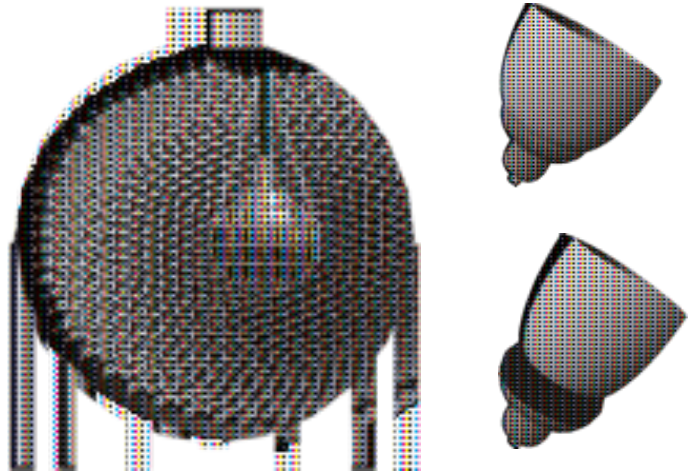
search. It also contains the sound and meaning of "then" and "Xenon." And searching for a truth of the universe ( $0\nu 2\beta$ ) at nothingness (ultra-low background environment) just matches with the word *Zen* (see Fig.4). The experiment started in September with about 330 kg of Xenon and we are expecting to publish a result shortly.

### Future plans

Better sensitivity requires more light-yields. But replacement of the KamLAND LS is a big and costly effort. So, we are going to attach light concentrators to PMTs at the same time (see Fig. 5). We expect 2.5 times more light combining with the LS replacement, and  $2\nu 2\beta$  will be suppressed by a factor of more than 10. The upper entrance will also be enlarged to deploy various instruments. Once  $0\nu 2\beta$  is found, measurements with higher statistics and different nuclei become important for reducing uncertainty from a theoretical calculation of the nuclear matrix element and for identification of underlying physics mechanisms. Also, a direct search for dark matter



Figure 5. Schematic of the KamLAND2-Zen detector (left) and photomultipliers with light concentrators (right).



with NaI, for example, will become possible. This future upgrade is called as KamLAND2-Zen, and initially KamLAND2-Zen is planned to contain 1,000 kg of enriched  $^{136}\text{Xe}$  which will be dissolved in the LS at 80% higher concentration by pressurizing Xenon up to 1.8 bar (balances with 10 m LS depth). The expected sensitivity is about 20 meV, covering the inverted hierarchy.

Some challenging developments are also going on. Scintillating film, for example, will be effective to improve the BiPo tagging efficiency in the mini-balloon, and an imaging device will be useful to distinguish multi-vertexes events such as  $^{10}\text{C}$  and multi-compton gamma rays. Employing these technologies, it may be possible to access the normal hierarchy. Among these future plans, pressurizing Xenon is cost effective and an intermediate phase with 800 kg of Xenon before KamLAND2-Zen is considered. Currently, 450 kg of Xenon is in hand and additional procurement is going on. The estimated sensitivity with this phase is about 30 – 40 meV, in the middle of the inverted hierarchy.

## Closing

Rapid growth in neutrino research has created a very special observational environment. The ultra-low radioactivity environment established at a huge underground cavity, with ultra clean materials, are developing a new research field of rare phenomena search. The target mass of the double beta decay study has already exceeded 300 kg; it was only up to 10 kg just a few years ago. By using an existing apparatus, the project can keep costs down and have very high scalability. The start-up time can be also reduced. For a detailed study, measurements with various nuclei and of angular distribution are necessary. But such high technology apparatuses often become expensive and single purpose. For the continuous growth of research, a strategy of starting and finding with a general-purpose detector at first and then deepening the research with a dedicated detector seems to be beneficial.

# Our Team

## Toshiyuki Kobayashi

Research Area: **Mathematics**

Principal Investigator



My research interests focus on the analysis of “symmetries” in mathematics. Currently I am working on representation theory and a theory of discontinuous groups including the following topics:

① Analysis of minimal representations:

Minimal representations are special irreducible representations, which are a building block of linear symmetries. My guiding hypothesis

minimal representations (algebra)

= maximal symmetries (function spaces)

is a driving force for a new theory of global analysis based on non-commutative symmetries of minimal representations.

② Spectral analysis on locally symmetric spaces:

For spaces of indefinite metric, intrinsic differential operators (e.g., Laplacian) are not necessarily elliptic. As a first step of spectral theory in this new general setting, I am working on the construction of discrete

spectrum of such operators, and studying its stability under the deformation of geometric structure.

My research achievements include

③ pioneering works on the theory of discontinuous groups for homogeneous spaces beyond the classical Riemannian setting,

④ pioneering works on the theory of discretely decomposable restrictions of representations (discrete symmetry breaking), and

⑤ an original theory of visible actions on complex manifolds, and its systematic and synthetic application to multiplicity-free theorems on both finite and infinite dimensional representations.

## Jyotirmoy Bhattacharya

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

I am broadly interested in quantum field theories, super-conformal field theories and string theory. I have primarily focused on the understanding and applications of the AdS/CFT correspondence, which is one of the outstanding theoretical insights that has emerged out the study of string theory. In my research, I have tried to exploit this correspondence



to study exotic and new phenomenon in fluid dynamics, condensed matter systems and gravity.

## Valentin Tonita

Research Area: **Mathematics**

Postdoc

My interests lie in Gromov-Witten theory, in particular in its K-theoretic version which associates invariants to a complex projective manifold  $X$  by taking Euler holomorphic characteristics of certain (orbi)bundles on the moduli spaces of stable maps to  $X$ . Among the interesting problems in the field are: the computation of these invariants (which turns out to be more difficult than in cohomological theories),



the study of the structures arising (e.g., quantum K-theoretic product) and the connections with mirror symmetry.

## Marcus Werner

Research Area: **Astrophysics and Mathematics**

Postdoc

Understanding the dark sector of the universe is one of the most challenging problems in current cosmology, and gravitational lensing is among the principal tools to investigate it. I am a theoretical astrophysicist interested in the mathematical theory of lensing, as well as in general relativity and its modifications. Recently, I studied the origin of certain magnification invariants underlying the flux-ratio anomaly with Lefschetz fixed point theory, and



the Randers-Finsler structure of the Kerr optical geometry. Joining IPMU from the Mathematics Department of Duke University, I hope to create some more links between the mathematics and astronomy communities here.

Our Team

## Talking IPMU: Three Years at IPMU

Hirosi Ooguri  
Principal Investigator

Susanne Reffert<sup>1</sup>  
IPMU Postdoctoral Fellow



**Ooguri:** First, I would like to congratulate you on successfully completing the 3 years of postdoctoral study at IPMU. You have been very productive in research and expanded the area of your study significantly. Now, you are moving on to the next position at CERN, which in this age of the LHC experiment is one of the best places for a high energy theorist to be. So, congratulations. I understand this is essentially your last week at IPMU, and you must be busy with packing and moving. I very much appreciate your sitting down with me for an interview during this busy week.

### Deciding to join IPMU

**Ooguri:** I thought that we should reflect upon your 3 years at IPMU and talk about your experience here. But, before we even start with you arriving at IPMU, I want to hear how

<sup>1</sup> Now at CERN.

you had decided to come to IPMU. IPMU was officially established on October 1, 2007. We were notified about the approval of its funding less than a month before that date, so we had to scramble to launch the Institute. I remember that, within a month after IPMU had started, I received an email from you saying that you heard about a job opening and asking whether it's possible to have two positions for both you and Domenico Orlando, who is your husband. At that time, you were still in the middle of your first postdoctoral appointment at the University of Amsterdam. How did you hear about the position and why did you decide to contact me?

**Reffert:** I heard about it from you, actually, because I received a message that you had sent to colleagues about job openings at IPMU. It said there were 20 postdoc positions. I thought, well if there are so many of them, maybe there are two, for both my

husband and me. Many institutes have at most one opening per season in String Theory, so it's very difficult to find something for two people together.

**Ooguri:** When the institute started, we needed to attract a lot of young talent, especially from abroad. So, we sent out a massive amount of emails to scientists all over the world announcing the job opening, and I guess, Robbert Dijkgraaf,<sup>2</sup> who was your advisor, must have received my message.

**Reffert:** I don't remember who forwarded it, but it arrived in my mailbox.

**Ooguri:** Good, so our plan worked. We pay attention to diversity in the workplace, and we recognize that the two-body problem<sup>3</sup> is one of the

<sup>2</sup> Distinguished University Professor at the University of Amsterdam and President of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences.

<sup>3</sup> The difficulty for an academic couple to find two positions at the same place so that they can live together.



serious issues for academic couples, often making it difficult, especially for female scientists, to advance their careers. You and Domenico were people we wanted to have here as scientists, and we were very happy to have been able to attract both of you to come to IPMU. But, I am also curious; was there any hesitation about moving to the part of the world which would be different from what you were used to, leaving the comfortable research group in Amsterdam?

**Reffert:** Not really. Of course, moving to a new institute, when you don't know how it will develop, is a risk. But, since excellent scientists like yourself backed it, it sounded like it was a risk one can take. Of course, Japan is very far and our parents prefer us to be closer to home, but we thought it would also be a very interesting experience and an adventure to go somewhere completely different, so we were excited about that.

**Ooguri:** I am glad to hear that.

### Starting at IPMU

**Ooguri:** You arrived here in September of 2008, exactly 3 years ago. I heard you took the Trans-Siberian Railway to come to Japan. Is that true? That must have been an adventure in itself.

**Reffert:** Yes. Since we had the chance to go all the way to Tokyo, we really wanted to do it properly. On the airplane you wouldn't even notice what happens. You get on somewhere, you get off somewhere else. But, if you go by train, you really have this experience of going far.

**Ooguri:** That must have been an interesting trip. After arriving in Tokyo, was there any difficulty in getting settled, for example, finding housing and setting up your apartment?

**Reffert:** No, it was actually very easy because people from the IPMU Administrative Office took very good care of us here. They organized everything, and they helped us find an apartment, so it was very smooth.

**Ooguri:** I see. How about paperwork, such as immigration, registration, opening a bank account?

**Reffert:** All of this was very smooth because all the documents were prepared for us in advance and we just had to sign them. When we had to go to the town hall or to the bank, a translator was sent along with us. So, it was very easy, much easier than in some European countries. In Europe, they know that you can do it yourself, so they don't help you.

### Life at IPMU

**Ooguri:** IPMU also offers Japanese language courses, and I remember you took some classes.

**Reffert:** Exactly. We are still taking classes, but less frequently. In the beginning, we had 6 hours per week, and now we're down to 1 and ½ hours per week. But, we are always interested in learning the language to experience the country more directly.

**Ooguri:** It helped you to get to see various parts of Japan that you would not have seen otherwise.

**Reffert:** I think it helps a lot. If you just want to stay at IPMU, of course, you don't need to speak Japanese because everyone speaks English. But, if you want to experience life in Japan, then it's really useful if you speak the language a little.

**Ooguri:** It opens doors, I guess.

**Reffert:** I think so, yes.

**Ooguri:** Since we're talking about life in Japan, I would like to hear your impressions of life in Tokyo. I understand you had an apartment in

Asakusa<sup>4</sup> and commuted from there every day.

**Reffert:** That's correct.

**Ooguri:** Have you been plugged into the community of expatriates in Tokyo?

**Reffert:** Not so much, because most of our friends are actually at IPMU as well, in different disciplines but still mostly at IPMU. But, we also met some other expats through our hobbies like attending karate classes.

**Ooguri:** You took karate classes?

**Reffert:** Yes. Here on campus.

**Ooguri:** Oh, do they offer karate classes on campus?

**Reffert:** Yes.<sup>5</sup> We also attend some yoga classes, where they are mostly expats. This way, we met some other people as well.

**Ooguri:** I see. Not only you met and socialized with scientists within IPMU, the Kashiwa campus offers opportunities for you to meet with people from other institutes.

**Reffert:** Actually, what's also very nice is that the International Office of the University of Tokyo on Kashiwa campus organizes very interesting outings to experience Japanese culture. For example, there was the Kabuki Theater, some excursions, and events like calligraphy classes or the tea ceremony, which you can attend for free, and we have made use of this as well. You meet a lot of other expats there that work on campus as well.

**Ooguri:** That is great. It serves two purposes. You get to learn Japanese culture, but through that you also meet with interesting people.

**Reffert:** Exactly.

**Ooguri:** I know that you have a popular blog<sup>6</sup> that chronicles your life

<sup>4</sup> One of traditional downtown areas in Tokyo.

<sup>5</sup> Hakumon Karate Club (<http://hakumonkarate.web.fc2.com/english/index.html>).

<sup>6</sup> <http://chipango.wordpress.com/>

in Japan. Have you got any response on that?

**Reffert:** Yes. What's interesting is that I had started the blog to be in touch with friends and family back in Europe, but it turns out that many Japanese people are also reading it. I get feedback from them, which surprised me at first because - why would they be interested in a foreigner's view? They already know what Japan is like. I thought it was more for people back in Europe to see what it's like in Japan. But actually, Japanese people also enjoy seeing a different point of view on their culture.

**Ooguri:** I see. I am also a reader of your blog. From that I learned that you have traveled extensively within Japan.

**Reffert:** That's correct.

**Ooguri:** You have covered all the four major islands.

**Reffert:** Almost, yes. We have not managed to go to Okinawa, though.

**Ooguri:** Right, but I meant Hokkaido, Honshu, Shikoku, and Kyushu. You have just been to the Tottori Sand Dune, and you are going to Kyoto one more time before leaving Japan.

**Reffert:** Yes, we enjoy traveling in Japan really a lot because it's a very interesting country—it's very different from where we come from. It's very suitable for traveling because the train system is so convenient. You can go very far in a short time, and all the facilities are very good. It's easy to get to the tourist attractions, which are really very interesting. I think that, if one just comes to Japan and doesn't travel, one really misses out on a very interesting experience.

**Ooguri:** Indeed, by reading your blog, I felt that I should visit these places. You have been to many interesting places in Japan that I myself have never been.

**Reffert:** But that's usually the case. In Switzerland, where I am from, many tourists know more sightseeing spots than I do because when you live in a country, you take it for granted. But, if you are new to the country, everything seems very interesting.

**Ooguri:** That is true in general. But, in your case, your curiosity to explore this country is palpable in your blog, and that is what makes it interesting to read.

### Research at IPMU

**Ooguri:** Now, I would like to also talk about your research activities at IPMU. You have this very widely cited paper<sup>7</sup> on the Hořava-Lifshitz gravity. Could you tell us about that?

**Reffert:** What happened was that a topic that we had worked on before, namely stochastic quantization, turned out to be very relevant to this new theory of gravity, which was suggested by Petr Hořava.<sup>8</sup> We understood that we could successfully apply some of the knowledge we had gained on this topic and answer some important questions about his theory, in particular about its quantum behavior. We proved that the theory is renormalizable. It was very fortunate that we could apply our previous knowledge to a new and hot topic.

**Ooguri:** I understand that you were drawn to this area of research because of your interest in integrable systems, is that correct?

**Reffert:** That's correct, yes.

**Ooguri:** In Japan, there is a large and active community of people who are working on integrable models, both

in physics and mathematics. Have you had any contact with these people?

**Reffert:** Yes, indeed. There are some very distinguished scientists in this subject like, for example, Professors Jimbo and Miwa, and we were lucky to be able to meet and discuss with both of them.

**Ooguri:** Jimbo was a principal investigator at IPMU when you arrived here.

**Reffert:** That's right. We discussed with him when he was at IPMU. Later on, we met Professor Miwa at a conference in Kyoto.

**Ooguri:** I see. You also collaborated with Nicolai Reshetikhin,<sup>9</sup> who is also in this general area of integrable systems. He visits IPMU frequently since he is on our external advisory board. That must have helped you to pursue this research.

**Reffert:** Yes, it's always much easier to finish a paper when it is possible for your collaborator to be with you or the other way around. That was very helpful.

**Ooguri:** One of the memorable events for me was to organize the Focus Week entitled "New Invariants and Wall Crossing" with you, Domenico and Yukinobu Toda, who is an IPMU mathematician. At that time, *Wall Crossing* was just emerging as an exciting new area, both in physics and mathematics. I was also writing a paper on this subject with Masahito Yamazaki, a graduate student at IPMU, and I thought that we should have more activities in this area at IPMU. Then, you and Domenico approached me and proposed exactly what we should be doing — that we should have a Focus Week. So, we joined forces and organized this meeting,

<sup>7</sup> D. Orlando and S. Reffert, "On the Renormalizability of Hořava-Lifshitz-type Gravities," *Class. Quant. Grav.* **26** (2009) 115.

<sup>8</sup> Professor at the University of California at Berkeley and a member of the IPMU Satellite at Berkeley.

<sup>9</sup> Professor of Mathematics at the University of California at Berkeley and a member of the external advisory board of IPMU.

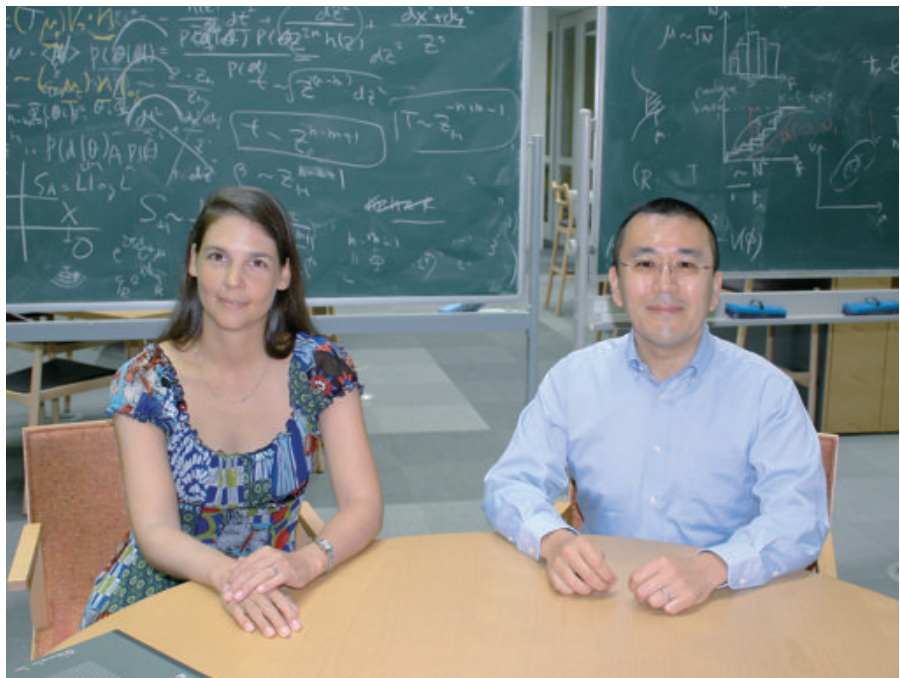
which was a great success. We had an almost equal number of mathematicians and physicists, as lecturers as well as participants, and they interacted very well, communicating at a deep level. How was your experience in organizing this?

**Reffert:** It was very interesting and, luckily, not very tiring at all, because the support staff from the IPMU Administrative Office took care of most of the heavy tasks of organizing. So, we could essentially just interact with the scientists we had invited. We were very happy that it was possible to attract very high caliber scientists to come to this workshop—to Japan.

**Ooguri:** I myself was amazed. We wanted to seize the opportunity in this emerging area and organized this event in a very short period of time. I remember contacting Hitoshi (Murayama) saying, “there is a breakthrough – we should have a workshop quickly.” He approved it instantly.

It was sometime in February, 2009, and a meeting was held in May. We had only 3 months to prepare. Usually, an international conference of this scale takes a year of preparation. Despite that, many of the leading mathematicians and physicists accepted our invitations. The International Office of IPMU helped us put together the conference on very short notice. We did it at the right time, and it was very successful.

I am not sure whether you remember or not, but the Focus Week was held in the midst of the H1N1 influenza pandemic, and it added a twist to this event.



**Reffert:** Absolutely. I remember being very worried that the meeting might have to be cancelled because international travel had to be restricted. We were nervous about that, but in the end we were able to hold the conference as planned, thanks to some additional security measures, such as checking the temperature of participants and providing hand sanitizers and masks, et cetera.

**Ooguri:** That’s right. When our conference was taking place, Japan was not yet infected by the swine flu, but there were countries which were officially declared as infected. The Japanese Government was nervous about lots of foreigners coming to international conferences. Indeed, when our meeting was taking place, there were many other conferences that had to be cancelled.

One of the reasons that we were able to go ahead and hold this workshop was that people at the IPMU Administrative Office did

a lot of work in complying with requests from the Government and the University Administration, and they took necessary measures, as you said, to ensure the health and well-being of the participants. That included handing out surgical masks and making sure that everybody knows how to wear and dispose of them properly. We also installed an infrared thermographic camera at the entrance of the conference room to monitor the body temperature of the participants. Participants took these steps with a sense of humor. In the end, it worked very well, I think.<sup>10</sup>

**Reffert:** Absolutely.

**Ooguri:** For me, this workshop was very helpful for my own research. It inspired me to work on a couple of new directions too.

**Reffert:** We were very fortunate to be able to interact directly with some of the mathematicians who naturally

<sup>10</sup> A report on this Focus Week can be found at IPMU NEWS Vol. 6 ([http://www.ipmu.jp/webfm\\_send/164](http://www.ipmu.jp/webfm_send/164)).

have a bit of a different take on the problems than the physicists, so that was very helpful for us as well.

**Ooguri:** Talking about interacting with mathematicians, how was your experience at IPMU in this regard?

**Reffert:** It has been very good. First of all, we have a joint seminar where you can really attend the seminars for both physicists and mathematicians and ask questions. We have this introductory half hour at the beginning, before the actual talk. This I found very helpful for myself.

**Ooguri:** Yes, we have this rule that each speaker is asked to give a thirty-minute general presentation that is accessible to both mathematicians and physicists, and we then have a five minute break.

**Reffert:** Exactly.

**Ooguri:** During the short break, people are allowed to leave if they wish, and then we continue on to a more technical presentation. That seems to have been very popular. Indeed, we also used this format for the Focus Week we just talked about, and people liked it.

**Reffert:** Yes, I think it is very helpful to learn and understand the language of other fields better.

**Ooguri:** It is very important for us to make efforts to communicate with people in other areas of science and mathematics. I heard you interacted especially with Kyoji Saito<sup>11</sup> on various occasions?

**Reffert:** Yes, in fact Kyoji is very helpful. You can always just appear at his door if you have some mathematics questions, and he is always very happy to help you out.

**Ooguri:** Happy and enthusiastic.

**Reffert:** He is great.

<sup>11</sup> Principal Investigator and Professor of Mathematics at IPMU.

## Outreach Activities at IPMU

**Ooguri:** Now, changing gears a little bit — you have helped IPMU a lot in the outreach activities. You gave talks at various levels. Could you tell us about your experience with these activities?

**Reffert:** I participated in a number of events, mostly geared towards students — even elementary school students, but also high school students — who have a special interest in science or mathematics. I think it's important to interact with these people. When I was in school, it was hard to see what it is really like to do research, because the way it is taught in school is much less interesting than it is in real life. So, I think maybe students don't get a good enough opinion of how interesting it would be to be a researcher. I think it's very important for young people to meet researchers and see that there is much more than what you are taught in the classroom.

**Ooguri:** I agree. Miyazoe-san<sup>12</sup> also has a blog. In her blog, she was describing one of the talks that you gave to, I think, high school students at a mathematics camp at the IPMU. Miyazoe-san wrote that she was impressed by your presentation on the scientist's life, and that it sounds like a very interesting life to have. I think it is wonderful that those young students had the opportunity to meet scientists in person and learn what life in science is like. That is something we should be doing in order to attract young talent to science.

I also enjoyed watching your short video "Ask a Scientist." It was very well prepared. How did you do it?

**Reffert:** It was actually a challenge to

<sup>12</sup> Fusae Miyazoe, a public information and outreach coordinator of IPMU.

explain String Theory in 2 minutes. I tried to do justice to the subject and at the same time be understandable for everyone. But, it was fun. A lot of people from other institutes on campus told me that they had seen it.

**Ooguri:** I was very impressed by the way you presented the difficult material in just 2 minutes, and using a chalkboard. It is a very interesting video to watch.<sup>13</sup>

## Great Tohoku Earthquake

**Ooguri:** In the last year of your stay at IPMU – sadly - the Great Tohoku Earthquake struck on March 11. My heart goes out to people whose lives have been seriously affected by it. Both you and I were in Japan at the time of the earthquake. Could you tell us your experience?

**Reffert:** We were actually on a train going towards the Kashiwa campus when it happened. The train made an emergency stop before the earthquake struck.

**Ooguri:** So, the early warning system worked.

**Reffert:** Yes, the train suddenly stopped in the tunnel. After it stopped, the ground started shaking.

**Ooguri:** I see.

**Reffert:** Then, we didn't really know what had happened. We were asked to wait on the train for about 2 hours. We didn't know if the train was going to proceed, or whether the earthquake had been very bad or not, because on the train it was hard to tell.

**Ooguri:** Was the train in an underground tunnel?

**Reffert:** Yes. Finally they asked us to evacuate on foot. Everyone had to walk to the next station between the tracks. In the end, it was already late

<sup>13</sup> Available at [http://www.ipmu.jp/drupal/webfm\\_send/121](http://www.ipmu.jp/drupal/webfm_send/121)



afternoon and we were about 20 kilometers away from home. We had to stay overnight in the emergency shelter that they opened up in the town hall of a very small town.

**Ooguri:** I see. I myself was working at IPMU on that day. I couldn't go home either.<sup>14</sup>

**Reffert:** Many people couldn't go home.

**Ooguri:** You're right. There is a word for that. *Kitaku nanmin* in Japanese, which means refugees who cannot go home.

**Reffert:** Exactly. We were treated very well at the shelter because the emergency procedures at this town hall were very efficient. They handed out emergency blankets and mats, so we could sleep on the floor in an auditorium. In the morning, they even made breakfast for us.

**Ooguri:** Wow.

**Reffert:** They must have made it at home. They had all sorts of things, like miso soup and *onigiri*. They also tried to give us some information about what trains were running because the train system was still...

**Ooguri:** On the next day, not all the trains were running.

**Reffert:** It was a bit difficult to return home and it took several hours, but we managed eventually.

**Ooguri:** Was there any damage to your home?

**Reffert:** Not really damage. A lot of things had fallen down because we live on the 8th floor. Everything that was on top of some surfaces had fallen down and also —inside the cupboards— stuff had moved and was like falling down when you opened the doors. But, there was

almost nothing broken.

**Ooguri:** That is fortunate. Has your life changed after the earthquake?

**Reffert:** For a little bit, of course there were changes, because the supply chains did not work so well and there were power shortages.

**Ooguri:** In the week immediately after the earthquake?

**Reffert:** Yes. The first week afterwards you could tell that there were problems, but it wasn't like a real problem. We always had enough food and water so we were okay. I think it was exaggerated on international TV how bad things were in Tokyo. Tokyo was essentially all right.

**Ooguri:** It is almost half a year since then. How are you feeling now?

**Reffert:** Luckily, in this region you don't feel much anymore. Of course, it is different in Tohoku. There are still some power-saving measures in Tokyo also. But, I don't think they are disruptive at all. I do not have any more trouble from them at all.

**Ooguri:** Yes, there was some concern, when the summer months started, when demand for electricity was expected to rise because of air conditioning, whether the electric company has enough capacity to supply electricity. In the end, I was amazed that the City of Tokyo functioned with 75 - 80% of the electricity that they normally use, without impacting life in any significant way.

**Reffert:** That's true. In fact, the changes are minimal, and I also find that, for example, it's not necessary to cool down the interior so much.

**Ooguri:** In some cases, it turned out to be better. For example, it used to be that when I go to a department store in summer in Tokyo, it was freezing cold inside.

**Reffert:** Yes, absolutely. I find this to

be an improvement as well.

### Reflecting upon Three Years at IPMU

**Ooguri:** Now, you are departing from IPMU. Of course, we are sad that you are leaving us. But, on the other hand, we are very happy and proud that you are moving on to this wonderful position at CERN. To make it even better, both you and Domenico found positions at the same place. Could you tell us about your new positions?

**Reffert:** We are very excited, not only that we can be together again, but also that we can go to CERN, which is now a very exciting place to be because the LHC is running, and the search for the Higgs is really in full swing. Maybe during our time, we will witness the discovery. It's a very exciting place to go.

**Ooguri:** Congratulations. That is great.

**Reffert:** We are very happy that our time at IPMU has prepared us for this new position.

**Ooguri:** Thank you. Any final reflection or departing thoughts?

**Reffert:** Of course we are both sorry to leave because we enjoyed our stay at IPMU and in Japan in general very much because IPMU has a really nice and open working atmosphere. We were able to be very productive here. Also, Japan is really such an interesting country that we will miss it very much. We would really like to encourage other people to come to Japan and have this kind of experience, which is really enriching both scientifically and also on a personal level, I believe.

**Ooguri:** Thank you for joining us and being with us for the last 3 years. It was great to have both of you at IPMU. I wish you all the best for your next adventure.

**Reffert:** Thank you very much.

<sup>14</sup> Serguey Petcov describes his experience of the earthquake and aftermath at IPMU in his article in IPMU NEWS Vol 14 ([http://www.ipmu.jp/webfm\\_send/508](http://www.ipmu.jp/webfm_send/508)).

# Heisenberg's Hand-Written Manuscript – Heisenberg and Nishijima

Masataka Fukugita

Principal Investigator

Straight through the entrance door of the IPMU library you will find the display of a handwritten manuscript of Werner Heisenberg, one of the two or three greatest physicists of the twentieth century.

All physicists agree that the two most revolutionary concepts to emerge in the last century were relativity and quantum mechanics. Today, one cannot think of physics without either of these. These two show a marked contrast in their development. The former was created and developed by a single genius, Albert Einstein, through the pursuit of logical consistency and aestheticism in the foundations of physics, without any pressing motivation from experiments. The latter, on the other hand, resulted from the work of a number of leading physicists in Europe, starting with Max Planck in 1900, forced to provide consistent explanations for newly discovered experimental results. During this development Heisenberg, in Göttingen, took the decisive steps towards the final theory of quantum mechanics.

Heisenberg discovered the rule that governs the motion of electrons in atoms and the emission of light from the atom. Immediately after his discovery (July 1925) his "strange"

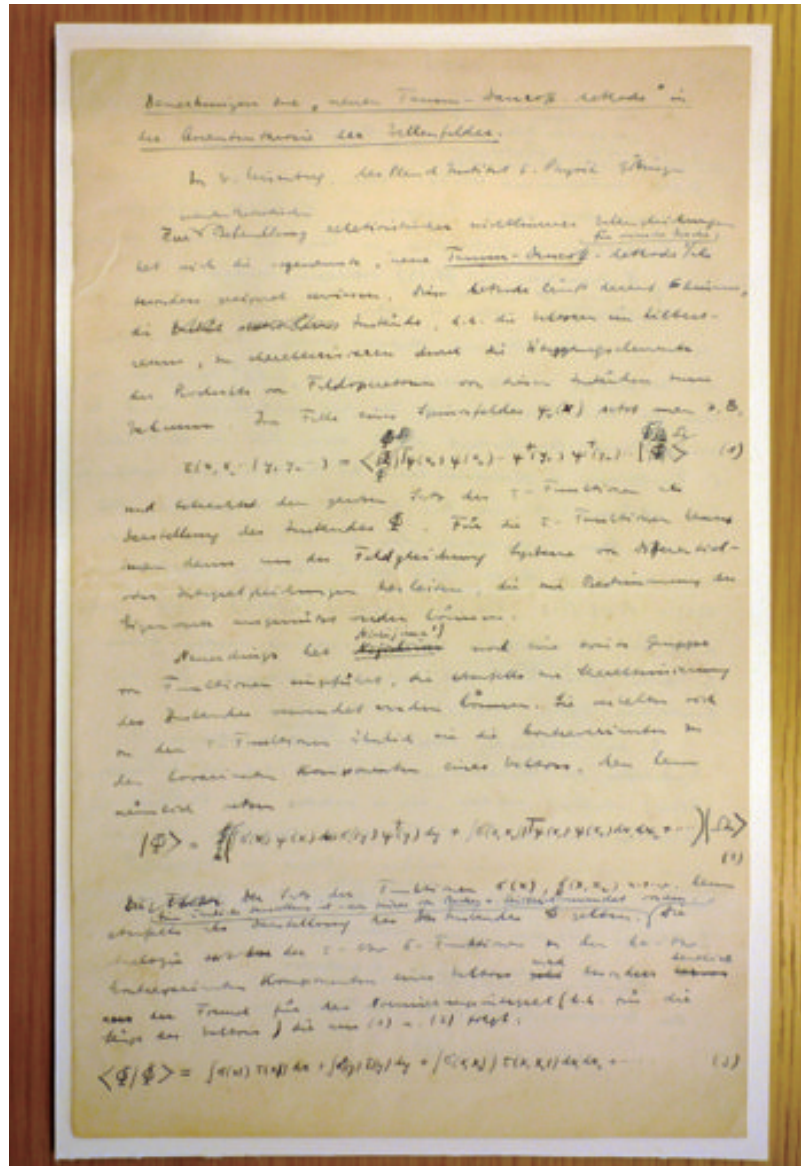


Figure 1. The first page of a Heisenberg's handwritten manuscript, displayed at the IPMU library.

rule turned out to be the very one that mathematicians called matrix multiplication (Born, Heisenberg & Jordan, November 1925). Physicists were absolutely unfamiliar with this mathematical concept, in which the multiplication of two numbers does not commute, and it should be stressed that Heisenberg did not know this mathematics, but discovered it by pondering deeply on the empirical characteristics of atomic physics. A year later, Erwin Schrödinger discovered a wave equation that seemed to govern the dynamics of atoms; Schrödinger's equation was apparently completely different from Heisenberg's matrix mechanics, but the two methods yielded the same answers. It took less than a year for physicists to realize that these two formulations are mathematically equivalent (it is said that David Hilbert knew this all along). This work formed the theoretical basis not only for atomic physics but also for nuclear and elementary-particle physics. (Incidentally, Einstein's theory of general relativity was based on Riemannian geometry, another mathematical concept that was entirely new to physicists at the time. When Einstein started to develop general relativity, he was ignorant of Riemannian geometry until his colleague-friend Marcel Grossmann told him about it. These are two examples in which new mathematics was crucial in the development of physics.)

This single discovery would be more than sufficient to raise Heisenberg to the top rank of physicists, but his first-rate contributions continued. These include the discovery of Heisenberg's uncertainty principle (key to understanding and the heart of quantum mechanics), that nuclei

consist of protons and neutrons rather than protons and electrons, the concept of isospin, the principle of the ferromagnet, and (with Wolfgang Pauli) the foundation of quantum field theory, which is the fundamental theory that describes elementary particles and their dynamics. All of this was done before he became some 30 years of age. He later also proposed the fundamental concept

of the scattering matrix to describe interactions of elementary particles.

During World War II, Germany and its science were annihilated not only by the Allied raids but also by its own regime. So was the Kaiser Wilhelm Institut für Physik in Berlin to which Heisenberg belonged. Heisenberg, who remained in Germany in the hope that he could help to rebuild post-war science in Germany,

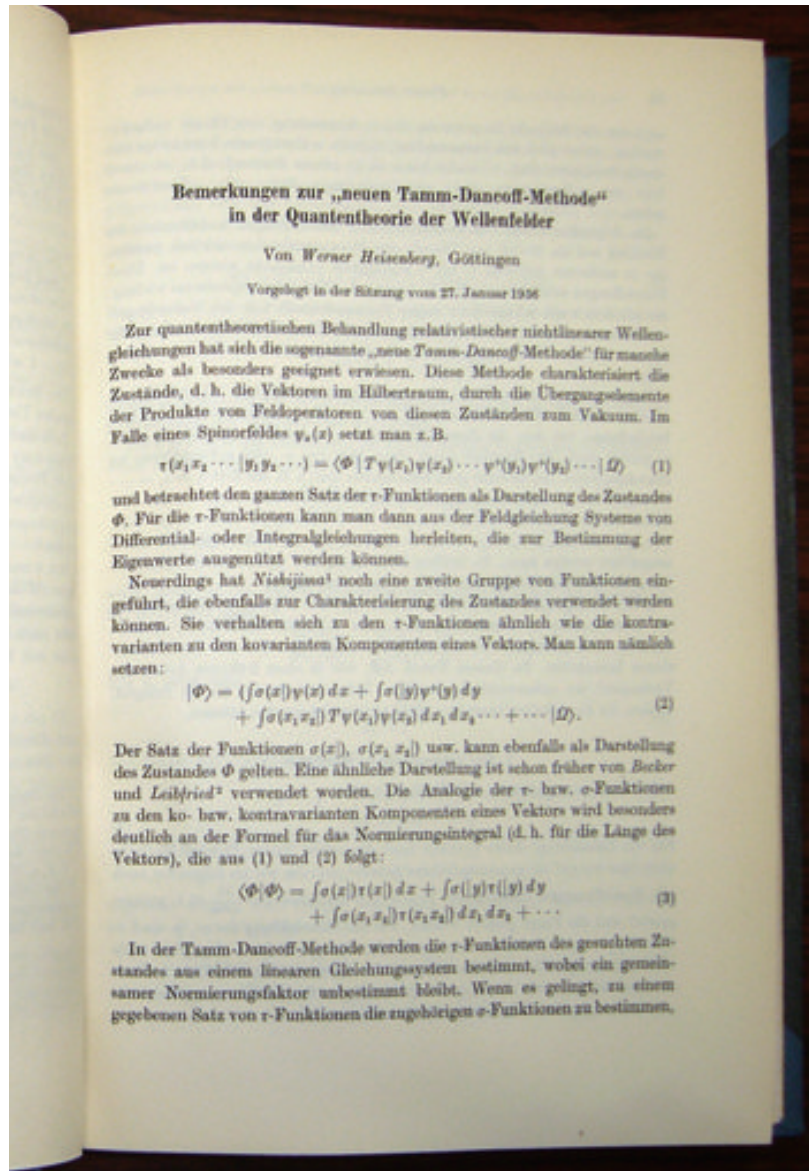


Figure 2. The first page of the published Heisenberg's paper corresponding to his handwritten manuscript shown in Fig. 1. (The photographed material is owned by Ochanomizu University.)

Special Contribution



endeavoured to reestablish the KWI in Göttingen, but the use of the name “Kaiser” was forbidden by the British occupation forces (Göttingen was in the British sector). Together with colleagues, among them Otto Hahn, Heisenberg succeeded in re-establishing the institute, with, however, the new name “Max-Planck-Institut.”

Heisenberg devoted himself from 1953 onward to developing non-linear spinor field theory with the hope that it would describe the world of elementary particles and their interactions. During the course of this work he became impressed by the research done by Nishijima, and in August 1955 he enquired in a letter to Tomonaga, who was a disciple of Heisenberg just before the war, whether Nishijima would be interested in coming to Göttingen for a year. Nishijima happily accepted his offer and arrived in Göttingen in January 1956.

Kazuhiko Nishijima (b. 1926) was educated at the University of Tokyo and then recruited by Sachio Hayakawa to a group of particle physicists at the newly founded Osaka-City University upon the request of Yuzuru Watase. The new group included Yoichiro Nambu as professor, Hayakawa himself as associate professor, Yoshio Yamaguchi as lecturer, and Kazuhiko Nishijima and Tadao Nakano as research assistants. This was a powerful group that had great success in interpreting the new experimental results that were flooding the field. For example they explained the basic properties of the new particles now called strange particles by hypothesizing that they are always produced in pairs. Nishijima went further and boldly, but correctly, conjectured that the new

particle, the K meson, should have isospin  $1/2$  rather than integer. He then introduced the quantum number of  $\eta$  charge (strangeness, in later terminology), and proposed what is now called the Nishijima-Gell-Mann rule. This is in fact a general rule when symmetry of a higher rank is broken to lower symmetry, so it applies to many concepts that were unknown in Nishijima’s time. Nishijima eventually left work on the phenomenology of new particles to study the more mathematical elements of field theory.

While Heisenberg was developing field theory, the work of Nishijima published in *Progress of Theoretical Physics* (1953) came to his attention, and hence his invitation via Tomonaga in August 1955. Displayed in the library is the first page of Heisenberg’s hand-written manuscript entitled “Bemerkungen zur ‘neuen Tamm-Dancoff-Methode’ in der Quantentheorie der Wellenfelder” published in *Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen, Math.-Phys. Klasse IIa*, S. 27-36 (1956). (The entire manuscript of this paper is retained at IPMU). This paper aims at a non-perturbative treatment in non-linear spinor theories with some truncation, which he called the ‘Tamm-Dancoff method,’ and a calculation of the fermion mass and, as a fermion bound state, the boson mass in the lowest approximation for a simplified model. Here the separate treatment of the covariant and contravariant representations of the state vector was important in treating the bound state in field theory; this treatment had been an invention in Nishijima’s paper that dealt with the scattering matrix for composite particles.

We may presume that Heisenberg

gave this manuscript to Nishijima to ask for his opinion before the presentation at the Academy. Nishijima kept it until he passed away at age 82 in February 2009 of leukaemia.

Nishijima extended his stay at Göttingen by half a year, as seen in a letter in which Heisenberg asked Watase for permission for this extension. He then went to the Institute for Advanced Study in Princeton; there his work with Rudolf Haag and Wolfhart Zimmermann on the scattering matrix of composite particles led to what is now called the HNZ construction. Frequent communications between the two scientists continued for the next two years, in particular about the role of  $\gamma_5$  and the surprising recent discovery of parity violation in field theory. Nishijima returned to Osaka-City University in 1959, but then went to the University of Illinois at Urbana-Champaign where he remained until 1966. During that time he wrote a well-regarded textbook, *Fields and Particles* (W. A. Benjamin, 1969). He worked at the University of Tokyo until 1985 when he was asked to direct the Yukawa Institute of Kyoto University.



# The First Phase of the XMASS Experiment

Kai Martens

IPMU Associate Professor

Dark Matter is one of the big mysteries of our universe. Tallying up gravitational forces we find that Dark Matter makes up roughly a quarter of *ALL* there is in the universe. Normal matter - like stars, galaxies, and us - only accounts for less than 1/20-th of all there is. So Dark Matter is a code word for a pretty big gap in our knowledge. And “Hey, it’s got to be WIMPS” is the cheerful answer to this challenge by some of our best theorists. But WIMPS are not the only “theoretically” motivated candidate for Dark Matter particles, and experiment will have to be the arbiter.

Underground here in Japan at Kamioka an exciting experiment is being commissioned for this purpose. In its current incarnation its name XMASS stands for “Xe detector for weakly interacting MASSive particles.” In modern physics jargon the latter abbreviates to “Xe detector for WIMPS.” 800kg of xenon are liquefied at  $-100^{\circ}\text{C}$  and kept at its center. The innermost 100kg are used as a target for WIMPS to scatter on. Lowering background from radioactivity is paramount to its success and was the major concern during its construction. And the



The heart of the XMASS detector after its assembly in February of 2010.

beauty of its design is ready scalability.

If successful a new detector with 10 tons of liquid Xe in its target (24 tons total) may be built to open up new physics reaches. Then its name XMASS will take on new meanings: “Xe neutrino MASS detector” as it searches for neutrino-less double beta decay in  $^{136}\text{Xe}$ , and “Xe MASSIVE neutrino detector” as it records low energy neutrinos from the sun. The key to these new experiments is the proof of its experimental concept in its current smaller incarnation as Dark Matter experiment.



## IPMU Interview

# with Jerome I. Friedman

Interviewer: Kaoru Hagiwara

### Interests changed from art to science at age 16

**Hagiwara:** Jerome, thank you very much for the inspiring lecture which we all enjoyed. Please let me start my interview with your biography. I learned that you were born in 1930, and that you were interested in art and music when you were very young.

**Friedman:** Yes, primarily in art. I did take violin lessons, but I had to make a choice between the violin and painting. It was during the Great Depression and my parents could not afford to give me lessons in both music and painting. I chose painting, and then, of course, things got so bad economically that I even had to stop lessons in painting. As a child, I would spend quite a bit of time drawing and painting,

Jerome I. Friedman is Institute Professor Emeritus of MIT. He, together with R.E. Taylor and H.W. Kendall, received the 1990 Nobel Prize in Physics "for their pioneering investigations on the inner structure of protons and neutrons, which have been of essential importance for the development of the quark model in particle physics." He received his Ph.D. from the University of Chicago in 1956. He joined the MIT Physics Department in 1960, and became a full professor in 1967.

and I really thought I would possibly become an artist when I grew up. I went to a high school that had an art program that permitted me to draw and paint 3 hours a day.

**Hagiwara:** Three hours?

**Friedman:** I took very little mathematics, a course in algebra and one in geometry. I never had trigonometry. I had one course in physics that was so bad that all I could remember was that the teacher burnt his sleeve on a Bunsen burner. I was happily on my way to a career in art, and I was reasonably good in it. I won a national prize in art; and when I graduated from high school, I got a scholarship to the Museum School of the Art Institute of Chicago, which was the best art school in the area.

**Hagiwara:** I know the Art Museum, a landmark in Chicago.

**Friedman:** Yes. I was on my way to a career in art, but I decided not to accept the art scholarship and go to the University of Chicago instead. My interests started to change at the end of my third year in high school.

**Hagiwara:** Third year in high school is about 15 years of

age or 16?

**Friedman:** Yes, about 16 years. It happened as a result of a trip to the Museum of Science and Industry. You must know that Museum.

**Hagiwara:** Sure, of course, that's another landmark.

**Friedman:** I went there, and I bought a little book by Einstein. I had heard what a great man he was and had also heard about all the tremendously interesting things he had predicted about shrinking meter sticks and clocks that slowed down. I thought that this was really interesting and I really wanted to understand how it works. I spent the whole summer going through this book.

**Hagiwara:** I remember about the same age I also read a book written by Einstein and Infeld.

**Friedman:** This was a book very much like the book that you read. Supposedly if you knew algebra, which I did know, you could derive the Lorentz transformations, which I did. But I never really understood them, because the real issue in the derivation, which is a very deep issue, is why the velocity of light should be invariant in all inertial reference systems. As a teenager with no background, it didn't make any sense to me. I didn't understand it, and I decided that I would like to pursue that question and others like it. It was kind of audacious because I had an art scholarship and yet I decided to go to University of

Chicago instead.

**Hagiwara:** I see, so you declined the scholarship from the art school and then decided to go to University of Chicago.

**Friedman:** Yes.

**Hagiwara:** Was it easy to enter the University?

**Friedman:** Yes, it was very easy. I was quite good academically. I got very good grades in all the courses I took. As a result of that, I got a full scholarship to the University of Chicago. I never paid a penny for my entire education.

**Hagiwara:** That's great.

**Friedman:** My parents had such economic problems that that was the only way I could go to the university.

**Hagiwara:** I see. When you went to University of Chicago, did you already know that Professor Fermi was there?

**Friedman:** Oh, yes.

**Hagiwara:** I see. He was very popular.

**Friedman:** Everybody in Chicago knew about Professor Fermi. I felt very lucky because I couldn't afford to go to a university anywhere else. First of all, I lived at *home*, and I took the streetcar to the University. I lived in the west side of Chicago. It was a long trip, but I went every day. For the first two years, I had the Great Books Program—a set of courses in which you read many of the great books of Western Civilization.

**Kaoru Hagiwara is Professor at KEK and Senior Scientist at IPMU. He is a theoretical particle physicist.**



**Hagiwara:** Western Civilization? That was what you first had about 2 years of liberal arts studies.

#### The days with Fermi at Chicago

**Friedman:** Yes, that's it. Then I went into the physics department, and initially that was very difficult for me. Fermi had the point of view that everybody who wanted to get into physics, could enter the Department with almost no restrictions. That's why I could get into the physics department, but I had to catch up in mathematics very rapidly. There were very difficult examinations and the flunk out rate was very high. At the beginning, I was struggling. I remember the first course I took; it was physics 105, 6, and 7. They covered in only 1 year what we used to cover in 2 years at MIT; and every Friday, there was a very difficult examination.

**Hagiwara:** Every Friday examination?

**Friedman:** Every Friday, and the average was about 20 to 30 out of a 100. There were times that I got a very low grade and I wondered whether I had made the right choice. About 125 people started in this course and about 35 people finished.

**Hagiwara:** Only 35.

**Friedman:** The reason most of them left was because they couldn't take it. It wasn't that they were forced to leave. You would take a test every

Friday and you would get less than 50% of the test correct almost every time. These were all good students. They just couldn't take it.

**Hagiwara:** Did Fermi make those examinations?

**Friedman:** No. The individual who taught that course said in the first lecture, "most of you are not smart enough to be a physicist." What saved me was that if I got a bad grade on an exam, I said to myself, I don't know anything. What do I expect? I caught up, and I was able to pass all my exams. And so I was able to stay and continue my physics education. After 2 years they gave a long exam called the qualifying exam, and then another one called the basic exam after the third year, which was the Ph.D. qualifying exam, and that was a 3-day exam, 6 hours a day. About 50% of everybody who took each of those exams failed out. Basically one quarter remained, and it was really tough, but it was really enjoyable in the following sense: it was a very active place. Fermi was such a brilliant man, and the best physicists in the world would come and visit and then give talks. We heard the talks, and I saw some of the great physicists. Among those who visited were Pauli, Heisenberg, and Feynman, and a very young Gell-Mann taught at Chicago at the time. And of course, there was Fermi. Here is where I had a lot of audacity. I said

to myself, "Look, maybe I am not the best student in the department, but I want to work with the best professor." So I went to see Fermi, and I asked him if I could work for him. I thought he would say, well, tell me how you did in this course and that course. Tell me how you did in the basic examination. He didn't ask me one thing. He just said yes, and I couldn't believe it. It was like I won the lottery. I worked for him until unfortunately he passed away during my thesis. He was a wonderful man, and it was just fabulous to see him think about physics problems, and do them in front of you and explain things. He was a brilliant man and a very kind and nice man. In addition, there were wonderful doctoral students in the Department. One of my fellow students was Tadao Fujii who was a good friend of mine. At this time, Koshiba was a young postdoc at Chicago, working in Marcel Shein's cosmic ray group. I often met him and would converse with him.

**Hagiwara:** Have you met Nambu?

**Friedman:** Yes, Nambu was a young assistant professor when I was a student. Even at that point, he had a very high reputation, and it just continued to go up. He is an incredibly gifted theorist, and I was so happy when he got the Nobel Prize because it was a wonderful recognition of the wonderful works he has done. I never had a course

with Nambu, but I heard him give lectures, and I talked to him on a few occasions. He is very friendly, but very shy. You have to go up and approach him to talk to him because he is so shy. But I did, and he was always extremely friendly. Fermi had assembled an extraordinary faculty. Being a student in the department was an absolutely wonderful experience.

**Hagiwara:** Yes. I can imagine.

**Friedman:** I was so lucky. I was incredibly lucky.

**Hagiwara:** I have a next question. According to your biography, your research thesis work was on proton polarization in the emulsion experiment.

**Friedman:** Yes, that is correct.

**Hagiwara:** The subject was by using the polarization of the scattered proton, you wanted to learn if it is coming from elastic or inelastic scattering. Was it the subject which Fermi gave you or...?

**Friedman:** That's right. It turned out that in those days, it was noticed that if you scattered protons off a carbon target, they had a high degree of polarization.

**Hagiwara:** I see.

**Friedman:** One didn't know what the process was, whether you were actually breaking the carbon up, exciting carbon, or scattering elastically. Fermi wanted to know, but what I didn't know was that he already had made a calculation of this process. But he didn't tell me about it because he didn't want



to influence my results. His calculation indicated that there was a very high degree of polarization in elastic scattering. He always had a great interest in the effects of spin. In fact, Maria Mayer got the idea of LS coupling, which was basically the key to unlocking the shell model, from Fermi. He thought that the LS couplings could produce this polarization. He did a calculation in which he put in a real and imaginary potential, an LS coupling, and he got a very high degree of polarization in elastic scattering. It turned out that when all results came in, they matched his calculation beautifully.

**Hagiwara:** Really.

**Friedman:** I did my own scanning of the exposed nuclear emulsions. I looked at 300 meters of track, 150 microns of field of view, and you can imagine what that was. My progress was very slow. When I was in the middle of my measurements, I got a troubling surprise. Segrè did the same experiment using counters, and the results confirmed Fermi's calculation. I felt that I had wasted the year and a half because I had been scooped. I went to see Fermi, and he was very kind about it. He said, "Don't be upset. You can also look at the inelastic scattering and make a comparison, and you can publish both sets of measurements," which I did. I was able to get a Ph.D. as a result of that, but

unfortunately by the time I finished my thesis Fermi was dead. He died very tragically. He went to Europe one summer, the summer of '54, and developed a very rapidly advancing cancer of the stomach. When I saw him in the previous spring, he looked very robust. When he came back to Chicago in the fall, I saw him at a distance walking in the hall. I looked at him, and I could barely believe that was Fermi, because he looked so gaunt. I waved to him and he waved back to me, and then he went into his office. The next day, he went into Billings Hospital for exploratory surgery, and they found that the cancer was inoperable. They sent him home to die. But I want to give you an idea of what kind of man he was. When he was in the hospital, Herb Anderson, and Chandrasekhar, the great Indian theorist, went to see Fermi for the first time after the surgery. It was a very awkward situation, what do you say to a man who you are seeing for the first time after he has been given a death sentence, what do you say to him? They came in, and they were obviously at a loss for words, and Fermi noticed this. He said, "Chandra, tell me, when I die will I come back as an elephant?"

**Hagiwara:** Elephant?

**Friedman:** Yes. They all just broke out laughing. That broke the ice and then they had a wonderful conversation. He was obviously concerned

about their feelings, and though he was on his death bed, he made a joke to get them to feel at ease. That's a real human being.

**Hagiwara:** I see, yes. It's a wonderful story of him. Thank you very much. Now, let me go ahead. After you got your Ph.D., you worked at Chicago and then you moved to MIT and...

#### Started working on electron scattering

**Friedman:** No, I went to Stanford first before MIT. I worked for 3 years with Hofstadter at the High Energy Physics Laboratory.

**Hagiwara:** Where you started working on electron scattering?

**Friedman:** Yes, I learned electron scattering there. It was a very fortunate move for me because I had been doing emulsions, and by the time I finished my thesis, it was a dying technique. I decided I didn't really want to go into bubble chambers because I had had enough of images. I had looked at images so many times I was tired of looking at them. I wanted to learn how to make measurements electronically.

**Hagiwara:** Starting from emulsion and then you moved up to counter...

**Friedman:** Yes, so I got a job with Hofstadter's group in electron scattering. There I did a number of things, but the experiment I remember the most, one that played a role in my later thinking was a measurement I made using

a result of Drell and Schwartz. They did a calculation in which they showed that if you measure electro-disintegration of deuteron and you sum over all inelastic states, you could find out something about the exchange force of the deuteron. That struck me as an interesting result. I was really fascinated by the idea that by looking at all the inelastic states, you can learn something about the ground state.

**Hagiwara:** I see. So is that the first time you learned about inclusive measurement?

**Friedman:** Yes, and I learned how to do the radiative corrections from that, and found them to be quite complicated. In electron scattering, the radiative corrections can occur in two ways. The electron can emit a photon before scattering, in which case you are scattering at a lower energy than your beam energy, and you have to make a correction using a cross section you have never measured. Or the photon can be emitted after scattering, and that is relatively easy to correct for. But emission before scattering means that you have to learn something about lower energy cross sections, and every time you do that, you have to go to lower and lower energies.

**Hagiwara:** That is true, yes.

**Friedman:** It's a problem, and you have to learn how to do that. The other thing this measurement told me was that there might be

something you can learn from the sum over states. When we decided to do inelastic inclusive measurements at SLAC, I already had done that with a deuteron, and I said to myself, I am not sure what we are going to learn about the proton, but it could be interesting. That electro-disintegration of the deuteron experiment turned out to be a very significant one for me. Now, was I successful in finding the exchange forces of the deuteron? The answer is no. I am going to tell you what happened. I did this experiment and evaluated the results, and I realized that there were some terms that Drell and Schwartz left out of their calculations. I went to see Sid Drell, and I talked him about it. He said, "Oh, yes, you really should check them..." and I sat down and spent 6 months calculating the effect of these so called gauge terms. I put the gauge terms into the calculations, and it turned out that they made the results inconclusive. I still published the result because I was able to show that the gauge terms are important and you had to put them in. I wasn't able to provide new information about the exchange force, but two things I did learn. I learned about radiative corrections and I learned about sum rules.

**Hagiwara:** Yes, I understand, because that's directly related to your very important work. I see. Then you went to MIT? The Cambridge Electron

Accelerator (CEA)?

**Friedman:** Yes, the CEA. Henry Kendall and I were colleagues at that time and we led a group together. We wanted to do electron scattering from the proton at the CEA, but we weren't permitted to do that because somebody else was using the spectrometers for an extended period of time.

**Hagiwara:** I see. That is actually the reason why you went to SLAC.

**Finding the magic to do research at SLAC, 3000 miles away, and yet teach at MIT**

**Friedman:** Yes. We realized that if we wanted to study the proton, we had better go elsewhere. So Henry and I decided to try to go to SLAC and that was a difficult thing because how do you teach and do research 3000 miles away? That was an incredibly crazy idea that Henry and I had.

**Hagiwara:** How could you manage?

**Friedman:** There was a wonderful man who was Head of the physics department at MIT at the time. His name was Bill Buchner and I am eternally thankful to him. Henry and I, we went to see him, and we were perplexed as to what we could do. But we thought we should ask him what could be done to allow us to do research at SLAC. We thought the answer would certainly be no, that we better continue working at the CEA. We told him what research

we wanted to do, and he said, "Simple, I know how to fix it." We were very surprised. What was this magic that could fix this problem? He said to Henry and myself, "You two will teach one course. Each of you will get a salary, and Henry can be away for 2 weeks and Jerry can teach and Jerry will go away for 2 weeks and Henry will teach," and that's what we did. For a number of years, I would be in California for 2 weeks and he would teach and then I came back to teach and he would go to California; and we built up a group there. In fact, in the United States, I think we were the first group that did research more than 1000 miles away from our University, establishing the first distant user group.

**Hagiwara:** Yes, that's really hard.

**Friedman:** It's true that Columbia would go to Brookhaven to do research, but that's relatively close. 3000 miles is a different thing.

**Hagiwara:** Yes, completely different.

**Friedman:** We set up a group. We moved postdocs and students to SLAC, and before we knew it, we were a presence there, and we played a role in building up the spectrometer complex, preparing experiments and carrying them out. It was really a good time.

**Hagiwara:** I have a question about your deep inelastic scattering experiment. You said that first you measured

proton form factor, elastic scattering, and after finishing this, you could of course measure the form factor to really short distance, but that nothing was really interesting.

**Friedman:** We didn't really learn anything new from measuring the form factor, and we decided to abandon it. There was no point in trying to do it more precisely.

**Hagiwara:** You then proposed to do inelastic scattering.

**Friedman:** Yes.

**Hagiwara:** At that time, you said that absolutely nobody believed that you can find anything by doing this, but you should have had some picture probably or...

**Friedman:** I did. I can't speak about the motivation of Henry or Dick or the others. I can only speak of mine. My motivation came from the deuteron experiment.

**Hagiwara:** Yes.

**Friedman:** That's where it came from.

**Hagiwara:** You probably wanted to learn something about the force which makes up the proton.

**Friedman:** You could learn something because in analogy to the deuteron experiment the sum over excited states could provide information about the ground state.

**Hagiwara:** I see. It was really important.

**Friedman:** That was a lesson to me. I didn't know what we were going to find. We were certainly not looking for quarks, and Henry may have had a different

motivation. I don't know what Henry's motivation was. He probably told me, but I can't remember anymore, and I don't remember what Dick said, but I can tell you what I remember about myself. But, the program committee wasn't very happy about our going in this direction. What we promised to do was to measure the inelastic excited states, namely the resonances. Of course, if you do that, you have to also measure the continuum because these resonances are sitting on the continuum.

**Hagiwara:** Excuse me, so the PAC approved your experiment because they thought that you can measure resonances.

**Friedman:** Yes. They weren't very happy about our just measuring the continuum.

**Hagiwara:** At summing up.

**Friedman:** Yes, summing up. We measured both. We measured the resonances, but we never published these results.

**Hagiwara:** Never published? That's a revenge.

**Friedman:** No. Because what happened was that the inelastic became so interesting and important, that we didn't take the time to publish the resonance results. I will tell you how we found out that the continuum spectra were so interesting. I went to a few theorists and asked them if they would give us some predictions of what we could expect in measuring the continuum. Nobody was



interested. They thought it was garbage. After all, in the continuum you have all these processes, and how do you include them? Nobody would calculate it.

**Hagiwara:** Did you ask Bjorken?

**Friedman:** Bjorken did not calculate the cross-sections at all. He calculated sum-rules.

**Hagiwara:** I see.

**Friedman:** Now, Bjorken was possibly talking to Dick and to Henry, and I don't know exactly what Bjorken was doing, but I can tell you what I did. After having watched Fermi approximate complicated phenomena, I said to myself, why not just try to calculate a very crude model. I will tell you what my crude model was, and you'll see that it was actually not terribly unreasonable. If you have electron scattering, you have the virtual photon, right?

**Hagiwara:** Sure.

**Friedman:** If you have an inclusive process, it's the total cross-section for the virtual photon. So, the first thing that will come in is the total photo production cross-section at the energy of the photon. But

there has to be a correction because the photon is virtual. If you look at the Feynman diagram, there is a vertex correction, which is a function of  $Q^2$ . You don't know what that function of  $Q^2$  is, but there's one thing you do know, it can't be a function of only  $Q^2$  because  $Q^2$  has units. You have to have something else. You have to have  $Q^2$  times a distance squared so that it is a unit-less number. This means you have to put a distance in it.

**Hagiwara:** Is that the proton size?

**Friedman:** That's exactly right.

**Hagiwara:** You knew it from your form factor experiment.

**Friedman:** Yes. That contains the proton size. In fact, the most efficient thing is to just put in the proton form factor, because that's the best reflection of proton size. Calculating the inclusive cross section from the proton form factor along with the total photo production cross-section provided a template for what we could expect. So we then could simulate what we would measure, by putting in the radiative corrections.

We started measuring, and at one point, the measurements were a factor 5 bigger than this calculation.

**Hagiwara:** Yes, when your  $Q^2$  is not too large.

#### Found point-like objects in the proton

**Friedman:** We thought, well, it's okay. A factor of 5 is not surprising for such a rough calculation. Then we observed a factor of 10, then a factor of 100, then a factor of 1000, then a factor of 10,000, and we knew there was some new physics here.

**Hagiwara:** Is that the detector which you showed us in your lecture? With its rail you gradually start from the low angle to the large angle?

**Friedman:** Yes, that's right. I didn't show you a distribution because it was supposed to be a popular lecture. But if you look at the structure function as a function  $Q^2$ , it's flat. It has a little turnover because it has a kinematic limit. To me that suggested point-like structures immediately. If there is a finite size, it has to come in and the structure function begins to fall with increasing

four momentum transfer. If you look at inelastic electron scattering from a carbon nucleus it has a spectrum like that of the proton. You get excited states and then you get a broad continuum. If you look at the momentum transfer distribution in the range of the maximum of the carbon continuum, you get the form factor of the average nucleon. It's called quasi-elastic scattering. Basically, in the same way you can talk about quasi-elastic scattering off some tiny objects in the proton.

**Hagiwara:** You measure electron scattering off carbon atom nuclei and the size of the carbon nuclei matters at very low momentum transfer. Beyond it, you start measuring the proton...

**Friedman:** That's right, exactly. Because it is no longer coherent scattering.

**Hagiwara:** You already knew that.

**Friedman:** That's right and it becomes incoherent scattering. Once you get into the incoherent range, you are looking at the form factor of the nucleon, and of course, you have both the neutron and proton. So you are looking at the average form factor for the nucleon. It became quite clear, and we were already getting the idea of point-like objects in the proton. At about the same time, Henry was looking at BJ scaling, and it appeared that scaling was working. I don't think we really understood

what scaling meant at that time. In retrospect, it is clear that scaling implies point like behavior, but at that time we didn't understand it. I am sure it was in BJ's mind, but I don't remember that he ever discussed it with us.

**Hagiwara:** If there were no other scales...

**Friedman:** Yes, right, exactly.

**Hagiwara:** ...and then that should depend only on a ratio of kinematical scales.

**Friedman:** Exactly. If there is no size for  $Q^2$ , it has to be a ratio; but at that time I didn't understand that.

By 1968, some of us had the point of view that there was possibly point-like structure in the proton, and the Vienna Conference was coming up. I was going to be the representative for the group at that conference.

**Hagiwara:** Vienna?

**Friedman:** Yes. Before I left, I had to talk to the group to find out what they would permit me to say. Henry and I and few others, wanted to mention the idea that there could be point-like structure in the proton. The rest of the group objected, saying that such an interpretation was too bizarre. The group took a vote, and we lost.

**Hagiwara:** You lost!

**Friedman:** When I gave my paper, I never mentioned the possibility of point like structure. I just showed the plot of the  $Q^2$  dependence. Panofsky gave a plenary talk on our sessions. In the plenary talk, he said about

two sentences about our experimental results indicating the possibility of point-like structures within the proton. He said nothing more and nobody paid much attention to it. It was just like dropping a stone in water, you get few ripples, and then nothing. It was so far from people's thinking because first of all, it implied a field theory. In those days, field theory was thought not to be valid for the strong interaction. Nuclear democracy was the prevailing theory, and nobody wanted to talk about the possibility of point-like structure. But we kept on working on that possibility. Then, we used the Callan-Gross sum rule and found that if there were constituents in the nucleon, their spin was one half. We then used another sum rule which when combined with neutrino-nucleon inelastic scattering demonstrated that these constituents have the fractional charges of quarks. That was it. It took a number of years, but it was a very exciting time and I had a great time doing it. That's a long answer to your short question.

**Hagiwara:** Thank you very much. That was a very, very fascinating story. I entered graduate school after all your works were completed.

**Friedman:** Where did you get your graduate school education?

**Hagiwara:** I went to Tokyo Metropolitan University, and it was in 1974 when  $J/\psi$  particle was discovered.

**Friedman:** Yes.

**Hagiwara:** Even in those days, at least in my small university, field theories were not at all popular.

**Friedman:** They weren't popular at all.

**Hagiwara:** Actually, my Professor (Tetsuro Kobayashi) was doing a Regge phenomenology for pion-nucleon scattering physics, but after this  $J/\psi$  discovery, he told me that I should not really study what he is doing, but instead his recommendation was that I should read all the preprints coming from SLAC.

**Friedman:** He was a wise man.

**Hagiwara:** Yes, indeed. That's how I started my graduate studies. I was just reading and reading and reading. In those days, I read many articles written by Bjorken, Feynman, Glashow... I really learned from those physicists.

**Friedman:** Things were changing so rapidly. The whole standard model was coming into play at about that time.

**Hagiwara:** Yes, I know that was all based on your work and many theorists' work. Let me see what else I should ask you. I have already asked the most important questions. Actually, I prepared two last questions.

**Friedman:** Sure.

**Hagiwara:** They may not be so kind.

**Friedman:** That's okay.

The whole high energy physics is now global

**Hagiwara:** My first question



is this. When I was studying in the 70's, most high energy physics results were obtained in the United States, and it was in '82, when I was in Madison as a postdoc, the W and Z were discovered at CERN. Now it seems almost everything at highest energy is coming from Europe. Do you have any picture for the future of high energy physics in the United States? What is your opinion?

**Friedman:** I think in general the whole high energy physics has changed, and it's now global, and every facility will have to be multinational. I think CERN is a good example of what it is, and it's hard to know what will exist in a country in 10 or 15 years. I would say that in the near future it will be difficult to build any new facility because of what's going on in terms of the economic meltdown and deficits. When the countries come out of it, and they will come out of it because we have been there before, it's not clear where the next big facility will be. But wherever it is, it is going to be multinational. The Super B-factory you are going to have will be a national project because it is still of a magnitude that can be paid for by a single nation although I am sure you would like to get international participation, which I am sure will happen.

**Hagiwara:** Yes, of course.

**Friedman:** But if you start getting into an ILC or CLIC or

something like that, we are going into TeV region and we are talking about multi-billions of dollars. It's going to be multinational and where it goes will be less important than having it in some place and having international participation. I think whether a nation will be in the field will depend on whether it wants to join multinational efforts. Even though the US will not have a large accelerator after the Tevatron shuts down, we have a large number of physicists working at CERN, well over a 1,000, which is pretty substantial.

**Hagiwara:** Yes, so that's an extended version of your commuting between Massachusetts and California.

**Friedman:** But things have gotten a lot better since those days because now we can communicate much easier. Now we can have real meetings at a distance, which we couldn't have in those days; and that is happening all the time. You are going to move bits. You are not going to move people, and people participating in an experiment will be participating from home.

**Hagiwara:** The location of the lab doesn't matter.

**Friedman:** Yes, it's great. It's changing, and as time goes on, it's going to change even more.

**Hagiwara:** I can imagine. Do you have any comments about Japanese High Energy Physics? We have been kind of concentrating on efforts

towards flavor physics. Japanese community has been quite successful in flavour physics experiments, such as B-factory and neutrino experiments.

**Friedman:** Those are very important areas, and Japan has always had a very high level of physicists. I have been interacting with Japanese physicists since my very early days as a student because, as I said, I went to school with Tadao Fujii and knew Nambu and Koshihara at Chicago.

**Hagiwara:** Yes, you told us.

**Friedman:** Tadao was a classmate of mine. He was a terrific fellow and a very capable physicist. Look at what Koshihara has done. Nambu is one of the greatest theorists of our time. Japan has a great array of physicists who have done extremely important things. The B-factory and neutrino programs have been a great success, and I think Super-B-factory and the programs at J-PARC will also be great successes. You do things in a careful, thoughtful manner; and you are willing to try difficult things and you make them succeed.

**Hagiwara:** Yes, I think so. I was amazed also.

#### Message to the political leaders, both in Japan and in US

**Friedman:** The Belle and Kamiokande programs were very impressive, and got beautiful results. I think Japan has done extremely well, and

it will continue to do well as long as it keeps on investing in research. Even though particle physics does not have known applications, the spin-offs of its technologies will provide the nation with economic benefits. The training of your students in the new technologies utilized in particle physics will give rise to innovations that will be enormously beneficial to the economy, and that's the message you have to convey to your political leaders. We have to do the same thing in the US. We have the same problem. As budgets get tight and problems develop, there is a tendency to want to spend money primarily on projects that can provide immediate economic benefits. But if you stop spending money on basic research, you are going to lose a lot. That's the message you have to get across. If your government keeps giving good support to your science, you will continue to do wonderful things.

**Hagiwara:** Okay, I understand. This is my last question. If you have anything...

**Friedman:** No, I think I have said enough.

**Hagiwara:** Okay, well, then, thank you very much.

**Friedman:** Oh, you're very welcome. It was a very interesting interview because you made me think about things I haven't thought about for some time. Thank you.

# 2011 IPMU-YITP School and Workshop on Monte Carlo Tools for LHC

Mihoko Nojiri

IPMU Principal Investigator

The 2011 IPMU-YITP School on Monte Carlo Tools for LHC was held for the first time outside Europe, at the Yukawa Memorial Hall of Kyoto University, on September 5-10, 2011. This series of schools has been annually organized by a group developing crucial computational tools for analyzing the physics of LHC experiments. Kyoto was selected as the main venue because, at the time of planning, there were non-negligible effects of the great earthquake on March 11, 2011. As the school was held in Asia, about 80% of the 50 students who participated were from Japan, China, India, and Korea.

The purpose of this school is to familiarize students with the why, what, and how of the tools with which one can compute various physical processes occurring in the LHC experiments aiming at exploring the ultimate structure of elementary particles. Using these tools it is possible not only to compute particle production rates at LHC, but also to simulate interactions occurring at LHC and to look into them in detail. In recent years, better agreements have been obtained between the computed results and the experimental data by taking higher order QCD corrections more strictly into account. Typically these tools are utilized for physics studies in the LHC experiments which have high background event rates.

At the school, together with a series of lectures,



students ran these computational codes for training of simulations and analyses of real LHC events. Within a week they experienced all of Herwig<sup>++</sup>, PYTHIA, and Sherpa, which are the main codes to produce the Standard-Model processes at LHC. They also got MadGraph training, with which they can incorporate interactions and generate events in physics beyond the Standard Model. There were about 10 lecturers and tutors for 50 students. Software installation was efficiently performed on the pre-installed VirtualBox virtual computer. Through a questionnaire survey carried out after the school, it was observed that the students were very satisfied. This school was effective for Asian students who had no access to Monte Carlo tools so far to explore the exciting physics of the LHC experiments from now on.

## News

### IPMU Was Given the Highest Grade S in the WPI Interim Review

The five WPI centers including IPMU were selected by the Program Committee in FY 2007 aiming to establish internationally opened and globally visible institutions in Japan, and they were launched in October 2007. This year, these five initial WPI centers were subjected to an interim evaluation after four years since their launch.

The result of the interim evaluation was announced on December 14, 2011 by MEXT; only IPMU was given the highest grade “S” (superior). The criterion for “S” is defined as: *Progress being made in establishing the center exceeds its initial goals. Even greater progress in developing itself as a “top world-level research center” is anticipated.* The report comments on the achievements of IPMU: *We all highly evaluate IPMU's past 4 years of activities and scientific achievements. During a short period, IPMU has established itself as a world-renowned institute from scratch. IPMU has demonstrated outstanding progress toward achieving the goals of the WPI program in all areas — quality of science, globalization, interdisciplinary approach, and organizational reform. The leadership of Professor Murayama is highly appreciated. At the same time, however, the report points out some actions required as well as*

recommendations. Among others, the most notable is the following one, which is directed to the IPMU's host institute, UT (the University of Tokyo): *With the establishment of TODIAS, UT is in a position to give a certain number of tenured positions to IPMU. The committee anticipates that researchers may be concerned about their futures and leave IPMU for more secure positions. We recommend that UT should put some care into adopting a globally accepted meaning of “tenure.”*

The interim evaluation report from the MEXT is available at [http://www.jsps.go.jp/j-toplevel/data/08\\_followup/FY2010result\\_e.pdf](http://www.jsps.go.jp/j-toplevel/data/08_followup/FY2010result_e.pdf). Also, please visit the Director's Corner written by Hitoshi Murayama on page 3 of this IPMU NEWS.

### First Stars Were Heavy, But Not Monstrous

Up to now, astrophysicists thought that the first stars could grow huge “monstrous” stars with mass as heavy as a few hundred times the sun. However, a group of international researchers, Takashi Hosokawa ( JSPS fellow at NASA Jet Propulsion Laboratory), Kazuyuki Omukai (Associate Professor at Kyoto University), Naoki Yoshida ( IPMU Associate Professor), and Harold Yorke (NASA Jet Propulsion Laboratory) reported the result of a new large-scale computer simulation of the formation and evolution of one of the first stars in the universe, showing that there is a mechanism with which the first star regulates its own growth; there remained a star with a mass of about 40 times that of the sun. So, contrary to expectations, the first stars were not monstrous. The research article appeared in *Science Express* on November 10, 2011 as an online version, and was published in *Science* 334 (2011) 1250 – 1253 on December 2, 2011.

### Masaomi Tanaka Receives 2011 Inoue Research Award for Young Scientists

IPMU Postdoctoral Fellow Masaomi Tanaka (from December 1, 2011 he is at the National Astronomical Observatory of Japan, see Personnel Changes on page 33) won the 28th (2011) Inoue Research Award for Young Scientists for his doctoral thesis “Supernovae in Three Dimensions.” The award ceremony will be held on February 3, 2012.

### 1990 Nobel Laureate J. Friedman Gave a Public Lecture

Jerome Friedman, 1990 Nobel Prize Laureate in physics, gave an open lecture entitled “Exploring the Universe at the Largest and Smallest Distances” at an auditorium in the Chemistry Department Building on the University of Tokyo Hongo campus on October 6, 2011, jointly hosted by the IPMU and the University of Tokyo's Division of International Affairs, and co-hosted by JST (Japan Science and Technology Agency). He, together with R.E. Taylor and H.W. Kendall, received the 1990 Nobel Prize in Physics for their discovery of the inner structure of protons and neutrons—the first experimental evidence for the existence of quarks. Professor Friedman spoke to about 200 audiences in English, but Professor Hiroaki Aihara, of the Physics Department at the University of Tokyo and IPMU Deputy Director, interpreted Professor Friedman's talk in Japanese at short intervals.

You can also find IPMU Interview with Professor Friedman on pages 22 – 29 in this issue of IPMU NEWS.



1990 Nobel Laureate Prof. Friedman, giving a lecture

### 2011 Open House at UT Kashiwa Campus

An open house on the Kashiwa Campus of the University of Tokyo was held on October 21 and 22, 2011. The IPMU took part in this open house with a number of programs in addition to the usual poster presentations, etc. These included a lecture by IPMU Associate Professor Taizan Watari who spoke on a “Close-Up Look at Elementary Particles,” a Japanese play presented by IPMU foreign researchers “2011: A Space Odyssey,” a Digital Space Theater “Let’s Go On a Journey into Space” which utilizes a 4-Dimensional Digital Universe viewer “Mitaka” released by the National Astronomical Observatory of Japan, and IPMU Building Tours in Commemoration of the AIJ (Architectural Institute of Japan) Prize 2011 (see IPMU NEWS No. 14, p. 28). During the two days, a total of 6000 people visited the Kashiwa campus, and the IPMU attracted more than 1700 people.



Taizan Watari giving a lecture

### WPI Research Center Joint Symposium “Leading Science and Your Future”

On November 12, 2011, a Joint Symposium of the six WPI research centers entitled “Leading Science and Your Future” was held at Fukuoka Bank Hall in Fukuoka City, hosted by Kyushu University’s I<sup>2</sup>CNER (International Institute for Carbon-Neutral Energy Research), a WPI center newly launched in 2010, and co-hosted by other 5 WPI centers. An audience of about 600 comprised

mostly high-school and junior high-school students invited from Kyushu and Yamaguchi Prefecture, with some other participants. The research activities of each WPI center were presented; from IPMU, Director Hitoshi Murayama spoke on “The Dark Side of the Universe.” He and other speakers also engaged in a panel discussion where they responded to questions from the representatives of the participating students.



A scene of the panel discussion

### 5th IPMU-ICRR Joint Public Lecture “Decoding the Universe”

Also on November 12, 2011, IPMU-ICRR (Institute for Cosmic Ray Research) joint public lecture entitled “Decoding the Universe” was held at the Koshiba Hall on the Hongo Campus of the University of Tokyo, with an audience of about 150 people. IPMU Associate Professor Tadashi Takayanagi gave a lecture entitled “The Mystery of the Black Hole Investigated by Means of Superstring Theory.”



Tadashi Takayanagi giving a lecture.

### A Program to Encourage Female Students to Study Science “Look into the Universe!”

On November 23, 2011, a Program to Encourage Female Students to Study Science “Look into the Future!” was held at IPMU, jointly hosted by IPMU

and ICRR, and about 30 high school and junior high school female students participated. This is an attempt to encourage female students in studying science as their future path by inspiring their interests in the fields of science. The students listened to a lecture given by IPMU Postdoctoral Fellow Takahiro Nishimichi, “Challenging the Mystery of the Accelerating Universe,” experienced either theoretical calculation or experimental measurement of the zenith-angle distribution of cosmic rays, and had a pleasant talk with female IPMU Postdoctoral Fellow Alexie Leauthaud and other researchers.



Alexie Leauthaud and female students talking at lunchtime

### IPMU Joined the WPI Presentation at “Science & Technology Festa in Kyoto 2011”

On December 17 and 18, 2011, the “Science and Technology Festa in Kyoto 2011” was held at the Kyoto International Conference Center. It was well attended with a total of more than 5,000 participants. All six WPI centers jointly exhibited their research activities. IPMU ran an entire single booth. A visual demonstration, called “Digital Space Theater,” and video presentations related to the IPMU research activities were very popular. IPMU also distributed for free 1,000 specially designed paper bags on which mathematical equations were printed against a dark background. They were very popular and sold out. Both days, IPMU Director Hitoshi Murayama volunteered his services as a booth staff member.





IPMU Director Murayama spoke with Mr. Masaharu Nakagawa, Minister of Education, Culture, Sports, Science and Technology at the IPMU booth



IPMU Director Murayama spoke with Mr. Motohisa Furukawa, Minister of State for Science and Technology Policy at the IPMU booth

### IPMU Seminars

1. "Did galaxies reionize the Universe: progress and challenges"  
Speaker: Richard Ellis (Caltech)  
Date: Oct 03, 2011
2. "Gregory-Laflamme as the confinement/deconfinement transition in holographic QCD"  
Speaker: Takeshi Morita (University of Crete)  
Date: Oct 04, 2011
3. "Cosmic Dawn: The Quest for the First Stars and Galaxies"  
Speaker: Richard Ellis (Caltech)  
Date: Oct 05, 2011
4. "Jet substructure and new physics searches at the LHC"  
Speaker: Biplob Bhattacharjee (IPMU)  
Date: Oct 06, 2011
5. "Observational probes of dark energy: the role of HSC and PFS"  
Speaker: Richard Ellis (Caltech)  
Date: Oct 06, 2011
6. "Gamma-ray probes of dark matter annihilation"  
Speaker: Shin'ichiro Ando (Amsterdam)  
Date: Oct 11, 2011
7. "Millimeter Survey of Distant Dusty Starburst Galaxies"  
Speaker: Bunyo Hatsukade (Kyoto)  
Date: Oct 13, 2011
8. "Constraining the Complete Star Formation History of Observable Galaxies from  $z=0$  to  $z=8$ "  
Speaker: Peter Behroozi (Stanford)  
Date: Oct 13, 2011
9. "On the Taxonomy of Holographic Fermi/Non-Fermi Liquids"  
Speaker: Norihiro Iizuka (CERN)  
Date: Oct 14, 2011
10. "Linking Star Formation Histories with Galaxy Assembly"  
Speaker: Amanda E. Bauer (Australian Astronomical Observatory)  
Date: Oct 20, 2011
11. "Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam"  
Speaker: Masahiro Komatsu (OPERA Collaboration (Nagoya))  
Date: Oct 20, 2011
12. "Lagrangian Floer theory on compact toric manifolds (Part 1)"  
Speaker: Kaoru Ono (Hokkaido)  
Date: Oct 24, 2011
13. "Lagrangian Floer theory on compact toric manifolds (Part 2)"  
Speaker: Kaoru Ono (Hokkaido)  
Date: Oct 24, 2011
14. "Electromagnetic duality from integrable spin chain"  
Speaker: Peng Zhao (DAMTP, Cambridge)  
Date: Oct 25, 2011
15. "A Matter Bounce By Means of Ghost Condensation"  
Speaker: Chunshan Lin (IPMU)  
Date: Oct 27, 2011
16. "On a classification of irreducible modulo  $p$  representations of a split  $p$ -adic group"  
Speaker: Noriyuki Abe (Hokkaido)  
Date: Oct 27, 2011
17. "The Origin of the Elements in the Universe"  
Speaker: Johannes Andersen and Birgitta Nordstrom (The Niels Bohr Institute, Copenhagen)  
Date: Oct 28, 2011
18. "Supermassive Black Holes and Galaxies"  
Speaker: Scott Tremaine (Institute for Advanced Study, Princeton)  
Date: Nov 02, 2011
19. "Seminar on Supermassive Black Holes"  
Speaker: Scott Tremaine (Institute for Advanced Study, Princeton)  
Date: Nov 04, 2011
20. "Towards the Next Generation of the CFHT: a dedicated, 10m, wide-field, highly-multiplexed spectroscopic facility for Mauna Kea"  
Speaker: Alan McConnachie (NRC Herzberg Institute)  
Date: Nov 07, 2011
21. "Two lectures on the extrasolar planet: observational and theoretical (1)"  
Speaker: Scott Tremaine (Institute for Advanced Study, Princeton)  
Date: Nov 07, 2011
22. "Two lectures on the extrasolar planet: observational and theoretical (2)"  
Speaker: Scott Tremaine (Institute for Advanced Study, Princeton)  
Date: Nov 07, 2011
23. "On Donaldson-Thomas theory for quivers with potentials (Part I)"  
Speaker: Aleksandr Ivanovich Efimov (Steklov Mathematical Institute)  
Date: Nov 07, 2011
24. "On Donaldson-Thomas theory for quivers with potentials (Part II)"  
Speaker: Aleksandr Ivanovich Efimov (Steklov Mathematical Institute)  
Date: Nov 07, 2011

### Personnel Changes

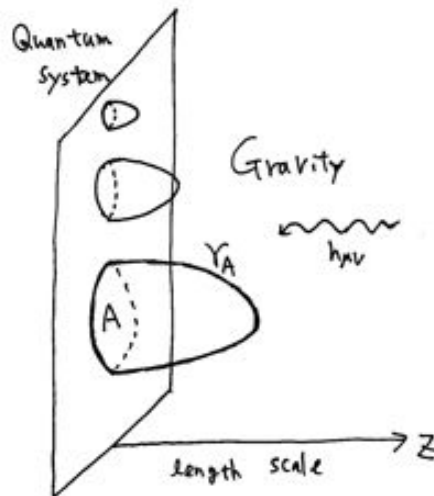
IPMU Postdoctoral Fellow Masaomi Tanaka moved to The National Astronomical Observatory of Japan as an Assistant Professor. He was at IPMU from October 1, 2009 to November 30, 2011, first as a JSPS Postdoctoral Fellow until March 31, 2010.

IPMU Postdoctoral Fellow Kenneth Shackleton resigned IPMU at the expiration of his term, October 16, 2008 – October 15, 2011.

# Holographic Principle

Tadashi Takayanagi IPMU Associate professor

The entropy of a black hole, which was discovered by Bekestein and Hawking, is proportional to its area instead of its volume. In this way, the effective degrees of freedom in gravity theories, such as the general relativity and superstring theory, look like those live in one dimesion less. This is called *holographic principle*. Thanks to this idea, we can compute physical quantities in complicated quantum many-body systems using differential geometry. For example, we can calculate the entanglement entropy, which measures the degrees of freedom in a given region of a quantum many-body system, as the area of minimal area surfaces.



$$S_A = \min_{\gamma_A} \left[ \frac{\text{Area}(\gamma_A)}{4 G_N} \right]$$

$\partial \gamma_A = \partial A$   
 $\gamma_A \cap A = A$

## S 評価を得て

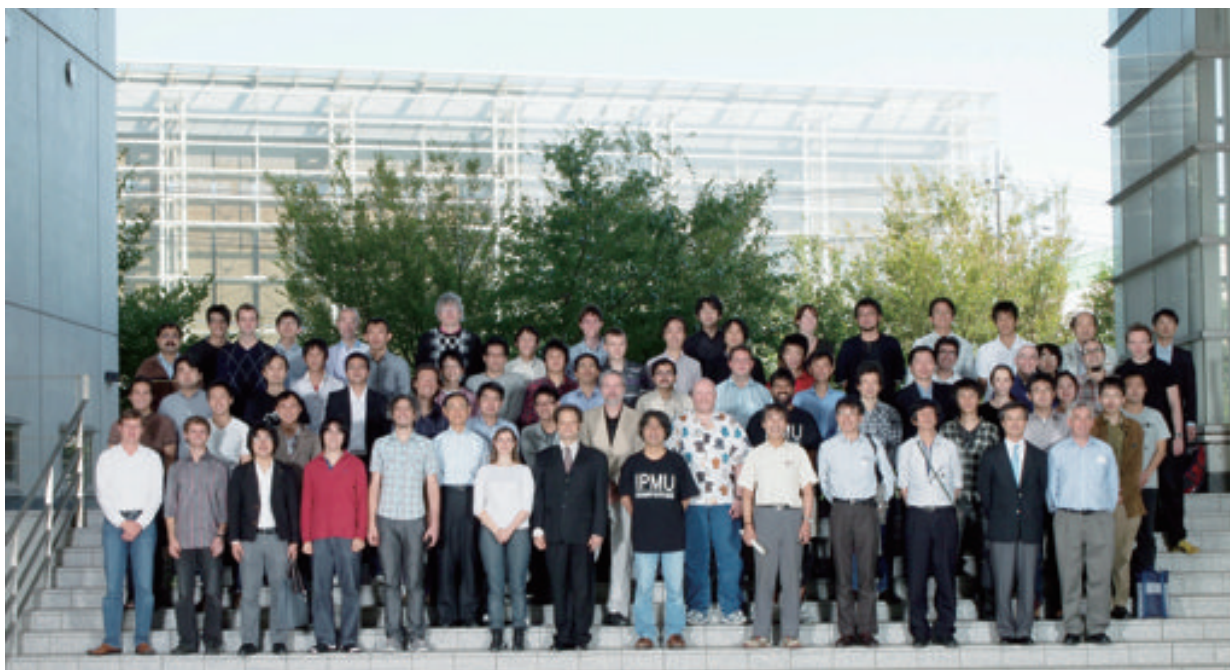
IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし

IPMU を含め世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) の資金で運営されている日本国内の6つの研究拠点のうち5拠点が発足4年を機に文部科学省から中間評価の審査を受けました。その結果が2011年12月14日に文部科学省から発表され、IPMU は最高点であるS評価を受けました。文部科学省によると、S評価の意味は『当初目的を超える拠点形成の進展があり、「世界トップレベル研究拠点」としてさらなる発展が期待される』ということだそうです。とてもいいですね!

夏から秋に掛けての厳格な中間評価を経て、S 評価を得られたことは、大変嬉しいです。長い伝統を持つ

世界の強豪研究所に迫り、高いビジビリティーを得るのは大変難しいことです。特に外国人の研究者が安心して来られる、そして来たいと思う魅力的な研究所を作ることを心がけて来たのが、評価されたのだと思います。4年間にここまで来られたことは、東京大学の厚いサポート、優秀な事務スタッフ、加えて一般の方の応援があったからこそです。更に、発足当時から徐々に立ち上げて来た大きなプロジェクトは、これからデータが出て、結果を出していくフェーズに入っていきます。これからが一番の勝負所だと思っています。



## カムランド禅

### ディラックかマヨラナか?

ニュートリノは宇宙全体で平均すると1 cm<sup>3</sup>あたり300個強存在し、我々が知っている物質を構成する素粒子の中で最も、しかも桁違いに、多く存在します。ニュートリノをあまり身近に感じないのはこの素粒子がなかなか反応しないからですが、そのためその性質の解明にも時間がかかっていました。ニュートリノのルーツは、 $\beta$ 崩壊のエネルギー保存などに関する問題を解決するためにパウリが1930年に理論的に導入したもので、実験より理論が先行した最初の素粒子とされています。1937年には既に今回の主題であるニュートリノのマヨラナ仮説が提唱されていますが、この仮説は未だに検証されていません。その後ニュートリノが実験的に観測できるようになった後も、太陽ニュートリノ問題や大気ニュートリノ異常といったものが長らく研究者を悩ませていました。これらの問題は1998年以降ほんの数年で解決しましたが、これはニュートリノ振動の実験的観測によるものです。飛行中にニュートリノの種類が繰り返し変化するニュートリノ振動の研究は、ニュートリノの混合や質量の2乗差といった性質の理解を大きく進めました。カムランド実験も原子炉反ニュートリノ振動の測定により $\Delta m_{21}^2$ という質量の2乗差を2.6%という高精度で測定し、ニュートリノ振動研究に大きく貢献しています。ニュートリノ振動現象はニュートリノが質量を持つということの決定的な証拠であり、ニュートリノ質量を0と仮定している素粒子の標準理論を越えた枠

組みを必要とします。同時に宇宙論や $\beta$ 崩壊の研究から来る質量の上限は、他のクォークやレプトンと比べてニュートリノが桁違いに軽いことを示していて、ニュートリノが質量を持ち、しかも特別軽いという二重の問題を突きつけています。一方で、これまでニュートリノについては進行方向に対して左向きに回転（左巻き）するものしか発見されておらず、反ニュートリノでは進行方向に対して右回転（右巻き）するものしか発見されていません。しかし、ニュートリノに質量があることが判明したため、相対論に従えばニュートリノは必ず光速より遅く飛行します。ですから、ニュートリノより速く進む座標系ではニュートリノの回転方向が逆転してしまいます。したがってニュートリノの有限質量の存在から、これまで見つかっていない右巻きのニュートリノや左巻きの反ニュートリノという状態を考えざるを得ません。電荷をもつ素粒子は粒子と反粒子では電荷が反転するために明らかに区別がつきますが、電氣的に中性のニュートリノはニュートリノ・反ニュートリノの関係に対して2つの選択肢が考えられます。ディラック粒子なのかあるいはマヨラナ粒子なのかです。ニュートリノが電荷を持った素粒子同様にディラック粒子であるのなら、右巻きのニュートリノは左巻きのニュートリノと同質量であり、相互作用が一段と弱いために未だ発見されていないということになります。粒子・反粒子も同質量ですから、回転方向でも区別するなら粒子・反粒子それぞれの右巻き左巻きの合計4種が全て同質量になります。一方、マヨラナ粒子であるならば、ニュートリノと反ニュート



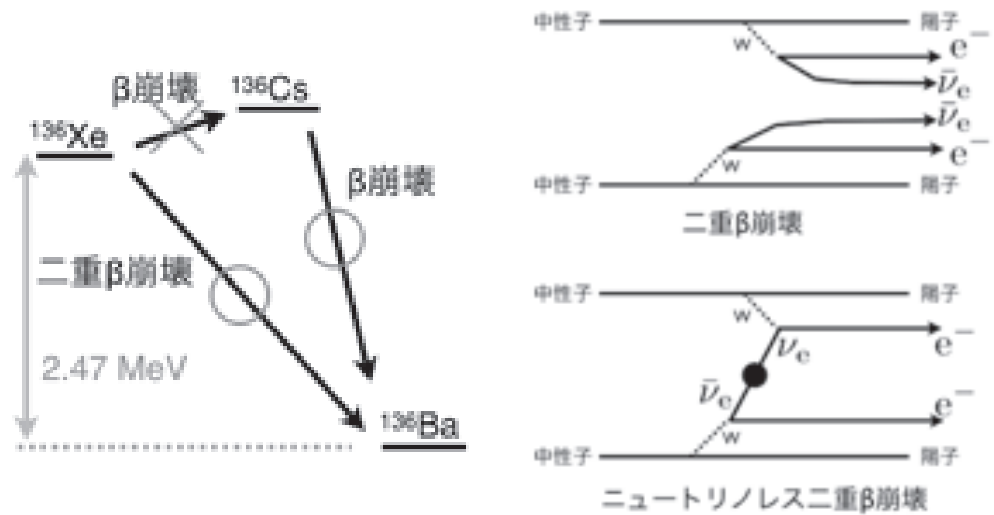


図1 二重β崩壊核のエネルギー準位(左)と二重β崩壊のファインマンダイアグラム(右)。

リノに区別はなく、すなわち右巻きのニュートリノは実は右巻きの反ニュートリノということになります。マヨラナニュートリノを選んだ場合は自由度として右巻きのニュートリノを別個に定義することができ、例えば大統一スケールに近い非常に重い質量を与えることも可能です。このような大質量のニュートリノの導入は、シーソー模型を通して軽いニュートリノ質量を説明することができます。同時に、ニュートリノのマヨラナ性はビッグバン以降の宇宙に物質を生き残らせるために必要なバリオン数Bとレプトン数Lの差(B-L)の破れを明らかに含んでおり、シーソー模型で導入した重いニュートリノの崩壊を通して宇宙にバリオン数を生成するレプトジェネシス理論が有力な理論のひとつとして議論されています。

### ニュートリノを伴わない二重β崩壊

ニュートリノのマヨラナ性というものが、宇宙、素粒子の大問題である「軽いニュートリノ質量」および「宇宙物質優勢」という2つの謎に対して知見を与える非常に重要な性質であるにもかかわらず、これまでマヨラナ性に対する確実な証拠は得られていません。

マヨラナ性を調べるためには、例えば電子ニュートリノを打ち込んで、反電子ニュートリノが起こす反応が発生するかを調べれば良いのですが、これは現実的には不可能な話です。なぜなら、もともとニュートリノ反応は断面積(物質中を単位距離進むときの反応確率)が小さいのですが、効率的に反応を引き起こすにはエネルギーEをある程度大きくしなければならないのにニュートリノ質量mは小さく、一方調べなければならない逆回転の成分の割合は断面積のたった $1/2(m/E)^2$ にすぎないからです。しかし、うまい手法があって、β崩壊は起こさないが2つ同時のβ崩壊なら許される特別なエネルギー準位の関係にある原子核(二重β崩壊核)を用意すれば、原子核内という非常に小さい空間に2つの反ニュートリノを同時に生み出すことができます(図1参照)。マヨラナ性があるなら、この2つの反ニュートリノが対消滅することも可能です。対消滅をする確率は、ニュートリノの有効質量の2乗に比例することから、「ニュートリノが出ない二重β崩壊」(ニュートリノレス二重β崩壊とも言い、記号的に $0\nu 2\beta$ と書きます)を発見すればニュートリノのマヨラナ性を証明でき、その頻度からニュートリノの絶対質量を知ることができます。今のところはこ

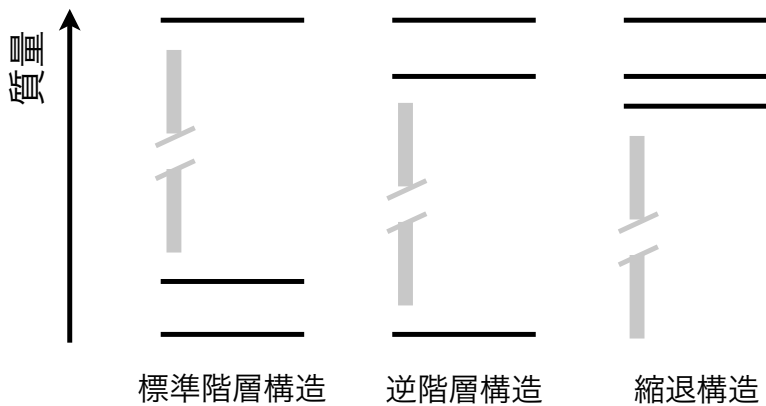


図2 ニュートリノ質量の階層構造。ニュートリノには電子ニュートリノ ( $\nu_e$ )、ミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ )、タウニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) の3種類がありますが、これらはニュートリノ振動の実験から、質量  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  をもつ質量の固有状態、 $\nu_1$ 、 $\nu_2$ 、 $\nu_3$  の組み合わせ (一次結合) となっていることがわかっています。  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  の絶対値はまだわかりませんが、ニュートリノ振動の実験から  $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$  と  $\Delta m_{32}^2 = |m_3^2 - m_2^2|$  が測定されており、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  の相対的な関係が標準階層構造 ( $m_1 < m_2 < m_3$ )、逆階層構造 ( $m_3 < m_1 < m_2$ )、縮退構造 ( $m_1 \approx m_2 \approx m_3$ ) のいずれかであることがわかっています。ニュートリノ質量の階層構造の決定は今後のニュートリノ物理学の重要な課題の一つです。

れがマヨラナ性を探る唯一現実的な手法です。ちなみに、マヨラナ質量でなくても標準理論を越える物理で  $0\nu 2\beta$  を引き起こすことは可能ですが、幸いにもそのようなファインマンダイアグラムに外線を幾つか加えてやるとマヨラナ質量を作るダイアグラムに書き換えることができ、すなわち  $0\nu 2\beta$  の発見はマヨラナ性の証明となることがわかっています。

その物理的重要性に動機づけられた精力的な探索にもかかわらず  $0\nu 2\beta$  の確実な証拠はこれまで得られておらず、唯一<sup>76</sup>Geを使った測定で320 meV (ミリ電子ボルト) 程度の質量で  $6\sigma$  以上の信号\*を得たと指摘するもの (ここではKKDCクレイムとよぶことにします) があります。しかしKKDCクレイムは、疑わしいバックグラウンドの候補があることやその信号の振る舞いに疑念が残されており、検証が待たれています。一方、これまでほどの程度の有効質量を目標に実験装置を設計すればよいかという明確な指針がありませんでしたが、ニュートリノ振動の研究から、ニュートリノの質量階層構造として、図2に示すように3種類

\* ある量を測定する場合、測定に伴う標準偏差が分散  $\sigma$  の正規分布に従って統計的に分布するものと仮定する。 $6\sigma$  以上の信号とは、 $a \pm \sigma$  のように測定値  $a$  とその誤差として標準偏差  $\sigma$  が報告され、 $a$  が0から $6\sigma$ 以上離れていること ( $a$  が正なら  $a > 6\sigma$ ) を意味する。

が同程度に重い縮退構造 (マヨラナ有効質量60 meV以上)、2つが相対的に重い逆階層構造 (20 meV~60 meV)、1つが重い標準階層構造 (20 meV以下) の3種類が考えられるようになり、明確な目標設定が可能となりました。有効質量が軽いほど発見が困難になります。現在の主要なプロジェクトはKKDCクレイムにとどまらず、まずは縮退構造であれば確実に発見し、なおかつ逆階層構造に感度を持つ拡張性を設計の基本としています。軽い有効質量にまで感度を持つためには二重  $\beta$  崩壊核も大量に必要となります。原子核の種類によりますが、これまでの実験では10 kg程度の二重  $\beta$  崩壊核が使われていたところ、今後は $10^{26-28}$ 年の寿命を探索することが必要で、質量を100 kg~1000 kg以上に増やさなければなりません。

### カムランド禅

大量の物質を使って希な現象を探るとするのは陽子崩壊探索やニュートリノ検出と似通った手法ですが、二重  $\beta$  崩壊の Q 値 (この場合は崩壊により放出される全エネルギーを意味する) が4.3 MeV 以下であることも考えると、さらに極低放射能環境という特性

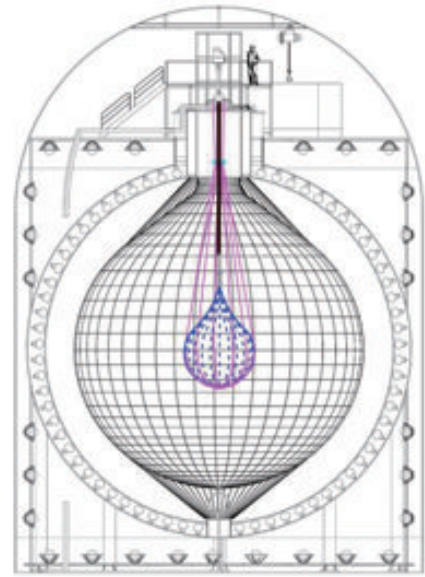


図3 KamLAND-Zen検出器の概略図。

が必要となります。反ニュートリノ観測で成果をあげてきたカムランドは、1000トンの液体シンチレータを有した極低放射能環境を実現しており、 $0\nu 2\beta$  探索にうってつけの環境と考えられます。その特性を活かすためには、不要な構造物を導入しないで済むようにする必要がありますが、二重 $\beta$ 崩壊核の中でもキセノン136 ( $^{136}\text{Xe}$ ) は液体シンチレータに可溶 (3wt%、つまり液体シンチレータ100 g 当たり3 g の $^{136}\text{Xe}$  が溶解する) であり、遠心分離による濃縮や純化の手法が確立しているという特徴があります。キセノン136のQ値は2.476 MeVですが、Q値の高い放射性物質を使った研究でしばしば問題になる $^{214}\text{Bi}$  や $^{212}\text{Bi}$  は $^{214}\text{Po}$  との遅延同時計測で除去できること、カムランドを巨大なアクティブシールド (信号検出の邪魔になるバックグラウンドを積極的に検出して除去するシステム) と考えるならば、 $^{208}\text{Tl}$  は2.615 MeVと0.583 MeVの $\gamma$ 線に加え $\beta$ 線も放出されエネルギーが問題にならないくらい高くなることから、非常に素性が良いことが予想されます。次に考察すべきバックグラウンドは宇宙線の原子核破砕反応による $^{10}\text{C}$ や太陽ニュートリノ事象、通常の二重 $\beta$ 崩壊 ( $2\nu 2\beta$ ) ということになります。前の2つは体積に比例するものなので、S/N比

(信号/雑音比) を高めるためには、同位体濃縮したキセノン136をできるだけ高濃度で溶かすことが有効です。一方、 $2\nu 2\beta$ はエネルギー分解能を高めるほかありませんが、カムランドをアクティブシールドとして活用するためにはキセノンの導入部分だけ発光量を増加させてしまうと、外部にも漏れだすバックグラウンド事象のエネルギーがわかり難くなってしまいます。

このような考察のもと、ミニバルーン内に、自然存在比 8.9%のキセノン136を90%以上に同位体濃縮し、液体シンチレータに可能なだけ溶かして導入するという手法を選びました (図3参照)。発光量はキセノンを溶かした状態でカムランドの液体シンチレータと揃えます。ミニバルーンに負荷をかけないように密度も揃える必要が有ります。ミニバルーンが放射性物質を含んでいては元も子もないので、純度の高いものを薄くして物質量を減らすとともに、Bi-Poの同時計測がある程度成立するように、 $\alpha$ 線が出てこられるほど薄いものが望ましいのです。当然、薄いバルーンは製造も導入も全て難しくなります。また、 $^{10}\text{C}$ 対策は新たな電子回路を開発・導入することでも行っています。宇宙線ミュオンにより $^{12}\text{C}$ から $^{10}\text{C}$ が生成するときに90%以上の高い確率で中性子が生成されるので、

Feature



図4 カムランド禅のロゴ。

これをミューオン・中性子・ $^{10}\text{C}$ の3重同時計測で識別するため、1GHzのフラッシュADCを用いた不感時間をもたないデッドタイムフリー電子回路が稼働しています。

プロジェクトは、いち早く縮退構造を探索し、最終的に逆階層構造を探索できるように2段階で進められます。縮退構造を探索する感度を2年程度で達成するには400 kgくらいのキセノンが必要となりますが、光量はカムランド程度で良いことがシミュレーションで判明していました。設計時点では $2\nu2\beta$ の半減期は $10^{22}$ 年以上と非常に長く、その分エネルギー分解能に対する要求も緩いものでした。つい最近、アメリカで行われているEXO実験がキセノン $^{136}\text{Xe}$ の $2\nu2\beta$ を検出し、半減期としてこれまでの実験的制限より5倍も早い $2.11 \times 10^{21}$ 年と報告した時はびっくりしましたが、比較的影響は小さく、縮退構造を探索するのに3～4年かかるという程度で済みました。2年なら80 meV程度の感度になると見積もっていますが、エネルギー分解能向上に対する要求が高まったことは間違いありません。

このプロジェクトはKamLAND-Zenと命名しました。Zero neutrino double beta decay searchを意味

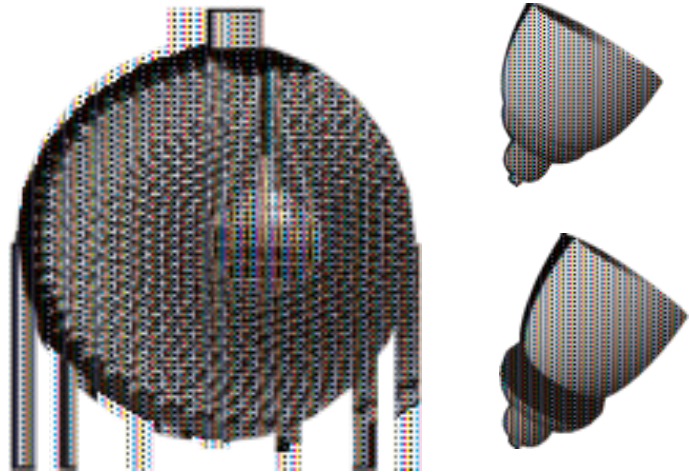
していますが、カムランドのその後という意味の“then”とも響きがちかく、キセノンの英語読みXenon（ゼノン）とも響きが近いのでこの名前を選びました。バックグラウンドのない無の境地で宇宙の真理を探るといえるのはいかにも「禅」らしいということで、日本語では「カムランド禅」と名乗ることにしました。ロゴには漢字の禅の文字を入れてあります(図4)。観測はキセノン量約330kgで2011年9月に始まりましたので、近いうちに論文を発表できると期待しています。

### 将来計画

さらなる感度向上に向けて光量を増加させるには、先に述べた理由でカムランドの液体シンチレータの光量も増やす必要が有ります。これは大規模な作業になるので、ついでに光電子増倍管に集光のためのウィンストンコーンも取り付けることを計画しています(図5参照)。液体シンチレータを標準的な光量のものにするのとあわせて2.5倍の光量増加が見込まれ、 $2\nu2\beta$ の影響を10分の1以下にできます。同時に上部導入口を拡大することで、各種の機器を導入できるようにするつもりです。 $0\nu2\beta$ が発見されたなら、高統計の



図5 KamLAND2-Zen (左)とウィンストンコーン型反射板を取り付けた光電子増倍管 (右)の概略図。



測定だけでなく各種の原子核でも測定することが重要です。崩壊の寿命を決める原子核行列要素の不定性の低減にとどまらず、背景となる物理を探る上でも有効と考えられています。また、NaI（ヨウ化ナトリウム結晶シンチレーター）を沈めて暗黒物質探索のようなことも可能になると期待しています。この計画はKamLAND2-Zenと呼んでいます。KamLAND2-Zenでは、1000 kgの同位体濃縮キセノンを用いて約1.8気圧の圧力（深さが10mある）で溶かすことで、濃度を高めて体積に比例するバックグラウンドを低減することを考えていて、逆階層構造を探索する20 meV程度の感度が見込まれます。

並行してさらに挑戦的な開発も行っていて、ミニバルーンのフィルムがシンチレーション光を発するようにし、Bi-Poの識別効率を大幅に上げる開発や、イメージング技術を用いたマルチバーテックス（多反応点）の識別による $^{10}\text{C}$ や $\gamma$ 線由来のバックグラウンドの大幅な低減を図る開発も行っています。これらを組み合わせれば標準階層構造に切り込むことも夢ではありません。これらの改良案のうち、高压で溶かすことでキセノンの濃度を高める工夫はコスト対効果が高いため、KamLAND2-Zenに移行する前の中間段階

として800 kgのキセノンを溶かしたフェーズを考えていて、現在手持ちの450 kgからさらに調達を進めています。このフェーズでは、逆階層構造の半ば程度30~40 meVの感度を達成できると見積もっています。

## おわりに

大きく発展したニュートリノ研究は非常に特殊な観測空間を生み出しました。地下深くの巨大な空間できわめて純度の高い物質を用いることで構築された極低放射能環境は、希な現象の探索で新たな領域を開拓しています。これまで10 kg程度にとどまっていた二重 $\beta$ 崩壊研究の物質量が既に300 kgを越えるまでになりました。既存の装置を有効活用することで高いコストパフォーマンスと拡張性を有しており、短い準備期間での立ち上げが可能です。より詳細な物理現象の研究には多種の原子核での測定や角分布の測定などが必要ですが、高度な装置ほど高額になることは避けられずしかも往々にして単機能になってしまいます。汎用性・拡張性の高い装置で先鞭をつけ、目標を定めた後により高度な装置で詳細な研究を行うといったスタイルが継続的な研究発展には必要ではないでしょうか。

## 小林 俊行 こばやし・としゆき 専門分野: 数学

IPMU 主任研究員



数学における様々な対称性の解析に興味をもっています。無限次元表現および不連続群の理論の中で、現在は特に以下のテーマを中心に研究を進めています。

①【極小表現の解析的理論】極小表現は最も“根源的”な対称性を表す既約表現と考えられています。

極小表現（代数）＝最大の対称性（関数空間）という哲学を軸に、非可換対称性に統制された新しい大域解析学の理論の開発に取り組んでいます。

②【局所均質空間のスペクトル解析】ローレンツ空間のように不定値計量をもつ空間の内在的な微分作用素（ラプラシアン等）は楕円型とは限りません。このような作用素のスペクトル理論の第一歩として、幾何構造の変形に関して“安定なスペクトラム”の存在問題に取り組んでいます。

これまでの主な研究成果は

③【局所均質空間の大域的研究】リーマン幾何学の古

典型的な枠組みを超えた不連続群（局所から大域を統制する代数構造）の基礎理論の創始と構築（不連続性の判定条件、Calabi-Markus 現0象の一般的解明、閉じた空間形の存在問題、剛性定理、変形理論など）、  
④【対称性の破れの数学】リー群のユニタリ表現の分岐則（fusion rule の一般化）における連続スペクトラムの存在条件を解明、離散的な分岐則の理論を創始、  
⑤【無重複表現】同じ対称性は二度と現れないという際立った性質をもつ表現を産み出す新しい“からくり”を発見し、複素多様体への可視的作用の理論を提起などです。

## ジヨティルモイ・ボッタチャージョー

Jyotirmoy Bhattacharya 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私は量子場の理論、超共形場理論、弦理論に広く興味を持っています。これまで、主として弦理論の研究から得られた顕著な理論的洞察の一つである AdS/CFT 対応 (AdS-反ドジッター時空-における弦理論と共形場理論の間の対応) の理解と応用に焦点を合わせた研究を行ってきました。流体力学や凝縮系や重力



の新奇な現象の研究にこの対応を利用しようと努めています。

## ヴァレンティン・トニタ

Valentin Tonita 専門分野: 数学

博士研究員

私はグロモフ・ウィッテン理論、中でも特にその K 理論版に興味を持っています。グロモフ・ウィッテン理論の K 理論版とは、複素射影多様体  $X$  に対し、 $X$  への安定曲線写像のモジュライ空間上のある (オービ) バンドルの正則オイラー標数という不変量に対応させるものです。この分野の興味深い問題としては、これらの不変量の計算 (コホモロジー的なグロモフ・ウ



ィッテン理論よりも難しいことが分かります)、理論に現れる構造 (例えば、量子 K 理論的な積) の研究、ミラー対称性との関係、等々があります。

## マーカス・ワーナー

Marcus Werner 専門分野: 天体物理学、数学

博士研究員

今日の宇宙論で最も興味をそそる問題の一つは宇宙の暗黒面を理解することであり、その主要な研究手段に重力レンズがあります。私は理論天体物理学者ですが、重力レンズの数学的理論、一般相対論およびその修正重力理論に興味を持っています。最近では、レフシェッツ不動点理論により重力レンズのフラックス比異常の原因となっているある種の重力レンズ拡大率不変量の起源を研究し、またカー・ブラックホール時空



の幾何光学のランダース・フィンスラー構造について調べました。私はデューク大学の数学教室から来ましたので、IPMU でさらに数学と天文学の研究者たちを結びつける新たな研究を行いたいと思っています。

Our Team

## Talking IPMU: IPMUでの3年間

**大栗 博司** おおぐり・ひろし  
IPMU主任研究員

**スザンネ・レフフェアト<sup>1</sup>** Susanne Reffert  
IPMU博士研究員



**大栗** IPMUで博士研究員としての3年間の任期を成功裏に終えられ、おめでとうございます。とても多くの研究成果を挙げ、研究分野も随分広がりましたね。CERNに移られるわけですが、LHC実験の時代である今、素粒子論の研究者にとって、CERNは最高の研究環境の一つと言えるでしょう。その意味でもおめでとうございます。今週は事実上IPMUで過ごす最後の週なので、引越しの準備で大忙しだと思います。忙しい最中にこの対談を引き受けていただき、ありがとうございます。

### IPMUに行くことを決めた経緯

**大栗** この対談ではIPMUでの3年間の振り返り、あなたの様々な経験についてお聞きしたいと思います。着任のときか

ら話を始める前に、まずそもそもIPMUに来ることに決めた経緯についてお尋ねします。IPMUが正式に発足したのは2007年の10月1日でした。採択されて予算がつくことを知らされた時から発足まで1ヵ月足らずで、大急ぎで発足させなければなりません。そんな状態での発足後1月もしないうちにあなたからメールを受け取ったことを覚えています。研究者の募集を聞いて、自分と夫のドメニコ・オルランドの2人を一緒に採用してくれないかという問い合わせでした。当時、あなたは最初に博士研究員になったアムステルダム大学でまだ任期半ばでした。どこから募集のことを聞き、また、私に連絡しようと思ったのはどうしてですか？

**レフフェアト** 実はあなたから聞いたのですよ。IPMUで募集があるという知らせ

を同じ分野の研究者宛に送ったでしょう。私はそれを受け取ったのです。博士研究員を20人募集ということだったので、それなら私と夫の2人くらい何とかできるのでは、と思いました。超弦理論分野では大抵の研究所は1年に1人募集するかどうかですから、2人一緒に職を得るのはとても大変です。

**大栗** IPMUの発足時、多くの優秀な若手研究者を、それも特に外国から、惹きつける必要がありました。それで世界中の研究者に向けて大量に募集の知らせのメールを送ったのです。あなたの研究指導者だったロバート・ダイクラーフさん<sup>2</sup>も私のメールを受け取ったに違いないと思います。

<sup>1</sup> 現在の所属はCERN。

<sup>2</sup> アムステルダム大学の特別荣誉教授でオランダ王立芸術・科学アカデミー会長。



**レフフェアト** そのメールが誰から転送されたか覚えていませんが、とにかく私のメールボックスに届きました。

**大栗** 我々のもくろみがうまくいったわけで、結構なことでした。多様な人々が活躍できる環境にすることは大切なことです。研究者のカップルにとっては2体問題<sup>3</sup>が深刻な問題の一つであり、往々にして特に女性研究者の経歴の障害となっていることは理解しています。あなたとドメニコは是非来て欲しい研究者だったので、二人ともIPMUに勧誘することができたのは実に喜ばしいことでした。でも、やはり知りたいのですが、アムステルダムの快適な研究グループを離れ、それまで慣れ親しんでいた世界とは違うであろう所に移ることにためらいはなかったのですか？

**レフフェアト** いいえ、全然。勿論、どう発展するか分からない新設の研究所に行くことにはリスクがあります。しかし、あなたのような優れた研究者が支えている研究所ですから、あえてリスクを冒しても良いように思われました。勿論、日本はとても遠いし、親たちは私たちが近くに住む方を望みますが、でも全く違うところへ行くのはとても面白い経験だし、冒険だと思うので、私たちはわくわくしていました。

**大栗** それはとても嬉しいですね。

### IPMUに着任して

**大栗** あなた達はちょうど3年前の2008年9月に到着しました。日本に来るのにシベリア横断鉄道を利用したと聞きましたが、本当ですか？それ自体が冒険だったに違いないと思います。

**レフフェアト** はい、はるばる東京まで行くチャンスなので徹底的にやってみたいと思いました。飛行機に乗っていたら途中の何も分からないでしょう。どこかで搭乗して、別のどこかで降りるだけ。列車で行けば、本当に遠くに旅したと感ずることが出来ます。

**大栗** 面白い旅だったに違いないと思います。東京に着いてから、落ち着くまでに何か問題はありましたか？例えばアパ

ートを探したり、そこを住めるようにするとか。

**レフフェアト** いいえ、IPMUの事務部門のスタッフがとても良く面倒を見てくれたので、実際は非常に簡単でした。全て準備してくれて、アパート探しも手伝ってくれ、とてもスムーズに行きました。

**大栗** なるほど。入国審査や、外国人登録、銀行口座の開設などの事務手続きはいかがでしたか？

**レフフェアト** そういったこと全てスムーズにできました。あらゆる必要書類が前もって準備され、私たちはサインするだけでした。市役所や銀行に行く必要があるときは通訳が同行してくれました。ですからとても楽でした。ヨーロッパではもっと大変な国もあります。自分でやれると知っているのも、誰も助けてくれないからです。

### IPMUでの日常

**大栗** IPMUでは日本語教室も開いています。あなたも習いましたよね。

**レフフェアト** その通りです。以前ほどではないけれど、今でも出席しています。最初は週に6時間でしたが、今は週に1時間半に減らしています。言葉を習えば今住んでいる国をもっと直接的に経験できるので、語学学習にはいつでも興味を持っています。

**大栗** そうでなければ知ることのなかったような日本の色々な面を知ることができるのですね。

**レフフェアト** とても役に立ちます。IPMUに居るだけで良いなら日本語を話す必要はありません。皆英語を話しますから。でも日本の本当の生活を経験したければ、言葉がすこしは話せたほうが便利です。

**大栗** 言葉を知ることで、新しい世界が開けるわけですね。

**レフフェアト** そう思います。

**大栗** 日本での生活の話が出たので、東京住まいの印象を聞かせてくれませんか。浅草<sup>4</sup>にアパートを借りて、そこから毎日通ったのですよね？

**レフフェアト** その通りです。

**大栗** 東京の外国人コミュニティと繋

がりを持っていましたか？

**レフフェアト** それほどではありません。私たちの友人は大抵はIPMUにいて、研究分野の違う人たちでもやはりほとんどはIPMUの人たちですから。でも、空手の練習に参加するといったような、趣味を通じて知り合った外国人もいます。

**大栗** 空手を習ったのですか？

**レフフェアト** ええ、この柏キャンパスで。

**大栗** おや、キャンパスで空手の講習会もしてくれるのですか？

**レフフェアト** そうなのです。<sup>5</sup>二人でヨガのクラスにも出ましたが、参加者はほとんど外国人でした。こうして他の外国人とも何人か知り合いになりました。

**大栗** なるほど。IPMUの研究者とだけつきあっていただけではなくて、柏キャンパス内の他の研究所の人たちと知り合う機会をキャンパスで用意してくれていたわけですね。

**レフフェアト** 実は柏キャンパスではもう一つとても良いことがあって、東大の国際センター柏オフィスが日本の文化を経験する目的の非常に興味深い日帰り旅行を企画してくれます。例えば、歌舞伎見物や、遠足や、書道教室とか茶道のような催しもあって、無料で参加できます。私たちも利用しました。そういう機会にも柏キャンパスにいる大勢の外国人研究者と知り合えます。

**大栗** それは素晴らしい。日本文化を知ることができるのと、それを通じて楽しい人々と知り合いになれるという二つの点で役に立ちますね。

**レフフェアト** 全くその通りです。

**大栗** あなたが日本での生活記録をブログに書いている<sup>6</sup>のが人気を呼んでいますね。いろんな反応があるのでは？

**レフフェアト** はい、興味深いと思うのは、私がブログを書き始めたのはヨーロッパにいる友人達や家族と連絡を取り合うためでしたが、日本の人たちも大勢が読ん

<sup>3</sup> 研究者のカップルが一緒に暮らすため同じ研究機関で職を得るのが困難なこと。

<sup>4</sup> 東京の伝統的な下町の一つ。

<sup>5</sup> 東京大学柏門空手部 (<http://hakumonkarate.web.fc2.com/>)。

<sup>6</sup> <http://chipango.wordpress.com/>

でくれるようになったことです。そういう人たちからフィードバックを受けますが、最初私は驚かされたのですよ。何でもこの人達は外国人の考えに興味を持つのかって。だって、皆日本がどうなのかはよく知っているはずでしょう。私はヨーロッパの人たちに日本はどんなところか知ってもらおうと思ったのに、実は日本の人たちも自分の文化を違う視点で眺めることを面白がるのですね。

**大栗** なるほど。私もあなたのブログの愛読者なのです。それで知ったのですが、日本中を随分と旅行していますね。

**レフフェルト** そうなんです。

**大栗** 日本の4つの大きな島全部に足跡を残しましたね。

**レフフェルト** ほぼその通りですが、沖縄には行きませんでした。

**大栗** ええ。でも、北海道、本州、四国、それから九州という意味です。つい最近も鳥取砂丘を訪れたそうですし、日本を離れる前にもう一度京都に行くのですよね。

**レフフェルト** はい、日本は私たちの国とは相当違っても興味深い国なので、私たちは随分旅行を楽しみました。鉄道が発達しているので旅行には最適です。短い時間で随分遠くまで行けるし、旅行者向けの施設も立派、魅力的な観光地を訪れるのも簡単です。日本に来て観光旅行をしないとしたら、とても興味深い体験をする機会をみすみす逃してしまうこととなります。

**大栗** 全く、あなたのブログを読んで自分もそういうところに行きたいと思いました。私が行ったことのない楽しそうなところにも色々行っていますね。

**レフフェルト** それが普通ではないでしょうか。スイスでは私より観光客の方が観光地をよほど多く知っています。自分の国に住んでいるときはそれで当たり前と思うからではないでしょうか。もし今まで知らない国に行くなら何でも面白そうに見えます。

**大栗** 一般的にはそうですね。でもあなたの場合、ブログには日本を見てやろうという好奇心がありありとしています。読む気を起こさせるのはそれですね。

## IPMUでの研究

**大栗** さて、IPMUでの研究活動についての話に移りたいと思います。あなた達の手記のホジバ-リフシツツの重力理論についての論文<sup>7</sup>は相当広く引用されていますね。

**レフフェルト** 事情をお話すると、以前私たちが研究したテーマ、つまりは確率過程量子化なのですが、それがペトロ・ホジバさん<sup>8</sup>が示唆したこの新しい重力理論に対して非常に関係があることがわかったのです。そこで、私たちが持っている知識を彼の理論に対してうまく応用できて、それについてのいくつかの重要な問題、特に量子的振る舞いについて回答を与えられることに気がつきました。それでこの理論のくりこみ可能性が証明できたのです。以前に得た知識を新しいホットなテーマに応用できたことは非常に幸運でした。

**大栗** 可積分系に興味があってこの研究分野に惹かれたのだと理解していますか？

**レフフェルト** はい、そうです。

**大栗** 日本には物理と数学の両方で可積分模型について研究する人たちの大きくて活発なコミュニティーがあります。こういう人たちと交流がありますか？

**レフフェルト** はい、あります。この分野には神保先生や三輪先生のような大変立派な研究者がいて、お二人と知り合いになって議論できたのは幸運でした。

**大栗** あなたがここに着いた頃、神保さんはIPMUの主任研究員でした。

**レフフェルト** そうでした。神保先生とはIPMUの主任研究員のときに議論しました。後に京都の国際会議で三輪先生と知り合いました。

**大栗** なるほど。ニコライ・レシェティンさん<sup>9</sup>も一般的な可積分系の研究者ですが、彼とも共同で研究しましたね。彼はIPMUの外部諮問委員会委員で、度々やってきます。それもあなたの研究の助けになったに違いないと思います。

**レフフェルト** はい、共同研究者がこちらに来てくれたり、逆に向こうに行く場合も同じですが、一緒にいると論文を仕上げるのがとても楽ですね。とても助かり

ました。

**大栗** 私にとって忘れられないイベントの一つに、「新しい不変量と壁越え」と題してあなたとドメニコ、それにIPMUの数学者の戸田幸伸さんと一緒に組織したフォーカス・ウィークがあります。あの頃、「壁越え」は物理と数学の両方で最新の分野として注目され始めていました。また私はIPMUの大学院生だった山崎雅人さんとこのテーマについて論文を書いている、IPMUでもっとこの分野の研究を活性化すべきだと考えていました。ちょうどそこにあなたとドメニコがやってきて、あの国際会議を提案してくれました。これが大成功だったわけです。講演者も参加者も数学者と物理学者がほぼ半々であり、極めて活発に交流し、相互に理解を深めました。この会議を組織してどんな経験をしましたか？

**レフフェルト** とても面白くて、幸いなことに全く負担ではありませんでした。国際会議を組織するのに必要なやっかいな仕事をIPMUの事務部門スタッフがほとんど引き受けてくれたおかげです。ですから私たちは招待した研究者との交流に集中できました。日本で行われたこの会議に極めつきの研究者達をお呼びできて、とてもうれしかったです。

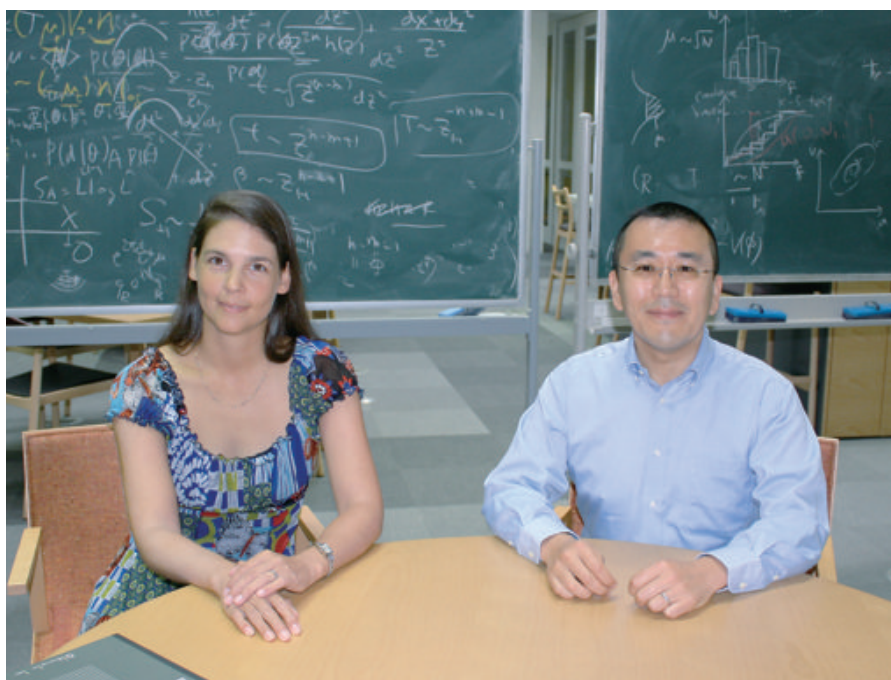
**大栗** 私も驚嘆しました。この発展し始めた分野で好機を捕らえて、極めて短時間で会議が組織できたのです。村山さんに「大きな進展があるので、迅速に国際会議を開催すべき」と連絡したところ即決で認めてくれたことを覚えています。

2009年の2月のことで、会議の開催は5月でした。準備期間はたった3ヶ月でした。普通、この規模の国際会議の準備には1年はかかります。それなのに多くの指導的な数学者と物理学者が私たちの招待を受けてくれました。IPMUの国際交流係も、突然話を持ち込んだのに私たち

<sup>7</sup> D. Orlando and S. Reffert, "On the Renormalizability of Hořava-Lifshitz-type Gravities (ホジバ-リフシツツ型重力理論の繰り込み可能性について)", *Class. Quant. Grav.* 26 (2009) 115.

<sup>8</sup> カリフォルニア大学バークレー校教授で、IPMUバークレーサテライトのメンバー。

<sup>9</sup> カリフォルニア大学バークレー校の数学教授で、IPMUの外部諮問委員会委員。



がこの会議をまとめ上げるのを手伝ってくれました。まさに最適の時期に開催し、大きな成果を上げました。

覚えていますか、フォーカスウィークが開催されたのはちょうど新型インフルエンザ流行の真っ最中で、ちょっと予想外の展開でした。

**レフフェアト** 全くですね。海外渡航が制限されるに違いなく、会議が中止されるかもしれないととても心配したことを思い出します。はらはらしたけれど、参加者の体温を測ったり消毒液とマスクを用意したりといった対策をとったおかげで結局は計画した通り開催できました。

**大栗** その通りでした。私たちが会議を開催した頃、日本にはまだ新型インフルエンザが上陸していなかったのですが、公式に感染国と宣言された国もいくつかありました。日本政府は国際会議に参加するため多数の外国人が入国することを心配していました。実際、私たちの会議が行われていた頃、他の国際会議はほとんど中止せざるを得ませんでした。

私たちが計画通りこの会議を開催でき

た理由の一つとして、IPMUの事務職員が政府と東大執行部の要求に応えるため一所懸命に働き、今言われたような参加者の健康を守るために必要な対策をとってくれたことが挙げられます。対策の一つとしては、外科手術用のマスクを配り、その装着法と正しい廃棄の仕方を全員に徹底しました。また、会場の入り口に赤外線サーモグラフィーを設置して参加者の体温を測りました。参加者もこういった処方にユーモアのセンスで応じてくれました。結局のところ、とてもうまくいったと思います。<sup>10</sup>

**レフフェアト** 本当に。

**大栗** この会議は私自身の研究に非常に役立ちました。また、二つほど新たな方向に研究を進めるきっかけになりました。

**レフフェアト** 私たちも数人の数学者たちと直接交流することができたのはとても幸運でした。当然ですが、彼らの問題のとらえ方は物理学者とやや違います。それで、この会議は私たちにも非常に役に立ちました。

**大栗** 数学者との交流について、IPMUで

の経験はいかがでしたか？

**レフフェアト** とても良かったです。まず第一に、物理学者と数学者の合同セミナーがあり、それに出て質問できることです。本格的な議論に入る前に最初30分の入門的な話があり、それが私にはとても役に立ちました。

**大栗** そう、セミナーの講師は最初の30分間、数学者と物理学者双方が理解できる一般的な講演とする決まりにしています。そのあと5分間休憩します。

**レフフェアト** そうですね。

**大栗** 入門部分だけを聞きたい人は、短い休憩の間に出て行くことができ、再開後はもっと専門的な内容の話になります。この方式はとても評判が良かったと思います。実際、今話しの出たフォーカスウィークにもこの方式を取り入れ、参加者に気に入ってもらえました。

**レフフェアト** そうです、他分野の言葉を勉強し、より良く理解するのに大変役立つ

<sup>10</sup> このフォーカスウィークについて、IPMU NEWS No. 6 ([http://www.ipmu.jp/webfm\\_send/164](http://www.ipmu.jp/webfm_send/164))に報告が掲載されています。

つと思います。

**大栗** 他分野の科学や数学の研究者との交流はとても大事です。特に斎藤恭司さん<sup>11</sup>と色々な機会に交流されているそうですね。

**レフフェアト** はい、斎藤さんには随分お世話になりました。数学で聞きたいことがあるときは斎藤さんの研究室に行けばよくて、いつでも喜んで教えてくれます。

**大栗** 喜んで、しかも熱心に教えてくれますね。

**レフフェアト** えらい人ですね。

### IPMUで行ったアウトリーチ

**大栗** この辺で、少し話題を変えましょう。いろいろなレベルの講演をするなど、IPMUのために随分アウトリーチ活動をしてくださいました。その経験話を話していただけませんか。

**レフフェアト** いろんな企画に参加しました。ほとんどは学校の生徒を対象にしたものでした。科学や数学に興味をもっている生徒達です。小学生を相手にしたこともありましたが、勿論高校生もです。こういう交流は大事だと思います。私が学校に行っていた時は、研究とはどういうものかを知る機会ほとんどありませんでした。学校で教わったのは実際の研究よりずっとつまらないものでした。ですから、研究者になるのがどんなに面白いものか、生徒達はちゃんとした話は聞いていないのだらうと思います。若い人たちが研究者に会って、教室で教わるよりもっといろいろなおもしろい事があるのだと知ることはとても大事だと思います。

**大栗** 私もそう思います。IPMUの広報担当者の宮副さん<sup>12</sup>もブログを書いていて、その中でIPMUで行われた数学のサイエンスキャンプで高校生にだと思いましたがあなたがした話を取り上げていました。宮副さんは、あなたの研究者の生活についての話が、実際研究者になってみたくなるようなとても印象的なものだったと書いています。

私は若い生徒達が直接研究者と話をし、研究者になるということがどんなことなのか知る機会を持てたのは素晴らしいことだと思います。

いことだと思います。優秀な若者を科学の世界に惹きつけるには大切なことですね。

それから、あなたの「はてな宇宙」という短いビデオも見ました。とてもうまくできていましたが、どうやって準備したのですか？

**レフフェアト** 超弦理論をたった2分で説明するのですから、大変でした。学問的内容には忠実でいながら、誰にでも理解できるように努めたのですが、大変でも面白かったですよ。柏キャンパスの他の研究機関の人たちが「見たよ」と言ってくれました。

**大栗** 難しいテーマを黒板を使ってちょうど2分で解説したあなたの説明の仕方には、私も強い感銘を受けましたよ。あのビデオ<sup>13</sup>は是非とも見る価値がありますね。

### 東日本大震災

**大栗** あなたが IPMU で過ごす最後の年の3月11日に、悲しいことですが東日本大震災が襲いました。被災された方達は本当にお気の毒です。あなたも私も地震が起きた時日本にいましたが、あなたの経験したことを聞かせて下さい。

**レフフェアト** そのとき私たち夫婦は柏キャンパスに向かう電車の中でした。地震が発生する前に電車が緊急停車したので。

**大栗** では早期地震警戒システムが機能したわけですね。

**レフフェアト** そうです。トンネルの中で電車が突然停車しました。停止後に地面が揺れ始めました。

**大栗** なるほど。

**レフフェアト** 私たちは何が起きたのか全く分かりませんでした。電車の中で2時間ほど待つように言われたのです。電車が動き始めるのか、あるいはとてもひどい地震だったのかどうか、電車の中には情報が得にくいので、分かりませんでした。

**大栗** 電車は地下のトンネルで止まったままだったのですか？

**レフフェアト** そうなのです。とうとう歩

いて避難するように言われ、皆線路の間を次の駅まで歩かなければなりませんでしたが。結局、もう午後の遅い時間で、自宅からは20キロも離れていたのに、とても小さな町の市役所に設けられた避難所で一晩過ごさざるを得ませんでした。

**大栗** そうですか。その日私はIPMUで仕事をしていたのですが、やはり帰宅できませんでした。<sup>14</sup>

**レフフェアト** 大勢の人たちが帰宅できなかったのですね。

**大栗** そのとおりで、そういう人たちは日本語で「帰宅難民」と言います。

**レフフェアト** 知っています。その市役所では緊急事態の対応が非常に効率的で、避難所ではとても親切にしてくれました。緊急用の毛布とマットを配ってくれたので、集会室の床で寝ることができました。朝になると、朝食まで作ってくれました。

**大栗** それはすごい。

**レフフェアト** 市役所の人たちが自宅で作ってきたに違いないと思います。味噌汁やおにぎりなど、色々ありました。それから、動いている電車の情報も調べようとしてくれました。

**大栗** 地震の翌日は運行していない鉄道もありました。

**レフフェアト** 帰宅するのは結構難しく、数時間かかりましたが、何とかたどり着きました。

**大栗** 自宅では被害はありましたか？

**レフフェアト** 被害と言うほどのことはありませんでした。私たちは8階に住んでいるので、いっぱい物が落ちてはいましたが、棚とかの上に置いた物は全部落ちて、食器戸棚の中では戸を開けると落ちそうになっていましたが、壊れた物はほとんどありませんでした。

**大栗** それは運が良かったですね。地震後、生活に変化はありましたか？

**レフフェアト** 勿論少しは変わりました。

<sup>11</sup> IPMUの主任研究員。数学の特任教授。

<sup>12</sup> 在職期間20年6月-23年11月。

<sup>13</sup> [http://www.ipmu.jp/drupal/webfm\\_send/121](http://www.ipmu.jp/drupal/webfm_send/121) で公開されています。

<sup>14</sup> IPMU NEWS No. 14 ([http://www.ipmu.jp/webfm\\_send/508](http://www.ipmu.jp/webfm_send/508)) にセルゲイ・ペトコフがIPMUでの地震とその後の経験について書いた記事を参照。



食品などの補給網が十分機能しなくなったり電力が不足したためです。

**大栗** 地震直後の一週間のことですか？

**レフフェアト** そうです。最初の一週間は問題があったとも言えますが、本当の問題と言うほどのことはなかったと思います。私たちはいつも食料と水は十分用意しておくので大丈夫でした。各国のテレビ放送では東京がどんなにひどい状況か、大分誇張されていたと思います。実際上は東京は大丈夫でした。

**大栗** あれからほぼ半年ですが、今どういう風を感じていますか？

**レフフェアト** 幸いなことに、この地域ではもはや特別な感じはしなくなっていると思います。勿論東北では違いますが、東京でもまだいくらか節電しなければならぬ点があります。でも、そのために混乱が起きるということは全くないと思います。私は何も困っていません。

**大栗** 夏が始まる頃は冷房のため必要な電力の増加が見込まれ、電力会社に十分な供給能力があるか心配されました。しかし結局、東京が普段使う電力の75～80%で、生活に重大な影響を与えることなく機能したことは驚かされました。

**レフフェアト** 全くです。変化は最小限で、私も室内をそんなに冷やさなくても良いといったようなことに気がつきました。

**大栗** かえて良くなったこともありませう。例えば、夏の東京でデパートに行くとは前は凍えるほど寒かったものです。

**レフフェアト** 全くそのとおりで、私もその点は良くなったと思います。

### IPMUでの3年間を顧みて

**大栗** 間もなくあなたは IPMU から旅立ちます。勿論あなたたちが去ってゆくことは私たち全員悲しいのですが、一方で素晴らしい職を得て CERN に行かれることをとてもうれしく、また誇りに思っています。なおさら良いことは、あなたとドメニコが同じ場所で職を得たことです。新しい仕事について聞かせて頂けますか。

**レフフェアト** 私たちはとてもわくわくしています。また二人一緒にいられるとい

うだけでなく、CERN は今 LHC の実験中で、ヒッグス粒子の探索が佳境に入っているのもとても活気に満ちており、そういう所に行けるのですから。恐らく私たちがいる間に発見を目撃することになるでしょう。行くにはとても刺激的な場所です。

**大栗** おめでとう。本当に素晴らしい。

**レフフェアト** IPMUで研究したことがこの新しい職を得ることにつながったので、私たちはとても幸せです。

**大栗** どうもありがとう。なにか最後に言い残したこととか旅立ちの言葉はありませんか。

**レフフェアト** 私たちは IPMU、それから日本での滞在全般をととても楽しんだし、研究の上でも IPMU は素晴らしくて開放的な雰囲気でしたから、ここを離れるのは勿論二人とも残念に思っています。多くの研究成果も挙げることができました。また、日本は実に興味深い国なので、離れるのはとても残念です。他の人たちに、是非日本に行って、研究の面でも個人的なレベルでも自分を高めてくれるようなこういう経験をするように勧めようと思っています。

**大栗** IPMU のメンバーとして3年間一緒に過ごして頂き、ありがとうございます。IPMU にあなたたちお二人を迎えることができたのは、本当に素晴らしいことでした。次のご活躍と成功を祈っています。

**レフフェアト** どうもありがとうございます。

# ハイゼンベルグの手書き原稿

## ーハイゼンベルグと西島

福来正孝 ふくぎた・まさたか

IPMU主任研究員

IPMUの図書室の入り口を入りまっすぐ進んだところに、20世紀の偉大な物理学者、ヴェルナー・ハイゼンベルグの手書き原稿が展示されている。

相対性理論と量子力学が前世紀に出現した二つの最も革命的な概念であることについては、すべての物理学者に異論はない。これらは現代の物理学に不可欠の概念である。しかし、その発展は極めて対照的であった。相対論は一人の天才、アルベルト・アインシュタインが、動機となるような何の実験事実も無しに物理学の基礎における論理的無矛盾性と美学の追究により創造し、発展させた。一方、量子力学は1900年のマックス・プランクに始まるヨーロッパの多くの指導的物理学者が、新たに得られた実験結果を矛盾無く説明する必要性に迫られて展開した研究によって得られたものである。この発展の間、ハイゼンベルグはドイツのゲッティンゲンにおいて量子力学理論の完成に対し決定的な一歩を踏出した。

ハイゼンベルグは、原子中の電子の運動と原子から放射される光を支配する法則を発見したのである。1925年7月の発見直後、彼の「奇妙な」法則は数学者の呼ぶ「行列の乗法」に他ならないことが判明した (Born, Heisenberg & Jordan, November 1925)。乗法について非可換 (かけ算で二つの数の順番を入れ替えると同じ結果にならない) というこの数学の概念は、物理学者には全く馴染みのないものであった。ハイゼンベルグはこの数学を知らなかったが、原

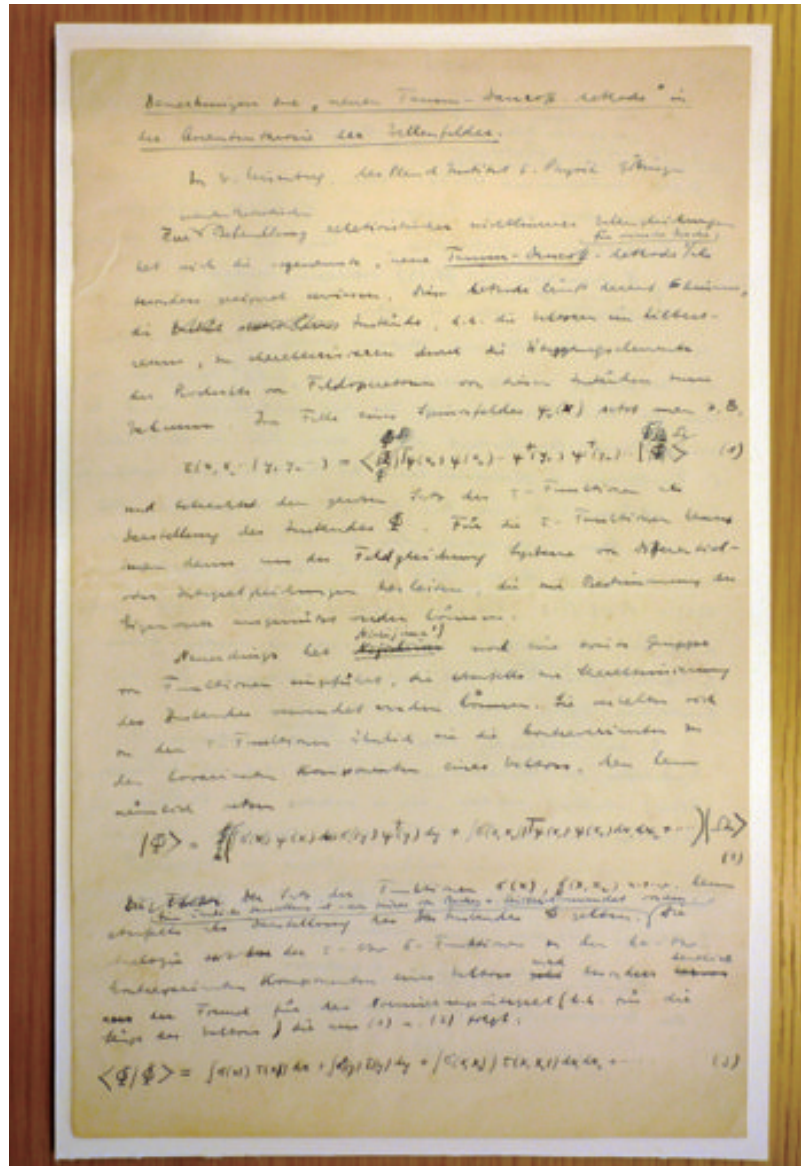


図1 IPMU図書室に展示されているハイゼンベルグの手書き原稿第1ページ。

子物理の経験的に得られた特性を深く考えることにより独自に発見したことを強調しておきたい。1年後にエルヴィン・シュレディンガーが原子の振舞いを支配すると思われる波動方程式を発見した。このシュレディンガー方程式は見かけ上ハイゼンベルグの行列力学とは全く異なっていたが、二つの方法により同一の結果が得られた。これらが数学的に同値であることに物理学者が気づくには一年も要しなかった(グヴィッド・ヒルベルトはこのことを初めから知っていたと言われている)。この研究は原子物理だけでなく、原子核物理と素粒子物理の理論的基礎となった。(ところで、アインシュタインの一般相対性理論も、当時の物理学者にとって全く新しい数学的概念であったリーマン幾何学に基づいている。アインシュタインが一般相対性理論の構築にとりかかった当初、友人で同級生のマルセル・グロスマンから話を聞くまではリーマン幾何学について全く知識を持ち合わせていなかった。これらは、物理学の進展に新しい数学が決定的に重要であった二つの実例である。)

この発見だけでもハイゼンベルグを超一流の物理学者たらしめるに十分であったが、彼はその後も第一級の業績を挙げ続けた。ハイゼンベルグの不確定性原理(量子力学を理解するための鍵であると共に、その核心)の発見、原子核が陽子と電子ではなく陽子と中性子から構成されることとアイソスピンの概念、強磁性体の原理、および素粒子とその力学を記述する基礎理論である量子場の理論の構築(ヴォルフガング・パウリとの共同による)などが列挙される。彼はこのすべてを30歳になる前に成し遂げた。後に、素粒子の相互作用を記述する散乱行列の基礎概念も提案している。

第二次大戦中、ドイツおよびドイツの科学は連合国の空襲だけではなく自らの体制によっても壊滅し

た。ハイゼンベルグが所属していたベルリンのカイザー・ヴィルヘルム物理学研究所も同様であった。戦後、ハイゼンベルグはドイツの科学の再建に助力できるものと考えて国に残り、ゲッティンゲンにおけるカイザー・ヴィルヘルム研究所の再構築に努力を傾けた。しかし、英国の占領軍(ゲッティンゲンは英国の占領地域であった)により「カイザー(皇帝)」という名前を用いることは禁止された。ハイゼンベルグは同僚たち、中でもとり

わけオットー・ハーンと共に研究所の再構築を成し遂げたが、その名前は新たな「マックス・プランク研究所」となった。

1953年以降、ハイゼンベルグは非線形スピノル場理論が素粒子の世界とその相互作用を記述するであろうと期待をかけ、その構築に没頭した。ハイゼンベルグはこの研究を進めるうちに、西島によって行われた研究に強い印象を受けたため、戦争直前に彼に師事した朝永に対し1955年8月に手紙を書いて、西島が

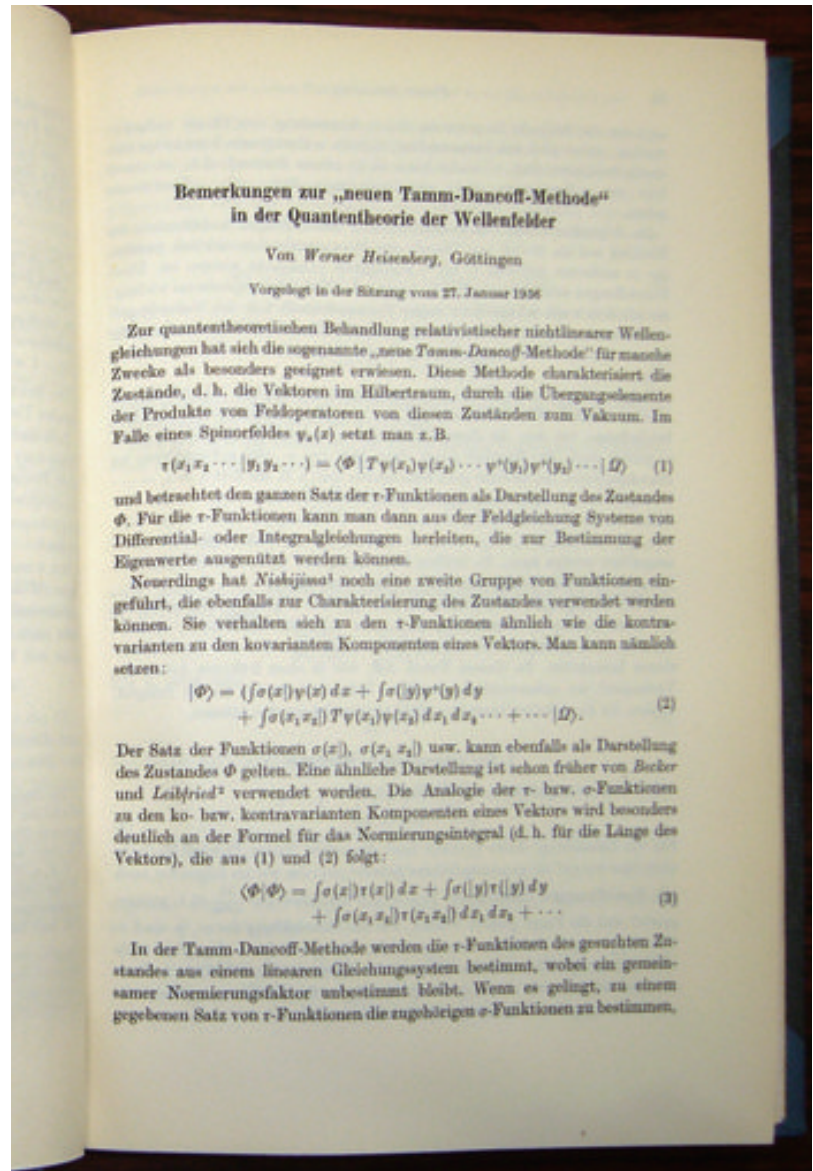


図2 出版されたハイゼンベルグの論文の第1ページ。図1の手書き原稿に対応。(お茶の水女子大学所蔵の資料を撮影。)

Special  
Contribution



1年間ゲッティンゲンに来る気はないかと問い合わせた。西島はハイゼンベルグの申し出を喜んで受諾し、1956年1月にゲッティンゲンにやってきた。

西島和彦は1926年の生まれで、東京大学に学び、その後早川幸男に誘われ、新たに設立された大阪市立大学の素粒子物理学者グループ(渡瀬譲の要請に応じて作られた)に職を得た。この新しいグループには教授として南部陽一郎、助教教授として早川、講師として山口嘉夫、助手として西島和彦と中野董夫がいた。このグループは強力で、当時続々と報告された新たな実験結果の解釈に大きな成功を収めていた。例えば、現在は「ストレンジ粒子」と呼ばれている新粒子が常に一對として生成されることを仮定して、それらの基本的な性質を説明した。西島はさらに大胆に推論を進めた。それは結局正しかったのだが、新粒子K中間子のアイソスピンが整数ではなく $1/2$ であるとしたのである。彼は次に $\eta$ 電荷という量子数(後にストレンジネスと名付けられた)を導入し、現在西島・ゲルマン則と呼ばれている法則を提案した。実はこの法則は高次の対称性が破れて低次の対称性になるときの一般的な法則であって、西島の時代には知られていなかった多くの概念に適用されるものである。

ハイゼンベルグが非線形場の理論を構築していた間に、1953年の*Progress of Theoretical Physics*に掲載された西島の論文が彼の注意を引き、1955年8月の朝永を通じての招待となったのである。IPMUの図書室に展示されているのは、*Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen, Math.-Phys. Klasse* (ゲッティンゲン科学アカデミー報告 数学・物理学篇) IIa, p. 27-36 (1956)に掲載された『量子場の理論における「新タム・ダンコフ法」に関する考察』と題するハイゼンベルグの論文の手書き原稿第1ページである。(IPMUにはこの論文の原稿全体が保管されている。)この論文は、彼が「タム・ダンコフ法」と呼んだ、非線形スピノル理論に於いてある種の打切りを行った非摂動

論的取り扱いと、フェルミ粒子の質量及びフェルミ粒子の束縛状態としてのボーズ粒子の質量を簡単化されたモデルの最低次近似で計算することを目的とする。ここでは、場の理論で束縛状態を取り扱うために状態ベクトルの共変表現と反変表現を別々に取り扱うことが重要であった。この取り扱いは西島により複合粒子の散乱行列を議論した論文で考え出されたものであった。

ハイゼンベルグはアカデミーで報告する前に西島の意見を聞くためこの原稿を彼に渡したのではないかと推測される。西島は、2009年2月に白血病のため82歳で亡くなるまでこの原稿を手元に置いた。

西島はゲッティンゲンでの滞在を半年間延長したことが、ハイゼンベルグから渡瀬に送った西島の滞在延長の許可を求める手紙から見て取れる。その後西島はプリンストン高等研究所に行き、そこでのルドルフ・ハーク及びヴォルフハルト・ツィンマーマンとの複合粒子の散乱行列に関する研究は、現在HNZ構成と呼ばれている成果となった。ハイゼンベルグと西島は2年間に渡り、特に $\gamma_5$ の役割とその頃の驚くべき発見、場の理論におけるパリティの破れについて頻りに連絡をとり続けた。西島は1959年に大阪市立大学に戻ったが、その後イリノイ大学のアーバナ・シャンペーン校に行き1966年まで教鞭をとった。その間に高い評価を受けた教科書、*Fields and Particles* (W. A. Benjamin社から1969年刊行)を執筆している。彼はその後1985年に京都大学基礎物理学研究所長就任を依頼されるまで東京大学で研究を続けた。



# XMASS実験の第一フェーズ

## カイ・マルテンス

IPMU准教授

私たちの宇宙には大きな謎が幾つもありますが、その一つがダークマター（暗黒物質）です。重力として働く力を数え上げてみると、宇宙全体のエネルギーの約1/4がダークマターであることがわかります。恒星や銀河や私たち自身のような普通の物質はたった1/20以下でしかありません。ですから、ダークマターとは私たちの知識の結構大きな空白部分に対するコードネーム<sup>\*1</sup>と言えるでしょう。優れた理論家たちがダークマターの正体についていろいろ推測していますが、「あれはWIMP<sup>\*2</sup>に決まっているよ」という答は一部の理論家の耳には心地よく響くでしょう。しかし、ダークマターが素粒子であったとしても、その候補として「理論的な」動機がはっきりしているものはWIMP だけではありません。ダークマターが何かを決定するものは実験なのです。

この目的のため、今、神岡の地下でエキサイティングな実験が開始され、試験運転を行っています。その実験の名前であるXMASSは、現在実現した検出器に対して“Xe detector for weakly interacting MASSive particles”を意味します。これを近年の物理の業界用語を使って短く言えば“Xe detector for WIMPS”（WIMP用キセノン検出器）となります。検出器の中心には摂氏-100度で液化された800 kgのキセノンが置かれています。そのさらに中心部の100 kgをWIMP検出用の標的として使用し、WIMPとキセノン原子核の衝突を待ち構えます。この実験の成功のためには、放射性物質によるバックグラウンドの低減が最も

<sup>\*1</sup> 開発中の製品などで正式な名称が発表される前に付けられた通り名のこと。

<sup>\*2</sup> Weakly Interacting Massive Particles（相互作用が弱くて重い粒子）の略であるが、英語でwimpは弱虫という意味の単語でもある。



2010年2月に組み立てを終了したXMASS検出装置の中心部分。

重要であり、検出器建設中、最も気をつかった点でした。この検出器は簡単に大型化が可能であり、それがデザインの優れている点です。

うまくいけば、新たな領域で物理の研究を行うために、標的部が10トン、全部で24トンの液体キセノンを使用する新しい検出器を建設することができるかもしれません。そのときにはXMASSという名前は新たな意味をもつこととなります。すなわち、<sup>136</sup>Xe（キセノン136）のニュートリノを出さない2重ベータ崩壊を探索する“Xe neutrino MASS detector”（キセノンを用いるニュートリノ質量測定器）であり、また太陽から来る低エネルギーニュートリノを記録する“Xe MASSIVE neutrino detector”（キセノン巨大ニュートリノ検出器）です。将来の目標に比べれば小規模ですが現在実現しているダークマターの実験で、XMASS検出器が構想した通り実際に機能することを証明することが、新たな実験の可能性を開く鍵となります。



IPMU Interview

## ジェローム・フリードマン教授 に聞く

聞き手・萩原 薫

芸術から科学へ：16歳で変わった興味

**萩原** 今日の講演はいろいろ示唆に富んでいて、楽しませていただきました。ありがとうございます。経歴書によれば1930年のお生まれで、子供の頃は美術と音楽に興味をお持ちだったそうですね。

**フリードマン** ええ、主として美術でした。バイオリンも習っていましたが、バイオリンと絵画のどちらを取るか決めなければなりません。大恐慌の最中で、私の両親は両方習わせる余裕はなかったのです。私は絵の方を選んだのですが、そのうちもっと家計が悪化して絵を習うのも止めざるを得ませんでした。子供の時は随分長い時間絵を描いていたもので、大人になったら多分画家になるだろうと本気で考えていました。ですから私は美術課程のある高校に進み、毎日3時間も絵を描いていました。

**萩原** 3時間もですか？

ジェローム（ジェリー）I.フリードマンさんはマサチューセッツ工科大学（MIT）の特別荣誉教授で、リチャード（ディック）E.テイラー、ヘンリー W. ケンドール両氏と共に「素粒子物理学におけるクォーク模型の発展に本質的に重要な、陽子及び中性子の内部構造に関する先駆的研究」により1990年のノーベル物理学賞を受賞しました。1956年にシカゴ大学から Ph.D. の学位を取得。1960年に MIT の物理学科教員となり、1967年に教授。

**フリードマン** 数学は代数と幾何の科目を最小限取っただけで、三角関数は全くやりませんでした。物理は1科目だけ取りましたがひどい成績で、先生がプリンターで袖を焦がしたことしか覚えていません。順調に美術家への道をめざし、結構では良かったです。美術で全米の賞をとり、高校を卒業したときは、地域でベストの美術学校であるシカゴ美術館附属美術大学に行く奨学金を約束されました。

**萩原** その美術館は知っています。シカゴのランドマークですね。

**フリードマン** そうです。私は美術家への道を歩んでいたのですが、その奨学金はもらわずにシカゴ大学に行こうと決めたのです。高校3年の終わりに興味の対象が変わり始めました。

**萩原** 高校3年という15歳か16歳ですか？

**フリードマン** ええ、16歳位です。シカゴ科学産業博物館を訪れた結果、そうなったのです。あの博物館、知ってるでしょう。

**萩原** 勿論です。もうひとつのシカゴのランドマークですね。

**フリードマン** そこでアインシュタインの書いた小さな本を買いました。私は彼が偉大な科学者だということと、彼が予言した、物差しが縮んだり時計が遅くなったというものすごく面白いことをいろいろ聞いていたのです。私はこれが本当に面白くなり、なぜそうなるのか真剣に理解したい

と思いました。それで夏にかけてこの本を読み通しました。

**萩原** 私も同じくらいの年の頃、アインシュタインとインフェルトが書いた本を読んだことを覚えています。

**フリードマン** その本と私の読んだ本はとてもよく似ています。代数を知っていればローレンツ変換を導くことはできます。私はそれはできたのですが、本当に理解したわけではありません。本質的に重要なことは、全ての慣性系で光の速度が不変であるということ、それは非常に深遠な問題だからです。何の予備知識もないティーンエイジャーの私には全く理解できないことでした。それで私はその問題や同じような問題を勉強してみたいと思いました。美術の奨学金をもらったのにシカゴ大学を選んだのですから、ちょっと厚かましかったですね。

**萩原** なるほど、それで美術学校の奨学金を辞退してシカゴ大学に行くことにしたのですね。

**フリードマン** そうです。

**萩原** 大学に入るのは簡単でしたか？

**フリードマン** ええ、私は勉強は良くできたので、入学は全く簡単でした。受けた授業は全部とても良い成績で、その結果シカゴ大学で学ぶ学費は全額奨学金をもらいました。私は一銭も払わずに全教育を受けたのですよ。

**萩原** それはすごいですね。

**フリードマン** 両親が経済的に困窮していたので、それが私が大学に進める唯一の道でした。

**萩原** 分かりました。シカゴ大学に行ったときにはフェルミが教授でいることをすでに知っていましたか？

**フリードマン** 知ってましたとも。

**萩原** なるほど、とても有名だったのですね。

**フリードマン** シカゴでフェルミ先生を知らない者はいませんでした。私には遠くの大学に行く余裕などありませんでしたから、とても幸運だと感じていました。私は自宅に住んで大学までは市電を利用しましたが、家はシカゴの西側だったので長い時間かけて毎日通学しました。最初の2年間はグレート・ブックス課程で、西欧文明の古典を読む一連の講義を取りました。

**萩原** 西欧文明ですか？ つまりそれが一般教育課程の2年間だったのですね。

フェルミとともに過ごしたシカゴ大学の日々

**フリードマン** そう、その通りです。その後物理学科に進んだのですが、初めはとても難しかったです。フェルミは物理に進みたい学生はほとんど制限無しに受け入れて良いという考えでした。私が物理学科に進めたのはそのおかげですが、数学の勉強は大急ぎで追いつかなければなりません。試験はとても難しく、落第点を取る割合がかなり高かったのです。私は最初苦労しました。最初取った物理の科目は105、106、107だったことを覚えています。MITでは2年かけるところをシカゴでは1年で終えたのです。しかも毎週金曜日にとても難しい試験がありました。

**萩原** 毎週金曜日に試験ですか。

**フリードマン** 毎週です。100点満点で平均点は20から30点でした。私もとても低い点の時があり、物理を選んだのは正しい選択だったか思い悩んだ時期がありました。125人ほどがこの科目を取っ

萩原 薫さんは高エネルギー加速器研究機構 (KEK)・素粒子原子核研究所教授でIPMUの上級科学研究員を兼ねる素粒子理論の研究者です。





て、修了したのは35人程度でした。

**萩原** たった35人ですか。

**フリードマン** 大部分はやめてしまったのですが、やめさせられたわけではありません。毎週金曜日に試験を受けて、ほとんどいつも半分以下しかできなかったのですよ。皆良くてできる学生でしたが、ただ続けることができなかったのです。

**萩原** 試験問題はフェルミが作ったのですか？

**フリードマン** いいえ違います。その科目を教えた人が最初の講義で「君たちの大部分は物理学者になれるほど良い頭はしてないよ」と言いました。私にとって救いだったのは、試験の成績が悪くても「自分は何も知らないのだから良い点を取れるはずがない」と思えたことです。私は何とか追いついて全ての試験をパスすることができました。それで物理学科に残って勉強を続けられました。2年後に資格試験と呼ばれる長時間の試験があり、3年終わったところで基本試験と呼ばれる博士課程に進むための資格認定試験が3日間、毎日6時間行われました。どちらの試験も受けた者の約半分は落ちました。残るのは1/4程のとても狭い門でしたが、大いに楽しめる博士課程でした。シカゴ大学の物理教室は非常に活気のあるところだったので、世界中の最高の物理学者が訪問し、講演しました。私たちは講演を聴き、何人もの偉大な物理学者に会いました。パウリやハイゼンベルグやファインマンも訪れました。当時、とても若かったゲルマンがシカゴで教えていました。勿論、フェルミもです。私は大胆にも、「自分は物理学科で一番の学生ではないかもしれないが、

一番の教授のもとで研究したい」と考えて、フェルミに会いに行き、彼の下で研究できないかと尋ねました。私は、「では、この科目やあの科目のできはどうだったかね」とか、「基本試験の成績は?」とか聞かれるのではないかと思っていました。フェルミはそういうことは何一つ聞かず、ただ一言「いいですよ」と言っただけでした。私にはとても信じられませんでした。宝くじを引き当てたようなものでした。残念なことにフェルミは私が博士論文を書いている間に亡くなりましたが、それまで私は彼のために一生懸命働きました。彼はすごい人で、彼が物理の問題について考え、目の前で解いてみせたり説明してくれるのを見ることはなんとも素晴らしいことでした。フェルミは優れた人であるとともに実に親切な良い人でした。それに加えて、物理学科には素晴らしい博士課程の学生たちがいました。その一人の藤井忠男さんとは仲の良い友人同士でした。その頃、小柴さんはシカゴ大学の若い博士研究員で、マルセル・シャインの宇宙線グループで働いていました。小柴さんとは良く会って語り合ったものです。

**萩原** 南部さんとは会われましたか？

**フリードマン** 会いましたよ。私が学生の時、南部さんは若手の助教授でした。その時でさえとても高かった評判が、どんどん上がり続ける一方でした。信じがたいほど才能に恵まれた理論家ですから、南部さんがノーベル賞を受賞した時、私は大喜びしました。彼がなし遂げた素晴らしき仕事で最高の賞に輝いたわけですから。私は南部さんの講義を受講したことはありませんでしたが、講演は何度も聞きましたし、話をしたこともあります。彼はと

てもきさくな人ですが、また実に控えめな人です。ですから、南部さんと話をするにはこちらから近づいていかななくてはなりません。私はそうしましたし、そうすると彼はいつでもとても親しく接してくれました。フェルミは飛び抜けて優れた教授陣を集めたのです。その物理学科の学生だったことは最高に素晴らしい経験でした。

**萩原** ええ、想像がつかます。

**フリードマン** 私は実に信じがたいほど運が良かったと思います。

**萩原** 次の質問に移りたいのですが、経歴を見ると博士論文は原子核乾板を使った実験で陽子の偏極を測定されたそうですね。

**フリードマン** その通りです。

**萩原** テーマは散乱陽子の偏極を利用して陽子が弾性散乱されたか非弾性散乱されたかを調べようというものでした。そのテーマはフェルミに与えられたのですか？

**フリードマン** そうです。当時、炭素標的で散乱された陽子の偏極度が高いことが知られていました。

**萩原** なるほど。

**フリードマン** しかし、高い偏極度を与えるのは炭素核の分解過程なのか、励起過程なのか、弾性散乱なのかは分かっていませんでした。フェルミは知っていたのですが、彼が既にこの過程を計算していたことを私は知りませんでした。私の出す結果に影響を与えたくないので黙っていたのです。彼の計算は弾性散乱で非常に高い偏極度が得られることを示していました。フェルミは常にスピンの効果に大きな関心を持っていました。実は、原子核の殻模型説明への基本的な鍵であるLS結合のアイデアをマリア・メイヤーはフェルミから得たのです。彼はLS結合がこの偏極を引き起こすかもしれない

と考えました。そして、ポテンシャルの実数部と虚数部、それにLS結合を取り入れた計算を行い、弾性散乱で非常に高い偏極度を得ました。実験結果が全て揃ったとき、彼の計算と見事に一致していることが分かりました。

**萩原** そうだったのですか。

**フリードマン** 私は照射した原子核乾板を顕微鏡でスキャンしました。300メートルの飛跡を調べたのですが、顕微鏡の視野はたった150ミクロンでした。これがどんなことか想像できると思いますが、私の進み方は実に遅かったのです。測定の中で途中で途方に暮れることが起きました。セグレがカウンターを使って同じ実験を行い、その結果がフェルミの計算の正しさを確認してしまったのです。私は出し抜かれてしまい、1年半を無駄にしたと思いました。それで、フェルミに会いに行きましたが、彼はとても親切にこう言ってくれました。「気にすることは無い、君は非弾性散乱も調べられて、弾性散乱と比較できるのだから、両方の測定結果を発表できるのだよ。」実際、私はそうしたのです。その結果私はPh.D.の学位を得ることができたのですが、残念なことに学位論文を完成させた時には既にフェルミは亡くなっていたのです。彼の死は実に悲劇的でした。1954年でしたが、彼は一夏ヨーロッパに滞りました。その間に進行の早い胃がんに冒されたのです。春にはとても健康そうに見えました。秋にシカゴに戻ってきた時に、ホールの中を歩いているところが遠くから見えました。よく見ると、それがフェルミとはとても信じられないほどやせ衰えていました。私は彼に手を振り、彼も手を振り返してからオフィスに入って行きました。次の日、彼は試験開腹のためシカゴ大学のピ



リングス病院に入院し、手術不能なことが分かりました。そして、死を迎えるため自宅に戻ったのです。しかし、彼の人柄を分かち得たため、この話をしたいと思います。フェルミの入院中、ハーバート・アンダーソンとインド人の偉大な理論家、チャンドラセカールが試験開腹後初めて面会に行ったのです。それはとても気まずい状況でした。死を宣告されたばかりの人に会って何を言いますか？ 彼らは病室に入り、明らかに言葉に詰まっていた。フェルミは気がついてこう言ったのです。「チャンドラ、私は死んだら象に生まれ変わるのかね？」

**萩原** 象ですか？

**フリードマン** そうです。皆はじけるように笑いました。これで堅さがほぐれて素晴らしい会話が交わされました。明らかにフェルミは彼らの気持ちを気遣い、死の床にあるにもかかわらず冗談を言ってその場を和ませたのです。これこそ本当の人間らしい人間というものです。

**萩原** まさにそうですね。フェルミのとて素晴らしい話を聞かせていただき、ありがとうございます。では、話題を次に進めたいと思いますが、Ph.D.の学位取得後、シカゴで研究してからMITに移られたのですか？

#### 電子散乱の研究を始める

**フリードマン** いや、最初はスタンフォードに行きました。MITの前です。高エネルギー物理学研究所でホッフスタッターの下で3年間研究しました。

**萩原** そこで電子散乱の研究を始めたのですか？

**フリードマン** ええ、そこで電子散乱を学びました。そこに移ったことは私にとってとても運の良い

ことでした。というのも、私はずっと原子核乾板をやってきたのですが、学位論文を終える頃までにはもう滅びつつある技術になっていたのです。私は泡箱はやりたくないと決めました。もう画像はたくさんあったのです。十分すぎるほど見てきたので、見飽きてしまったのです。そこで私はエレクトロニクスによる測定を習得したいと思ったのです。

**萩原** 原子核乾板から始めて、カウンターに進んだのですか？

**フリードマン** ええ、そういうわけでホッフスタッターのグループに電子散乱の職を得ました。そこでは色々やりましたが、私が一番良く覚えている実験はドレル・シュバルツの結果を用いて行った測定で、その後の私の思考に役立ったものです。彼らの計算は、電子による重水素原子核の分解反応で、全ての非弾性終状態について足し合わせると重水素核の交換力についての情報を得ることができるということを示しました。私は面白い結果だと思いました。全非弾性終状態を調べると基底状態について情報が得られるというアイデアに非常に魅力を感じたのです。

**萩原** なるほど。包含反応の測定について初めて知ったのがそれだったのですか？

**フリードマン** そうなのです。どうやって輻射補正を行うかを学びましたが、非常に複雑であることを知りました。電子散乱では2種類の輻射補正があります。電子は散乱の前に光子を放出できますが、この場合、ビームエネルギーより低いエネルギーで散乱することになり、補正の計算には測定していない断面積を使わなければなりません。散乱後にも光子は放出されますが、その補正は比較的簡単です。しかし、散乱前の光子放出の補正には低

いエネルギーでの断面積について知る必要があります。こうして次々にさらに低いエネルギーでの情報が必要になってきます。

**萩原** ええ、全くその通りです。

**フリードマン** これは問題で、どうやってやるのか学ばなければなりません。もう一つこの測定で学んだのは、終状態について足し合わせるにより分かることがあるかもしれないということです。私たちがSLACで非弾性包含反応の測定をすることに決めた時、既に私は重水素実験を経験済みで、「陽子に関して何が分かるかはっきりしないが、面白いことになるかもしれない」と考えました。重水素核の電子分解実験は私にとって非常に意味のあるものだったのです。では、私は重水素の核子間の交換力を発見できたのかというと、答えはノーです。なぜそうなったのか、お話ししましょう。私は実験結果を吟味して、ドレルとシュバルツが彼らの計算で無視した項がいくつかあることに気がつきました。それでシドニー・ドレルに会いに行き、そのことを話しました。彼は「その通りです。その項をチェックしなければ..」と言ったので、私は机に向かってこれら、いわゆるゲージ項の影響の計算に6ヶ月を費やしました。私はゲージ項を計算に取り入れたのですが、分かったことは明確な結論が得られないということでした。それでもゲージ項が重要であり、取り入れなければならぬことは示せたので、私はその結果を公表しました。交換力についての新しい情報は得られませんでした、二つのことを学んだのは収穫でした。輻射補正について学び、「和則」について学びました。

**萩原** 良く分かります。あなたの非常に重要な研究に直接的に関係していたのですか。それから

MITに行かれたのですか？ ケンブリッジ電子加速器(CEA)に。**フリードマン** ええ、CEAです。当時、ヘンリー・ケンドールと私は同僚で、一緒にグループを率いていました。私たちは陽子による電子散乱実験をCEAで実施したかったのですが、それは許されませんでした。他の誰かが長期間スペクトロメーターを使っていたのです。

**萩原** なるほど、あなたがSLACに行ったのはそういう訳でしたか。

#### MITで教えながら3000マイル離れたSLACで実験する方法を見出す

**フリードマン** そうなのです。陽子を調べたかったらどこか別の所に行くより他ありませんでした。そこでヘンリーと私はSLACに行こうと決めたのですが、とても難しいことでした。どうやったからMITで教えながら3000マイル離れた場所で研究できますか？ それはほとんどなく馬鹿げた思いつきでした。

**萩原** どうやってうまくやれたのですか？

**フリードマン** 当時MITの物理学科の主任に素晴らしい人がいました。名前はビル・バックナーといいます。彼にはいつまでも感謝しています。ヘンリーと私は彼に会いに行ったのですが、私たちはどうすれば良いのか困惑していました。とにかく、私たちがSLACで研究するにはどうすれば良いのか、彼に聞いてみようと思ったのです。答えは間違いなくノーで、CEAで働き続ける方が良いと言われるだろうと思っていました。私たちは彼にどういう研究をやりたいのか話しました。そうしたら、彼は「簡単なことだ。こうすれば良い。」と言ったのです。私たちはとても驚きました。どん

な手品を使ってこの問題を解決できたと思いますか？彼はヘンリーと私にこう言ったのです。「二人で一つの科目を教えるのさ。二人とも給料をもらって、ヘンリーが2週間向こうに行きジェリーがその間教える、次にジェリーが2週間向こうに行きヘンリーが教えればいい。」私たちはそうしました。何年もの間、私がカリフォルニアに2週間滞在している間彼が授業をし、次に私が帰って授業している間彼がカリフォルニアに行くということを継続し、私たちは現地に実験グループを作り上げました。実のところ、アメリカでは私たちが本拠地の大学から1000マイル以上離れた場所で研究した最初のグループだったと思います。初めて遠方のユーザーグループを確立したのです。

**萩原** いや、それはとても大変ですね。

**フリードマン** 確かにコロンビア大学からは研究のためブルックヘブン国立研究所に行ったものですが、それは比較的近距离で、3000マイルとは話が違います。

**萩原** ええ、全く違いますね。

**フリードマン** 私たちはグループを作り上げました。博士研究員と大学院生をSLACに移し、いつの間にか影響力をもつ存在になっていました。スペクトロメーターシステムの建設に参加し、実験を準備し、実施したのです。実に良い時代でした。

**萩原** では、あなたの深部非弾性散乱実験についてお聞きしたいと思います。最初、陽子の形状因子を弾性散乱で測定して、勿論非常に短距離まで形状因子を測定できましたが、何も面白いことはなかったと言われていましたね。

**フリードマン** 実際、形状因子の測定からは何も新しいことが得られませんでした。それで止める

ことに決めました。精度を上げて測る意味が無かったのです。

**萩原** そこで非弾性散乱の測定を提案しました。

**フリードマン** そうです。

**萩原** 当時、あなたがその測定で何かを発見するとは全く誰も信じなかったと仰いましたね。しかし、あなたは多分何らかの描像をもってはいたはずでは？

**フリードマン** もっていましたとも。ヘンリーやディックや他の人たちの動機は知りませんが、私には重水素核の実験が動機になっていました。

**萩原** そうですか。

**フリードマン** そこから始まったのですよ。

**萩原** 多分、陽子を作っている力について何らかの知見を得ようとしたのではないですか。

**フリードマン** 重水素核の実験からの類推で言えば、励起状態について足し合わせれば基底状態についての情報が得られるかもしれないので、まあ何かは得られると思われました。

**萩原** なるほど、それは確かに重要でしたね。

**フリードマン** それが教訓だったわけです。何を発見することになるか、勿論知りませんでした。私たちがクォークを探していたわけではないのは明らかで、ヘンリーは違う動機をもってはいたかもしれませんが。ヘンリーの動機が何だったのか分かりません。多分彼は話してくれたのですが、もはや私には思い出せません。ディックが言ったことも思い出せないのです。しかし、自分自身のことについては覚えていることをお話できます。プログラム委員会は私たちがその方向に進むことを余り歓迎しませんでした。私たちが約束したことは非弾性励起状態、つまり共鳴状態の測定でした。勿論、共鳴状態は連続状態

と重なり合っている訳ですから、共鳴状態を測定すれば当然連続状態も測定されます。

**萩原** 失礼ですが、プログラム委員会はあなたたちが共鳴状態を測定することに意義があると考えて実験を採択したのですか？

**フリードマン** そうなのです。彼らは連続状態の測定だけでは満足しませんでした。

**萩原** 併せてということですか。

**フリードマン** ええ、併せてです。実際、両方測定しました。しかし、共鳴状態については測定結果は公表しませんでした。

**萩原** 公表しなかったのですか。プログラム委員会に対する返礼ですね。

**フリードマン** そういうわけではなくて、非弾性散乱が非常に興味深く重要となったので共鳴状態の結果を論文にまとめる時間をとれなくなったのです。なぜ連続状態のスペクトルが非常に面白いことを見出したのか、お話ししましょう。私は数人の理論家を訪れて連続状態の測定で何が期待されるか予言してもらえないかと尋ねました。でも誰も興味を示さなかったのです。ごみのようなものと考えたのですね。結局のところ、連続状態にはあらゆる過程が含まれているので、どうやってそれを全部取り入れるのか？誰も計算しようとはしませんでした。

**萩原** ビヨルケンには聞きましたか？

**フリードマン** ビヨルケンは断面積を全く計算しませんでした。彼は和則を計算したのです。

**萩原** なるほど。

**フリードマン** ビヨルケンは恐らくディックとヘンリーとは話していたと思います。私はビヨルケンがやっていたことをはっきりとは知りませんが、私がやったことはお話できます。フェルミが複雑な現象を近似するのを目の当たりにし

た後ですから、私はまずは非常に簡単なモデルで計算してみようと自分に言い聞かせました。私の簡単なモデルを説明すれば実はそれほど不合理ではないことが分かってもらえると思います。電子の散乱では仮想光子を考えますよね。

**萩原** はい。

**フリードマン** 包含過程を考えると、それは仮想光子に対する全断面積です。従って、まず第一に現れるのは光子のエネルギーでの光子・陽子衝突全断面積です。しかし、仮想光子であるために補正が入るはずで、ファインマンダイアグラムを見てみると、パーテックスの補正がありますが、それは $Q^2$ の関数です。その $Q^2$ の関数の具体的な形は分かりませんが、 $Q^2$ は次元をもつため、 $Q^2$ だけの関数ではあり得ず、他の何かが必要です。無次元の数にするためには $Q^2$ に長さの2乗を掛けなければならないので、このことからある長さを導入すべきことが分かります。

**萩原** 陽子のサイズですね？

**フリードマン** まさにその通りです。

**萩原** それは形状因子の実験から知ったのですね。

**フリードマン** そうです。形状因子は陽子のサイズを含んでいません。実際、最も効率的なのは単に陽子の形状因子を導入することです。陽子のサイズを最も良く反映していますから。こうして陽子の形状因子で補正された光子・陽子衝突全断面積から包含反応断面積を計算することにより、私たちが期待する結果のテンプレート（ひな型）を用意しました。次に輻射補正を考慮して実際測定される量をシミュレートしました。さて、測定を開始したところ、ある時点でこの計算より5倍も大きい測定値が得られたのです。

**萩原** まだ $Q^2$ が余り大きくない時ですね。

#### 陽子内部の点状構造を発見

**フリードマン** 私たちは、まあいいだろう、と思いました。このような粗い計算では5倍の違いは驚くにはあたらないことです。しかし、その後10倍、100倍、1000倍、10000倍とどんどん違いが大きくなり、何か新しい物理があることに気がついたのです。

**萩原** 講演のスライドで見せてくれたのがその測定器ですか？ レール上を移動させることにより小角度の測定から始めて徐々に角度を大きくしたのですか？

**フリードマン** ええ、その通りです。講演は一般向けということなので、測定した分布は示さなかったのですが、構造関数は $Q^2$ の関数として平らに見えます。運動学的な限界があるので、少し曲がりますが。私は直ちにこれは点状の構造を意味すると思いました。もしも有限のサイズがあってそれが効いてくると4元運動量移行( $Q^2$ )が大きくなるとともに構造関数は下がり始めます。炭素原子核による電子散乱を見ると、陽子に似たスペクトルが得られます。つまり、原子核励起状態の次に幅の広い連続状態が得られます。この連続状態が最大となる領域で運動量移行分布を見ると、平均した核子の形状因子が得られます。これは準弾性散乱と呼ばれます。基本的には同じように陽子の内部にある何か小さ

\*1:ここで「全包含断面積」は通常「構造関数」と呼ばれているものを指す。

\*2:この比、 $x = Q^2 / 2pq$ はビヨルケン変数と呼ばれる。 $p$ は陽子の4元運動量、 $q$ は電子と陽子の間で交換される仮想光子の4元運動量。 $Q^2 = -q^2$ 。

\*3: $pq$ は陽子の重心系で陽子の質量と仮想光子のエネルギーの積であるので、 $x$ の関数である全包含断面積は $Q^2$ と仮想光子のエネルギーの比の関数となる。

なものによる準弾性散乱を議論できます。

**萩原** 炭素原子核による電子の散乱を測定すると運動量移行が非常に小さいところでは炭素原子核の大きさが重要です。それを超えると個々の陽子を測定し始めます。

**フリードマン** 全くその通りです。もはや原子核全体とのコヒーレントな(干渉性の)散乱ではなくなるからです。

**萩原** あなたは既にそれを知っていた訳ですね。

**フリードマン** ええ、その通りで、非干渉性の散乱になります。非干渉領域に入ると核子の形状因子を見ることになります。勿論原子核中には中性子と陽子があるので、核子の平均的な形状因子を見る訳です。陽子についても同様に考えられて、私たちは既に陽子の中に点状のものが存在するというアイデアに達しようとしていました。ほぼ同じ頃、ヘンリーはビヨルケン・スケール則を調べていて、スケール則が成り立っているように見えました。しかし、スケール則が意味することを当時私たちが本当に理解していたとは思いません。今から振り返ってみると、スケール則が点状の振る舞いを意味することは明らかですが、当時私たちはそれを理解していませんでした。ビヨルケンの頭の中にはあったはずですが、彼が私たちとそれについて議論したかどうか、私は覚えていません。

**萩原** (陽子の大きさの)他に(例えばクォークのサイズのような、何か新しい物理の長さの)スケールが存在しなければ...

**フリードマン** ええ、全くその通りです。

**萩原** ...その場合、(全包含断面積<sup>\*1</sup>)は運動学的なスケールの比<sup>\*2</sup>のみに依存します。

**フリードマン** その通りです。 $Q^2$ に対応する物理のサイズがなければ、全包含断面積は他の運動学的量(ここでは仮想光子のエネルギー)との比<sup>\*3</sup>の関数でなければなりません。しかし、当時私はそれを理解していませんでした。1968年までに私たちのうち数人は恐らく陽子の中に点状の構造が存在するという見解をもちました。ウイーン国際会議が近づいていた時でした。私はその会議でグループを代表して発表することになっていました。

**萩原** ウイーンですか？

**フリードマン** ええ、出発前に私がどこまで発表することが許されるか見極めるため、グループと話し合わなければなりません。ヘンリーと私と他に数人は陽子の中に点状の構造が有り得るかもしれないというアイデアを言及したかったのですが、グループの他のメンバーはそんな解釈は余りに異様だと言って反対しました。グループで投票した結果、私たちは負けました。

**萩原** なんと、負けたのですか！

**フリードマン** 私の発表では点状の構造の可能性については一言も触れませんでした。単に $Q^2$ 依存性の図を見せただけです。パノフスキーが関連セッションの全体講演をしましたが、彼が私たちの実験結果について話したのはたった二つの文章で、陽子の中の点状構造の可能性を示唆するものでした。彼はそれ以上何も言わず、誰もほとんど注意を払いませんでした。それは水に石を落としたようなもので、ちょっと波紋が生じるけれどすぐ何事もなかったように静まります。当時の常識から余りにもかけ離れていたためです。なぜならまず第一にそれは場の理論を意味したのですが、当時強い相互作用には場の理論は有効ではないと考え

られていました。優勢だった理論は全てのハドロンを基本的な粒子と考えるNuclear Democracyであり、誰も点状構造の可能性について話したがりませんでした。しかし私たちはその可能性について研究を続けたのです。そしてカラン-グロスの和則を使って、核子中に構成要素が存在するならばそのスピンは1/2であることを見出しました。次にもう一つの和則を使い、ニュートリノと核子の非弾性散乱と組み合わせることで、これらの構成要素はクォークの分数電荷をもつことを示しました。それで終わりでした。何年かかかりましたが、実にエキサイティングな時でした。私は存分に楽しませていただきました。長くなりましたが、これがあなたの短い質問に対する答です。

**萩原** 実に何とも面白いお話を聞かせていただき、ありがとうございます。私が大学院に入学したのはあなたの研究が完結した後のことでした。

**フリードマン** 大学院はどこでした？

**萩原** 東京都立大学でしたが、 $J/\psi$ が発見された1974年のことです。

**フリードマン** そうでしたか。

**萩原** その当時でも、少なくとも私のいた小規模な大学では、場の理論は全く人気がありませんでした。

**フリードマン** 実際、全然人気がありませんでした。

**萩原** 実は私の先生(小林徹郎教授)はパイ中間子・核子散乱の物理のレジュエ現象論を研究していましたが、 $J/\psi$ が発見された後は私に、自分のやっている研究を勉強するのではなく、代わりにSLACから来るプレプリントを全部読むように言われました。

**フリードマン** 賢明な方でした



ね。

**萩原** はい、本当に。そういう風に大学院での勉強を始めたわけで、来る日も来る日も論文を読んでいた。当時読んだのはビョルケン、ファインマン、グラシヨウ、等々が書いた論文で、とても勉強になりました。

**フリードマン** 素粒子理論は実に急速に変わりつつあり、ほぼその頃完全な標準模型が影響力をもち始めました。

**萩原** そうですね。そうなのは全てあなたの研究や多くの理論家たちの研究の成果に基づいてのことですね。さて、他に伺うことは... 一番重要なことは既にお聞きしましたが、後二つ質問させて下さい。

**フリードマン** どうぞ。

**萩原** ちょっと意地悪な質問かもしれませんが。

**フリードマン** いいですよ。

高エネルギー物理学は今や全てが国際的

**萩原** では、最初の質問です。1970年代に私が勉強をしていた頃、ほとんどの高エネルギー物理学の実験結果はアメリカで得られていましたが、1982年、私はマディソンで博士研究員でしたが、WとZがCERNで発見されました。今や最も高いエネルギーでの実験成果はほとんどヨーロッパで得られています。アメリカでの高エネルギー物理学の将来像というものはあるのでしょうか。あなたのご意見をお聞かせいただけませんか？

**フリードマン** 一般的に高エネルギー物理学全体が変わってしまったと思います。今や全世界的なものとなり、あらゆる実験施設は多国間で共有されるものとなるでしょう。CERNはその好例であり、10年後、15年後に一つの国でもてるものは何か、予想するの

は難しいと思います。財政破綻や財政赤字の観点から、近い将来新しい実験施設の建設は困難になるのではないのでしょうか。各国がそういう状況を切り抜けた時、以前そうでしたから今度も切り抜けることでしょうか、次の巨大実験施設がどこに建設されるかは分かりません。しかし、どこに建設されようともそれは多国間で共有されるものとなるでしょう。日本で建設しようとしているスーパーBファクトリーはナショナルプロジェクトですが、それはその規模がまだ一国で賄える程度であるためです。とは言え、日本はスーパーBファクトリーへの国際的な参加を望んでいるはずであり、それは間違いなく実現すると思います。

**萩原** ええ、勿論です。

**フリードマン** しかし、ILCやCLICの規模の計画になると、TeV領域に入り、数10億ドルが必要になります。それは多国間の共同事業になり、どこに作るかよりも国際的に参加できるものとするのが重要となります。ある国がこの分野の研究を行うかどうかは、その国が多国間の共同事業に参加を望むか否かにかかってくると思います。テバトロンは運転終了後、アメリカは巨大加速器をもたなくなりましたが、1000人を優に超える多数の米国研究者がCERNで研究するので、相当な勢力と言えます。

**萩原** あなたはマサチューセッツとカリフォルニアの間を往き来しましたが、その拡大版という訳ですね。

**フリードマン** 今ではずっと楽に連絡しあえるので、あの頃と比べるとずっとましになりました。今やどんなに離れていても本当のミーティングができますが、当時はできませんでした。しかも、常時ミーティングしています。ほんの

少し移動するだけで済みます。いずれ、人は移動せず、実験に参加している研究者は自分の家から参加するようになるでしょう。

**萩原** 実験室がどこにあるとも問題無いわけですね。

**フリードマン** そうなのです。素晴らしいことです。常に変わっているし、時代が進むにつれさらに変わります。

**萩原** 想像がつかます。ところで、日本の高エネルギー物理学について何かコメントはありますか？日本ではどちらかと言えばフレーバー物理に努力を集中しています。日本の高エネルギーコミュニティはBファクトリーやニュートリノ実験のようなフレーバー物理の実験で非常に成功を収めてきました。

**フリードマン** その分野は重要で、日本は非常にレベルの高い物理学者を輩出してきました。私は学生時代から日本人の物理学者と交流してきました。既に言いましたが、藤井忠忠さんとは一緒に大学院に行き、またシカゴ大学で南部さんや小柴さんとも知り合いました。

**萩原** はい、そのお話は伺いました。

**フリードマン** 藤井さんは私の同級生でしたが、素晴らしい男であり、とても有能な物理学者でした。小柴さんの業績をご覧なさい。南部さんは私たちの時代の最も偉大な理論家の一人です。日本には極めて重要な業績を上げた物理学者がたくさんいます。Bファクトリーも一連のニュートリノ実験も大きな成果を上げました。スーパーBファクトリーもJ-PARCでの実験計画も同じく大きな成果を上げると思います。日本では注意深く思慮に富んだやり方で物事を行い、また進んで困難なことに挑戦し、成功させます。

**萩原** 同感です。私も驚かされました。

日米両国の指導的政治家へのメッセージ

**フリードマン** Belleと神岡実験は非常に印象的で、美しい結果を得ました。日本は極めて良くやってきたし、研究に対する投資を持続する限り今後も成功してゆくでしょう。素粒子物理学の直接的応用の方策は見つかっていませんが、その実験技術の副産物は国民に経済的利益をもたらします。素粒子物理学で利用される新しい技術を学んだ学生は経済に大きな利益をもたらす技術革新を引き起こすでしょう。そのことはあなたの方が日本の指導的政治家にメッセージとして伝えるべきです。米国人はアメリカで同じことをしなければなりません。私たちは同じ問題を抱えているのです。予算が厳しくなり経済的問題が深刻化するにつれ、主として直ちに経済的利益を生み出すプロジェクトに資金を使う傾向が出てきます。しかし、基礎科学に対する投資をやめればより多くのものを失うこととなります。日本政府が日本の科学に十分な支援を与え続けるならば、素晴らしい成果が上がり続けることでしょう。

**萩原** よく分かります。今のが最後の質問でしたが、他に仰りたいことはありますか？

**フリードマン** いえ、十分にお話しました。

**萩原** では、どうもありがとうございました。

**フリードマン** いえ、どういたしまして。とても興味深いインタビューでした。しばらく考えていなかったことを考えさせてくれましたので。ありがとうございました。



# LHC のモンテカルロ・スクールを京都で開催

野尻美保子 のじり・みほこ

IPMU主任研究員

2011年9月5日から10日に、IPMU と京都大学基礎物理学研究所の共催で Monte Carlo Tools for LHC という大学院生、研究者向けのスクールが開催されました。この会議は LHC 実験の物理を解析するのに不可欠な計算ツールの開発グループが毎年開催するもので、ヨーロッパ以外で開催されるのは、今回が初めてです。主要な会議は計画時点では震災の影響があったことから、京都で行われました。アジアで開催されるということもあり、50人の参加学生の出身は、日本、中国、インド、韓国が多く、全体の 80% を占めました。

このスクールは、素粒子の究極の構造を明らかにすることを目標とする LHC 実験で起こる様々な物理過程を計算するツールの成り立ちや、使用法を普及することを目的としています。このようなツールは、LHC で粒子が生成されるレートを計算するだけでなく、シミュレーションをおこなって、LHC でおこる反応を再現して詳しく調べることが可能です。近年とくに QCD の高次補正をより厳密にとり入れることによって、実験データとの整合性がより正確になりました。バックグラウンドの多い LHC 実験の物理をするために、このようなツールを使うことが一般的です。

スクールでは実際にレクチャー講演とともにこれ



らのコードを動かすことで、シミュレーションを体感できる演習、実際のLHC事象の解析なども行われました。LHCにおける標準模型のプロセスを生成するコードとして主要なHerwig++、PYTHIA、Sherpaの総てが一週間で体験でき、また、標準模型を越える物理の相互作用を自分でコードに組み込み、生成できるMadGraphの演習も行われました。生徒50人に対して、講師、チュータは10名程度で、ソフトウェアのインストールはVirtualBoxの作る仮想コンピューターの中で効率よく行われました。事後のアンケート調査での生徒の満足度も高く、今までモンテカルロツールにふれることのできなかったアジアの学生が、これから期待されるLHC実験の物理にチャレンジする上で有効な会議でした。

## IPMUに最高のS評価 – WPI中間評価結果発表される

IPMUを含む5つのWPI研究拠点は、我が国に国際的に開かれた目に見える研究拠点を形成することを目指して2007年度にWPIプログラム委員会によって採択され、2007年10月に発足しました。このたび、2011年10月19日に開催されたプログラム委員会において、これら5拠点に対し発足後4年を機に中間評価が実施されました。

結果は2011年12月14日に文部科学省から発表されましたが、IPMUは中間評価を受けた5拠点の中で唯一、最高のS評価を得ました。その評価基準は『当初目的を超える拠点形成の進展があり、「世界トップレベル研究拠点」としてさらなる発展が期待される』というものであり、所見には『我々の総意として、IPMUの過去4年間の活動と科学的業績を高く評価する。IPMUは、この短期間内にゼロから世界的に名の知られた研究機関にまで発展を遂げた。IPMUは、WPIの目標（最高のサイエンス、国際化、融合研究によるブレークスルー、研究及び組織運営におけるシステム改革）の全てにおいて、その達成に向けて目覚ましく進展したことを示した。村山拠点長のリーダーシップを高く評価する。』と書かれています。同時に、求められる対応と勧告としてIPMUのホスト機関である東京大学に対して『TODIASの設立によって、東京大学はIPMUに一定数のテニユアポジションを用意できる立場となった。プログラム委員会は、IPMUの研究者がそ

の将来を心配し、より安定した職を求めてIPMUを去ることを危惧している。東京大学は、国際的な意味でのテニユアポジションの拠点への導入について考えるべきであると、我々は勧告する。』との指摘がなされています。

なお、今回の中間評価結果全文は[http://www.jsps.go.jp/j-toplevel/data/08\\_followup/H22result\\_j.pdf](http://www.jsps.go.jp/j-toplevel/data/08_followup/H22result_j.pdf)で公開されています。

本誌35ページの村山機構長によるDirector's Cornerもご覧ください。

## 1990年ノーベル物理学賞受賞者、J. フリードマン博士講演会

2011年10月6日（木）に東京大学本郷キャンパスの理学部化学館講堂において、IPMUと東京大学国際本部の共同主催、科学技術振興機構の共催により、J. フリードマン博士の「Exploring the Universe at the Largest and Smallest Distances（最大と最小のスケールで宇宙を探究する）」と題する一般講演会が開催されました。フリードマン博士はクオークの発見により、H. ケンドール、R. テイラー両氏と共に1990年のノーベル物理学賞を受賞しました。約200名の聴衆に対し、講演は英語で行われ、司会者の相原博昭さん（理学系研究科教授でIPMU副機構長を兼ねる）が逐次通訳する形式を取りました。

また、この機会にフリードマン博士にIPMU Interviewに登場していただきました。本誌54～60ページをご覧ください。



講演するフリードマン博士

## 柏キャンパス一般公開2011

2011年10月21日(金)、22日(土)の2日

間、柏キャンパスの一般公開が実施され、IPMUは研究棟においてポスター等による展示の他に、渡利泰山IPMU准教授の講演「素粒子たちの素顔に迫る」、外国人研究者による日本語劇「2011年宇宙の旅」、国立天文台が配布している4次元デジタル宇宙ビューワー“Mitaka”を利用したデジタル宇宙シアター「宇宙旅行に出かけよう」、「祝！ 2011日本建築学会賞☆研究棟ツアー」などのプログラムで参加しました。キャンパス全体では2日間で約6000人が来場し、IPMUには1700人以上が訪れました。



講演する渡利泰山IPMU准教授

## WPI 研究拠点合同シンポジウム「最先端の科学と君たちの未来」

2011年11月12日（土）に福岡市の福岡銀行本店大ホールを会場としてWPIプログラム6拠点合同シンポジウム「最先端の科学と君たちの未来」が開催されました。九州と山口県の中高生を主に一般の方も対象として、WPI研究拠点の研究活動等を紹介するシンポジウムで、2010年度に新たに設置された、九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (I2CNER) が主催し、他の5拠点が共催として加わりました。参加者は約600名でした。IPMUからは村山機構長が「宇宙の暗黒面」と題して講演し、また中高生代表者の質問に答えるパネルディスカッションに参加しました。



パネルディスカッションの様子

### 第5回 IPMU・ICRR合同一般講演会「宇宙を読み解く」

同じ2011年11月12日(土)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と東京大学宇宙線研究所(ICRR)の第5回合同一般講演会「最高エネルギー宇宙線で宇宙を探る」が開催されました。参加者は約150名でした。IPMUからは高柳 匡(ただし)准教授が「ひも理論で探るブラックホールの謎」について講演しました。



高柳 匡IPMU准教授の講演風景

### 柏プラネタリウム講演会「加速宇宙の謎に挑む」

2011年11月19日(土)に柏市立図書館本館2階の柏プラネタリウムを会場としてIPMU、柏市中央視聴覚ライブラリー、柏プラネタリウム研究会の共催で、「IPMU講師によるやさしい宇宙の講演会(星空解説付き)」が開催されました。参加者は約40名で、IPMU博士研究員の西道啓博さんが「加速宇宙の謎に挑む」と題して講演を行いました。

### 女子中高生支援イベント「宇宙をのぞこう!」

2011年11月23日(水)にIPMUに於いて、IPMUとICRR共同主催の女子中高生支援イベント「宇宙をのぞこう!」が開催され、女子中高生約30人が参加しました。このイベントは、女子中高生の理系分野に対する興味や関心を喚起し、理系進学を支援するための取り組みで、IPMU博士研究員、西道啓博さんの講演「加速宇宙の謎に挑む」、ICRR助教、伊藤英男さんの指導による実習「宇宙線の天頂角分布を求めてみよう(理論班)、

測ってみよう(実験班)」、女性研究者のIPMU博士研究員Alexie Leauthaud(アレクシー・レオト)さんとの懇談などが行われました。



昼食時に参加者と語るアレクシー・レオトさん

### 科学・技術フェスタ in 京都2011に出展

2011年12月17日(土)、18日(日)の両日、国立京都国際会館において科学・技術フェスタ in 京都2011が開催され、参加者数延べ5000人以上と盛会でした。WPIは全6拠点が出展しました。IPMUはブース一つを専用し、デジタル宇宙シアターなどの映像出展が好評を博し、また暗黒の背景に数式を配置したデザインの特製紙袋1000個を配布しましたが、一つも残らないほどの人気でした。村山機構長は両日ともIPMUブースに詰め、説明役を買って出ました。



IPMUブースを訪れた中川正春文部科学大臣と話す村山機構長



IPMUブースを訪れた古川元久科学技術政策担当大臣と話す村山機構長

### 宇宙の初代星は太陽の40倍の重さ

宇宙誕生後最初に生まれた星の研究では、これまで「初代星」は太陽の数百倍の重さを持つ巨大な「モンスター星」であると思われてきました。しかし、日本学術振興会海外特別研究員としてNASAジェット推進研究所に滞在中の細川隆史さん、京都大学准教授の大向一行さん、IPMU准教授の吉田直紀さん、NASAジェット推進研究所のハロルド・ヨークさんが原始星から始まり10万年に渡る進化を初めてコンピュータ中に再現したところ、宇宙最初の星の成長は、従来の常識を覆して太陽の重さの40倍程度になると止まることが分かりました。この結果は、論文として2011年11月にScience誌電子速報版に発表され、また同誌334巻1250-1253ページに出版されました。

### 田中雅臣さん、第28回井上研究奨励賞受賞

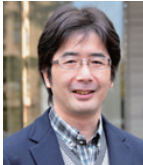
IPMU博士研究員の田中雅臣さん(12月1日より国立天文台所属、63ページ人事異動参照)が、博士論文「超新星爆発の三次元構造」により第28回井上研究奨励賞を受賞しました。2012年2月3日に贈呈式が行われます。

### 人事異動

IPMU博士研究員の田中雅臣さんが国立天文台理論部の助教に転出しました。田中さんは、当初日本学術振興会特別研究員として2009年10月1日-2010年3月31日、引き続きIPMU博士研究員として2010年4月1日-2011年11月30日の間IPMUで研究を行いました。

また、IPMU博士研究員のKenneth Shackletonさんが任期満了で退職しました。IPMU在任期間は2008年10月16日-2011年10月15日でした。

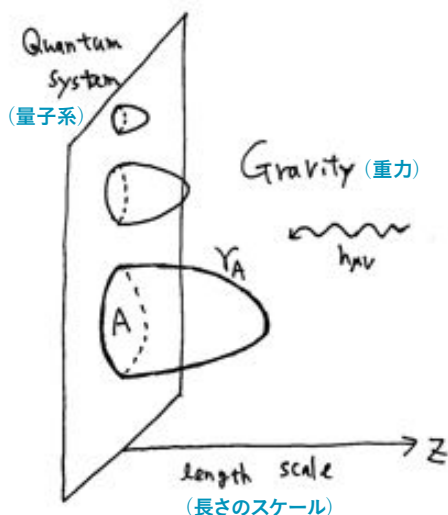




## ホログラフィー原理

高柳 匡 IPMU准教授

ベッケンシュタインとホーキングが発見したブラックホールのエントロピーは、体積ではなく面積に比例します。このように、一般相対性理論や超弦理論に代表される重力理論において、力学的な自由度が見かけより1次元低くなるという現象が起こり、ホログラフィー原理と呼ばれます。これを用いると複雑な量子多体系の物理量を微分幾何的に計算できます。例えば、ある領域内の量子系の自由度に相当するエンタングルメント・エントロピーは、極小曲面の面積として計算されます。



$$S_A = \min_{Y_A} \left[ \frac{\text{Area}(Y_A)}{4 G_N} \right]$$

$\partial Y_A = \partial A$   
 $Y_A = A$