

KAVLI IPMU NEWS



World Premier International Research Center Initiative

世界トップレベル研究拠点プログラム

Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe

カブリ数物連携宇宙研究機構



The University of Tokyo Institutes for Advanced Study

東京大学国際高等研究所

Feature

Probing the Fundamental Laws of Nature with Neutrinos

Round Table Conversation with Takaaki Kajita



32

No.

January 2016

Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
Probing the Fundamental Laws of Nature with Neutrinos
Mark Hartz
- 10 **Round Table**
Conversation with Takaaki Kajita
Takaaki Kajita
Hitoshi Murayama
Masataka Fukugita
Tsutomu Yanagida
- 18 **Special Contribution**
Nobel Week Report Masayuki Nakahata
- 22 **Our Team** Feng Luo
Matthias Weissenbacher
- 23 **Workshop Report**
Workshop on Astrophysics of Dark Matter
Alexander Kusenko
- TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2015
Masahiro Kawasaki
Shigeki Matsumoto
- PFS-SSP galaxy survey workshop 2015
Kiyoto Yabe
- Categorical and Analytic Invariants in Algebraic
Geometry 1 & 2 Alexey Bondal
- B mode from Space
Hajime Sugai
- 28 **News**
- 32 **Baryon Acoustic Oscillation (BAO)**
Shun Saito

Japanese

- 33 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 34 **Feature**
自然の基本法則をニュートリノで探る
マーク・ハーツ
- 40 **Round Table**
梶田隆章教授ノーベル賞受賞記念座談会
梶田 隆章
村山 斉
福来 正孝
柳田 勉
- 48 **Special Contribution**
ノーベルウィーク報告 中畑 雅行
- 52 **Our Team** 羅 峰
マティアス・ヴァイセンバッハー
- 53 **Workshop Report**
ワークショップ：ダークマターの天体物理学
アレクサンダー・クセンコ
- TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2015
川崎 雅裕
松本 重貴
- PFS-SSP galaxy survey workshop 2015
矢部 清人
- 代数幾何学における圏論的及び解析的不変量 1, 2
アレクセイ・ボンダル
- B mode from Space
菅井 肇
- 58 **News**
- 60 **バリオン音響振動 (BAO)**
斎藤 俊



Mark Hartz is an Assistant Professor at the Kavli IPMU and holds a joint position with TRIUMF laboratory. He is a graduate of the University of Pennsylvania and received his Ph.D in Physics from the University of Pittsburgh in 2008. He became a postdoctoral fellow at the University of Toronto and York University in 2009 and joined the T2K experiment, focusing on the beam monitor, neutrino flux calculations and neutrino oscillation measurements. Since 2013, he has been an Assistant Professor at the Kavli IPMU while collaborating on the T2K, Super-Kamiokande, Hyper-Kamiokande and nuPRISM experiments.

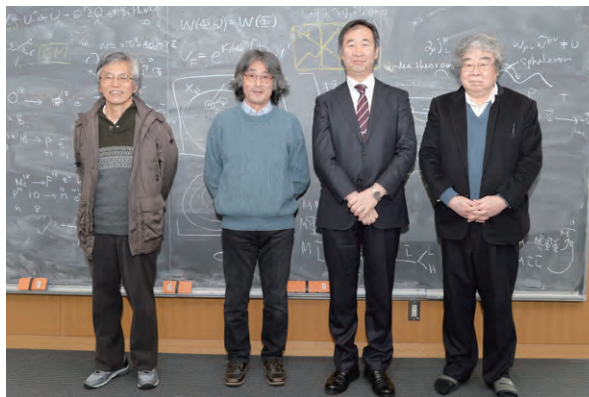
マーク・ハーツ：東京大学Kavli IPMU助教。カナダのTRIUMF研究所研究員を兼務。ペンシルバニア大学卒業後、2008年にピッツバーグ大学より物理学のPh.Dを取得。2009年にトロント大学およびヨーク大学の博士研究員となりT2K実験に参加。主に、ビームモニター、ニュートリノフラックスの計算、およびニュートリノ振動の測定に関する研究を行ってきた。2013年より現職。T2K実験、スーパーカミオカンデ実験、ハイパーカミオカンデ実験、nuPRISM実験に参加している。

Hitoshi Murayama at Work

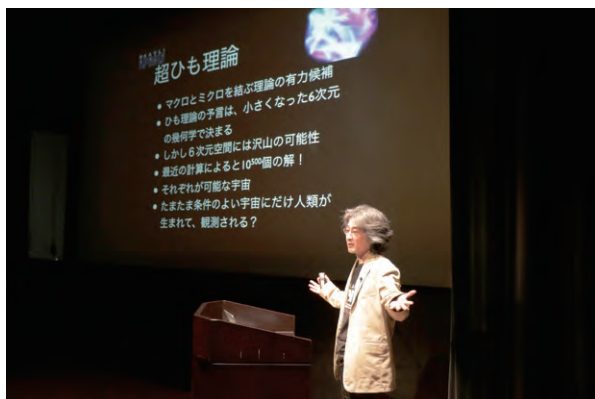
Director of IPMU
Hitoshi Murayama



January 5: Kavli IPMU and the Institute of Statistical Mathematics (ISM) signed a memorandum of understanding on research partnership between the two organizations. From right to left: ISM Director-General Tomoyuki Higuchi, Kavli IPMU Professor Naoki Yoshida, and Hitoshi Murayama.



January 6: From left to right: Tsutomu Yanagida, Hitoshi Murayama, Takaaki Kajita, and Masataka Fukugita, on the occasion of a round-table talk (see p. 10).



January 10: The Kavli IPMU and Tokyo Institute of Technology's Earth-Life Science Institute (ELSI) jointly organized a public lecture entitled "Question of Origins" at Miraikan (The National Museum of Emerging Science and Innovation). (Photo on the left) Hitoshi Murayama giving a talk. (Photo on the right) Discussion of the three lecturers. From left to right: ELSI Director Kei Hirose, Hitoshi Murayama, University of Tokyo's Center for Philosophy (UTCP) Director Shinji Kajitani.



January 18: A commemorative lecture event honoring Nobel Prize in Physics recipient Professor Takaaki Kajita was held at the University of Tokyo's Yasuda Auditorium. (Photo on the left) Hitoshi Murayama giving a talk. (Photo on the right) Hitoshi Murayama and Takaaki Kajita answering questions.



Director's
Corner

Probing the Fundamental Laws of Nature with Neutrinos

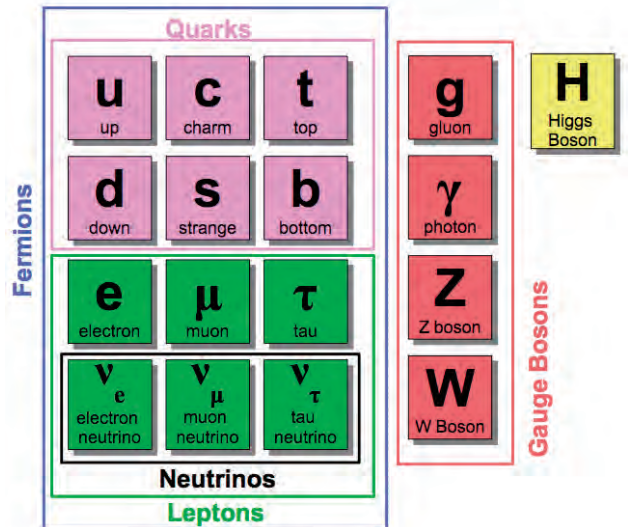
The Standard Model of particle physics describes the fundamental building blocks of matter in the universe and the interactions in which matter participates. Included in the Standard Model are the particles associated with matter itself, the fermions, the particles associated with interactions, the gauge bosons, and the particle responsible for generating the masses, the Higgs boson. The Standard Model also includes anti-particles that have opposite electrical charge and are mirror images of the particles. The ordinary matter we see in the universe is made of the Standard Model particles, but we know that the anti-matter particles exist since they are produced by some physical processes in nature, and they can be produced in laboratories. The Standard Model particles are summarized in Figure 1. The neutrinos are fermions that have a unique position in the Standard Model. Neutrinos are electrically neutral particles that only participate in the weakest type of interactions and have masses much smaller than any of the other fermions. In fact, the neutrino masses are so small that we don't yet know the precise value. However, we can say that the neutrino masses are less than about 1 millionth of the mass of the electron, the next lightest fermion. The mystery of why the

neutrino masses are so small compared to the other fermions can only be solved by expanding our understanding of nature beyond the current Standard Model.

How do we know neutrinos have non-zero masses?

If the neutrino masses aren't precisely known, how do we know neutrinos are not massless like the photon? The discovery of neutrino masses is one of the great stories of science in the last half century. It begins in the late 1960s with the famous Homestake experiment led by Nobel Prize winner Raymond Davis. In this experiment, neutrinos produced in the sun, solar neutrinos, were detected in a deep underground mine in South Dakota, USA. The detected rate of neutrinos was significantly less than what was expected, and scientists considered the possibility that our model of the physics inside the sun was wrong. The mystery deepened in the 1980s when detectors such as the Kamiokande-II detector in Japan also detected indications of a deficit of neutrinos produced when cosmic rays interact in the earth's atmosphere, so-called atmospheric neutrinos. These deficits could be explained by the behavior of neutrinos, rather

Figure 1. The particles in the Standard Model of particle physics are shown. The neutrinos are the lightest fermions, and they only interact by the weak force through the Z and W bosons.



than the processes that produced them. There are three types of neutrinos: electron neutrinos, muon neutrinos and tau neutrinos. Electron neutrinos are produced inside the sun, while the atmospheric neutrinos are predominantly muon and electron neutrinos. In the Homestake or Kamiokande-II experiments, only the electron neutrinos or muon and electron neutrinos were detected, respectively. Hence, if an electron neutrino could transform into a muon or tau neutrino, it would be undetectable by the Homestake experiment. By the same reasoning electron and muon neutrinos transforming into a tau neutrinos would not be detected at Kamiokande-II. This phenomenon called neutrino oscillations could explain the deficits, but it requires that the neutrinos have masses.

Why do neutrino oscillations imply massive neutrinos?

Why do neutrino oscillations require that neutrinos have mass? The electron neutrino, muon neutrino and tau neutrino names are derived from how each type of neutrino interacts. The interactions of electron neutrinos are associated with the production of an electron, while muon neutrino interactions produce muons and tau

neutrino interactions produce taus. Physicists have named this property of neutrinos their flavor and we say that neutrinos can be described by states of definite flavor. Another property of neutrinos is their mass. The mass determines how a neutrino of a particular energy propagates between two points. In the same way that there are states of definite flavor, there can also be states of definite mass. In the strange world of quantum physics, it is possible that each neutrino state of a definite flavor consists of a combination of different neutrinos states of definite mass. When the neutrino of definite flavor is produced, its components of definite mass can propagate differently because the masses are different. This causes the relative fraction of each mass component to vary as the neutrino propagates. After propagating some distance, the neutrino no longer has its initial flavor, but it becomes a combination of the all three flavors and may interact as a different flavor than the original flavor, as illustrated in Figure 2. This process of neutrino oscillations requires that neutrino masses exist and differ, because the differences in propagation due to the neutrino masses cause the oscillation effect.

$\nu_1, \nu_2, \nu_3 = \text{states of definite mass}$

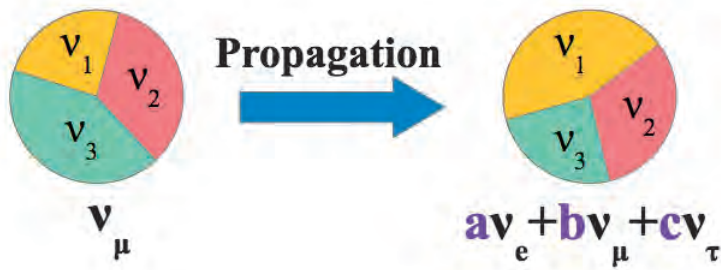


Figure 2. The muon neutrino, ν_μ , of definite flavor is a combination of neutrinos of definite mass, ν_1 , ν_2 and ν_3 . As it propagates, the relative fraction of the mass states changes and the neutrino becomes a combination of the flavor states. The probability to interact as ν_e , ν_μ or ν_τ depends on the size of a , b and c .

The discovery of neutrino oscillations

The hypothesis of neutrino oscillations was triumphantly confirmed by two experiments in the late 1990s and early 2000s. First, the Super-Kamiokande experiment, a larger version of Kamiokande-II, showed that the deficit in atmospheric neutrinos was a real effect and it depended on the distance the neutrinos traveled to reach the detector in a way that was consistent with neutrino oscillations. Soon after, the SNO experiment measured both the electron neutrino rate and the sum of the electron, muon and tau neutrino rates from the sun. They found that total rate from all flavors is consistent with the prediction from solar models, while confirming the deficit of electron neutrinos. This showed that the electron neutrino deficit was due to electron neutrinos oscillating to muon and tau neutrinos. It was for these discoveries that Takaaki Kajita from Super-Kamiokande and Arthur McDonald from SNO received the 2015 Nobel Prize in physics.

Precision measurements of neutrino oscillations at T2K

Since neutrino oscillations have been established,

experimental particle physicists are now engaged in precisely measuring the properties of these oscillations. For precise measurements, we turn to man-made sources of neutrinos. These include neutrinos produced in nuclear reactors and neutrinos made with particle accelerators. The author and colleagues at the Kavli IPMU are collaborators on the T2K experiment, which uses accelerator neutrinos. The accelerator neutrinos are produced by the same process that produces atmospheric neutrinos, but instead of using naturally occurring cosmic rays, we use protons that are accelerated to a large fraction of the speed of light in a particle accelerator. This allows us to produce a high intensity beam of neutrinos where the direction, energy and flavor content of the beam are controlled. T2K stands for Tokai-to-Kamioka, since the neutrinos are produced on the east coast of Japan at the J-PARC accelerator in Tokai-mura and they travel 295 km through the earth to Kamioka, where a very small fraction of them interact in the previously mentioned Super-Kamiokande detector, as illustrated in Figure 3. When a neutrino interacts in Super-Kamiokande, we call this a neutrino event. Since the interaction probability of neutrinos is very low, we only detect



Figure 3. The T2K experiment uses a neutrino beam produced in the J-PARC facility in Tokai-mura on the east coast of Japan. A small fraction of the neutrinos are detected at the Super-Kamiokande detector located 295 km away.

hundreds of neutrino events in Super-Kamiokande, even though more than a billion billion accelerator neutrinos will pass through Super-Kamiokande over the lifetime of the T2K experiment.

The T2K neutrino beam consists of almost 100% muon neutrinos. The main process we are interested in measuring is the oscillation of muon neutrinos to electron neutrinos. At Super-Kamiokande, we can detect the difference between a muon neutrino and an electron neutrino interaction. Recall that electron neutrino interactions produce an electron, while muon neutrino interactions produce a muon. Super-Kamiokande detects the electrons and muons from neutrino interactions through a process called Cherenkov radiation that produces a ring of light on the detector wall. Electrons produce a ring with fuzzy edges, while muons produce sharp ring edges, and this difference can be used to differentiate electrons and muons. Examples of the patterns observed for muons and electrons in Super-Kamiokande are shown in Figure 4.

The muon neutrino to electron neutrino oscillation process is interesting for a couple of reasons. First, its detection marks the first direct evidence of one neutrino flavor oscillating into another specific flavor. Second, this oscillation process can be different for neutrinos and their

anti-matter partners, the antineutrinos. The search for matter/anti-matter asymmetries in the laws of nature connects to our understanding of how the universe came into being. If matter and anti-matter followed the same rules, we would expect the universe to be made out of equal parts matter and anti-matter. Since the universe consists of matter, we search for physical processes that can produce an imbalance. The oscillation of neutrinos is one such process where an imbalance can occur.

In June of 2011, after the operation of T2K was temporarily stopped by the Tohoku earthquake, T2K published the first indication of muon neutrino to electron neutrino oscillations. T2K observed 6 events when only 1.5 events were expected from sources other than oscillations. The probability for the 6 events to be explained by the non-oscillation sources was 0.7%. With great effort, the J-PARC accelerator and T2K experiment were able to recover from the Tohoku earthquake after 1 year, and the experiment resumed. In February of 2014, T2K published an update of the search for electron neutrinos. The new result found 28 events when only 4.9 events were expected from non-oscillation sources. With this number of observed events, the probability that they could be explained by non-oscillation sources dropped to much less

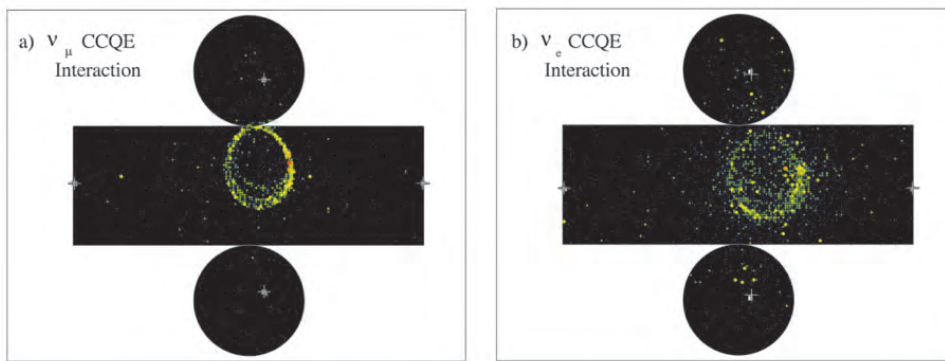


Figure 4. Examples of the simulated pattern observed by Super-Kamiokande when a neutrino interacts to produce a muon (left) and an electron (right). The muons are identified by a ring with sharp edges, while the ring produced by electrons is fuzzy.

than 1 part in a billion, strong enough evidence to claim a discovery of the muon neutrino to electron neutrino oscillation process. The energy distribution of the 28 observed events is shown in Figure 5.

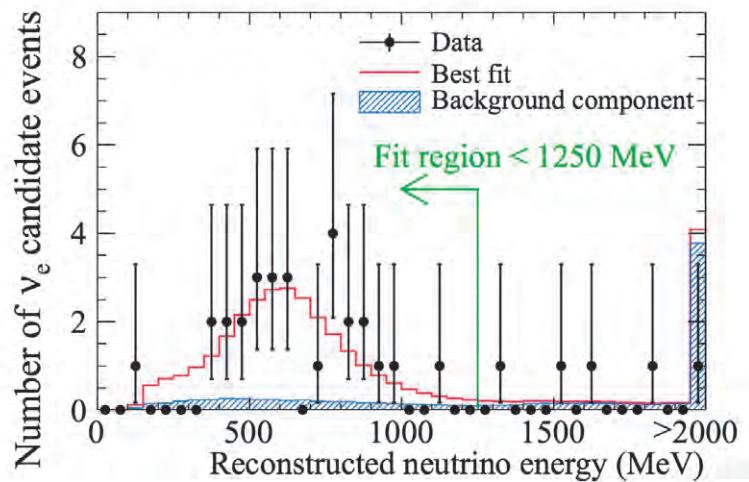
T2K's future and beyond

Now that T2K has discovered the muon neutrino to electron neutrino oscillations, T2K has switched to a beam of muon antineutrinos to search for muon antineutrino to electron antineutrino oscillations. By measuring the rate of this oscillation for both neutrinos and antineutrinos, T2K can search for the previously mentioned matter/antimatter asymmetry. In the summer of 2015, T2K showed its first search for electron antineutrino appearance. 3 events were observed with an expected background of 1.8 events. The amount of data is still too low to claim a discovery of muon antineutrino to electron antineutrino oscillations, but T2K continues to collect more data.

Over the lifetime of the experiment, T2K expects to collect hundreds electron neutrino and antineutrino events. If we are lucky, we may observe the matter/anti-matter asymmetry with 99% confidence. The rate of collecting neutrino

and antineutrino interactions is so low because they only interact weakly. To make an exhaustive search for the matter/anti-matter asymmetry and to make precise measurements of its properties, we need thousands of events rather than hundreds. We can increase the rate of events in two ways. First, we can make the neutrino detector more massive. The current Super-Kamiokande detector contains 50,000 tons of water in which the neutrinos can interact. Scientists in Japan (including the Kavli IPMU) and from around the world have proposed a new neutrino detector called Hyper-Kamiokande, which would be constructed near the current Super-Kamiokande detector. Hyper-Kamiokande would contain 1 million tons of water, making it 20 times more massive than Super-Kamiokande. This would increase the rate of neutrino interactions in the detector by a factor of 20. The second way to increase the neutrino interaction rate is by producing a more intense beam of neutrinos. It is expected that the J-PARC neutrino beam intensity can be increased by at least a factor of 3 by the time that Hyper-Kamiokande is built. The combination of the high intensity neutrino beam and ultra-massive detector will make Hyper-Kamiokande the world's most sensitive experiment

Figure 5. The energy dependence of the observed electron neutrino candidate events by T2K is shown in black. The blue hatched region shows the contribution from non-oscillation sources. The red line shows the contribution from oscillations. The data are consistent with oscillations.



to search for the matter/anti-matter asymmetry in neutrino oscillations.

Summary

Neutrinos play a unique role in the Standard Model of particle physics due to their very small masses, which point to as-yet unexplained physics. In particular, the oscillations of neutrinos provide information about the neutrino masses and may even include a new source of matter/anti-matter asymmetry, which can help explain why the universe consists of matter and not equal parts matter and anti-matter. Scientist at the Kavli IPMU are now involved in the T2K experiment, which uses high intensity of muon neutrino and muon antineutrino beams to search for muon neutrino to electron neutrino oscillations and muon antineutrino to electron antineutrino oscillations. If we are lucky, T2K may discover the first indications of the matter/anti-matter asymmetry in neutrino oscillations with these measurements. Making an exhaustive search for the matter/antimatter asymmetry and precision measurements of the neutrino oscillations will require at least an order of magnitude more neutrino events than T2K

will detect. To achieve this additional sensitivity, scientists from around the world have proposed the Hyper-Kamiokande experiment, which consists of neutrino detector 20 times larger than the current Super-Kamiokande detector. If the Hyper-Kamiokande detector is built, we expect that it will continue the tradition of Nobel prize worthy experimental neutrino physics in Japan that has been established with the Kamiokande and Super-Kamiokande experiments.

Round Table Talk : Conversation with Takaaki Kajita

Takaaki Kajita

Kavli IPMU Principal Investigator

Hitoshi Murayama

Kavli IPMU Director

Masataka Fukugita

Kavli IPMU Professor

Tsutomu Yanagida

Kavli IPMU Principal Investigator

Participated in Proton Decay Search Conducted by Kamiokande

Murayama: Congratulations on the Nobel Prize! I think you must be extremely busy.

Kajita: Yes, the number of e-mails I receive has significantly increased, for instance...

Murayama: You will feel things are tough for a while. Thank you very much for attending this round-table talk even though you are so busy. I'd like to start with a question — why did you decide to join the Koshiba group when you entered the Graduate School of Science at the University of Tokyo?

Kajita: As I wanted to participate in a particle physics experiment, I had a choice between the Fujii-Kamae group and the Koshiba group. Honestly speaking, I didn't have an idea about which to choose.

Murayama: Why did you want to participate in a particle physics experiment?

Kajita: As I was young, I hoped to do research in fundamental science such as elementary particle physics.

Murayama: Were you immediately

involved in the construction of Kamiokande?

Kajita: I had not visited the construction site at all. It was just when the first batch of 20-inch PMTs (photomultipliers) were being produced.

Fukugita: Were you not involved with designing Kamiokande?

Kajita: No, not at all.

Murayama: Do you mean that when you entered graduate school, Kamiokande had been already designed and Professor Koshiba was leading its construction and you just joined it?

Kajita: Exactly.

Fukugita: When did you enter

graduate school?

Kajita: It was April in 1981.

Murayama: At that time, was the Koshiba group still involved in an experiment at DESY?

Kajita: Yes.

Murayama: Who decided a graduate student would do which experiment?

Kajita: I have no idea. At the beginning of 1981, Katsushi Arisaka was writing his master thesis by conducting a Monte Carlo simulation study of the Kamiokande experiment. I had been encouraged by him to work on proton decay search before I realized it [laughs].

Murayama: Was the IMB experiment already running at that time?



Hitoshi Murayama



Takaaki Kajita



Tsutomu Yanagida



Masataka Fukugita

Kajita: It was under construction.

Murayama: It is usually said that Prof. Koshiba worked on the development of 20-inch PMTs in order to compete with IMB. Was it really so?

Kajita: I heard that story only indirectly as you did.

Murayama: Then, the construction of Kamiokande started. I guess there were only a few members in the team at that time — Atsuto Suzuki, Arisaka, you, and...

Kajita: Prof. Teruhiro Suda of the ICRR (Institute for Cosmic Ray Research) and a few more.

Murayama: Yoji Totsuka was not there at that time?

Kajita: Prof. Totsuka returned from Germany in the spring, probably in May, of the year I entered graduate school. He was doing R&D of the OPAL experiment, but helped us because the Kamiokande team suffered from lack of manpower [laughs].

Murayama: At that time, was the Kamiokande project being advanced entirely by the Physics Department at the Hongo Campus?

Kajita: No, Prof. Suda of the ICRR was a member, and Prof. Jiro Arafune, who helped us with theoretical issues, was also at the ICRR. He then moved to the Tokyo Institute of Technology.

Murayama: When was Kamiokande completed?

Kajita: In July 1983.

Kamiokande Observed Neutrino Burst Soon after Being Upgraded

Murayama: From then, how had it been running till the supernova explosion in 1987?

Kajita: Prof. Koshiba was great. I don't remember the exact month, but in the fall of 1983, he already proposed upgrading Kamiokande so as to observe solar neutrinos. He

also put forward the idea of Super-Kamiokande, because Kamiokande was too small for observing solar neutrinos. I think the upgrading of Kamiokande started some time in 1984.

Fukugita: Though Prof. Koshiba was aiming to make solar neutrino observations, the primary reason for him to have proposed Super-Kamiokande was his clear recognition that proton decay would never be discovered unless we had a larger detector than Kamiokande.

Murayama: Did he think so because of IMB? When was the first $p \rightarrow e\pi$ limit reported by IMB?

Kajita: It was in 1982.

Murayama: At that time, was there a prevailing atmosphere that Grand Unified Theories would not work?

Fukugita: We did not conclude so, but ...

Yanagida: The prevailing atmosphere was that we needed a larger detector.

Fukugita: There were lots of arguments in favor of $p \rightarrow \nu K$.

Murayama: SUSY-GUT (Super-symmetric Grand Unified Theories).

Kajita: Yanagida-san, you pointed out the importance of νK . Was it around 1981?

Yanagida: Yes, it was pointed out by Weinberg and by Sakai-Yanagida. It may be that Prof. Koshiba envisioned νK around that time. Anyhow, he is very quick in identifying theoretical issues. In 1981 or in the first half of 1982, I was requested by him to give a seminar on the seesaw mechanism of neutrino mass because he was interested in it. At that time, he was very impressed with my talk, but other people weren't at all [laughs].

Murayama: He has a good sense.

Fukugita: His sense is extremely good.

Yanagida: Yes it is. His flair... How should I put it?

Murayama: So, the Kamiokande team realized that a larger detector was needed for a proton decay search and decided to switch Kamiokande to solar neutrino observation. For that, you constructed an anti-counter and lowered the threshold. Did you then start a new phase aiming to make observations of solar neutrinos and supernova explosions?

Kajita: We did not consciously aim to observe supernova explosions.

Fukugita: A supernova explosion happened by chance when the threshold was successfully lowered.

Murayama: And just a month before it was not possible to observe it because the radon level was too high. As Prof. Koshiba was retiring in a month, there was only a two-month window [laughs]. A supernova had exploded exactly 160,000 years before the middle of this window. Impossible!

Yanagida: Incredibly tiny probability.

Fukugita: Originally, the threshold was near 100 MeV, wasn't it?

Kajita: No, it was 30 MeV. Probably the analysis threshold was about 100 MeV, but it was for electrons.

Fukugita: Around that time, Rubakov pointed out that monopoles, if they existed, would catalyze proton decay.

Murayama: Yes, Callan-Rubakov.

Fukugita: Then, a 30 MeV muon neutrino would be emitted. So I told Prof. Totsuka many times to lower the threshold so as to detect it.

Murayama: That's interesting.

Fukugita: Yes, Prof. Totsuka said it was possible to lower the threshold down to there, and he worked hard with Atsuto Suzuki to achieve it. So, before lowering the threshold down to 6 MeV, there was an intermediate stage to detect 30 MeV neutrinos.

Yanagida: I didn't know that story. I didn't understand why they aimed



at monopole-catalyzed proton decay because I couldn't imagine that experimentalists knew Callan-Rubakov. Fukugita-san, you suggested...

Fukugita: So, they succeeded in lowering the threshold...

Murayama: But, it must have been very hard to further lower the threshold below 10 MeV.

Fukugita: It was really hard, in particular, to lower the radon level.

Murayama: What was the radon removing process?

Kajita: First of all, we didn't know about the existence of radon. We thought that the new hardware would allow us to lower the threshold down to 5–7 MeV as far as we took the accidental rate into account. But actually we found a trigger rate of more than 1,000 Hz. We started by wondering what the reason was.

Murayama: Do you mean that it was difficult to understand it?

Kajita: Prof. Atsuto Suzuki was great. As the trigger rate was 1,000 Hz, he stopped the pure water system. Then, the trigger rate rapidly dropped, and from its decay rate he found that radon might be the reason.

Murayama: How did you move forward with removing impurities from water?

Kajita: First of all, radon decays. So we had to prevent Rn from leaking into the Kamiokande detector. At first, we continuously supplied fresh mine water, that passed through filters, into Kamiokande because mine water

was sufficiently clean.

Murayama: I see. At first, you were not using the water recirculation system.

Kajita: That's true. At the level of Kamiokande, we only needed to recirculate water while keeping its purity. But, as our pure water system was not very good, it was very difficult to do this.

Murayama: So, you managed to lower the threshold down to about 10 MeV only about a month before the supernova.

Fukugita: Probably it was lowered to that level around the end of December, because it was 6 to 7 MeV in January.

Kajita: I don't remember any more, but probably you are right.

Murayama: Then, a month or two after the threshold had been lowered, a neutrino burst suddenly happened. What did you feel at that time?

Kajita: Then, I was staying at CERN. So, I didn't know about it. As I was formally affiliated with the ICEPP at the University of Tokyo, it was my duty to help with the OPAL experiment from time to time.

Murayama: By chance, I heard Maurice Goldhaber's speech at a dinner party before his retirement. He first showed a slide of the Kamiokande's neutrino burst events, and then another slide of the IMB's events. He said, "The IMB events have higher energies. This means that IMB observed the burst slightly after Kamiokande. So, Koshiba got it, but that's life" [laughs]. What

was the actual relation?

Fukugita: Kamiokande was asked by IMB about the burst timing. As IMB had a higher noise level, they searched for and found events at around the timing which they had been informed of.

Murayama: Without knowing Kamiokande's timing, IMB would not have been able to find the events?

Fukugita: I think it would have been difficult. It may be that they would eventually have found them, but not so quickly like that.

Murayama: It sounds like it was important.

Fukugita: Yes, it was extremely important information.

Deficit of the Muon Neutrino Flux

Murayama: After the supernova excitement, Kamiokande finally entered an era of solar neutrino observation. Were you involved with the solar neutrino analysis?

Kajita: No, I was not.

Murayama: Have you been working on atmospheric neutrinos since then?

Kajita: Yes.

Fukugita: Already around that time Kamiokande people were speaking about the atmospheric neutrino problem.

Kajita: No, in the spring of 1987 we never spoke about it to people outside the Kamiokande group.

Fukugita: I heard about a deficit in 1984 or 85, well before 1987.

Kajita: That must be a deficit of muon decays.

Fukugita: In 1984 or 85, I heard from Prof. Totsuka many times about a deficit of muon decays..., no, muon flux. A muon neutrino produces a muon, and an electron is produced from muon decay. When he was working hard on proton decay, he was

already aware of a deficit of that rate.
Murayama: But, the absolute fluxes of atmospheric neutrinos were not very reliable at that time.

Kajita: At that time, we had roughly separated single Cherenkov rings identifying them as being due to muon neutrinos and electron neutrinos. But the problem was that number of electrons from muon decays was significantly less than expected, though the μ/e ratio looked OK.

Fukugita: In 1978, Frederic Reines et al. first reported a muon flux deficit from their experiment in South Africa. They observed only 60% of what they had expected...

Kajita: In their experiment, they used a detector that could count only penetrating muons. They reported the ratio of Monte Carlo prediction/Data was 1.6, but they did not explicitly mention the deficit.

Fukugita: That means 60% of what they had expected. So, the number became known then, but no one believed it would be a reliable flux. Later, IMB also reported a slight deficit earlier than Kamiokande.

Kajita: Actually, the submission date of our paper was a few days behind. Both Kamiokande and IMB reported data showing fewer muon-decay electrons than expected in single-ring events.

Yanagida: When did we suspect the possibility of neutrino oscillations?

Fukugita: Kamiokande's atmospheric neutrino paper¹ published in 1988 describes lots of details, and the possibility of neutrino oscillations is suggested at the end of the paper. But, I believed neutrino oscillations had been discovered when I read their paper² published in 1992.

Kajita: In our paper published in 1992, we somehow doubled the amount of data used and reported an allowed

region in the neutrino oscillation parameter space.

Fukugita: At that time, you reported the double ratio, the observed ν_μ/ν_e to the expected Monte Carlo value. It was not 2:1 as expected, but about 1.2:1. That means that the ν_μ flux was about 60% of the expected value. The flux uncertainties were cancelled out because you took the double ratio.

Murayama: But, calorimeter experiments like Frejus did not observe the ν_μ flux deficit at that time.

Fukugita: That's right. Both Nusex and Frejus reported no ν_μ flux deficit.

Murayama: They said something like "Particle identification conducted in a water Cherenkov detector may be wrong," because only water Cherenkov detectors observed the ν_μ flux deficit.

Fukugita: Yes. At that time, Prof. Totsuka said, "If it's wrong, we could lose our credibility." He was very nervous.

Believed the Correctness of Kamiokande's Particle ID Algorithm

Murayama: Kajita-san, did you first devise Kamiokande's particle identification algorithm?

Kajita: Yes, I devised an algorithm which, in the case of multi-ring events, identified particles by calculating electron-type and muon-type probabilities for each Cherenkov ring. When I applied it to the simplest

case, namely, single-ring events, I found a significantly smaller number of muons than expected. It was around autumn in 1986. Then, I first realized something strange in atmospheric neutrinos.

Murayama: At that time, few people believed it was possible to reliably distinguish between clear muon single rings and fuzzy electron rings?

Kajita: I believed so, because cosmic-ray muons were identified as muons with more than 98% probability, but ...

Murayama: What did the people around you think? I mean, as a community.

Kajita: I have no idea about that. Probably people were confused because soon after our paper, Frejus and Nusex published papers in which they reported no observation of a ν_μ deficit.

Murayama: Do you mean that there were various opinions even inside the Kamiokande group?

Kajita: Yes. Thanks to Professor Koshiba we could publish our paper in 1992, I think.

Murayama: Do you mean that he thought it was very interesting?

Kajita: Rather than that, he advised me, "You must write the next version of the paper, because the current paper remains unsatisfactory."

Fukugita: The paper published in 1992 was very important.

Yanagida: We published our neutrino oscillation paper³ at a rather earlier



time. I think it was because we had close contact with the Kamiokande group. We believed their results. Then, we thought if we could build a model...

Fukugita: We published it in 1993, about a half year after Kamiokande's publication in 1992. What most people did not believe was nearly maximum mixing. They thought "How do you explain it?"

Murayama: It was a prejudice.

Fukugita: Normally, we think the mixing angle ($\sin \theta$) is about the square root of the mass ratio. Then it cannot be that large. However, adopting Yanagida-san's seesaw mechanism, you can take the square root once again. The 4th root of a small number is nearly 1.

Yanagida: That is peculiar to the seesaw mechanism. The root of a root is 1.

Murayama: In 1991, I finished graduate school and went to Tohoku University. There, Yanagida-san immediately told me to see if atmospheric neutrino Monte Carlo was really reliable. So, I made a simulation to see if $\nu_\mu:\nu_e$ was really 2:1.

Yanagida: Did I tell you that?

Fukugita: Around that time, it was proposed that the $\nu_\mu:\nu_e$ ratio may shift from 2:1 if you take muon polarization into account. But, calculations showed that it produced only a small effect.

Murayama: I found that the ratio was really 2:1 even if I took every possible effect into account. When did you see the zenith-angle dependence?

Kajita: It was first reported in our paper published in 1994.⁴

Murayama: It took a very long time.

Kajita: Yes, it really took a long time from 1988 when we started. We had accumulated data for 6 years, and

finally we wrote a paper. We felt, "It wouldn't help if we waited any longer."

Murayama: Because Kamiokande's fiducial mass was only 1,000 tons, it was difficult. Moreover, looking at the zenith-angle distribution, only the first bin was significantly high, but the other four bins could be reasonably fit to a flat distribution. So, I felt uneasy like, "Is there really zenith-angle dependence?"

Kajita: The double ratio compares the data and Monte Carlo of the μ/e ratio. Then, as the observed number of electron events was small, the double ratio didn't show a clear zenith-angle dependence. Instead, if you look at muons only, you can see an up/down asymmetry with about 99% probability. But, 99% probability is less than 3σ .

Murayama: Was it not possible to see upward-going muons in Kamiokande?

Kajita: We did publish it, but probably later in 1998.

Murayama: Oh, that late.

Kajita: Yes.

Murayama: IMB measured upward-going muons, and from the stop/through ratio they reported an excluded region in the neutrino oscillation parameter space.

Fukugita: It was around 1994.

Murayama: Looking at their paper now, they very clearly excluded...

Kajita: Doubly excluded the perfectly right region.

Murayama: What caused that? Was that due to background?

Kajita: I do not remember precisely, but I think it was caused by something going slightly wrong.

Murayama: In the meantime, construction of Super-Kamiokande started.

Kajita: It started in 1991. It was

completed and the data-taking started on April 1, 1996.

Murayama: When did the main force of the IMB group join?

Kajita: I think it was around 1992.

Murayama: Oh, immediately after the construction had started. They joined Super-Kamiokande, because they could not fix the water leak of the IMB tank.

Kajita: Yes, it was due to their reason.

Murayama: Did the Japanese group accept them immediately?

Kajita: Basically, yes.

Obtained Decisive Evidence from Super-Kamiokande

Murayama: Having started data-taking in 1996, you very quickly accumulated the data. Soon the up/down asymmetry of muon neutrinos showed up. Then were you very excited?

Kajita: At that time, I was very glad at heart.

Murayama: Around the end of 1997, Hank Sobel visited Berkeley as a colloquium speaker. He showed data indicating a large up/down asymmetry. So, I said to him, "It looks more than 5σ . Why don't you announce it as a discovery?" He answered, "No, I cannot say my personal opinion, because this is the Collaboration's result" [laughs]. How did it converge to a level that allowed a real announcement to be made? You had been showing the data without concealing anything at all.

Kajita: Super-Kamiokande always presents the data when they are summarized. So, we did not conceal the data at all.

Murayama: What kind of discussion was there in the group before you finally announced the evidence at the International Conference in Takayama?

Kajita: I don't remember, but probably we had been waiting until it was confirmed that we could consistently explain everything such as upward-going muons.

Murayama: Then, you thought that only the zenith-angle dependence of the multi-GeV events was not sufficient. It was not until you obtained other pieces of supporting evidence... At that conference, I was deeply moved. Originally, the conference had been scheduled to be held in Sudbury, Canada, but because of a delay in SNO's construction the venue was changed to Takayama at short notice. It was the right decision for Japan to have hosted it.

Fukugita: Around that time, neutrino oscillations were obvious to me. So, I wasn't very excited [laughs]. For me, Kamiokande's paper in 1992 was extremely important. I firmly recognized the reality of neutrino oscillations.

Murayama: But, for the first time in 1998 it was shown experimentally with more than 5σ that the Standard Model is not perfect. Then, after you had shown the data in 1998, what reaction to you did the people around or the entire community have? My impression was that everybody believed it soon.

Kajita: I had the impression that it was accepted more than expected.

Murayama: Do you mean you expected quite a bit of objections?

Kajita: I expected some, because I had continuously witnessed those things for 10 years [laughs].

Fukugita: It might have been different if there had not been a prehistory before 1998. Because of that, people thought "Atmospheric neutrinos may possibly oscillate with a large mixing angle." So, by looking at the decisive data presented in 1988 they felt at

ease, like "Yes, that's it!"

Murayama: I also felt that it gradually converged. Though the Soudan experiment had a calorimeter detector, that group started to report a low double ratio. At KEK, a water tank was built to check the particle identification capability. It is true that the uneasy factors were gradually removed. But I remember around that time I heard many collider people saying things like "As a water Cherenkov detector is not very precise, it is unlikely that such a kind of thing will be clarified with it." So, I found some PhD thesis on Super-Kamiokande's website and read it thoroughly. This thesis carefully studied various systematic errors. Then, when I was staying at CERN I held a seminar. It was after the Takayama Conference. I mentioned what I understood about atmospheric neutrinos, such as to what extent various factors were reliable. Many experimentalists staying at CERN came to this seminar. They were mostly skeptical at that time.

Fukugita: I think John Bahcall was very skeptical even after the Takayama Conference. He asked me many times, "Is their experiment reliable?"

Future Direction of Neutrino Physics

Murayama: Well, what is future direction of neutrino physics?

Fukugita: Investigations of (neutrinoless) double beta decay.

Murayama: KamLAND-Zen is leading the world now.

Fukugita: The present effective mass limit from KamLAND-Zen is somewhere between 120 and 250 meV, considering rather large uncertainties in nuclear matrix elements. However, in the case of the normal neutrino mass hierarchy, the

effective mass is 5 meV...

Murayama: Normal hierarchy is very difficult. The effective mass can be even zero.

Fukugita: The effective mass is zero if cancellation occurs due to opposite CP phases. Even if we exclude this possibility, the present limit is 50 times greater than 5 meV. That means a detector volume that is 2,500 times larger is needed.

Kajita: The factor 2,500 is for the case of no background. Background, if there is any, makes things worse.

Fukugita: Even for the inverted hierarchy, if we assume the effective mass to be 40 to 50 meV, it means an improvement by a factor of five, which in turn means a factor of 25 in volume. It would be difficult to make KamLAND bigger.

Murayama: There is an idea of suspending a balloon in Super-Kamiokande.

Fukugita: Even if you do it, it will be impossible to discover double beta decay during my lifetime if the normal hierarchy is the true one.

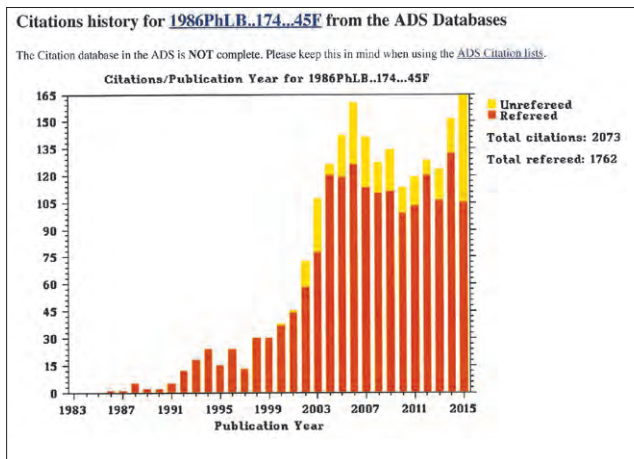
Murayama: Do you think it is possible to verify leptogenesis?

Fukugita: It's difficult. We were motivated by Rubakov et al.'s argument⁵ that baryons created by normal baryogenesis will be completely washed out. At first, I suspected their argument was wrong, but accepted it in due course. So, I thought we should try to find a solution.

I have an interesting plot here. Yanagida-san and I wrote this paper⁶ in 1986.

Murayama: You published it in 1986. It was well before the discovery of neutrino oscillations.

Fukugita: This plot shows the yearly number of citations of the leptogenesis paper. We published



it here, but at first it was very poorly accepted. In 1998, neutrino oscillations were accepted by the community, and thereafter the number of citations per year has increased. Recently, this paper has been having about 120 or 130 citations every year. These data are taken from ADS (Astrophysics Data System). SPIRES (database of particle physics literature) will give slightly higher citation numbers for this paper.

Murayama: Oh, I get it [laughs]. It's due to greater credibility since the discovery of neutrino oscillations.

Kajita: After the first few years of the 2000s, we started to extensively discuss how to explore CP violation in the neutrino sector. In relation to it, the importance of leptogenesis has been highlighted.

Yanagida: I am very happy with it. It means that theoretical physics has greatly developed thanks to experiments. This sort of thing does not happen so often. If double beta decay is discovered, it will be... [laughs].

Fukugita: You can readily understand to what extent there is a delay in the increase in the number of citations. At first, we submitted our leptogenesis paper to *Physical Review Letters*, but it was rejected.

Murayama: Oh, was it?!

Fukugita: At that time, Yanagida-san was staying at DESY. So we submitted it to *Physics Letters* and it was accepted soon.

Yanagida: Yes, it was.

Fukugita: So, its publication was delayed by three or four months. As I said, at first it had a very poor reputation. So, a long-range view is really needed.

Yanagida: It's a good example of it. But, this paper would not have been widely noticed if there had not been neutrino oscillation results from experiments at Kamioka. I feel it is very impressive.

Sakharov's three conditions for creation of matter in the universe are baryon number violation, CP violation, and departure from thermal equilibrium. To come up with leptogenesis, we changed only one factor in Sakharov's framework, namely we changed the baryon number to B-L. Then we came up with the prediction that neutrinos have Majorana masses. I think this prediction corresponds to Sakharov's prediction of proton decay. Even if it is not possible to really check leptogenesis, non-zero neutrino mass has been experimentally verified.

Fukugita: Furthermore, it predicts a plausible neutrino mass. It is interesting that the average neutrino mass should be less than about

100 meV. For a heavier neutrino mass, it's not possible to create a baryon number.

Murayama: Yes, the baryon number is washed out.

Yanagida: It's very important.

Fukugita: It is a very important result of Buchmüller et al.'s calculation.⁷

This 100 meV is comparable to every limit. The upper limit from double beta decay is 120 meV. Should double beta decay be discovered there, leptogenesis would get into difficulties. Also, the present limit for the sum of three neutrino masses from cosmology is less than 200 meV. **Murayama:** Well, it is analysis-dependent.

Fukugita: Analysis is difficult. What I can trust is a limit of less than 600 meV for the sum of three neutrino masses, because it uses only CMB (cosmic microwave background). A limit of 200 meV uses BAO (baryon acoustic oscillations). That aside, 200 meV divided by 3 gives 60 meV. It is the present goal of double beta decay as well as cosmological constraint. So, the next goal is about 50 meV.

Yanagida: In that sense, leptogenesis will be seriously checked from now on, as to whether the upper limit of neutrino mass will be lowered from 100 meV or 50 meV. If neutrino mass turns out to be near these finite values, leptogenesis would be strongly constrained.

Fukugita: For now, everything indicates neutrino mass to be less than this upper limit. It is sort of like searching for a sunken ship in the Pacific Ocean.

Yanagida: We should recognize that. It is very important if the upper limit is really lowered.

Fukugita: Lowering this limit as much as possible is meaningful even if

the result is not drastic. Of course, searching for double beta decay is the best way. But, if the normal hierarchy were true, it would be hopeless.

Kajita: How about if the inverted hierarchy is true?

Fukugita: Still difficult. As the target is 40 meV, you have to lower the limit by a factor of 5.

Kajita: My impression is that it may be possible to lower it by a factor of 5. It should be manageable one way or another during our lifetime.

What Will Be the Next Discovery in Neutrino Physics?

Murayama: What will be the next surprise, if there is any, in neutrino physics?

Yanagida, Kajita: Inverted hierarchy.

Murayama: How about sterile neutrinos?

Fukugita: I don't think they exist.

Yanagida: I don't believe in them.

Murayama: Will you be astonished if inverted hierarchy is proved true?

Yanagida: If so, it will be astonishing. In some meeting, probably at DESY, Ed Witten said, "Neutrinos' large mixing angle was a great surprise. We may have another surprise." He stopped without saying anything more. I wonder what the surprise is. Is it inverted hierarchy?

Fukugita: If inverted hierarchy should be true, it would be a surprise. It would be almost impossible to explain it.

Yanagida: It will be possible for me to put forward a far-fetched argument [laughs].

Fukugita: Yanagida-san is great. He can always put forward a far-fetched argument [laughs].

Yanagida: After all, double beta decay is important, isn't it?

Murayama: Double beta decay and

cosmology.

Fukugita: In cosmology, the most reliable results are obtained by using only CMB. But, the limit comes from the fact that matter is nonrelativistic at the epoch of recombination. So, using only CMB, we cannot lower the limit too much. This is a difficult point for cosmology.

Murayama: Then, if we emphasize the surprise, our tentative goal should be showing a large neutrino mass and excluding leptogenesis [laughs].

Hoping for Coincident Supernova Observation by KAGRA and Super-K

Murayama: Kajita-san, what is your future plan with neutrino physics? I think you must be very busy with the KAGRA gravitational wave experiment for the moment.

Kajita: As the neutrino community want to see Hyper-Kamiokande achieved, I'd like to support it as much as I can.

Murayama: What is your view on the prospects of KAGRA?

Fukugita: What is the prospect of detecting gravitational waves?

Kajita: I think we have good possibilities.

Murayama: We can expect to conduct astronomy with it. Some supernova explosions may not be optically observed, but can be detected by gravitational waves.

Fukugita: I think supernova explosions would not emit gravitational waves too much. So, should they be detected by gravitational waves, clearly it would be a surprise.

Murayama: For instance, if the gravitational collapse of a massive star forms a black hole, no supernova explosion occurs. Then, it can be observed only by neutrinos and gravitational waves. It cannot be seen by telescopes. Such a scenario

may be quite possible. It would be very interesting if KAGRA and Super-Kamiokande detected signals at the same time at Kamioka, but telescopes observe nothing.

Fukugita: If that happens, it's great. It would be much more interesting if signals were detected only in Japan [laughs].

Murayama: The third Nobel Prize from Kamioka may not be a dream.

Fukugita: You have to have another gravitational wave detector somewhere for coincident signal detection. With a gravitational detector, you have so many signals with more than 10σ significance.

Murayama: Coincidence is important.

Kajita: We expect coincidence with LIGO in the U.S. LIGO is already running.

Murayama: Well, time's up now. Kajita-san, good luck in your future. I am really happy with your Nobel Prize. It means a lot to me.

Kajita: Thank you very much.

¹ K.S. Hirata et al., "Experimental Study of Atmospheric Neutrino Flux," *Phys. Lett. B* **205** (1988) 416.

² K.S. Hirata et al., "Observation of a Small Atmospheric ν_μ/ν_e Ratio in Kamiokande," *Phys. Lett. B* **280** (1992) 146.

³ M. Fukugita, M. Tanimoto, and T. Yanagida, "Phenomenological Lepton Mass Matrix," *Prog. Theor. Phys.* **89** (1993) 263.

⁴ Y. Fukuda et al., "Atmospheric ν_μ/ν_e Ratio in the Multi-GeV Energy Range," *Phys. Lett. B* **335** (1994) 237.

⁵ V.A. Kuzmin, V.A. Rubakov, and M.E. Shaposhnikov, "On Anomalous Electroweak Baryon-Number Non-Conservation in the Early Universe," *Phys. Lett.* **155B** (1985) 36.

⁶ M. Fukugita and T. Yanagida, "Baryogenesis without Grand Unification," *Phys. Lett. B* **174** (1986) 45.

⁷ W. Buchmüller, P. Di Bari, and M. Plümacher, "The Neutrino Mass Window for Baryogenesis," *Nucl. Phys. B* **665** (2003) 445.

Nobel Week Report

Masayuki Nakahata

Kavli IPMU Principal Investigator

During the week of December 6–12, 2015, the Nobel Prize Award Ceremony and related festivities took place in Stockholm. As I was invited by Dr. Takaaki Kajita as a guest to attend these amazing festivities, I would like to report on Nobel Week 2015.

On December 6, there was a laureates' get-together at the Nobel Museum, and they each donated to the museum collection an object connected to their work. Dr. Kajita donated a 20-inch diameter photomultiplier (PMT) for the Super-Kamiokande's inner detector as well as an 8-inch PMT for its outer detector. Also, Dr. Arthur McDonald donated 500-ml bottles, each containing the same volume of heavy

water (D_2O) which was used in the SNO experiment, and light water (H_2O). They were put on each side of a balance. These donations are displayed together in the same box, as shown in Photo 1. When Professor Masatoshi Koshihara was awarded the Nobel Prize in Physics in 2002, he donated a 20-inch PMT, which had actually been used in the Kamiokande experiment. I also saw it in the Nobel Museum. Though only a few dozen donations from laureates are exhibited in the Nobel Museum because the building is not that large, there are two 20-inch PMTs among them. I felt it was a great honor. On that day, laureates signed the undersides of the chairs according to the tradition of the Nobel Museum. Photo 2 shows

the chair with the signatures of Dr. Kajita and Dr. McDonald.

The Nobel Lectures in Physics took place on December 8 at the Aula Magna, Stockholm University. Though the venue was a big auditorium with a capacity of 1,200, it was almost full. I was particularly surprised that there were so many young people who appeared to be university students. I felt envious of those students in Stockholm, because they can hear the historical lectures of Nobel laureates every year. After Royal Swedish Academy of Sciences President Christina Moberg's address and the Nobel Committee for Physics 2015 chairperson Anne L'Huillier's introduction, Dr. Kajita presented his 30-minute lecture (see Photo 3).



Photo 1: A 20-inch PMT and an 8-inch PMT for the Super-Kamiokande experiment and heavy water (D_2O) used in the SNO experiment and light water (H_2O). They were donated to the Nobel Museum.



Photo 2: A chair with the signatures of Dr. Kajita and Dr. McDonald displayed in the Nobel Museum.



Photo 3: Dr. Kajita giving his Nobel Lecture.



Photo 4: Nobel Concert. Dr. and Mrs. Kajita sitting in front of the camera.

He told the story of Kamiokande's startup around 1983; the story of his data analysis around 1986, which led to the discovery of atmospheric neutrino oscillations; and the story of Super-Kamiokande's startup. He then showed the famous slides he presented at the 1998 Neutrino Conference. He also mentioned that long baseline neutrino oscillation experiments have confirmed neutrino oscillations, that the third oscillation mode was discovered in the 2010s, and that large-scale future experimental facilities are being planned, aiming at starting in the 2020s. Finally, he acknowledged his collaborators in the Kamiokande and Super-Kamiokande experiments.

Subsequently, Dr. McDonald gave a 30-minute lecture. He said

that solar neutrino observations have been conducted based on the great achievements by Hans Bethe, William Fowler and others; how the SNO experiment was started; and how solar neutrino oscillations were discovered. He also said future experiments were now under preparation at the SNOLAB. Finally, he acknowledged his 262 collaborators who are coauthors of the SNO's papers.

At noon on that day, the Embassy of Japan hosted a reception at an elegant hall in the Grand Hotel, where the laureates and their guests stayed. After Ambassador Jun Yamazaki's opening address, the 2015 Nobel laureate in Physiology or Medicine, Dr. Satoshi Omura, gave his speech, followed by Dr. Kajita. As

young Japanese postdocs working in Sweden attended this reception, I had a chance to speak with young researchers in the field of physiology.

In this evening, the Nobel Prize Concert was held at the Stockholm Concert Hall (see Photo 4). The performance of the gifted twenty-four-year-old pianist Daniil Trifonov was simply overwhelming. After the audience enjoyed a glass of champagne in the intermission, at the beginning of the second half, conductor Franz Welser-Möst gave a speech in which he said that Nobel laureates in science are working on reality, but music can go beyond reality.

In the evening of December 9, a reception was given by the Nobel Foundation and the Royal Swedish

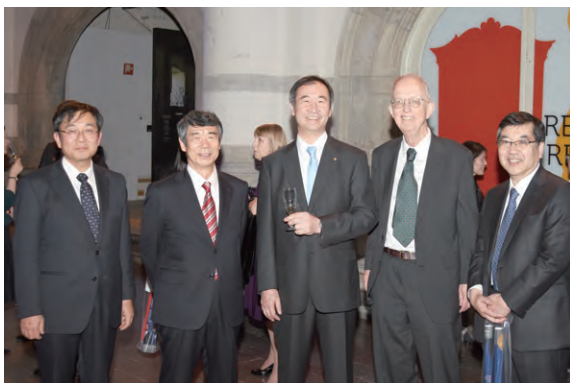


Photo 5: President of the University of Tokyo Gonokami (right) and old Kamiokande members at the Nobel Reception.



Photo 6: Dr. Kajita and his guests from the Super-Kamiokande group.



Photo 7: Nobel Prize Award Ceremony. Copyright © Nobel Media AB 2015, Photo: Pi Frisk

Academy of Sciences at the Nordic Museum. In the hall of the Museum, executives of the host organizations shook hands with each attendant. President of the University of Tokyo Makoto Gonokami was also invited to the Nobel Week as a guest; Photo 5 was taken with old Kamiokande members during the reception.

The highlights of Nobel Week, the Nobel Prize Award Ceremony and the Nobel Banquet, took place on December 10. The dress code for men for the festivities up to December 9 was business suit or dark lounge suit (for the Nobel Concert), but the dress code for men for the Award Ceremony and Banquet was white tie and tails. We had sent our measurements for renting men's formal attire before leaving for Stockholm, so a tuxedo was prepared for each guest by a tailor in Stockholm. In the afternoon of

December 8, guests visited this tailor for fitting and to learn how to put on a tuxedo. Guests gathered in formal attire on December 10. Photo 6 shows Dr. Kajita and his guests from the Super-Kamiokande group, taken in the hotel just before leaving for the

Award Ceremony.

The Nobel Prize Award Ceremony was held at the Stockholm Concert Hall with about 1,500 guests. The Hall, where the Nobel Concert had been held two days before, was rearranged for the Ceremony. Photo 7 shows the



Photo 8: Dr. Kajita receives his diploma and medal from King Carl XVI Gustaf of Sweden. Copyright © Nobel Media AB 2015, Photo: Pi Frisk

stage of the Award Ceremony. The Nobel Prizes in Physics, Chemistry, Physiology or Medicine, Literature, and the Nobel Memorial Prize in Economic Sciences were awarded, in this order. Dr. Kajita was the first laureate to be awarded the Prize (see Photo 8). For each Prize category, after a presentation speech to extoll the work of the laureate(s) in Swedish, King Carl XVI Gustaf of Sweden presented a diploma and medal to each laureate. When the Prize was presented by the King, the audience rose and a fanfare resounded through the Hall. I was deeply moved by this solemn Award Ceremony. Photo 9 shows Dr. Kajita's medal and diploma.

The Nobel Banquet took place in the City Hall, attended by 1,300 people (see Photo 10). When the laureates, the King and Queen and other members of the Royal Family of Sweden, as well as the other main guests walked into the hall, Dr. Kajita was escorted by Princess Sofia (wife of Prince Carl Philip). The meal started off with hors d'oeuvres (turbot and scallop with sea plants) followed by roasted veal wrapped in mushrooms as the

main course and coffee and almond flavored cherry blossom for dessert. I felt that the menu was thoughtfully and creatively elaborated. There was an after dinner speech given in each Prize category. Dr. McDonald gave a speech as laureate in Physics. He began his speech by saying, *"Today I am speaking for Prof. Kajita and our two scientific Collaborations, SuperKamiokande and SNO, of which there are a number of representatives here with us today."* Let me quote the main part of his speech.

*"... It has been said that behind every success there is effort, behind the effort there is passion and behind the passion there are people with the courage to try. Prof. Kajita and I have been very fortunate to have many highly skilled and courageous collaborators and we thank them for their contributions to our success. There are several founders of our collaborations who have passed away that we would particularly like to remember: Yoji Totsuka for SuperKamiokande and Herb Chen for SNO. We will be forever thankful for their contributions to the success of our experiments."**

After the banquet, there was the Students' Nobel NightCap organized

by the Stockholm University Student Union from midnight until 5 am. I did not join it, but a participant told me that it was something like a campus festival.

On December 11, BBC recorded a program called "Nobel Minds," which is a round-table discussion program. The Nobel laureates sat around a table surrounded by students, and the laureates answered questions from the students. It was a nice program because we can hear what laureates think about their respective fields of research from a global point of view. If you are interested in this program, you can watch it on the BBC or Nobel Foundation's websites.

Having attended Nobel Week, what I felt most strongly was the fact that many students and citizens are interested in science in general and they enjoy the brilliant achievements of the Nobel laureates. In Japan, our interest tends to focus on Japanese Nobel laureates. Looking at Scandinavian people who approach science from a global point of view, I felt the importance of history.

* http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/mcdonald-speech.html, Copyright © Nobel Media AB 2015



Photo 9: Dr. Kajita's Nobel Prize medal and diploma.



Photo 10: Nobel Banquet. Copyright © Nobel Media AB 2015, Photo: Alexander Mahmoud

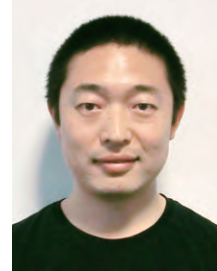
Our Team

Feng Luo

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

My research interests are at the interface of theoretical particle physics and cosmology. I am especially interested in theoretical models with testable predictions, and I am studying how to describe various physical phenomena within a consistent framework. An attractive framework is supersymmetry, which provides one solution to several fundamental questions. In addition to the intrinsic elegance of the theory, supersymmetry is phenomenologically attractive because we can now test it in the Large Hadron Collider and dark matter



search experiments, as well as check it against cosmology including Big-Bang nucleosynthesis. I believe a thorough exploration of this framework can guide us to find a clearer path and new directions in looking for beyond the Standard Model physics.

Matthias Weissenbacher

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

My research interests lie in the field of string phenomenology, which connects the UV complete framework provided by Superstring theory to field theoretical models such as the Standard Model of particle physics and cosmology. The connection is established using “string effective actions,” given by certain supergravity theories. Especially beneficial is the approach over F-theory, which is best accessed through eleven-dimensional supergravity and allows to deduce $4d$, $N=1$ supergravity theories that exhibit chiral spectra and exceptional gauge groups relevant for Grand Unified Theories. My current



focus is on string theory induced α' , g_s and Kaluza-Klein corrections to these supergravity theories. The study of the modified dynamics of these effective theories, especially the determination of their vacuum structure, is of crucial phenomenological importance and also of significant conceptual interest.

Workshop on Astrophysics of Dark Matter

Alexander Kusenko

Professor of Physics and Astronomy at UCLA
and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

The *Astrophysics of Dark Matter* focus week, held at the Kavli IPMU on October 13 - 16, 2015 brought together particle physicists and astrophysicists to discuss one of the most intriguing mysteries in the universe, the mystery of dark matter.

Most of the matter in the universe is dark matter; it is not composed of ordinary atoms, but, rather, of new, yet undiscovered particles. The presence of dark matter is seen by its gravity. Dark matter mass can be measured in several ways. First, gravitational lensing observations, using the bending of light by massive objects, can determine the masses of the "lenses" composed of dark matter. Second, the temperature of gas in clusters of galaxies, inferred from x-ray observations, can be used to determine the depth of the potential well containing this gas. Third, the spectrum of temperature fluctuations in the cosmic microwave background radiation left from Big Bang can be used to measure the ratio of all gravitating matter to ordinary matter, which, unlike dark matter, feels the pressure of photons. Finally, the measured speeds of galaxies in clusters and of stars in galaxies tell us about the gravitational pull of the mass in those objects. All of these independent measurements converge on the same number: dark matter outweighs ordinary matter by more

than a factor five.

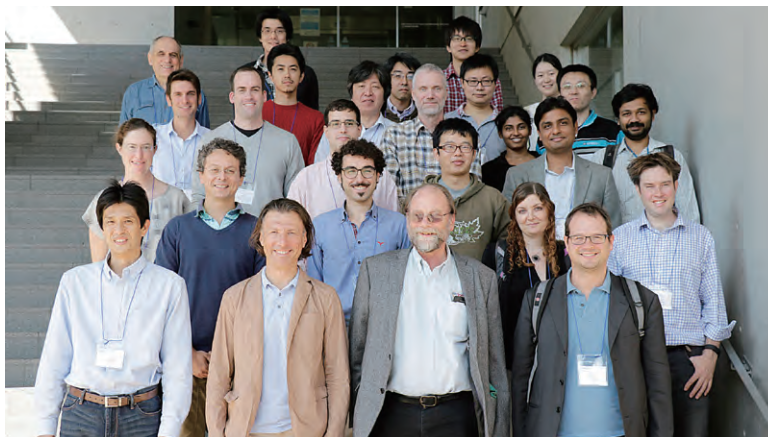
However, the composition of dark matter remains a mystery. One can show that none of the particles discovered so far can make up dark matter, and, therefore, identification of dark matter will be a discovery of at least one new particle, taking science in a new direction beyond the standard model of particles and interactions.

To solve the mystery of dark matter, one must understand any non-gravitational interactions it might have because these interactions may allow us identify the dark matter particles. Astrophysics can probe the nature of dark matter in several ways.

Dark matter has played a leading role in forming structures we see in the universe today, such as galaxies, clusters of galaxies, etc. The smallest possible structures in the universe depend on whether dark matter is cold or warm, that is, how fast the dark matter particles were moving at the dawn of structure formation. The density profiles of dark matter halos can also be affected by self-interactions of dark matter particles with each other. Observations of dwarf spheroidal galaxies, and the determinations of the dark matter profiles of galaxies and clusters can

shed light on the properties of dark matter particles.

Several recent developments made the workshop timely and exciting. The possibility that a reported 3.5 keV X-ray line originates from decay of dark matter, coupled with some anomalies of structure formation on sub galactic scales were at the focus of discussion. Recent breakthroughs in N-body simulations of dark matter, which allow a better description of dark matter (cold and warm), as well as baryons, promise to provide better tools for relating small-scale structure to the properties of dark matter. The proliferation of particle physics models with self-interacting dark matter raises new questions in connection with astrophysical manifestations of microscopic properties of dark matter particles, from halo shapes and triaxiality, to density profiles, to cluster collisions, to supermassive black hole formation. N-body simulations are reaching new levels of understanding of dark matter and baryonic matter; observational techniques using gravitational lensing are maturing. All of these developments made it timely to bring together astrophysicists and particle physicists for a productive discussion.



TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2015

Masahiro Kawasaki

Kavli IPMU Principal Investigator

Shigeki Matsumoto

Kavli IPMU Associate Professor

The conference “TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2015” was successfully conducted at the Kashiwa-no-ha Conference Center October 26–30, 2015. It was organized by the Kavli IPMU and the Institute for Cosmic Ray Research of the University of Tokyo. Having a conference dedicated to the current situation and future prospects of TeV particle astrophysics was an important and timely idea for the following reasons. First, the origin of cosmic rays is now being resolved thanks to great strides in the development of particle astrophysics. These include the observations of gamma rays (at HESS, etc.), high energy neutrinos from outside the earth’s atmosphere (at IceCube, etc.), and various cosmic-ray species with unprecedented accuracy (at AMS-02, etc.). Second, TeV particle astrophysics provides us with precious data to search for dark matter, in particular, when its mass is of the order of TeV rather than the electroweak scale, for such heavy dark matter is difficult to detect in collider experiments in the near future.

All of these topics were covered in great depth at the conference, which included fifteen plenary talks and four parallel sessions (dark matter, neutrino, cosmic-ray, and gamma-ray sessions). Concerning neutrino physics, data on high energy neutrinos were accumulated and their origin was discussed in plenary and contributed talks. The future prospects of neutrino observations were also discussed. Another important subject in the conference was ultra-high energy cosmic rays whose spectrum, compositions, and anisotropy were attracting great interest from participants. Gamma-ray astronomy has been developing with large Cherenkov detectors and is expected to reveal the acceleration mechanism of cosmic rays and properties of source objects. Thus, many aspects of gamma-ray astronomy were covered and intensively discussed in the conference.

On the other hand, concerning dark matter studies, most of the plenary and contributed talks were devoted to indirect searches for dark

matter. Since particle astrophysics and astronomical observations are steadily being developed and as a result we will obtain in the near future very precise data of dark matter such as distributions in our galaxy and satellite galaxies, all participants were interested in the impact of the observations on indirect dark matter searches. These aspects were thoroughly covered and discussed in the talks, and participants could clearly understand the current situation and future prospects of the searches, and got a glimpse of promising future directions on this subject.

This conference was originally not planned to be a large one, but the number of participants was much more than expected. We had almost 200 participants in total! This means that the topic of the conference is now regarded as the most important one by almost all researchers in particle physics, cosmology, and astronomy. Having a similar workshop again at the Kavli IPMU in near future would be important.



PFS-SSP Galaxy Survey Workshop 2015

Kiyoto Yabe

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

There is a wide variety of galaxies in the Universe. How did they form? One way to explore this astronomical question is to reveal the past appearance of distant galaxies. Spectroscopic observations are a common way to determine the nature of the galaxy in detail. Distant galaxies, however, tend to be generally faint, and spectroscopic observation becomes difficult compared to nearby galaxies. Therefore, spectroscopic observation with larger telescopes is indispensable. Furthermore, multi-object spectroscopy to observe as many galaxies as possible is important for an efficient survey of faint galaxies.

Prime Focus Spectrograph (PFS) on the Subaru Telescope, which is now being promoted by the Kavli IPMU, is a fiber type spectrograph that can simultaneously obtain spectra of up to 2400 objects in a field of view of 1.3 degrees, covering a wide wavelength range from visible to near-infrared. Using this powerful instrument, we are now preparing for a large galaxy spectroscopic survey. Since PFS is an international collaboration, the survey plan is being discussed by researchers all around the world. On November 13, 2015, about 40 Japanese researchers who are interested in the galaxy formation and evolution gathered at the Kavli IPMU and discussed specific scientific cases using PFS.

The PFS galaxy survey targets

galaxies at redshift of around 2 (age of the Universe of about 30 billion years), when the galaxies are in the most active phase, to make statistical studies of the nature of galaxies. However, since the observable wavelength of PFS is wide, it is possible to observe objects such as galaxies and active galactic nuclei (AGN) at various redshifts from ~ 1 (age of the Universe of 60 billion years) to ~ 7 (age of the Universe of 800 million years). In this workshop, we discussed what kind of scientific cases will become clear by using PFS and how to arrange the survey strategy. In addition, the importance of the role of PFS in this field was also discussed from the theoretical point of view.

At this time, the expectations for PFS of galaxy formation and evolution researchers in Japan are becoming clearer. Although PFS is a project based on international collaboration, the Japanese community is expected

to take leadership on the survey. In addition to the discussion on specific scientific themes, some researchers who will lead the individual topics were determined.

In the future, researchers in the PFS collaboration will gather and discuss various topics related to the project. The results of the discussions in this workshop will be reported in the collaboration meeting, and consistency with the other surveys will be discussed. We expect to start the actual observations from the second half of 2019. We will continue to hold similar scientific workshops on a regular basis, and the discussion will be input into the survey plan in order to successfully achieve the goals related to galaxy formation and evolution with unprecedented results.

We are grateful to the staff of the Kavli IPMU for their hard work, as well as to the graduate students of the University of Tokyo for their help.



Workshop

Categorical and Analytic Invariants in Algebraic Geometry 1 & 2

Alexey Bondal

Kavli IPMU Principal Investigator

The year 2015 saw the start of the Japanese-Russian bilateral project on Categorical and Analytic Invariants in Algebraic Geometry. It was jointly financed by JSPS and the Russian Foundation for Basic Research (RFBR). The project is governed by Kyoji Saito and Alexey Bondal.

The aim of the project is to bring together the best Japanese and Russian experts actively working in the area of algebraic and analytic geometry, homological algebra and string theory, in order to get an insight on the structure of complex varieties and certain interrelated invariants thereof, such as derived categories, semi-infinite Hodge structures, topological correlators and quantum motives, which reflect the properties of these varieties relevant to mirror symmetry.

The first conference, “Categorical and Analytic Invariants in Algebraic Geometry 1,” under the auspices of this project, took place at the Steklov Institute in Moscow on September 14–18. Several members of the Kavli IPMU participated, as well as mathematicians from the Graduate School of Mathematical Sciences, The University of Tokyo, from Kyoto University, Osaka University, Tokyo Metropolitan University, the Steklov Institute in Moscow, the Higher School of Economics in Moscow.

The new workshop, “Categorical and Analytic Invariants in Algebraic Geometry 2,” took place at the Kavli IPMU during the week of 16–20 November, 2015. More experts on the subject of the project from both

Russia and Japan as well as from several other countries attended.

From the mathematical perspective, mirror symmetry is understood as a mysterious duality between the complex and symplectic worlds, where branes, the boundary conditions for strings, are interpreted in a non-mixed way either as complexes of coherent sheaves or as Lagrangian submanifolds. For that reason, the project has two sides, symplectic and complex, and many talks of the workshop were devoted to study of one of the sides of the mirror or to comparison of the two.

Since the subject of the study of the project is inspired by mirror symmetry, which was a discovery of physics, it was crucial to give the microphone to physicists. The first speaker of the workshop was Kentaro Hori, a string physicist at the Kavli IPMU, who outlined an approach from the perspective of Gauged Linear Sigma Models.

An interpretation of the Fukaya categories of Lagrangian cycles in terms of the categorification of special topological constructible complexes of sheaves, called perverse sheaves, was presented by Mikhail Kapranov. He described a vast categorical and topological landscape of this new theory and gave an explicit description for the case of punctured Riemann

surfaces by means of the Waldhausen construction.

An application of K. Saito’s Frobenius structures related to singularities of functions to the physical problem of the computation of the correlation numbers in the theory of 2-dimensional Minimal Liouville gravity was reported by the famous Russian physicist Alexander Belavin. In a conjectural picture proposed by the speaker, the choice of primitive form was of crucial importance.

Another attempt to have a look behind the both sides of the mirror was the talk given by Hiroshi Iritani on mirror symmetry of toric stacks. The consistency of behavior of analytic and categorical invariants of toric stacks under mirror symmetry transformation was scrutinized with delicacy.

All the other talks at the workshop were devoted to the most modern and advanced study of either categorical or analytic invariants on one of the side of the mirror, i.e. in complex and algebraic geometry or in symplectic geometry. The excellent expertise of the participants has guaranteed that the level of the reported research was far beyond what one might expect in the boundaries of two countries; it was truly world class. That is why the workshop attracted the attention of some prominent foreign researchers.



B Mode from Space

Hajime Sugai

Kavli IPMU Associate Professor

The workshop “B Mode from Space” was held at the Kavli IPMU Lecture Hall from Thursday, December 10 to Wednesday, December 16, 2015, with 130 participants (<http://indico.ipmu.jp/indico/conferenceDisplay.py?confid=72>). The research goal of the participants is to reveal the inflation era before the Big Bang. In the period immediately after the beginning of the universe, the universe is believed to have expanded exponentially and to have produced the primordial gravitational wave. We aim to detect the footprint of this wave on the Cosmic Microwave Background (CMB) in a form of polarization pattern called B mode. The CMB has its emission peak at millimeter wavelengths. It is essential to separate it from the foreground galactic emission including the synchrotron and the dust emission.

In this workshop, we intensively discussed the developments of foreground removal methods over the course of a whole day, including talks on the dust emission mechanism itself. We have also discussed other scientific motivations of CMB polarization experiments, e.g., the understanding

of the reionization era of the universe and the narrowing down of the neutrino mass limit.

Based on the direct involvement of participants in past, present and future CMB polarization projects, various kinds of approaches have been reported. These include ground-based experiments such as SPT, ACT, POLARBEAR/Simons Array, ABS, QUIJOTE, and CMB-S4; balloon experiments such as EBEX and PIPER, which are shorter-time scale experiments but are relatively free from atmospheric absorption / radiation; and satellite experiments such as Planck, LiteBIRD, and PIXIE, which carry out long-term measurements without suffering from the atmosphere. Through this workshop, a major movement towards next-generation CMB polarization experiments has emerged, as mentioned in the conference banquet by Jan Tauber, who was responsible for the Planck satellite (which followed COBE/WMAP CMB satellites).

In the second half of the workshop, technical aspects of CMB experiments were reported and discussed, including compact

optics for satellites, polarization modulators with a half wave plate, cooling systems including adiabatic demagnetization refrigerators which go down to 100mK, and TES/MKID superconductor detectors and their readout systems. The Kavli IPMU is one of the core institutions of LiteBIRD (Light satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection), and I presented on its optics designing. The LiteBIRD will carry out three-year measurements of linear polarization of the CMB in the whole sky, covering the wide frequency range of 35GHz to 450GHz.

About 40%, 30%, and 30% of the participants, were respectively from Japan, the USA, and Europe; these regions are leading this research field of CMB experiments. The local organizing committee, led by Nobu Katayama, consisted of Masaya Hasegawa, Masashi Hazumi, Hirokazu Ishino, Tomotake Matsumura, Yutaro Sekimoto, and Sugai. We thank the Kavli IPMU office, particularly Ms. Kohama, for their management support, as well as students from Japanese universities.



News

Takaaki Kajita Receives Japan's Order of Culture

The University of Tokyo's Institute for Cosmic Ray Research Director and Kavli IPMU Principal Investigator Takaaki Kajita was selected as a 2015 recipient of the Order of Culture. At a ceremony at the Imperial Palace in Tokyo on November 3, Emperor Akihito awarded the medal to Kajita for his significant contribution to the development of Japan's culture.



Takaaki Kajita

Yoichiro Suzuki and Takaaki Kajita Awarded 2016 Breakthrough Prize in Fundamental Physics

On November 9, 2015, the Breakthrough Prize Foundation awarded this year's Breakthrough Prize in Fundamental Physics to the leading scientists and team members involved in five neutrino experiments (Japan's Super-Kamiokande, KamLAND, K2K and T2K, Canada's SNO, and China's Daya Bay). The prize is an international award recognizing scientists who have contributed to human knowledge of the mysteries of the Universe.

From the Super-Kamiokande experiment, leaders Takaaki Kajita and



Yoichiro Suzuki

Yoichiro Suzuki, and all the collaboration members who are coauthors of the papers representing the Super-Kamiokande's main achievements were selected as laureates.

Yuji Tachikawa Receives the 2016 New Horizons in Physics Prize

On November 9, 2015, the Breakthrough Prize Foundation also announced Yuji Tachikawa as one of the recipients of the 2016 New Horizons in Physics Prize. Tachikawa is an Associate Professor at the University of Tokyo's School of Science, and a Scientist at the Kavli IPMU. The prize recognizes junior researchers who have made significant contributions to the field of fundamental physics.



Yuji Tachikawa

Tachikawa was recognized for penetrating and incisive studies of supersymmetric quantum field theories. For example, his outstanding contribution to the discovery of the Alday-Gaiotto-Tachikawa correspondence led to spectacular advances in quantum field theory and string theory.

Open Campus Kashiwa 2015

"Bright Science, from Kashiwa" was the theme of this year's open campus (October 23 - 24, 2015).

Highlights at the Kavli IPMU included special seminars on both days, "The Dark Side of the Universe through the Eyes of the Subaru Hyper Suprime-Cam" by Professor Masahiro Takada on the first day, and "Capturing Dark Matter: Closing in on the Mystery of the Universe from Underground" by Yoichiro Suzuki on the second day.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Ryo Namba and contemporary artist and Artist in Residence participant Yasuo Nomura took part in a talk event

about the link between science and art.

Special exhibitions on display during the two-day event included an Artist in Residence art exhibition showcasing Nomura's work, mathematics puzzles, Kavli IPMU tours, and a screening of the science documentary *Particle Fever*, with Japanese subtitles advised by UC Berkeley Professor and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist Yasunori Nomura, and by Kavli IPMU staff.

With most of the country still in celebration over Takaaki Kajita receiving the Nobel Prize, the open campus attracted a record number of visitors: more than 10,000 came by Kashiwa campus over the event, 3,700 to the Kavli IPMU alone.



Masahiro Takada's talk



Yoichiro Suzuki's talk

Kavli Prize Laureate Lectures in Tokyo

On October 31, 2015, up to 400 visitors came to Kokuyo Hall in Shinagawa, Tokyo, to hear renowned scientists speak at the "2015 Kavli Prize Laureate Lectures," supported by the Kavli Foundation, the Norwegian Academy of Science and Letters, the Norwegian Embassy, and the Kavli IPMU.

The event started with a welcoming from Kavli Foundation President Robert Conn. With Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama as host, physical chemist and 2014 Kavli Prize in Nanoscience

laureate Thomas Ebbesen talked about his work in nano-optics, and theoretical physicist and 2014 Kavli Prize in Astrophysics laureate Alan Guth talked about cosmic inflation and whether our universe is really part of a multiverse.



(From left) President Conn, Professor Guth, Director Murayama, and Professor Ebbesen

Kavli IPMU and ICRR Joint Public Lecture: See the Unseen Universe

On November 22, 2015, the Kavli IPMU and University of Tokyo Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) hosted their 13th joint event at the University of Tokyo's Hongo campus. More than 170 people, from young junior high school students to senior citizens filled up the Koshiba Hall.

Kavli IPMU Associate Professor Kai Martens started the event, with a talk titled "Dark Matter: Mystery, Imagination, and Challenge." In it, he talked about how scientists first found evidence concluding that dark matter exists in the Universe, and about his own work on the XMASS project. In the next talk, ICRR Project Assistant Professor Masaaki Hayashida gave a talk titled "Look into Our Dynamic Universe Using High-Energy Gamma Rays," and explained how scientists study the Universe using gamma rays, and shared stories about the Cherenkov Telescope Array currently being built.

Following on from the talks, both speakers took part in a discussion titled "Making the World's Only Handmade Machine." There, they shared stories about what got them interested in their current projects, what other projects they had worked on, and

characteristics about the equipment that both of them currently work on. The teatime at the end of the event gave participants a chance to ask their own questions to the speakers. The room was buzzing with conversations for a long time, providing an uplifting end to the event.



Kai Martens (left) and Masaaki Hayashida on stage

The 5th Annual WPI Joint Symposium

On December 26, 2015, the Kavli IPMU took part in the 5th Annual WPI Joint Symposium "Seeing, Touching, and Feeling Science" at Kyoto University. This year's event was hosted by the Institute for Integrated Cell-Material Sciences (iCeMS).

Every year, the symposium has invited local high school students to hear and ask about the latest cutting edge developments in science.

This year's event included talks from three scientists, and a special talk by Kyoto University President and gorilla expert Juichi Yamagiwa. A special highlight of the day was a panel discussion where scientists shared stories about their research notebooks, and how it shapes their work. The other WPI institutes including the Kavli IPMU set up booths upstairs, and enjoyed the time answering questions from curious students and participants.



High school students crowd around WPI booths

Santa Claus Visits the Donguri Day Nursery

The Kashiwa Campus Donguri Day Nursery threw its annual Christmas party on December 18, 2015. This year, Kavli IPMU Assistant Professor Kevin Bundy transformed into Santa Claus, and joined in the celebration with the Donguri children.



Kevin Bundy as Santa Claus

Kavli IPMU Seminars

1. "Cosmic Reionization on Computers
2. How to build a virtual universe"
Speaker: Nick Gnedin (Fermilab / U Chicago)
Date: Oct 01, 2015
2. "On the proof of the S-duality modularity conjecture for the quintic threefold"
Speaker: Artan Sheshmani (Ohio State U / Kavli IPMU)
Date: Oct 01, 2015
3. "6d SCFTs and their compactifications"
Speaker: Kazuya Yonekura (Kavli IPMU)
Date: Oct 06, 2015
4. "Expansion Opacity in Supernova Models: Line Lists and the Shape of Type Ia Supernova Light Curves"
Speaker: Elena Sorokina (Sternberg Astronomical Inst)
Date: Oct 07, 2015
5. "The Growth of Today's Most Massive Galaxies over the Last 12.8 Gyr of Cosmic History"
Speaker: Danilo Marchesini (Tufts U)
Date: Oct 08, 2015
6. "In the Alphabet of Bsm Curiosities, A is for Axion"
Speaker: Sacha Davidson (Inst Nuclear Physics of Lyon / CNRS)

- Date: Oct 09, 2015
7. "K. Saito structures and string theory"
Speaker: Yakov Kononov (HSE, Moscow)
Date: Oct 13, 2015
 8. "The Stellar IMF of Early-type Galaxies from Strong Gravitational Lensing"
Speaker: Alessandro Sonnenfeld (Kavli IPMU)
Date: Oct 13, 2015
 9. "Sheaves on Lorentzian manifolds"
Speaker: Pierre Schapira (U Paris VI)
Date: Oct 13, 2015
 10. "Introduction to BV quantization"
Speaker: Nicolai Reshetikhin (UC Berkeley)
Date: Oct 13, 2015
 11. "Localization of 4d N=1 super-Yang-Mills on elliptic fibrations"
Speaker: Itamar Yaakov (Kavli IPMU)
Date: Oct 14, 2015
 12. "Introduction to BV quantization"
Speaker: Nicolai Reshetikhin (UC Berkeley)
Date: Oct 14, 2015
 13. "Introduction to BV quantization"
Speaker: Nicolai Reshetikhin (UC Berkeley)
Date: Oct 15, 2015
 14. "Flops and spherical functors"
Speaker: Alexey Bondal (Kavli IPMU)
Date: Oct 15, 2015
 15. "Introduction to BV quantization"
Speaker: Nicolai Reshetikhin (UC Berkeley)
Date: Oct 16, 2015
 16. "IceCube Events from Dark Matter through Right-handed Neutrino Portal"
Speaker: Yong Tang (KIAS)
Date: Oct 21, 2015
 17. "Close binary progenitors of gamma-ray bursts and hypernovae"
Speaker: Maxim Barkov (RIKEN)
Date: Oct 22, 2015
 18. "Scalar dark matter with coloured partner"
Speaker: Laura Lopez Honorez (Vrije Universiteit Brussel)
Date: Oct 23, 2015
 19. "Matrix factorizations and the Landau-Ginzburg/conformal field theory correspondence"
Speaker: Ana Ros Camacho (Institut de Mathématiques de Jussieu-Paris Rive Gauche)
Date: Oct 27, 2015
 20. "Cartan eigenvectors, Toda masses, and their q-deformations"
Speaker: Vadim Schechtman (Toulouse Mathematics Inst)
Date: Oct 27, 2015
 21. "Searching for 5-dimensional Nontrivial UV Fixed Point"
Speaker: Jin-beom Bae (Seoul National U)
Date: Oct 28, 2015
 22. "Probing properties of cosmic strings through Pulsar Timing Arrays"
Speaker: Sachiko Kuroyanagi (Nagoya U)
Date: Oct 28, 2015
 23. "Infinite Phase Space and the Two-Headed Arrow of Time"
Speaker: Alan Guth (MIT)
Date: Oct 30, 2015
 24. "Modeling cosmic-ray propagation in the Galaxy"
Speaker: Carmelo Evoli (DESY)
Date: Nov 02, 2015
 25. "Indirect searches for WIMP dark matter: Some signal candidates and many"
Speaker: Christoph Weniger (U Amsterdam)
Date: Nov 04, 2015
 26. "Quantum Hydrodynamics from Large-n Supersymmetric Gauge Theories"
Speaker: Peter Koroteev (Perimeter Inst for Theoretical Physics)
Date: Nov 04, 2015
 27. "Running Non-Minimal Inflation with Stabilized Inflaton Potential"
Speaker: Nobuchika Okada (U Alabama)
Date: Nov 05, 2015
 28. "The origin of the elements: direct nucleosynthesis constraints from supernovae"
Speaker: Anders Jerkstrand (Queens U Belfast)
Date: Nov 05, 2015
 29. "A formula for the double ramification cycle"
Speaker: Felix Janda (IMJ-PRG)
Date: Nov 05, 2015
 30. "Lepton Flavor Violating Processes in Mirror Fermion Model"
Speaker: Tzu-Chiang Yaun (Academia Sinica)
Date: Nov 06, 2015
 31. "Calabi-Yau structures on dg categories and shifted symplectic structures on moduli"
Speaker: Christopher Brav (HSE Moscow)
Date: Nov 11, 2015
 32. "Search for Muon to Electron Conversion at J-PARC — the COMET Experiment"
Speaker: Yasushi Kuno (Osaka U)
Date: Nov 11, 2015
 33. "Magnetar powered superluminous supernovae"
Speaker: Mariana Orellana (National U Rio Negro, Argentina)
Date: Nov 11, 2015
 34. "The Cosmic Dawn : Physics of the First Luminous Objects"
Speaker: Ken Chen (NAOJ)
Date: Nov 12, 2015
 35. "Construction of Compact Special Lagrangian T2-conifolds"
Speaker: Yohsuke Imagi (Kavli IPMU)
Date: Nov 12, 2015
 36. "Localization on twisted spheres and supersymmetric GLSM in 2d"
Speaker: Cyril Closset (Simons Center for Geometry and Physics)
Date: Nov 13, 2015
 37. "Stability in the Landscape"
Speaker: Michael Dine (SCIPP)
Date: Nov 16, 2015
 38. "Star/Galaxy Separation and Mapping the Milky Way Halo in HSC"
Speaker: Jose Garmilla (Princeton U)
Date: Nov 16, 2015
 39. "Integrable Bootstrap for Structure

- Constants in N=4 SYM"
Speaker: Shota Komatsu (Perimeter Inst)
Date: Nov 18, 2015
40. "A Zm graded generalization of the Witt algebra and its representations"
Speaker: Kenji Iohara (U Lyon1)
Date: Nov 18, 2015
41. "Detecting dark matter substructure using dusty galaxies"
Speaker: Neal Dalal (Illinois U)
Date: Nov 19, 2015
42. "Categorical approach to deformation theory"
Speaker: Agnieszka Bodzenta (U Edinburgh)
Date: Nov 24, 2015
43. "Preamble to CDM cosmogony: Theoretical overview"
Speaker: Simon White (Max-Planck-Inst für Astrophysik)
Date: Nov 24, 2015
44. "On Holomorphic Chern-Simons Theory in Twistor Space"
Speaker: Alexei Rosly (ITEP / HSE, Moscow)
Date: Nov 24, 2015
45. "Higher Derivative Terms in M-Theory Reductions"
Speaker: Matthias Weissenbacher (Kavli IPMU)
Date: Nov 25, 2015
46. "An elementary Goldstone Higgs"
Speaker: Aurora Meroni (U Southern Denmark)
Date: Nov 25, 2015
47. "The formation and evolution of the galaxy population"
Speaker: Simon White (Max-Planck-Inst für Astrophysik)
Date: Nov 25, 2015
48. "Searching for Strong Lenses to Probe Dark Matter Substructures"
Speaker: James Chan (ASIAA)
Date: Nov 26, 2015
49. "Non-linear structure formation: LCDM challenges and successes"
Speaker: Simon White (Max-Planck-Inst für Astrophysik)
Date: Nov 26, 2015
50. "Characterising the baryon content of galaxy halos through stacking analyses"
Speaker: Simon White (Max-Planck-Inst für Astrophysik)
Date: Nov 26, 2015
51. "Discussion meeting on cosmogony in the Λ CDM universe"
Speaker: Kavli IPMU astro group
Date: Nov 27, 2015
52. "Resurgence and Non-perturbative Physics: Decoding the Path Integral"
Speaker: Gerald Dunne (U Connecticut)
Date: Nov 30, 2015
53. "5d/6d SCFTs and 5-brane (Tao) web diagrams"
Speaker: Sung-Soo Kim (KIAS)
Date: Dec 01, 2015
54. "The Batalin-Vilkovisky formalism of the spinning particle"
Speaker: Ezra Getzler (Northwestern U)
Date: Dec 01, 2015
55. "Gluino Coannihilation"
Speaker: Feng Luo (Kavli IPMU)
Date: Dec 02, 2015
56. "Galaxy Formation in Dark Matter Halos from $z=15$ to $z=0$ "
Speaker: Peter Behroozi (Space Telescope Science Inst)
Date: Dec 03, 2015
57. "The top off shell effects on new physics search"
Speaker: Chengcheng Han (Kavli IPMU)
Date: Dec 03, 2015
58. "Local and Large-Scale Environmental Influences on Galaxy Gas Content"
Speaker: David Stark (Kavli IPMU)
Date: Dec 08, 2015
59. "Accidental symmetries and the conformal bootstrap"
Speaker: Silviu Pufu (Princeton U)
Date: Dec 08, 2015
60. "Quasiphantom categories in derived categories of surfaces isogenous to a higher product"
Speaker: Kyoung-Seog Lee (KIAS)
Date: Dec 08, 2015
61. "Little string theories via F-theory"
Speaker: David Morrison (UCSB)
Date: Dec 10, 2015
62. "2D and 3D Mass mapping from weak lensing data"
Speaker: Jean-Luc Starck (CEA Saclay)
Date: Dec 10, 2015
63. "Weighted Compactifications of Configuration Spaces"
Speaker: Evangelos Routis (Kavli IPMU)
Date: Dec 10, 2015
64. "Gauge Theory in 2 and 3 dimensions and categorical representations"
Speaker: Constantin Teleman (UC Berkeley)
Date: Dec 14, 2015

Personnel Changes

Promotion

Kavli IPMU
Assistant Professor
Tomoyuki Abe
became an Associate
Professor on January
1, 2016



Tomoyuki Abe

Moving out

The following people left the Kavli IPMU to work at other institutes. Their time at the Kavli IPMU is shown in square brackets.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow
Tanmay Deshpande [November 1, 2012 – November 30, 2015] moved to the Tata Fundamental Research Institute as a Leader of Mathematics.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow
Kai Schmiz [November 1, 2012 – October 31, 2015] moved to the Max Planck Institute for Nuclear Physics in Heidelberg as a Postdoctoral Fellow.

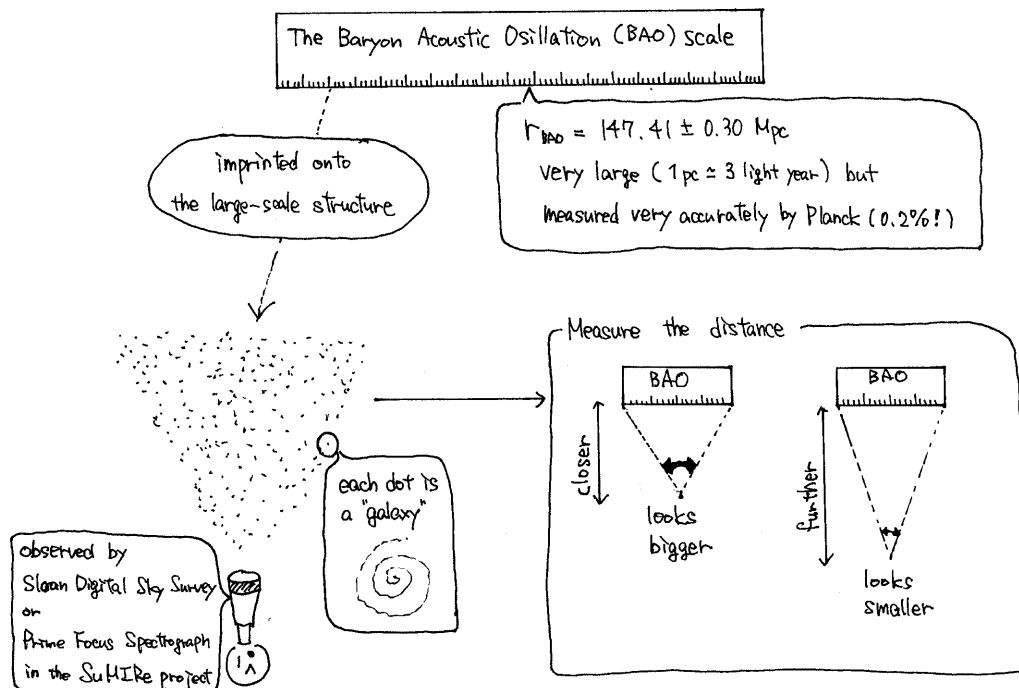
Kavli IPMU Postdoctoral Fellow
Benedetta Vulcani [October 16, 2012 – November 30, 2015] moved to Melbourne University Physics Department as a Postdoctoral Fellow.

Baryon Acoustic Oscillation (BAO)

Shun Saito

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

To study cosmic expansion history, we need to precisely measure distance to the universe at a past epoch. The Baryon Acoustic Oscillation (BAO) is an essential “standard ruler” for this purpose. The BAO scale, set by the speed of sound in the photon-baryon plasma of the very early universe, is very precisely measured by the experiments of the Cosmic Microwave Background such as Planck. The Sloan Digital Sky Survey or Prime Focus Spectrograph in the SuMIRe project has investigated or plans to investigate the mystery of dark energy by precisely measuring the cosmic expansion history via the BAO scale.



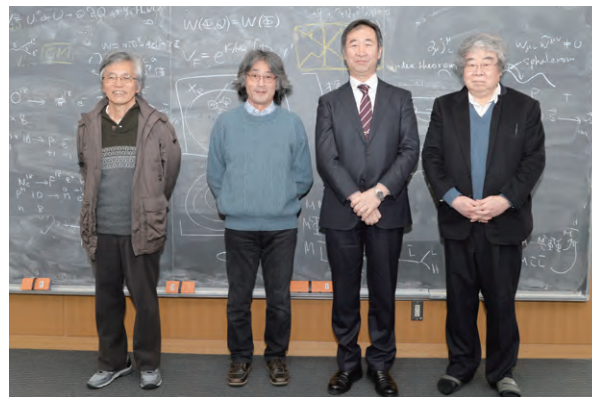
近況

IPMU 機構長

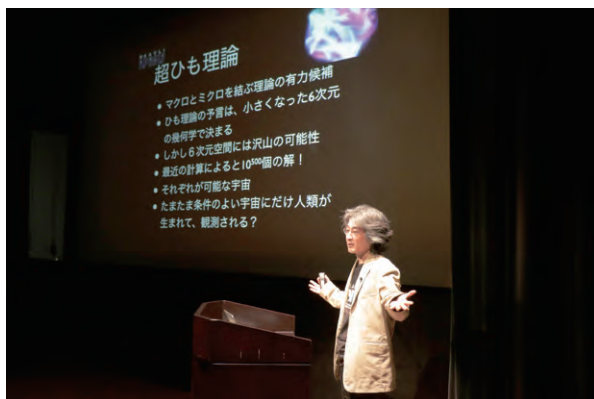
村山 斉 むらやま・ひとし



1月5日：Kavli IPMUと統計数理研究所の研究協力協定締結に際し、樋口知之統計数理研究所長(右)、吉田直紀Kavli IPMU教授(中央)と。



1月6日：梶田隆章教授を囲む座談会（本誌40ページ）当日、左から柳田 勉、村山 斉、梶田隆章、福来正孝の各氏。



1月10日：日本科学未来館で開催された東京工業大学地球生命研究所(ELSI)とKavli IPMUの合同一般講演会での(写真左)講演と(写真右)3人の講師、廣瀬 敬ELSI所長(左端)、村山 斉IPMU機構長、「東京大学共生のための国際哲学研究センター」梶谷真司センター長(右端)の鼎談。



1月18日：東京大学安田講堂で開催された梶田隆章宇宙線研究所長のノーベル賞受賞記念学術講演会で。(写真左)講演する村山機構長。(写真右)質問に答える村山機構長と梶田所長。



Director's
Corner

自然の基本法則をニュートリノで探る

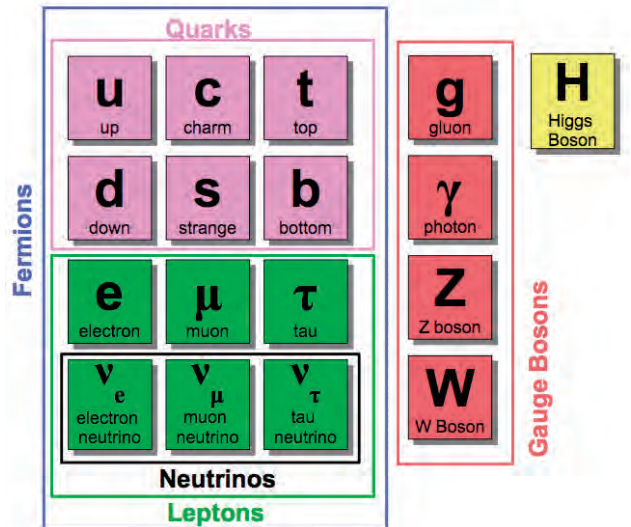
素粒子の標準模型は、宇宙の基本的な構成要素と物質の間の相互作用を記述します。標準模型に含まれる素粒子には、物質自身に伴う素粒子であるフェルミオン、相互作用に伴う素粒子であるゲージボゾン、そして質量を発生させる役割を果たす素粒子であるヒッグスボゾンが含まれます。また、標準模型には粒子と電荷が反対であり、粒子の鏡像である反粒子が含まれます。宇宙に存在する通常の物質は標準模型の粒子からできていますが、私たちは反粒子が存在するのを知っています。なぜなら、反粒子は自然界である種の物理的過程により生成され、また実験室で生成することができるからです。標準理論に現れる素粒子を図1にまとめておきます。ニュートリノは標準模型で独特の地位を占めるフェルミオンです。電氣的に中性で、最も弱い種類の相互作用しかせず、他のフェルミオンよりはるかに小さい質量をもっています。実際、ニュートリノの質量は小さ過ぎて、まだ正確な値は分かっていません。しかし、ニュートリノの質量は2番目に軽いフェルミオンである電子の質量の約100万分の1であると言うことはできます。なぜ他のフェルミオンに比べてニュートリノの質量がそんなに小さいのかという謎を解くことは、私たちの自然に対する理解を現在の標準模型を超えて拡張することによってのみ可能と

なります。

どうしてニュートリノが質量をもつことが分かるの だろう?

ニュートリノの質量が正確には知られていないなら、質量をもたない光とは違い、ニュートリノが質量をもつことがどうして分かるのでしょうか？ ニュートリノ質量の発見は、過去半世紀における科学上の偉大な物語の一つです。それは、ノーベル賞受賞者レイモンド・デイビスに率いられた有名なホームステイク実験により1960年代の末に始まります。この実験では、太陽の内部で生成された太陽ニュートリノがアメリカの南ダコタ州にある鉱山の地下深くで検出されました。そのニュートリノの検出率が予想されたものよりかなり少なかったため、研究者は太陽の内部の物理の模型が間違っている可能性を考えました。1980年代に、日本のカミオカンデ-IIなどの検出器で、宇宙線が地球の大気中で相互作用して発生する「大気ニュートリノ」と呼ばれるニュートリノにも不足があるという兆候が見出されたため、謎は更に深まりました。これらのニュートリノの不足は、恐らくニュートリノの生成過程よりもニュートリノの振る舞いにより説明できるのではないかと考えられました。ニュートリノに

図1 素粒子の標準模型に現れる素粒子。ピンクで表される素粒子、クォークと、緑で表される素粒子、レプトンを併せてフェルミオンと呼びます。レプトンのうち、黒い線で囲まれた素粒子がニュートリノです。一方、赤で表される素粒子がゲージボソンで、ヒッグスポソンは黄色で表されています。ニュートリノは最も軽いフェルミオンで、Z及びWボソンが媒介する弱い力によってのみ相互作用します。



は、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの3種類があります。太陽の内部では電子ニュートリノが生成され、一方、大気ニュートリノは主としてミューニュートリノと電子ニュートリノです。ホームステイク実験では電子ニュートリノだけを検出し、カミオカンデ-II 実験ではミューニュートリノと電子ニュートリノだけを検出します。従って、もし電子ニュートリノがミューニュートリノあるいはタウニュートリノに変身したとするとホームステイク実験では検出できないことになります。同様の理由で、電子ニュートリノとミューニュートリノがタウニュートリノに変身するとカミオカンデ-IIでは検出されないことになります。「ニュートリノ振動」と呼ばれるこの現象は観測されたニュートリノの不足を説明できますが、一方でニュートリノが質量をもつことを要求します。

なぜニュートリノ振動はニュートリノが質量をもつことを意味するのだろうか？

ニュートリノ振動は、なぜニュートリノが質量をもつことを要求するのでしょうか？ 電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノという名

前の由来は、それぞれのニュートリノの反応の仕方にあります。電子ニュートリノの反応には電子の生成が伴い、ミューニュートリノの反応はミュー粒子、タウニュートリノの反応はタウ粒子を生成します。物理学者はニュートリノのこの性質をフレーバーと名付け、ニュートリノは決まったフレーバーの状態で記述されると言います。もう一つのニュートリノの性質に質量があります。質量は、特定のエネルギーのニュートリノが2点間をどのように伝播するかを規定します。決まったフレーバーの状態が存在するのと同様に、決まった質量の状態があり得ます。量子力学の不思議な世界では、決まったフレーバーのニュートリノ状態それぞれが、決まった質量のニュートリノ状態の異なる組み合わせから成るということが可能です。決まったフレーバーのニュートリノが生成された場合、その各成分の決まった質量のニュートリノは、質量が異なるため異なる伝播をします。その結果、ニュートリノが伝播するに従い、各質量成分の相対的な比率が変化します。ある距離を伝播した後、ニュートリノはもはや最初のフレーバーをもっているわけではなく、図2に示すように3種類のフレーバー全部の組み合わせとなります。ニュートリノ振動過程は、ニュートリノ質量

$\nu_1, \nu_2, \nu_3 = \text{states of definite mass}$

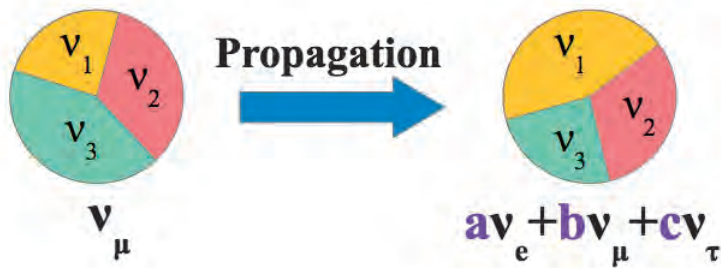


図2 決まったフレーバーであるミューニュートリノ、 ν_μ は決まった質量のニュートリノ、 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 の組み合わせです。それが伝播するに従い、質量状態の相対的比率が変わり、ニュートリノはフレーバー状態の組み合わせとなります。 ν_e 、 ν_μ 、あるいは ν_τ として反応する確率は、 a 、 b 、 c の大きさに依存します。

が存在し、かつ異なることを要求します。なぜなら、ニュートリノ質量による伝播の違いが振動効果を引き起こすからです。

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノ振動仮説は1990年代末と2000年代初めの2つの実験によって華々しく確認されました。最初、カミオカンデ-IIを大型化したスーパーカミオカンデ実験が、大気ニュートリノの不足は事実で、ニュートリノが検出器に達するまでに進んだ距離に依存すること、その依存性はニュートリノ振動と一致することを示しました。その後すぐに、SNO実験が太陽からやって来る電子ニュートリノの検出率と電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの検出率の総和の両方を測定しました。そして、全フレーバーからの検出率の和が太陽模型の予言と一致することを見出し、一方、電子ニュートリノは不足していることを確認しました。これは、電子ニュートリノの不足の原因が、電子ニュートリノからミューニュートリノとタウニュートリノへの振動のためであることを示すものでした。スーパーカミオカンデの梶田隆章、SNOのアーサー・マクドナルド両博士が2015年ノーベル物

理学賞を受賞したのは、これらの発見によるものです。

T2K実験によるニュートリノ振動の精密測定

ニュートリノ振動が確立して以来、素粒子物理実験は今やこれらの振動の性質の精密測定に携わっています。精密測定のために、私たちは人工ニュートリノ源に方向を転換しています。これには原子炉で発生するニュートリノと粒子加速器で作られるニュートリノがあります。筆者はKavli IPMUでグループを作り、加速器ニュートリノを用いるT2K実験に参加しています。加速器ニュートリノを発生させる過程は、大気ニュートリノを発生させる過程と同じですが、自然の宇宙線を用いる代わりに、粒子加速器によってほとんど光速まで加速された陽子を用います。これにより、ビームの方向、エネルギー、フレーバーの内訳がコントロールされた高強度のニュートリノビームを発生させることができます。T2Kとは「Tokai-to-Kamioka (東海から神岡へ)」を意味します。図3に示すように、日本の東海岸にある東海村のJ-PARCにおいて加速器で発生させたニュートリノが、地中を295 km通過して神岡に到達し、そこでほんの一部が先に述べたスーパーカミオカンデ検出器の中で反応するからです。



図3 T2K実験は日本の東海岸にある東海村のJ-PARC 施設で発生させたニュートリノビームを使用します。295 km離れたスーパーカミオカンデ検出器により、そのニュートリノのほんの一部が検出されます。

ニュートリノがスーパーカミオカンデの中で反応した場合、これをニュートリノ事象と呼びます。ニュートリノの反応確率は非常に低いため、T2K実験の全期間中にスーパーカミオカンデを10億個の10億倍以上の加速器ニュートリノが通過する計画ですが、スーパーカミオカンデで私たちが検出するのはたった数百個のニュートリノ事象です。

T2K実験のニュートリノビームの成分は、ほとんど100%ミューニュートリノです。私たちが測定したいと思っている主要な過程は、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動です。私たちはスーパーカミオカンデでミューニュートリノと電子ニュートリノの違いを検出できます。電子ニュートリノの反応は電子を、ミューニュートリノの反応はミュー粒子を生成することを思い出して下さい。スーパーカミオカンデはニュートリノ反応からの電子とミュー粒子を、測定器の壁面に光のリングを生じるチェレンコフ放射と呼ばれる過程によって検出します。電子は輪郭のぼやけたリングを生じるのに対し、ミュー粒子ははっきりした輪郭のリングを生じ、この違いを用いて電子とミュー粒子を区別することができます。図4に、スーパーカミオカンデでミュー粒子と電子に対して観測されるパターンの例を示します。

ミューニュートリノから電子ニュートリノへ振動する過程が興味深いのは、2つの理由があります。第1に、この過程を検出すると、あるフレーバーのニュートリノが別の特定のフレーバーのニュートリノに振動する初めての直接的証拠を得たことになります。第2に、この振動過程は物質であるニュートリノと、その反物質パートナーである反ニュートリノに対して異なっている可能性があります。自然の法則で物質と反物質に対して非対称な現象を探すことは、どのようにして宇宙が今の宇宙になったかを理解することに結びつきます。もし物質と反物質が同じ法則に従ったとすると、宇宙は同じ量の物質と反物質から成り立っているものと予想されます。しかし、宇宙は物質から成り立っていますから、私たちはこの不均衡を創り出すことのできる物理過程を探しています。ニュートリノ振動は、このような不均衡が生じる可能性のある過程の一つです。

東北大震災により一時的にT2K実験の実施が停止された後の2011年6月に、T2Kグループはミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動の初めての兆候を論文として発表しました。ニュートリノ振動以外の原因によるものとして僅か1.5個の事象が予測されるところ、6個の事象を観測したのです。観測された

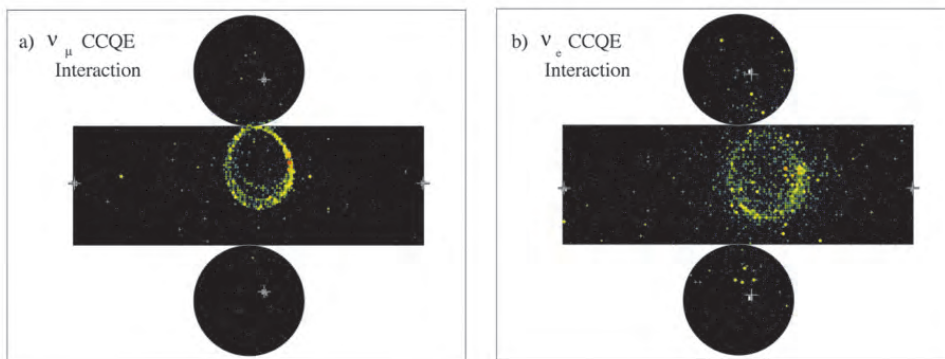


図4 スーパーカミオカンデでニュートリノが反応した場合に観測されるパターンのシミュレーション結果。左はミュー粒子、右は電子が生成された場合の例を示しています。ミュー粒子は輪郭のはっきりしたリングを生じ、電子は輪郭のぼやけたリングを生じるので、区別できます。

6事象全部がニュートリノ振動以外の原因によるものである確率は0.7%でした。J-PARCの加速器とT2K実験は、多大な努力により東北大震災から1年後に復旧することができ、実験が再開されました。2014年2月に、T2Kグループは電子ニュートリノへの振動の観測事象数を積み増した最新結果を論文として発表しました。新しい結果によれば、ニュートリノ振動以外の原因によるものとしてたった4.9個の事象が予測されるところ、28個の事象が観測されたのです。これだけの観測事象数が全てニュートリノ振動以外の原因によるとして説明される確率は10億分の1以下となり、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動過程発見を主張する十分強い証拠となりました。観測された28事象のエネルギー分布を図5に示します。

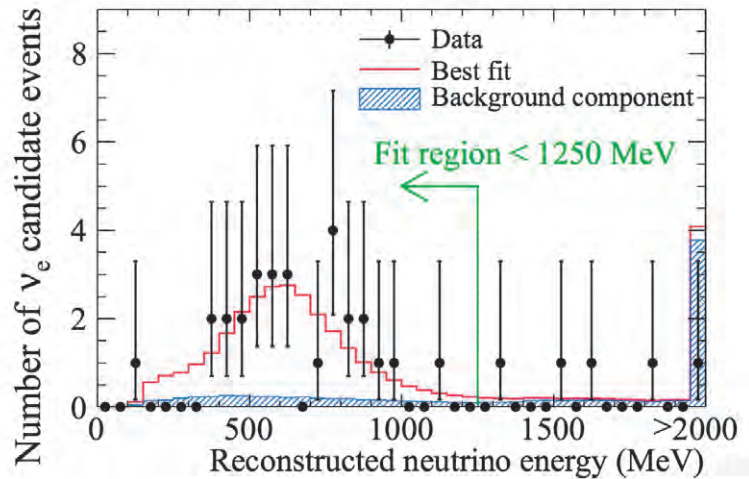
T2Kの将来とさらにその先

T2K実験はミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動を発見したため、現在では反ミューニュートリノのビームに切り替えて反ミューニュートリノから反電子ニュートリノへの振動を調べています。ニュートリノと反ニュートリノの両方に対してニュー

トリノ振動の事象検出率を測定することにより、T2K実験は先に述べた物質と反物質の非対称を探ることが可能となります。2015年夏に、T2K実験は反電子ニュートリノの出現について最初の結果を発表しましたが、予想される1.8事象のバックグラウンドに対して3事象が観測されました。これだけのデータ数では反ミューニュートリノから反電子ニュートリノへの振動を発見したと主張するには余りに少な過ぎますが、T2K実験はさらにデータの取得を続けています。

T2K実験は全実験期間を通じて数百個の電子ニュートリノと反電子ニュートリノ事象を収集すると予想されています。もし運が良ければ、私たちは物質と反物質の非対称を99%の信頼度で観測できるかもしれません。ニュートリノと反電子ニュートリノの反応は非常に弱いため、その事象の収集には非常に時間がかかります。物質と反物質の非対称を徹底的に調べてその性質を正確に測定するには、数百どころではなく数千事象が必要です。事象の発生率を増やすには2つの方法があります。第1に、ニュートリノ検出器の質量を増やすことができます。現在のスーパーカミオカンデ検出器では5万トンの水がニュートリノ反応の標的となります。Kavli IPMUを含む日本および世界各国から

図5 T2K実験で観測された電子ニュートリノ事象の候補のエネルギー分布。赤いヒストグラムはニュートリノ振動で予想される分布、青い斜線の部分は振動とは関係の無い原因によるバックグラウンド事象の見積もりを示しています。データはニュートリノ振動の予想と一致しています。



の研究者は、スーパーカミオカンデの近くにハイパーカミオカンデと呼ばれる新しいニュートリノ検出器を建設することを提案しています。ハイパーカミオカンデは、スーパーカミオカンデの20倍の100万トンの水をニュートリノの標的とします。これにより、検出器内のニュートリノ反応検出率は20倍に増加します。ニュートリノの反応検出率を増やす第2の方法は、もっと強度の強いニュートリノビームを発生させることです。J-PARCのニュートリノビームの強度は、ハイパーカミオカンデの建設が終わるまでには少なくとも3倍に増やすことが可能と期待されています。高強度のニュートリノビームと超巨大検出器が組み合わさることにより、ハイパーカミオカンデはニュートリノ振動で物質と反物質の非対称を調べる世界で最も感度の高い実験となります。

まとめ

ニュートリノは質量が非常に小さいため、素粒子の標準模型でユニークな役割を果たします。その質量の小ささは、まだ解明されていない物理を示すものです。特に、ニュートリノの振動はニュートリノの質量

について情報をもたらし、さらに物質と反物質の非対称の新たな起源を秘めているかもしれません。それが見つければ、なぜ宇宙が等量の物質と反物質からではなく、物質から成るのかを理解する上での助けとなり得るでしょう。現在、Kavli IPMUの研究者が参加しているT2K実験では、高強度のミューニュートリノと反ミューニュートリノビームを用いてミューニュートリノから電子ニュートリノ、および反ミューニュートリノから反電子ニュートリノへの振動を研究しています。もし運が良ければ、T2K実験はこれらの測定によりニュートリノ振動における物質と反物質の非対称の形跡を初めて発見できるかもしれません。ニュートリノ振動を精密に測定し、その物質と反物質の非対称を徹底的に調べるには、少なくともT2K実験の10倍のニュートリノ事象が必要とされます。この感度を得るために、世界各国からの研究者が現在のスーパーカミオカンデ検出器の20倍の大きさのハイパーカミオカンデ実験を提唱しています。もしハイパーカミオカンデ検出器が実現すれば、カミオカンデとスーパーカミオカンデ実験のノーベル賞受賞で確立した日本のニュートリノ物理実験の伝統を引き継ぐものになると期待しています。

Round Table Talk : 梶田隆章教授ノーベル物理学賞受賞記念座談会

梶田 隆章 かじた・たかあき
Kavli IPMU主任研究員

村山 斉 むらやま・ひとし
Kavli IPMU機構長

福来 正孝 ふくぎた・まさたか
Kavli IPMU教授

柳田 勉 やなぎだ・つとむ
Kavli IPMU主任研究員

カミオカンデで陽子崩壊の研究に携わる

村山 ノーベル賞、おめでとうございます。ものすごく忙しいのではないですか。

梶田 そうですね。メールがすごく増えてますし…

村山 しばらくは大変ですね。そういう中でこの座談会にお出でいただき、ありがとうございます。最初にお聞きしたいのは、大学院で東大に入ってなぜ小柴研に行こうと思ったのですか？

梶田 素粒子の実験はやろうと思っていたのでチョイスは2つ、藤井・釜江研か小柴研でした。どっちにしようかよく分からないというのが正直なところでした。

村山 素粒子実験をやろうと思った理由は？

梶田 若かったので、素粒子とかファンダメンタルなことをやりたいという思いがありました。

村山 入って、すぐにカミオカンデ建設の時期ですか？

梶田 まだ現場には全く行っていませんでした。入ったのはちょうど20インチの光電子増倍管の最初のものができた頃でした。

福来 設計には関与していなかったのですか？

梶田 全然関与していません。



村山 斉



梶田 隆章



柳田 勉



福来 正孝

村山 では、その時には既にカミオカンデの構想はあって、小柴先生がそれを進めていて、大学院に入って、それに参加するという形ですね。

梶田 そうです。

福来 大学院は何年ですか。

梶田 1981年の4月です。

村山 当時、小柴研はまだ DESY の実験もやっていたんですか。

梶田 やっていました。

村山 では、どっちに行くかというのは誰が決めたのですか。

梶田 それはよく分かりません。有坂勝史さんが1981年のはじめにモンテカルロ

シミュレーションで修士論文を書いていました。僕は有坂さんにそそのかされていつの間にか陽子崩壊をやることになりました（笑）。

村山 そのときはもうIMBはあったのですか？

梶田 建設していました。

村山 小柴先生は、IMBと競争しなければいけない、というので20インチの光電子増倍管開発に取り組んだとよく言われていますが、本当にそうだったのですか？

梶田 そこは皆さんと同じで、伝え聞いているレベルです。

村山 それから建設が始まって、当時は

チームはすごく少なかったんですね。鈴木厚人さんと有坂さんと梶田さんと。

梶田 宇宙線研の須田英博先生。他に数人でした。

村山 その頃は、戸塚さんはいなかったのですか？

梶田 戸塚先生は私が修士1年に入った春、5月頃だと思うのですが、ドイツから帰って来てLEPのOPAL実験の開発研究をやっていたのですが、余りにもカミオカンデが悲惨なので助けてくれていました(笑)。

村山 そのときは、カミオカンデは純粋に本郷の物理教室で進めていたのですか？

梶田 いや、宇宙線研で須田さんが入っていたし、理論で助けてくれた荒船先生もその頃宇宙線研で、それから東工大に移りました。

村山 カミオカンデが完成したのはいつでしたか？

梶田 1983年の7月です。

太陽ニュートリノ観測へ改造されたカミオカンデ、そこに超新星爆発

村山 それから1987年の超新星まではどんな感じだったのですか？

梶田 その辺は小柴先生がすごいのですが、もう1983年の秋には、何月かは分からないのですが、太陽ニュートリノ観測に向けてカミオカンデを改造すると言い、そうは言ってもカミオカンデでは太陽ニュートリノには小さすぎるので、スーパーカミオカンデをやるべきだと言い出しました。カミオカンデの改造工事は1984年ぐらいから始まったと思います。

福来 小柴さんがそうした一番の理由は、太陽ニュートリノも狙っていたけれども、陽子崩壊はもうカミオカンデでいくらやっても見つからない、大きくしない限りダメだということをはっきり認識していたからです。

村山 そう思ったのはIMBのせいですか？ $p \rightarrow e\pi$ の最初のリミットがIMBから出たのはいつでしたか？

梶田 あれは1982年でした。

村山 では、その時はもう大統一理論は駄目だという雰囲気になっていたんですか？

福来 まだ駄目とは言わないけれど…

柳田 もっと大きくしなくてはいけないという雰囲気でした。

福来 あの頃、 $p \rightarrow \nu K$ の方ではないかという話は随分あった。

村山 超対称大統一理論ですね。

梶田 柳田さんが νK が重要だと言ったのは、1981年ぐらいですか？

柳田 そうですね、ワインバーグと坂井-柳田。その辺から小柴さんには νK が視野に入っていたのかな。小柴さんは理論をキャッチするのがとにかく早いんですね。面白いから話をしろとニュートリノ質量のシーソー機構で僕が小柴さんからセミナーに呼ばれたのが1981年か82年の前半ぐらいです。その時、セミナーで小柴さんは非常に感心したけれど、他の人は全然感心しなかった(笑)。

村山 センスが良いんですね。

福来 センスはすごく良い。

柳田 ものすごく良いですね。直感力…あれは何と言ったら良いのだろう。

村山 すると、陽子崩壊はもっと大きくしてはダメだから太陽ニュートリノにスイッチするということになって、アンタイカウンターを作り、スレッシュールド(閾値)を下げ、それから太陽ニュートリノと超新星爆発を目指す時期に入ったわけですか？

梶田 いや、超新星は意識して目指してはいませんでした。

福来 偶然の産物で、スレッシュールドの下がったところにちょうど超新星爆発が起こったのです。

村山 だから、ひと月前まではラドンのレベルが高すぎて見られなかったのでしたか。小柴さんはひと月したら定年退官ですから、ふた月しかウインドウがない(笑)。ふた月のど真ん中の、ちょうど16万年前に超新星が爆発していた。あり得ないですね。

柳田 ものすごい確率だ。

福来 あの前、実はスレッシュールドはもともと100 MeVに近かったですよ。

梶田 いや、30 MeVです。解析は多分100 MeVぐらい。それも電子についてです。

福来 そこに、モノポールがあると陽子崩壊を引き起こすというルバコフの話があった。

村山 ああ、ありましたね。Callan-Rubakov。

福来 そう、Callan-Rubakov。そうすると30 MeVのミューニュートリノが出るから、それが測定できるようにするべきだと、僕は戸塚さんに随分言ったことがあります。

村山 そういう話があったのですか。

福来 そう。そこまでだったら下げられると戸塚さんが言って、戸塚さんと鈴木厚人さんが一生懸命それを考えていたのです。だから、スレッシュールドを6 MeVにする前にその途中段階があったんですよ。30 MeVのニュートリノを測定すると。

柳田 それは知らなかった。実験屋さんがCallan-Rubakovを知っているとは思えないから、どうしてそれを狙ったのか分からなかったけれど、そうか、福来さんが…

福来 それでスレッシュールドを下げることに成功して…

村山 でも、そこからまた10 MeV以下にするのは大変ですね。

福来 それは大変。特にラドンが。

村山 それはどんな感じだったのですか、ラドンを除去するプロセスは。



梶田 まず、世の中にラドンがあるということを知らなかったわけです。偶然計数だけを考える限り、新しいハードウェアでスレッシュホールドは十分5、6、7 MeV 辺りまで下げられるかなと思っていたら、トリガーレートが1,000ヘルツを超えるわけです。「何だろう?」というところから始まって…

村山 それでは、理解するところがまず難しかったわけですか。

梶田 やはり鈴木厚人先生が偉かったのです。1,000ヘルツになってしまったから、取りあえず純水装置を止めてみた。すると急激に下がっていくので、その寿命から「これ、ラドンかな」ということを見つけました。

村山 水から不純物を取り除く話はどうやって進んでいったのですか?

梶田 ラドンだと崩壊するし、あとはどこからか入ってくるので、それを止めれば良い。カミオカンデの最初のときには、鉱山の水が結構きれいなので、単にそれをフィルタリングして入れていたんです。

村山 そうか、循環ではなかったのですか。

梶田 はい。純水装置がそれ程良いものではなかったで、そこから結構大変でした。カミオカンデのレベルでは、単に純度を保ったまま水を循環させれば良いのですが、そこまでもっていくのが大変でした。

村山 それで、超新星のひと月前にやっとラドンのレベルが下がって、スレッシュホールドが10 MeV くらいになったのです

か。

福来 12月の終わりぐらいには下がったのではなかったかな。1月には6 MeV とか7 MeV になっていたから。

梶田 もう忘れたけれど、そのくらいです。

村山 それで、スレッシュホールドが下がって、ひと月、ふた月後にいきなりニュートリノバーストがあった。その時はどんな感じでしたか?

梶田 その時はCERN にいたので、知らないのです。私は公式にはICEPP (東京大学素粒子国際センター) の所属だったので、職務として向こうに行ってOPAL を手伝ってました。

村山 モーリス・ゴールドハーバーが引退する前にたまたまディナーパーティーで話を聞いたら、スライドでまずカミオカンデのイベントを出して、それからIMB のイベントを出して、「IMB のイベントはエネルギーが高い。ということは、カミオカンデよりちょっと後のバーストを見たことになるので、小柴が(ノーベル賞を)もらっても仕方がない」と言ったのですが(笑)。その辺、どういう関係だったんですか?

福来 IMB がバーストのタイミングを問い合わせてきたわけです。IMB はノイズレベルが高いから、情報を得たところを探してイベントを見つけた。

村山 カミオカンデのタイミングを知らなかったらIMB は見つけられなかった?

福来 難しかったでしょうね。いずれ見つかったかもしれないけれど、あんなに

早くはできなかったでしょう。

村山 それは重要ですね。

福来 そう、ものすごく重要な情報です。

ミューニュートリノのフラックスが不足

村山 超新星騒ぎがあった後、やっと太陽ニュートリノを観測する時代に入ったわけですね。太陽ニュートリノの解析には参加されていたのですか?

梶田 いや、していません。

村山 その頃から、大気ニュートリノの方をずっと?

梶田 はい。

福来 あの頃から、大気ニュートリノがおかしいというのは、既に皆言っていたよね。

梶田 いや、1987年の春はまだ研究グループ外には一切言っていないです。

福来 足りないというのは聞いていますよ。1987年よりはるかに前に、1984、5年頃。

梶田 それはミューオン崩壊が足りないということです。

福来 ミューオン崩壊、いや、ミューオンフラックスが足りないとい、1984、5年に戸塚さんからいつも聞いていました。ミューニュートリノが μ 粒子をつくり、 μ 粒子が崩壊して電子を出す。それを見たらレートが足りないということに、陽子崩壊を一生懸命やっている時、既に気がついてたのです。

村山 でも、大気ニュートリノフラックスの絶対値なんて、その頃そんなに信頼性なかったですよ。

梶田 その頃チェレンコフ光のシングルリングを一応ミューニュートリノと電子ニュートリノというように分けていたのですが、 μ とeの比は別におかしくはないように見えていたのに、 μ から崩壊した電子の数が少なすぎるという問題があり

ました。

福来 一番初めにミュオンフラックスが足りないと言ったのは、南アフリカで実験していたライネスたちで、1978年に60%しかないと…

梶田 彼らの実験に使われたのは、突き抜けていくミュオンしか見られない測定器なのですが、それが足りない。いや、足りないとは言っていないですね。データ分のモンテカルロという変な比で、1.6と書いてあるんです。

福来 だから予測の60%なので、値自身はその頃からあったけれども、そんなフラックス、どうして信用できるのだと誰も真面目に取る人はいなかった訳です。その後、IMBも少し足りないというのを先に出していますね。

梶田 論文を投稿した日は、実は数日違いなんです。カミオカンデとIMB両方ともシングルリング中で崩壊電子が少ないというデータは出しています。

柳田 ニュートリノ振動があるかなと思ったのはいつ頃かな？

福来 神岡の1988年の大気ニュートリノの論文¹には、たくさんディテールが書いてあって、その最後にニュートリノ振動の可能性も書いてあるのだけれど、僕がこれはニュートリノ振動が見つかったと信じたのは1992年の論文²だね。

梶田 でも1992年の論文というのは、データ自体は倍ぐらいに増やして、ニュートリノ振動パラメータの許容領域を書いたというレベルですけれども。

福来 あの時に ν_μ と ν_e の比の測定値をモンテカルロ予測で割った double ratio を書いたでしょう。 ν_μ と ν_e の比を取って、それが予測通りの2対1になるのではなくて、1.2対1くらい。つまり ν_μ のフラックスが予測の60パーセントくらい。Double ratioなので、フラックスの不定性が除かれている。



村山 でも、あの頃 Frejus とか、カロリメータでは見えてなくて…

福来 そう、Nusex も Frejus も ν_μ の不足は無いと言っていた。

村山 水チェレンコフだけが見えていて、あれは水チェレンコフの粒子識別が間違っているのではないか、みたいなことを言っていましたね。

福来 そう。その頃、戸塚さんも「間違ったら信用を失う、これは本当に諸刃の剣だ」とものすごく気にしていました。

カミオカンデの粒子識別アルゴリズム：作った本人は正しいと信じていた

村山 粒子識別のアルゴリズムを最初にカミオカンデで作ったのは梶田さんでしたか？

梶田 はい、そうです。マルチリングの場合にそれぞれのリングが電子型である確率とミュオン型である確率を計算して粒子識別をするようなアルゴリズムを作りました。それを一番簡単なシングルリングに適用してみたら、予想と違ってミュオンの数が有意に足りないという結果になりました。1986年の秋頃でしたが、それで私は初めて大気ニュートリノがおかしいのではないかと気がつきました。

村山 その頃本当にミュオンのきれいなシングルリングと電子のぼやとしたリングの区別をちゃんとできるとは、皆思っていなかったのですか？

梶田 宇宙線ミュオンはミュオンであると98%以上で識別できるので、私は信じていましたが…

村山 周りの人はどうだったのですか？コミュニティとしては？

梶田 その辺は良く分かりません。やはり Frejus と Nusex の論文がすぐに「 ν_μ の不足は無い」と出たので、皆相当混乱していたのでしょうね。

村山 では、カミオカンデのグループの中でも結構いろいろな意見があったという状況だったのですか？

梶田 そうです。1992年の論文が出せたのは、やはり小柴先生がいたからです。

村山 これは面白いと？

梶田 と言うより、小柴先生が、「中途半端なままなので、ちゃんと次のバージョンの論文を書かなくてはダメだ」と勧めてくれました。

福来 あれは極めて重要な論文だった。

柳田 我々がニュートリノ振動の論文³を割と早く書いたのは、やはり神岡グループのそばにいたからですね。これは間違いないと思った。それでは、モデルが作れないかと…

福来 1993年に書きました。カミオカンデの1992年の論文があったから、その半年ぐらいい後。皆が一番信じなかったのは、混合が最大に近いことで、「あれをどうしてくれるのか」と思っていた。

村山 偏見があったわけですよね。

福来 普通は、混合角 ($\sin \theta$) は質量の比のルートくらいだろうと思っているから、そんなに大きいはずがないのに、大きいからね。柳田さんのシーソー機構にすれば、もう一度ルートを取れるわけ。どんな小さい数でも4乗根は1に近くな

る。

柳田 あれはシーソーの特技だね、ルート
のルートは1であると。

村山 1991年に私は大学院を卒業して東
北大に行ったのですが、柳田さんにすぐ
言われたのは、大気ニュートリノのモン
テカルロを本当に信じて良いのかという
ことでした。それで、本当に2対1になる
のかとシミュレーションしました。

柳田 そうでしたか？

福来 あの頃ミューオンの偏極を考えると
比が2対1からずれるのではないかと
いう話もあったけれど、計算してみると
その効果はそんなに大きくなかった。

村山 確かにどう頑張っても2対1にし
かりませんでした。天頂角に対する依存
性が見えたのはいつでしたか？

梶田 見え始めたのが1994年の論文⁴
です。

村山 すごく時間がかかっていますね。

梶田 あれは本当に時間がかかりました。
始めたのが1988年ですから。6年間デー
タをためて、「もう駄目だ。これ以上待つ
ても仕方ない」と論文にしました。

村山 やはりカミオカンデは1000トンだ
ったから大変でしたね。しかも、天頂角
分布を見ると、一番上のピンだけボンと
上がっていて、あとの4つのピンは真っ
すぐ引いてもおかしくなくて、本当に天
頂角依存性があるのかどうか、あれを見
ると不安だったですね。

梶田 μ/e 比の測定データとモンテカル
ロ計算を比べる double ratio を取ると、
どうしても電子のイベント数が少ないの
で良く分からないけれど、ミューオンだけ
見ていると、一応アップ／ダウンの非対
称が99%くらいの確率で出ています。で
も、99%というのは 3σ に届いていない。

村山 カミオカンデで上向きミューオン
はできなかったのですか？

梶田 それも出しているのですが、遅れ

て、多分1998年にはなかったかな。

村山 そんな後ですか。

梶田 そうです。

村山 IMB は上向きミューオンを見て、
ストップと突き抜けの比で、この振動パ
ラメータ領域にはないと言いました。

福来 それは1994年くらいではなかった
かな。

村山 今見ると本当にすごくきれいに…

梶田 ドンビシャなところを二重に否定
していました。

村山 あれは何だったんですか？ バック
グラウンドですか？

梶田 あれは何か少し変なことをやって
いたと思います。もう忘れましたが。

村山 そういうことが続いてきて、スー
パーカミオカンデの建設が始まりました。

梶田 1991年からです。完成してデー
タを取り始めたのは1996年4月1日です。

村山 IMB の主立ったメンバーが入って
来たのはいつ頃ですか？

梶田 それは1992年頃だと思います。

村山 建設が始まってすぐですね。IMB
のタンクが水漏れして直せなかったのも
…

梶田 はい、向こうの都合でした。

村山 日本のグループとしては、それを
すぐ受け入れたのですか？

梶田 基本的にはそうです。

スーパーカミオカンデで得られた決定的なデータ

村山 1996年にデータを取り始めて、そ
れからは急激でしたね。どんどんデータ
がたまってきて、すぐミューニュートリ
ノのアップ／ダウンの非対称が見えてき
て、その時はすごく盛り上がったでしょ
うね？

梶田 その時は内心はすごくうれし
かったです。

村山 1997年の終わり頃、パークレーに

ハンク・ソーベルがコロキュームに来て、
データを見せました。アップ／ダウンの
非対称が大きく出ていて、「もう 5σ 以上
あるのにどうして発見と言わないの。」と
言ったら、「いや、これは共同研究だから
私個人の意見で言うことはできません。」
と言われました（笑）。これは本当に発表
するんだというところまでどういうふう
に収めんしていったのですか？ データは
ずっと見せていましたね。全然隠してい
なかった。

梶田 ええ、スーパーカミオカンデはデ
ータをまとめると必ず見せてしまう。全
然隠していませんでした。

村山 1998年の高山の国際会議でこれは
エビデンスと言うところまでいくのは、
どういう議論がそこにあったのでしょうか。

梶田 忘れてしまったのですが、多分上
向きミューオンとか、全部がコンシステ
ントに説明できるかどうか、きちんと確
認が取れるまで待っていたのではなかつ
たでしょうか。

村山 では、multi-GeVの天頂角依存性だ
けでは不十分で、他のサポーティングエ
ビデンスがあって初めて… あの会議の
時、私は感動しました。高山の会議につ
いては、もともとカナダのサドベリーで
予定されていたのが、SNOの建設が遅れ
ていたために急遽高山で開催になりました。
日本で引き受けたのは大正解でした。

福来 あの頃、僕はもうニュートリノ振
動は当たり前だと思っていたので、そん
なに感激しなかった（笑）。僕にとっては
ものすごく重要だったのはカミオカンデ
の1992年の論文。ニュートリノ振動はあ
るんだということを完全に知り得たから。

村山 でも、1998年に初めて本当に実験
的に標準模型ではダメだということを 5σ
以上で示しました。で、1998年にデータ
が出て、その後梶田さんに対して周りか

らの、コミュニティー全体からの反応はどうでしたか？私の印象では、皆すぐこれは本当だと信じた印象ですが。

梶田 思った以上に受け入れられたという印象でしたね。

村山 思った以上というのは、かなり抵抗を予想していたのですか？

梶田 あるかと思っていました。10年間ずっとそういうのを見てきましたから(笑)。

福来 1998年以前のプレヒストリーがなかったら、ちょっと分からなかったのでは…それがあったから、前から「ひょっとしたら大気ニュートリノで大きな混合角のニュートリノ振動があるかもしれない」と皆思っていたところに1998年の発表が決定的なデータだったから、それを見て、「あっ、これでいいんだ」と安心したのだと思う。

村山 確かにだんだん収束していった感じですね。Soudanもカロリメータだけど double ratio が低いと言いはじめたし、粒子識別も KEK で水タンクをつくって調べましたね。確かに不安要因は除いていったというのはそうですが、そのころの印象で今でも覚えているのは、コライダーの人たちは、水チェレンコフみたいないかげんな測定器でそんなこと分かる訳ないみたいなことを言っていた人が結構いました。私はスーパーカミオカンデのウェブサイトに乗っていた誰かの博士論文で、本当にいろいろな系統誤差を調べたものを全部読み、高山の国際会議の後でしたがCERNにたまたま滞在していた時に、大気ニュートリノで本当にどこまで分かっているのかというセミナーをしました。自分で理解したなりに、ここはどのぐらいまではっきりしているとか、これは間違いないだろうとか。結構CERNの実験の人たちがやってきて、まだその時は懐疑的でしたね。

福来 高山の後でも、ジョン・バコール

は非常に懐疑的だったと思う。“Is their experiment reliable?”と、僕は何回も聞かれました。

ニュートリノ物理はこれからどこへ行くか？

村山 さて、ニュートリノ物理はこれからどこに行くのでしょうか。

福来 (ニュートリノを出さない) 2重ベータ崩壊ですね。

村山 カムランド禅が今世界でトップで頑張っていますね。

福来 ただ、今出している有効質量の制限が、核行列要素で非常に不確かなところがあるけれども、それを考慮してカムランドで出したリミットが120ミリ電子ボルトから250ミリ電子ボルトの間くらい。ところが、ニュートリノの質量階層のノーマル (normal hierarchy) では、5ミリ電子ボルト…

村山 ノーマルは厳しい。ゼロもありますしね。

福来 CPが逆になっていてキャンセルしたらゼロだけれども、一応それは除外するとしても、50倍違う。ということは、測定器のボリュームで2,500倍必要。

梶田 バックグラウンドがなければ2,500倍だけれども、あるとさらに悪くなります。

福来 インバーテッド (inverted hierarchy) でも40から50ミリ電子ボルトだとすると、今の5倍良くなりゃいけないから、ボリュームで25倍。カムランドを大きくせよというのは難しいですね。

村山 スーパーカミオカンデの中にバルーンをつるすというアイデアも出ていましたけれど。

福来 それをやっても、ノーマルの場合2重ベータ崩壊を発見するというのは、僕が生きているうちは無理ですね。

村山 レプトジェネシスは証明できると思いますか？

福来 難しいですね。あれはルバコフたち⁵が普通のバリオジェネシスで作ったバリオンは全部消えてしまうと言っていたことが動機でした。初めは不審に思っていたけれど、そのうち納得して何とかしないとイケないと…

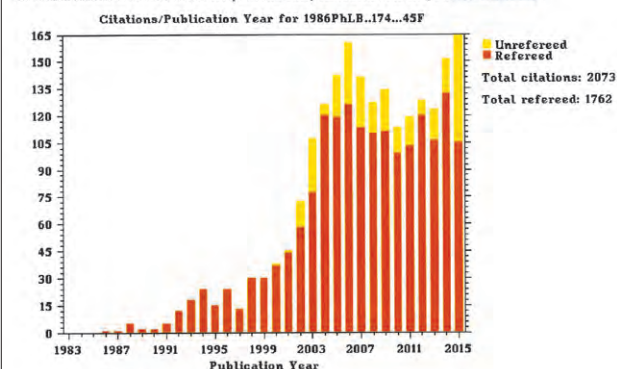
面白いものを1枚持ってきました。柳田さんと論文⁶書いたのは1986年だったのですが…

村山 1986年でしたか。まだニュートリノ振動が見つかるずっと前ですね。

福来 これが年ごとのレプトジェネシスの引用数なんです。ここで論文を出した訳だけれど、初め評判は非常に悪かったんです。ニュートリノ振動が皆に受け入れられた1998年以降上がってきて、最近はコンスタントに1年当たり百数十回引用されています。これはADS (Astrophysics Data System) なので、SPIRES (素粒子物理の文献データベース)

Citations history for 1986PhLB..174..45F from the ADS Databases

The Citation database in the ADS is NOT complete. Please keep this in mind when using the ADS Citation lists.



だともうちょっと多いんですが…

村山 本当だ(笑)。やっぱり信憑性が高まったから。

梶田 2000数年辺りから、将来のニュートリノのCP非保存をどう調べようか一生懸命議論するようになって、その関係でレプトジェネシスが前面に出てきました。

柳田 これは非常にうれしいですね。つまり、理論物理学が実験によってものすごく発展したということを表しているわけですね。こんなことは余りない。これで2重ベータ崩壊が見つければ、もう…(笑)。

福来 引用数が増えてくるのにどのくらいの遅れがあるかというのも、これを見ればすぐ分かる。このレプトジェネシスの論文は、一番初め、Physical Review Lettersに投稿して掲載拒否されたんです。

村山 え、そうだったのですか！

福来 そのころ柳田さんはDESYにいたので、ヨーロッパの雑誌のPhysics Lettersに投稿したらすぐ通った。

柳田 そう。すぐ通ったね。

福来 それで出版が3ヶ月か4ヶ月遅れたのだけれど、さっき言ったように、初め評判は非常に悪かったんです。だから長い目で見ないとダメですね。

柳田 いい実例だね。しかし、これは実験がなければズルズルと注目されないまま。神岡のニュートリノ振動という実験があったから、こんなにバーンと行ったので、そこが僕には非常にインプレッションです。

レプトジェネシスというのは、サハロフの宇宙の物質創生の3条件、バリオン数の破れ、CPの破れ、それから熱平衡の破れの、バリオンのところをB-Lに換えただけです。つまり、サハロフの枠組の1つだけを換えたものですが、それによってニュートリノがマヨラナ質量をもつという予言ができてしまった。これはサハ

ロフが陽子崩壊を予言したのに対応しているのではないですか。レプトジェネシスは本当にチェックできなくても、ニュートリノが質量をもつことは実験で証明されました。

福来 しかも質量がいいところに来たね。面白いのは、レプトジェネシスが成り立つためには、ニュートリノ質量の和と云うか、平均値が100ミリ電子ボルトくらい以下でなければならない。質量がそれより大きすぎるとバリオン数を作れない。

村山 そうですね。消えてしまいますからね。

柳田 それは非常に重要だね。

福来 ブッフミュラーたち⁷がやった計算なのですが、それは非常に重要な話で、100ミリ電子ボルトという値が、すべてのものとコンパラブルなんです。2重ベータ崩壊が出しているのが上限120ミリ電子ボルトでしょう。逆に、もし2重ベータ崩壊がそこで見つかってしまったら、レプトジェネシスは非常に厳しくなる。それから宇宙論からの制限が、ニュートリノ質量を3つ足したものが現在200ミリ電子ボルト以下だね。

村山 まあ解析によって違いますが。

福来 解析は難しく、僕が信じられるのは、3つ足したものが600ミリ電子ボルト以下というものです。これは信じてもいい。それはCMB(宇宙マイクロ波背景放射)だけしか使っていないから。200ミリ電子ボルトの方は、BAO(バリオン音響振動)を使っている。それはともかく、200ミリ電子ボルトというのは、3で割ると、60ミリ電子ボルトで、それは2重ベータ崩壊でも目標にするところだし、宇宙論的制限でも目標値のところ。次の目標値というのは、大体50ミリ電子ボルト。

柳田 そういう意味では、レプトジェネシスはこれからシリアスなチェックを受

ける訳ですね。100ミリ電子ボルトか50ミリ電子ボルトか分からないけれど、ニュートリノ質量の上限がその辺のところから下がっていくかどうか。この辺の質量が有限値として残ることになればレプトジェネシスは強い制限を受けることになる。

福来 今のところすべてがここ(上限値)以下にあると言っているだけで、太平洋で沈没船を探すようなものですね。

柳田 そういう認識をした方が良い。本当に下がっていくかどうか、非常に重要ですね。

福来 その制限を少しでも良くするにはどうすれば良いかというのは、ドラステックでなくても意味があると思う。もちろん2重ベータ崩壊が一番良いのだけれども、ノーマルだと届かない。

梶田 インバーテッドならどうですか。

福来 それでも難しい。40ミリ電子ボルトだから、ファクター5小さくしなければいけない。

柳田 ファクター5なら、できそうな気がします。生きているうちにはきっとどうにかなるのではないのでしょうか。

ニュートリノで次のサプライズは何か？

村山 では、これからニュートリノでサプライズがあるとすれば何でしょう？

柳田、梶田 インバーテッドですね。

村山 ステライルニュートリノは？

福来 そんなものはないと思う。

柳田 “I don't believe”だね。

村山 インバーテッドだったら仰天しますか？

柳田 インバーテッドだと驚きですね。DESYで会議した時だったか、ウィッテンが「ニュートリノは、ラージアングルは非常にサプライズであった。もう一度サプライズがあるかもしれない」と言ば

って言って終わってしまったけれど、何がサプライズなのだろう？やはリインバーテッドかな？

福来 インバーテッドとなったらサプライズだ。なぜそうなっているか考えるとというのは、ほとんど不可能…

柳田 それなりのへりくつをつけることはできるのですが、私が(笑)。

福来 そこが柳田さんの素晴らしいところで、何でもかんでもへりくつを作るとするのがね(笑)。

柳田 やはり重要なのは2重ベータ崩壊ですかね。

村山 2重ベータ崩壊と宇宙論ですね。

福来 宇宙論が難しいのは、CMBだけだというのが一番信頼できる場合だけでも、再結合のところで非相対論的になっているということから制限が来ているのですね。だから、CMBだけを使うと今の値より余り小さいところには行かない。

村山 では、驚きという意味では、これから当面目標にするべきなのは、宇宙論を使ってニュートリノ質量が大きいことを示して、レプトジェネシスを排除することですね(笑)。

KAGRAとスーパーカミオカンデの 超新星同時観測を期待

村山 梶田さんご自身は、これからニュートリノにどう関わっていくのですか。今は重力波のKAGRAですごく忙しいと思いますが。

梶田 ニュートリノのコミュニティはハイパーカミオカンデをやりたいので、一生懸命後押ししたいと思います。

村山 KAGRAの展望はどうですか、ご自身としては。

福来 見える可能性は？

梶田 十分あると思います。

村山 天文学になりますね。超新星爆発は、重力波で見えて光学的には見えない

こともあるし。

福来 超新星爆発は余り重力波を出さないと思っているので、重力波で見えたらこれは明らかに驚きです。

村山 例えば、重い星は重力崩壊で超新星にならずにブラックホールに落ち込んでしまっ望遠鏡で見えない、ニュートリノと重力波でしか見えないという話が十分あり得るわけですね。それこそ神岡でKAGRAとスーパーカミオカンデで同時に受かって、望遠鏡で見えない、というのは非常に面白いと思います。

福来 そういうことがあれば、それは素晴らしい。それから、日本でしか受からないというのもますます面白い(笑)。

村山 神岡から第3のノーベル賞ですよ。

福来 もう1つ重力波の検出器をどこかに作って、コインシデンスを取れるようにしておかないと。重力波検出器では 10σ 離れたシグナルなんていくらかありますから。

村山 コインシデンスが大事ですね。

梶田 アメリカのLIGOとのコインシデンス。LIGOはもう動いています。

村山 では時間ですので、この辺で。梶田さん、これからも頑張ってください。本当にうれしいです。我が事のようにうれしいです。

梶田 ありがとうございます。

Electroweak Baryon-Number Non-Conservation in the Early Universe. Phys. Lett. **155B** (1985) 36.

⁶ M. Fukugita and T. Yanagida, “Baryogenesis without Grand Unification,” Phys. Lett. B **174** (1986) 45.

⁷ W. Buchmüller, P. Di Bari, and M. Plümacher, “The Neutrino Mass Window for Baryogenesis,” Nucl. Phys. B **665** (2003) 445.

¹ K.S. Hirata et al., “Experimental Study of Atmospheric Neutrino Flux,” Phys. Lett. B **205** (1988) 416.

² K.S. Hirata et al., “Observation of a Small Atmospheric ν_μ/ν_e Ratio in Kamiokande,” Phys. Lett. B **280** (1992) 146.

³ M. Fukugita, M. Tanimoto, and T. Yanagida, “Phenomenological Lepton Mass Matrix,” Prog. Theor. Phys. **89** (1993) 263.

⁴ Y. Fukuda et al., “Atmospheric ν_μ/ν_e Ratio in the Multi-GeV Energy Range,” Phys. Lett. B **335** (1994) 237.

⁵ V.A. Kuzmin, V.A. Rubakov, and M.E. Shaposhnikov, “On Anomalous

ノーベルウィーク報告

中畑雅行

Kavli IPMU主任研究員

ノーベル賞の授賞式に伴う祝賀行事が2015年12月6日から12日にかけて一週間、ストックホルムで開催されました。私は梶田隆章さんからゲストとして招待していただき、素晴らしい祝賀行事に参加してきましたので、その様子を報告します。

12月6日、受賞者達がノーベル博物館に集まり、研究などに関係した物品を博物館に寄贈するという行事が行われました。梶田さんはスーパーカミオカンデ実験装置の内水槽に使われている20インチ径光電子増倍管と外水槽に使われている8インチ径光電子増倍管を寄贈しました。一方、Arthur McDonaldさんは、SNO実験に使われた重水(D₂O)と軽水(H₂O)を500 mlの瓶に入れ、それを天秤に乗せたものを寄贈しました。梶田さんの寄贈品と

McDonaldさんの寄贈品は、写真1のように一つのケースに収められて展示されました。因みに、2002年に小柴昌俊先生がノーベル物理学賞を受賞された時にはカミオカンデ実験で使用された20インチ径光電子増倍管を寄贈されましたが、それもノーベル博物館に展示されていました。ノーベル博物館はそれほど大きな建物ではなく、展示品も数十件程度しかありませんでしたが、そこに20インチ径光電子増倍管が2本もあることは大変名誉なことだと思います。この日は椅子の裏側に受賞者がサインをするという恒例の行事も行われました。梶田さんとMcDonaldさんがサインした椅子を写真2に示します。

12月8日、ストックホルム大学のAula Magna ホールで物理学賞受賞者

のノーベルレクチャーが開催されました。会場は1200人が入るような大きなホールでしたが、聴衆がそのホールをほぼ埋め尽くしました。私が特に驚いたのは、大学生と思われる若い人たちがたくさん参加していたことで、毎年ノーベル賞受賞者の歴史的な講演を聞けるストックホルムの学生たちを羨ましく思いました。スウェーデン王立科学アカデミーのMoberg会長の挨拶とL'Huillier物理学賞選考委員長のイントロダクションに続き、梶田さんが30分のレクチャーを行いました(写真3)。梶田さんは、1983年頃にカミオカンデが始まった頃、1986年に大気ニュートリノ振動の発見につながるデータ解析をしていた頃、スーパーカミオカンデの立ち上げ頃のことを話し、有名な1998年のニュートリノ国際会議で



写真1：ノーベル博物館に寄贈されたスーパーカミオカンデで使用されている20インチ径および8インチ径光電子増倍管とSNO実験で使用された重水(D₂O)および軽水(H₂O)。



写真2：ノーベル博物館に展示されている梶田さんとMcDonaldさんがサインした椅子。



写真3：ノーベルレクチャーでの梶田さんの講演。



写真4：ノーベルコンサートの様子。手前は梶田さんご夫妻。

の発表スライドを示しました。そして、その後長基線ニュートリノ振動実験がニュートリノ振動を確認してきたこと、第3の振動モードが2010年代に見つかったこと、将来は2020年代の実験開始に向けて大規模なニュートリノ実験装置が計画されていることを話し、最後にカミオカンデ実験、スーパーカミオカンデ実験の共同実験者達に謝意を表されました。

引き続きMcDonaldさんが30分のレクチャーを行い、Bethe、Fowlerといった巨人が積み重ねてきた発見に基づいて太陽ニュートリノ観測をしてきたこと、SNO実験はどのように立ち上げられたか、太陽ニュートリノ振動はどのように発見されたかについて話しました。そしてSNOLABで準備されている将来の実験にも触れ、最後にはSNOの実験論文に名を連ねている262名の共同実験者に謝意を表されました。

8日の昼には受賞者やゲストが宿泊しているストックホルムグランドホテルで、華麗なホールを会場として日本大使館主催のレセプションが催されました。山崎純大使の挨拶の後、ノーベル生理学・医学賞を受賞された大村智さん、続いて梶田さんがスピーチをされました。このレセプションには、スウェーデンで研究を行っている若い日本人ポスドクなども参加しており、生理学の分野の若い人達とも話す機会がありました。

8日夜には、ストックホルム・コンサートホールでノーベル・コンサートが開催されました(写真4)。24歳という若さの天才ピアニストDaniil Trifonovの演奏は圧巻でした。休憩時間にシャンパンが振る舞われ、再開後の冒頭で指揮者のFranz Welser-Möstがスピーチを行い、ノーベル賞を受賞される人々はrealityを研究しているが

音楽はrealityを超えることができる、と話しました。

9日の夜にはノルディック博物館を会場としてノーベル財団とスウェーデン王立科学アカデミー主催のレセプションが行われました。博物館のホールでは主催者側の首脳陣が参加者一人一人と握手を交わしていました。ノーベルウィークには五神真東京大学総長にもご参加いただきました。写真5は、レセプションで旧カミオカンデメンバーと共に撮ったものです。

ノーベルウィークのハイライトは10日で、授賞式と晩餐会がありました。9日までの行事については、男性にはビジネススーツ、あるいはダークラウングスーツ(ノーベルコンサート)という服装の指定がありましたが、授賞式と晩餐会は出席者全員が“white tie and tails”(燕尾服)を着ることと指定されていました。ストックホルムへ

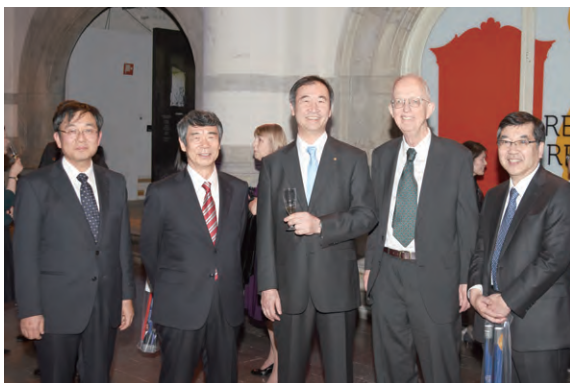


写真5：レセプションにて、旧カミオカンデメンバーと五神東京大学総長(右)。



写真6：授賞式に参加したスーパーカミオカンデメンバー。



写真7：授賞式の様子。Copyright © Nobel Media AB 2015、Photo: Pi Frisk

出発前にあらかじめ体の各部分のサイズの情報を送り、町中にあるテラーで各人の燕尾服が用意されていたのですが、ゲストの面々は8日の午後にテラーへ行き、サイズの微調整を行うとともに着方を教えてもらいました。そして、10日、ゲスト達は自分の部屋で着付けをして本番に臨みました。写真6は、会場へ出発する前にスーパーカミオカンデメンバーが集まって撮影してもらったものです。

授賞式はストックホルム・コンサートホールで行われ、約1500名が参列しました。2日前にコンサートが開かれた場所ですが、授賞式のために模様替えされていました。授賞式のステージを写真7に示します。物理学賞、化学賞、生理学・医学賞、文学賞、経済学賞の順に授賞が行われ、梶田さんが最初の受賞者でした。各賞ごとにスウェーデン語での業績紹介後、カール16世グスタフ国王から受賞者にメダルとディプロマが手渡されました。(写

真8)。手渡される時には会場の全員が起立し、華やかなファンファーレが鳴り響きました。この厳かな授賞式には大変感動しました。梶田さんのメダ

ルとディプロマを写真9に示します。

晩餐会は市庁舎で行われ、約1350名が参加しました(写真10)。受賞者らの入場に際しては、梶田さんの奥様



写真8：梶田さんがカール16世グスタフ国王からメダルとディプロマを受け取る様子。Copyright © Nobel Media AB 2015、Photo: Pi Frisk

がカール16世グスタフ国王にエスコートされて先頭で入場し、梶田さんはソフィア妃（国王の第2子、フィリップ王子妃）にエスコートされての入場でした。食事は、前菜としてヒラメとホタテの海藻風味、メインは子牛のロースト・マッシュルーム包み他、デザートは桜の花をイメージしたデザートでしたが、非常に気を使った創作が施されていると感じました。各賞ごとにスピーチがありましたが、物理学賞はMcDonaldさんが行いました。“Today I am speaking for Prof. Kajita and our two scientific Collaborations, SuperKamiokande and SNO, of which there are a number of representatives here with us today.” から始まるスピーチでしたが、スピーチの主要な部分をここに引用させていただきたいと思います。

“... It has been said that behind every success there is effort, behind the effort there is passion and behind the passion there are people with the courage to try. Prof. Kajita and I have been very fortunate to have many highly skilled and courageous

collaborators and we thank them for their contributions to our success. There are several founders of our collaborations who have passed away that we would particularly like to remember: Yoji Totsuka for SuperKamiokande and Herb Chen for SNO. We will be forever thankful for their contributions to the success of our experiments.”*

私の和訳を付けておきます。

「... すべての成功の裏には努力があり、努力の裏には情熱があり、情熱の裏には挑戦する勇気があります。梶田先生と私は非常に運良く、多くの高い技能をもった勇敢な共同実験者を持ち、今回の成功に対する彼らの貢献に感謝します。どちらの実験とも忘れてはならない亡くなられた創始者がいます。Super-Kamiokandeは戸塚 洋二、SNOはHerb Chen です。私たちは永久に彼らの貢献に感謝します。」

私は参加しませんでした、10日の夜から11日の朝にかけて、ストックホルム大学の学生が主催したNobel NightCapという催し物がありました。参加した方から聞くと学園祭のような

乗りだったそうです。

11日には、ノーベル賞受賞者たちが座談会風に議論する“Nobel Minds”と呼ばれるBBC放送の番組収録がありました。受賞者たちが円卓を囲み、その周りを地元の学生達が取り囲み、学生から出てくる質問に受賞者たちが答えるというスタイルの番組でした。受賞者達の研究に対する考え方をグローバルな見地から聞ける良い番組収録でした。BBC放送、あるいはノーベル財団のホームページでもいずれ見られるようですので、興味のある方はご覧下さい。

ノーベルウィークに参加して最も強く感じたことは、多くの学生達や一般の人達が科学全般に興味を持ち、ノーベル賞に輝く業績に楽しく接していることでした。日本にいと日本人受賞者にばかり話題が集中してしまいます。グローバルな見地で科学に接する北欧の人々に歴史の重さを感じました。

*http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/mcdonald-speech.html. Copyright © Nobel Media AB 2015



写真9：梶田さんのノーベル賞メダルとディプロマ。



写真10：晩餐会の様子。Copyright © Nobel Media AB 2015、Photo: Alexander Mahmoud

Our Team

罗 峰

ルオ・フォン 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私は素粒子理論と宇宙論の接点で研究を行っています。特に、検証可能な予言ができる理論模型に興味があり、様々な物理現象をある枠組みの中で矛盾なく記述する方法を研究しています。超対称性は魅力的な枠組みであり、幾つかの基本的問題に一つの回答を与えます。超対称性は、理論のもつ本質的なエレガンスに加え、LHCとダークマターの探索実験でテストできると共にビッグバン元素合成を含む宇宙論でもチェックできるため、現象論的にも魅力があります。私は、標



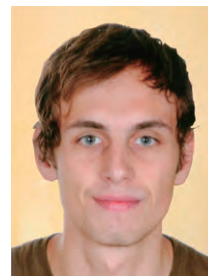
準模型を超える物理の探索において、より明確な道筋と新たな方向を見出すように私たちを導くことができるものはこの枠組みの徹底的な究明であると思っています。

マティアス・ヴァイゼンバッハー

Matthias Weissenbacher 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私は、超弦理論により提供されるUV complete（紫外完全）な枠組みを素粒子の標準模型や宇宙論のような場の理論的な模型と結びつける分野であるストリング現象論を研究しています。ある種の超重力理論によって与えられる「ストリング有効作用」を用いてこの結びつきが確立します。特に御利益が大きいのはF理論へのアプローチで、その最善の方法は11次元超重力理論を経由することであり、カイラルスペクトルと大統一理論に関連のある例外ゲージ群が現れる4次元の $N=1$ 超重力理論を導くことができます。現在、私はこ



ういった超弦理論が誘起する α' , g_s およびKaluza-Klein粒子による超重力理論への補正に的を絞って研究を進めています。こういった有効理論の補正を受けた力学、特にその真空の構造の研究は、現象論的に極めて重要であると共に概念的に非常に興味深いものです。

ワークショップ：ダークマターの天体物理学

アレクサンダー・クセニコ Alexander Kusenko

UCLA 物理学・天体物理学教授、Kavli IPMU 客員上級科学研究員

2015年10月13日から16日まで行われた Kavli IPMU フォーカスウィークワークショップ「ダークマターの天体物理学」には、素粒子物理学者と天体物理学者が集まり、宇宙の最も興味深いミステリーの一つ、ダークマターのミステリーについて議論しました。

宇宙の物質はほとんどダークマターです。ダークマターは通常の原子から作られたものではなく、新しい未発見の素粒子から作られています。ダークマターの存在は、その重力によって分かります。ダークマターの質量は、幾つかの方法によって測定可能です。第1に、重力レンズ効果は重い物質によって光が曲げられることに基づくもので、ダークマターで形成された「レンズ」の質量の測定に使えます。第2に、X線観測から推定される銀河団の中のガスの温度は、そのガスを含むポテンシャル井戸の深さを決めるために使えます。第3に、ビッグバンからの残留放射である宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎのスペクトルは、重力を及ぼす全物質と、ダークマターとは異なり光の圧力を感じる通常の物質との比を測定するために使えます。最後に、銀河団の中の銀河の速度と銀河の中の星の速度を測定すると、銀河団や銀河の中に存在する質量による引力を知ることができます。これら全ての独立な測定は、ダークマターの質量が通常の物質の5倍以上であるという同じ結果を与えます。

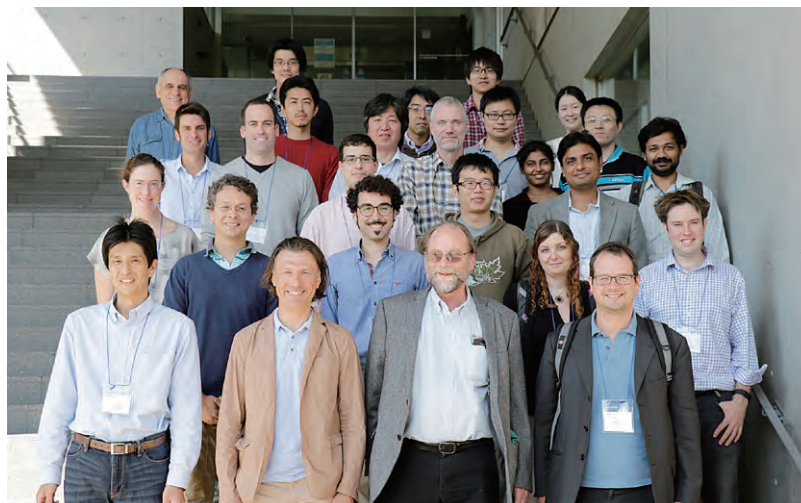
しかし、ダークマターの組成はミステリーのままです。これまでに発見された素粒子には、ダークマターの構

成要素になれるものは無いということを示すことができます。従って、ダークマターの正体が分かれば、それは少なくとも1種類の新粒子の発見を意味し、素粒子とその相互作用の標準模型を超える新たな方向にサイエンスを導くでしょう。

ダークマターのミステリーを解決するには、ダークマターがもつかもしれない非重力的な相互作用を理解することが必要です。なぜなら、このような相互作用によって、ダークマターの素粒子を識別することができるかもしれないからです。天体物理学では幾つかの方法でダークマターの性質を探ることができます。

ダークマターは、銀河や銀河団等のような、現在私たちが宇宙に見る構造の形成を主導する役割を務めました。宇宙で可能な最も小さな構造は、ダークマターが冷たいか暖かいかが、つまり、構造形成が始まったときにダークマターの素粒子がどれだけの速度で動いていたか、に依存します。また、ダークマター・ハローの密度分布はダークマター素粒子相互の自己相互作用の影響を受ける可能性があります。矮小楕円体銀河の観測と、銀河および銀河団のダークマターの分布の決定は、ダークマター素粒子の性質を解明する可能性があります。

最近の幾つかの進展により、このワークショップはタイムリーで興味深いものとなりました。報告された3.5 keVの単色X線の起源がダークマターの崩壊である可能性を、銀河スケール以下の構造形成に関する幾つかの異常と組み合わせた議論が特に注目を集めました。最近のダークマターとバリオンのN体シミュレーションでのブレイクスルーは、特に冷たいダークマターと暖かいダークマターの両方についての記述を改善するものですが、小スケールの構造をダークマターの性質と関係付けるツールとしてより良いものとなることが期待されています。自己相互作用をもつダークマターを含む素粒子物理の模型の急増は、ダークマター素粒子の微視的な性質が、ハローの形と3軸不等性から密度分布、銀河団の衝突、あるいは超重ブラックホールの形成まで、天体物理学的にどのような形で現れるかという問題との関連で新たな問題を提起しています。N体シミュレーションは、ダークマターとバリオン物質の理解に関して、新たな段階に到達しています。重力レンズを用いた観測技術は成熟しています。こういった進展全てによって、天体物理学者と素粒子物理学者が集まり、充実した議論を行ったこのワークショップがタイムリーなものとなりました。



TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2015

川崎雅裕 かわさき・まさひろ

Kavli IPMU 主任研究員

松本重貴 まつもと・しげき

Kavli IPMU 准教授

2015年10月26日から30日にかけて柏の葉カンファレンスセンターで開催された国際会議“TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2015”は大成功を収めたと言えます。この会議は東京大学の二つの研究機関、カブリ数物連携宇宙研究機構と宇宙線研究所の運営で行われ、テラスケールの高エネルギー素粒子天体物理学の現在までの進展と将来への展望を主眼に据えたものでしたが、以下の二つの理由によりその開催が特に渴望されるものでもありました。一つ目は最近のガンマ線観測（HESS実験等）、宇宙起源の高エネルギーニュートリノ観測（IceCube実験等）、そして高精度の宇宙線観測（AMS-02実験等）により、宇宙線の起源解明に向け大きな進展があったことです。二つ目はテラスケールの高エネルギー素粒子天体物理学が暗黒物質の探査（特にその質量が電弱スケールより高く、加速器実験では探査が難しい場合）に非常に重要となりつつあることです。

これらのトピックは15の招待講演と4つパラレル・セッション（暗黒物

質、ニュートリノ、宇宙線、ガンマ線の4つのセッション）で深く言及されました。高エネルギーニュートリノに関するトピックでは、データが蓄積されてきたこともあり、その起源について活発な議論が行われ、同時に将来のニュートリノ実験の展望についても意見が交わされました。宇宙線に関するトピックでは、最新の高精度観測が明らかにしたエネルギースペクトル、化学組成、そして到来方向の非対称性が聴衆の大きな注目を集めました。ガンマ線天文学は、現在までチェレンコフ望遠鏡の発展と共に進展してきましたが、将来においては宇宙線の加速機構やその起源天体の解明に大きな寄与をすると期待されています。このため、会議ではこれらについて多くの側面から言及され、内容の濃い議論が行われました。

一方、暗黒物質に関わる講演では、その殆ど全て（招待講演及び依頼講演）が高エネルギー素粒子天体物理学と暗黒物質の間接検出の関わりについて議論するものでした。現在素粒子天体物理学及び関連する天文学が大きく進展

しており、近い将来には我々の銀河や近傍銀河での暗黒物質分布等の詳細情報が得られると期待されています。そのため、これらの発展が暗黒物質探査に与える影響について、多くの参加者が強い興味をもっていました。会議では当然これらのトピックについて包括的かつ詳細に言及され、同時に活発な議論も行われました。その結果、参加者の多くはこの分野の現状と展望を深く理解することができ、また将来における研究の指針をも得るに至りました。

この会議はもともと規模がそれ程大きくならないことが想定されていましたが、蓋を開けてみると参加者数は当初の予定を大幅に超える事態となり、200人近くにも上りました！この事実、この本会議のトピックが現状において多くの素粒子物理学、宇宙論、そして天文学の研究者から最重要課題の一つであると認識されている証左であり、近い将来に再度カブリ数物連携宇宙研究機構を含む柏地区で同様の会議を開催することが重要となります。



PFS-SSP Galaxy Survey Workshop 2015

矢部清人 やべ・きよと

Kavli IPMU 博士研究員

宇宙にある多様な銀河はどのようにしてできたのでしょうか？その答えを探る方法のひとつが、遠くの銀河を観測し形成途中の銀河の姿を統計的に明らかにすることです。銀河の性質を詳細に調べる方法の一つに分光観測がありますが、遠くの銀河は一般的に暗くなるため観測が難しくなります。従って、より口径の大きい望遠鏡を用いた観測が必要となります。また、暗い銀河の効率的な調査のためには、一度にできるだけ多くの銀河を分光観測することが求められます。

Kavli IPMU が推進するすばる望遠鏡主焦点多天体分光装置 Prime Focus Spectrograph (PFS)は、視野1.3度の中に2400本のファイバーをもち、可視から近赤外にかけて同時に多天体分光観測できる装置です。現在、我々はこの装置を用いた大規模な銀河サーベイの準備を行なっています。今回、2015年11月13日にKavli IPMUで日本にいる多くの銀河研究者およそ40名が一同に会し、具体的なサイエンスの

例や観測計画などを議論しました。

PFSでは、銀河の活動が最も活発であった赤方偏移2付近(宇宙年齢約30億年)の銀河の性質をこれまでにない統計量で明らかにすることを目的の一つとしていますが、観測可能な波長範囲が広いと、様々な赤方偏移の銀河をターゲットとすることが可能です。本研究会では、主に赤方偏移1付近(宇宙年齢約60億年)から赤方偏移7付近(宇宙年齢8億年)における様々な銀河や活動銀河核(AGN)などのターゲットについて、PFSを用いてどのようなことを明らかにできるか、またそのためにはどのような戦略で観測を行うべきかの議論が行なわれました。また、銀河形成進化理論の立場から観測に期待する点なども挙げて頂き、PFSがこの分野で果たす役割の重要性を再確認しました。

本研究会において、日本における銀河研究者のPFSに対する期待の大きさが明らかになりました。PFSは国際協力をベースとした研究計画ですが、日

本のコミュニティが主導して観測を行っていくことが期待されています。今回の研究会を通して、具体的なサイエンステーマが明らかになっただけでなく、個々のテーマをリードする研究者も決まりました。

今後、PFSコラボレーションの研究者が集まり、全体会議で様々な議論を行ないます。本研究会での議論の結果も、この全体会議において報告され、全体のサーベイ計画との整合性が議論されていきます。PFSは2019年後半から実際の観測が始まります。今後もこのような研究会を定期的に行ない、具体的な観測計画へのフィードバックをかけることで、PFSによる銀河サーベイが世界に類を見ない研究成果を出せるサーベイとなるようにしていく予定です。

ワークショップの運営にご尽力いただいたKavli IPMUのスタッフおよびマイク係を引き受けてくださった東京大学の大学院生の方々に感謝致します。



代数幾何学における圏論的及び解析的不変量1, 2

アレクセイ・ボンダル Alexey Bondal

Kavli IPMU 主任研究員

2015年に日露2国間交流事業共同研究「代数幾何学における圏論的及び解析的不変量」が開始されました。日露2国間交流事業は日本学術振興会およびロシア基礎科学財団(RFBR)から資金援助を受け、本共同研究は斎藤恭司とアレクセイ・ボンダルが代表者を務めます。

この共同研究は、代数幾何学と解析幾何学、ホモロジー代数、および超弦理論分野で活発に研究を行っている日本人およびロシア人の中から優れた専門家を結集し、複素多様体の構造やそのミラー対称性に対して意味をもつ関連した諸々の不変量—導来圏、半無限ホッジ構造、トポロジー相関関数、量子モチーフ等—についての洞察を得ることを目的とします。

この共同研究の後援による最初の研究集会「代数幾何学における圏論的及び解析的不変量1」は2015年9月14日から18日までモスクワのステクロフ研究所で開催され、Kavli IPMUのメンバー数人と東京大学大学院数理科学研究科、京都大学、大阪大学、首都大学東京、モスクワのステクロフ研究所、ロシア国立研究大学高等経済学院から数学者が出席しました。

次に、2015年11月16日から20日まで、研究集会「代数幾何学における圏論的及び解析的不変量2」がKavli IPMUで開催され、ロシアと日本だけでなく他の幾つかの国々からもこの共同研究の課題の専門家を惹きつけ、前回より多くの参加者を数えました。

数学的な考え方では、ミラー対称性は複素世界とシンプレクティック世

界の神秘的な双対性として理解され、そこでは、弦の境界条件であるブレーンは純粋に接続層の複体、あるいはラグランジアン部分多様体のいずれかと解釈されます。この理由により、この共同研究にはシンプレクティックと複素という2つの側面があり、研究集会での講演の多くはミラー対称性の一方の側面の研究か2つの側面の比較に焦点を合わせるものでした。

この事業の研究課題が物理学で発見されたミラー対称性に端を発するものであることから、研究集会でも物理学者が重要な役割を果たしました。Kavli IPMUで超弦理論を研究している堀健太郎が最初の講演を行い、ゲージ化線形シグマ模型の観点から説明しました。

ミハイル・カブラノフは、偏屈層と呼ばれる特殊な位相的構成可能な層の複体を圏化することによってラグランジアン・サイクルの深谷圏の解釈を与えました。彼は、この新しい理論の広大な圏論的、位相幾何学的眺望を解説するとともに、ワルドハウゼンの構成法により有限個の点(puncture)を除いたリーマン面の場合について具体的に適用してみせました。

有名なロシア人物理学者のアレク

サンダー・ベラビンは、2次元ミニマル Liouville 重力理論における相関関数の計算という物理学の問題に対する、関数の特異点に関連した斎藤恭司のフロベニウス構造の応用について報告しました。彼の提案した予想では、原始形式の選択は極めて重要です。

研究集会での入谷寛によるトーリックスタックのミラー対称性に関する講演は、ミラー対称性の両方の側面の背後に潜む本質を探ろうというもう一つの試みでした。ミラー対称変換の下でのトーリックスタックの解析的不変量と圏論的不変量の振る舞いに矛盾がないことが細心の注意を払って調べられました。

研究集会での他の講演は、全てミラー対称性の一方の側面、すなわち複素代数幾何学あるいはシンプレクティック幾何学に関する圏論的あるいは解析的不変量の最新かつ最先端の研究に焦点を絞ったものでした。優れた専門的知識をもった研究者が参加したため、報告された研究は通常2カ国の範囲で期待されるレベルをはるかに超えるもので、本当に世界的なレベルでした。この研究集会が著名な外国人研究者数名の注意を惹きつけたのは、この理由によるものでした。



B Mode from Space

菅井 肇 すがい はじめ

Kavli IPMU 准教授

2015年12月10日(木)～16日(水)の1週間、Kavli IPMU大講義室で行われたB Mode from Spaceワークショップに130人が集結しました(<http://indico.ipmu.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=72>)。研究者達の狙いは、ビッグバン以前の宇宙の姿、つまり宇宙の始まり直後の指数関数的膨張時代(インフレーション期)の存在を検証することです。このために、インフレーション仮説により発生する原始重力波の痕跡として宇宙背景放射(CMB)に現れる偏光の空間的パターン(Bモード)を測定します。CMBはミリ波帯域にスペクトルのピークをもちますが、CMB以外の成分、つまり銀河系内からのシンクロトロン放射やダスト放射等の前景放射をスペクトル形状から成分分離することがポイントです。

ワークショップでは、CMB偏光観測による原始重力波検出以外のサイエンス、例えば宇宙再電離時代の理解やニュートリノ質量への制限という観点も議論されましたが、前景放射除去に

ついて丸一日かけて議論されました。除去方法そのものについての講演もちろん、ダスト放射機構についての講演もお願いし、理解を深めました。

CMB偏光についての経験と将来計画という観点から、SPT, ACT, POLARBEAR/Simons Array, ABS, QUIJOTE, CMB-S4等といった地上観測、短期間測定ではあるが大気吸収・放射に比較強い気球観測(EBEX, PIPER等)、さらには大気から完全フリーで長期間測定を行う衛星観測(Planck, LiteBIRD, PIXIE等)が当事者達によって報告・議論されました。COBE, WMAPに続くCMB観測衛星Planckの責任者Jan Tauberが懇親会挨拶で発言したように、CMBの偏光観測に向けた大きな国際的なうねりが表出したワークショップでした。

後半には、衛星用のコンパクトな光学系、半波長板を用いた偏光変調系、断熱消磁冷凍機を含む100 mKに至る冷却系、TES/MKID超伝導検出器及び読出系等それぞれの技術に焦点を当

てた進展報告・議論が行われました。

Kavli IPMUはLiteBIRD(Lite (Light) satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection)衛星計画にコアメンバとして参加しており、私は光学系設計について発表しました。35 GHzから450 GHzの観測帯域にて全天・大角度における直線偏光測定を3年間行う計画です。

参加者内訳は、CMB観測の分野をリードしている日本、アメリカ合衆国、欧州からそれぞれ4割、3割、3割というバランスがとれたものでした。当日の運営等は小濱さん、その他Kavli IPMUの事務スタッフや日本の学生達の協力に支えられました。組織委員は、片山伸彦(Kavli IPMU)が中心となり、長谷川雅也(KEK)、羽澄昌史(Kavli IPMU/KEK)、石野宏和(岡山大)、松村知岳(JAXA)、関本裕太郎(NAOJ)および菅井が努めました。



梶田隆章主任研究員、文化勲章を受章

東京大学宇宙線研究所長でKavli IPMU主任研究員を兼ねる梶田隆章さんが平成27年度文化勲章受章者の一人に選ばれ、2015年11月3日に皇居における親授式で天皇陛下から文化勲章を親授されました。文化勲章は「我が国の文化の発達に関して顕著な功績のあった者に対し授与される勲章」とされています。



梶田隆章さん

鈴木洋一郎、梶田隆章両主任研究員、2016年基礎物理学ブレークスルー賞を受賞

2015年11月9日、アメリカのブレークスルー賞財団がニュートリノ振動の研究に貢献した5つの実験（日本のスーパーカミオカンデ、カムランド、K2K及びT2K、カナダのSNO、中国のDaya Bay）に対し、各実験を主導してきた研究者及び研究チームへ2016年基礎物理学ブレークスルー賞を授与すると発表しました。基礎物理学ブレークスルー賞は、宇宙の謎の解明のため研究を行い人類の知の開拓に深く貢献したとされる物理学者を対象とする賞です。スーパーカミオカンデ実験からは、実験を主導した梶田隆章さんと鈴木洋一郎Kavli



鈴木洋一郎さん

IPMU主任研究員、および代表的な成果とされる論文の著者全員を含む研究チームが受賞者に選ばれました。

立川裕二科学研究員、2016年物理学ニューホライズン賞を受賞

同じく2015年11月9日、アメリカのブレークスルー賞財団が2016年物理学ニューホライズン賞受賞者を発表し、東京大学大学院理学系研究科准教授で



立川裕二さん

Kavli IPMU科学研究員を兼ねる立川裕二さんが受賞者の一人に選ばれました。基礎物理学ニューホライズン賞は、基礎物理学において重要な貢献をしてきた将来有望とされる若手研究者へ贈られる賞です。立川さんの受賞理由は超対称な場の量子論において傑出し且つ洞察力に優れた研究を行ったこととされ、例えば2010年に発表したアルディ・ガイオット・立川予想によって場の量子論や超弦理論の研究の進展に大きく貢献したことが評価されました。

柏キャンパス一般公開

2015年10月23日、24日の2日間、東京大学柏キャンパス一般公開「輝く科学、柏から」が開催されました。

Kavli IPMUでは研究棟の大講義室を会場に、初日に高田昌広教授による講演「宇宙のダークサイドーすばるHyper Suprime-Camが探る宇宙」、2日目に鈴木洋一郎主任研究員による講演「地下から探る宇宙の謎ーダークマターを捕まえようー」および難波亮研究員と9月にKavli IPMUで滞在制作（Artist in Residence）を行った現代美術作家の野村康生さんによる科学と芸術の共通性に関する対談が行われました。その他、2日間の企画として野村さんのArtist in Residence成果展、パネル展示によるKavli IPMUの研究紹介、数学パズル、研究棟ツアー、

Kavli IPMUの研究者の著作を展示した「わたしと図書館2015」、カリフォルニア大学パークレイ校教授でKavli IPMU客員上級科学研究員を兼ねる野村泰紀さんとKavli IPMUが監修した日本語字幕付き映画「Particle Fever」の上映を実施しました。

2日間の来場者数は、梶田隆章さんのノーベル物理学賞受賞決定直後とあって例年を大幅に上回り、キャンパス全体で10,000人を越え、Kavli IPMUには3,700人以上が訪れました。



高田昌広さんの講演



鈴木洋一郎さんの講演

カブリ賞受賞者一般講演会開催

2015年10月31日に東京都港区の品川コクヨホールにおいて、カブリ財団、ノルウェー科学人文アカデミー、駐日ノルウェー王国大使館、及びKavli IPMUの主催による「2015カブリ賞受賞者一般講演会」が開催されました。村山斉Kavli IPMU機構長が司会を務め、カブリ財団のロバート・コン理事長らの挨拶の後、まず2014年カブリ賞（ナノサイエンス）受賞者のストラスブール大学教授トーマス・エベセン博士が「光と金属と小さな穴がもたらした驚異の発見」と題してナノサイエンスに関する講演を行い、続いて2014年カブリ賞（天体物理学）受賞者のマサチューセッツ工科大学教授ア

ラン・グース博士が「インフレーション宇宙論—この宇宙は唯一の宇宙なのか?」と題して宇宙論に関する講演を行いました。同時通訳つきで行われたこの講演会は、400名の会場がほぼ満席となる盛会でした。



左からコン理事長、グース教授、村山機構長、エベセン教授

Kavli IPMU / ICRR 合同一般講演会 「見えない宇宙を観る」開催

2015年11月22日に東京大学本郷キャンパスの小柴ホールで、「見えない宇宙を観る」を主題に今回で13回目となるKavli IPMUと東京大学宇宙線研究所共催の一般講演会が開催され、中学生を含む170名が参加し、会場は満席となりました。

はじめにKavli IPMUのカイ・マルテンス准教授が「暗黒物質 —ミステリー、イマジネーション、チャレンジ」と題して、暗黒物質が存在するという証拠が示された歴史的経緯の解説、現在唱えられている主だった説の紹介、そして自身が取り組むXMASS実験について解説しました。続いて宇宙線研究所の林田将明特任助教が「ガンマ線で見えるダイナミックな宇宙」と題して、ガンマ線を使った観測で見る宇宙や現在開発中のCTA（チェレンコフ望遠鏡アレイ）プロジェクトについて解説しました。

その後の「世界に1つの手作り装置」と題した2人の講師の対談では、現在の実験を中心とした研究生活を目指すようになったきっかけや、これまで行ってきた研究の紹介、お互いが現在携わっている装置について意見交換を行いました。最後に行われた講師を囲みでの懇談会は、講師に直接質問をする

ことができる貴重な機会とあって大変な盛り上がりみせ、閉会となりました。



カイ・マルテンスさん(左)と林田将明さん(右)

第5回 WPI 合同シンポジウム「実感するサイエンス」

2015年12月26日、京都大学吉田キャンパスの百周年時計台記念館において第5回世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) 合同シンポジウム「実感するサイエンス」が開催されました。WPI合同シンポジウムは次代を担う高校生を対象に最先端の科学とその魅力を伝えるために毎年行われています。今年は京都大学物質・細胞統合システム拠点 (iCeMS) が運営を担当し、研究者3名による講演に加え、山極壽一京都大学総長の特別講演も行われました。その他、講師らによる研究ノート进行テーマとしたパネルディスカッションも実施されました。Kavli IPMUはWPIの他8拠点と共にブース展示を実施し、高校生を含む来場者の方に機構の紹介を行いました。



高校生で賑わう展示ブース

サンタクロースがどんぐり保育園にやってきた

2015年12月18日に柏キャンパスに設置されているどんぐり保育園でクリスマス会が行われました。今年は

Kavli IPMUのケビン・バンディ助教がサンタクロースとしてどんぐり保育園を訪れ、園児と楽しい一時を過ごしました。



サンタクロース姿のケビン・バンディさん

人事異動

昇任

Kavli IPMU 助教の阿部知行さんが2016年1月1日 付でKavli IPMU准教授に昇進されました。



阿部知行さん

転出

次の方々が転出しました。[括弧内はKavli IPMU 在任期間です。]

Tanmay Deshpande さん [2012年11月1日 - 2015年11月30日]、Kavli IPMU 博士研究員からインドのタタ基礎科学研究所数学研究科Reader (准教授) へ。

Kai Schmitz さん [2012年11月1日 - 2015年10月31日]、Kavli IPMU 博士研究員からマックスプランク原子核研究所博士研究員へ。

Benedetta Vulcani さん [2012年10月16日 - 2015年10月15日]、Kavli IPMU 博士研究員からメルボルン大学物理学科博士研究員へ。



バリオン音響振動(BAO)

齋藤 俊 Kavli IPMU 博士研究員

宇宙の膨張史を詳細に知るためには、過去のある時期の宇宙が現在からどれくらい遠くの距離離れているかを正確に測定する必要があります。バリオン音響振動は、この距離測定において本質的な非常に精密なものさしなのです。宇宙初期の光子・バリオンプラズマにおける音速で決まるバリオン音響振動スケールは、Planckなどの宇宙マイクロ波背景放射測定実験で精密に測定されています。スローンデジタルスカイサーベイやSuMIReプロジェクトのPrime Focus Spectrographは、宇宙の大規模構造に隠されたこのバリオン音響振動スケールを通して、精密に宇宙の膨張史を測定し、ダークエネルギーの謎に迫ります。

