

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 Atmospheric Neutrinos and Neutrino Oscillations
(Originally appeared in September 2011 issue of IPMU News)

2015 NOBEL PRIZE IN PHYSICS TO TAKA AKI KAJITA



31

No.

October 2015

Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Historic Achievement
- 4 **Feature**
Atmospheric Neutrinos and Neutrino Oscillations
Takaaki Kajita
- 10 **Our Team**
Masahiro Kawasaki
Artan Sheshmani
Chengcheng Han
Kaori Hattori
Changwoo Joo
Shing Chi Leung
Evangelos Routis
Alessandro Sonnenfeld
David Stark
Itamar Yaakov
Kazuya Yonekura
- 14 **Workshop Report**
Workshop on "Analytic Representation Theory
of Lie Groups" Yoshiaki Oshima
Tokyo-Berkeley Summer School
"Geometry and Mathematical Physics"
Toshitake Kohno
"Kavli IPMU-Durham-KIAS Workshop: New Particle
Searches Confronting the First LHC Run-2 Data"
Michihisa Takeuchi
MEXT Scientific Research on Innovative Area
Inauguration Symposium "Why Does the Universe
Accelerate? – Exhaustive Study and Challenges for the
Future –"
Masahiro Takada
- 18 **Special Contribution**
Invisible Halo Yasuo Nomura
- 22 **Tea Break**
Urashima Effect: a Version
Alexander Voronov
- 24 **News**
- 28 **Entanglement Entropy**
Tadashi Takayanagi

Japanese

- 29 **Director's Corner** 村山 斉
歴史的な業績
- 30 **Feature**
大気ニュートリノとニュートリノ振動
梶田 隆章
- 36 **Our Team**
川崎 雅裕
アルタン・セシュマニ
韓 成成
服部 香里
朱 倉佑
梁 成志
エバングロス・ルーティス
アレッサンドロ・ソネンフェルド
デイヴィッド・スターク
イタマル・ヤーコヴ
米倉 和也
- 40 **Workshop Report**
研究会 "Analytic Representation Theory
of Lie Groups" 大島 芳樹
東京-バークレーサマースクール
「幾何学と数理論理」
河野 俊丈
"Kavli IPMU-Durham-KIAS Workshop: New Particle
Searches Confronting the First LHC Run-2 Data"
竹内 道久
新学術領域研究「なぜ宇宙は加速するのか?
-徹底的究明と将来への挑戦」発足シンポジウム
高田 昌広
- 44 **Special Contribution**
不可視のハロ 野村 康生
- 48 **Tea Break**
浦島効果異説 アレクサンダー・ヴォロノフ
- 50 **News**
- 52 **エンタングルメント・エントロピー**
高柳 匡



Takaaki Kajita (Director of the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), the University of Tokyo, and a Principal Investigator of the Kavli IPMU) held a press conference on the University of Tokyo's Hongo campus on October 6, after the announcement of the 2015 Nobel Prize in Physics. (Image credit: The University of Tokyo.)

梶田隆章：東京大学宇宙線研究所長（Kavli IPMU主任研究員を兼ねる）。2015年ノーベル物理学賞発表当日の10月6日、東京大学本郷キャンパスにおける記者会見の様子。(Image credit: The University of Tokyo)

Historic Achievement

Director of IPMU

Hitoshi Murayama

I've always believed that Kajita's discovery in 1998 should be awarded Nobel Prize in Physics. All Nobel Prizes in particle physics so far were given to achievements that led to the establishment of the theory called "Standard Model". On the other hand, Kajita, and the joint awardee Art McDonald, have shown for the first time in history that the Standard Model cannot explain everything in the Universe. Their work is historic in that they have shown that the Standard Model is not the ultimate goal, but rather needs to be expanded to a yet bigger framework. Actually there is a long-standing problem "Why do we exist in the Universe? Universe created matter and anti-matter one to one, but somehow the balance was tilted towards matter at the level of one part in billion, so that matter and anti-matter did not completely annihilate each other and a small amount of matter remained to date. How was the balance changed?" This is literally a matter of life and death for us. Now that they discovered that the neutrinos have tiny amount of mass, there is a very strong anticipation in the community that neutrino is our "father" who protected us from the complete annihilation, by tilting the balance between matter and anti-matter. This is a theory put forward by Fukugita and Yanagida at Kavli IPMU, but it became very plausible after Kajita's discovery. As a matter of fact, this research is pursued by the

Hyper-Kamiokande proposal in Japan, and particle physics in the US puts research in this area as its first priority. Clearly Kajita's work changed the direction of research in particle physics worldwide.

Kajita has been a Principal Investigator from the beginning of Kavli IPMU. We are all ecstatic that one of our members received Nobel Prize. In addition, this year's Breakthrough Prize was also awarded to Kajita as well as Yoichiro Suzuki, and the New Horizon Prize to Yuji Tachikawa, also our members. Series of major awards is a testament to the high quality of researchers at our institute. What wonderful news! I expect more research results of worldwide recognition will come out from Kavli IPMU. I'm looking forward to a bright future.



Atmospheric Neutrinos and Neutrino Oscillations*

Introduction

About a hundred years ago, Victor Hess, aboard a balloon, measured the radiation levels at high altitudes and discovered cosmic rays. Later investigations revealed that the main components of the cosmic rays were protons and atomic nuclei, and their energy spectra extended to very high energies. The production sites and mechanisms of the cosmic ray acceleration are not fully understood up to now. Therefore, investigations are still made extensively in search of their origin.

Cosmic rays incident on the atmosphere interact with nitrogen and oxygen nuclei in the air, and pions are copiously produced in these interactions. Among them, positively or negatively charged pions decay into a muon and a muon antineutrino. Further, most of the muons produced in the upper atmosphere decay into an electron (or positron), a muon neutrino, and an electron neutrino (see Fig. 1), though the muon has a relatively long lifetime of 2 microseconds. It should be noted that for simplicity we do not distinguish between the positive and negative signs of the charges nor the particle and its antiparticle in this article. Therefore, it should be understood that a “neutrino” actually means either a neutrino or an antineutrino.

Neutrinos produced in this way are called *atmospheric neutrinos*. After the muon neutrino was discovered in an accelerator experiment in 1962, experiments to confirm the existence of atmospheric neutrinos were attempted deep underground in a

mine in South Africa and in another mine in India. In these experiments, the atmospheric neutrinos were observed in 1965. In this article I will explain investigations of neutrino oscillations through observations of neutrinos produced by cosmic rays.

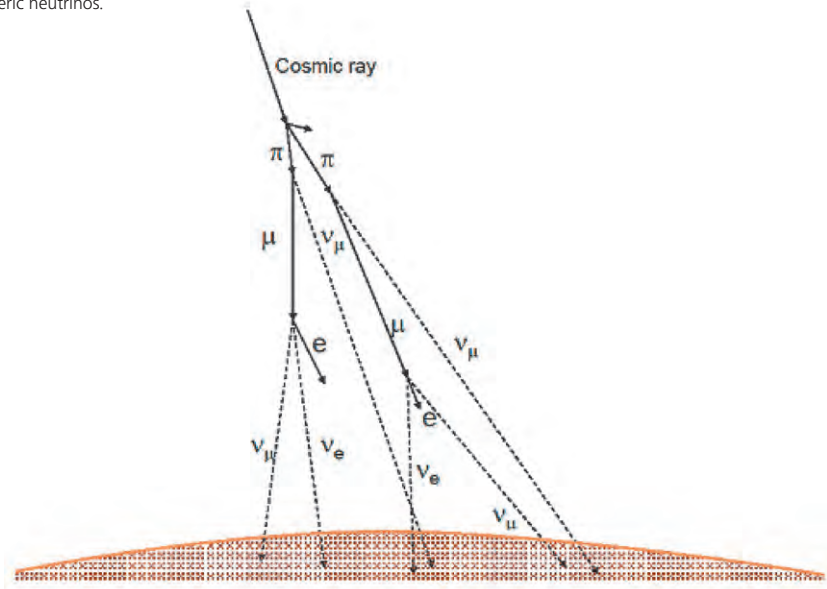
Atmospheric neutrino observations in Kamiokande

It was during the latter half of the 1980's that the atmospheric neutrinos attracted the attention of many researchers. Till then, the study of atmospheric neutrinos had not been developed as a widely recognized research area since their first observations in 1965. When several proton decay experiments started throughout the world in the 1980's, atmospheric neutrinos turned out to be the most disturbing background in the search of proton decay, and an understanding of this background was necessary. The Kamiokande experiment was among them. The Kamiokande detector, filled with pure water with an effective mass (usable for particle detection) of 1,000 tons, was located 1,000 m underground in a mine in Kamioka, Gifu prefecture. In this detector, Cherenkov light emitted by fast charged particles travelling in water with velocities faster than the light velocity in water was measured with 1,000 photomultiplier tubes of 50 cm in diameter.

Muons produced in the muon neutrino (ν_μ) interactions gradually lose their energy as they travel through water. On the other hand, electrons produced in the electron neutrino (ν_e) interactions

* Originally appeared in IPMU News No.15 September 2011

Figure 1. Production of atmospheric neutrinos.



form electromagnetic showers in water. Therefore, muons and electrons behave very differently in water. In Kamiokande, electrons and muons are observed by detecting a ring-like pattern of emitted Cherenkov light. In water, the Cherenkov ring pattern of a muon is different from that of an electron as a result of their different behavior. By exploiting this fact, it is possible to identify muons and electrons. For reference, Fig. 2 shows the Cherenkov-ring pattern of an electron event and that of a muon event, both observed by Super-Kamiokande which will be mentioned later in this article. Based on this idea, it is possible to identify events which had a single electron-type Cherenkov ring and were therefore considered to be ν_e interactions and events which had a single muon-type Cherenkov ring and therefore were considered to be ν_μ interactions. As a result, from the counts of both types of events, it was found that the observed number of ν_e events was almost as expected, but that of the ν_μ events was about 60% of the expected number.

Here, the expected numbers of events were obtained by a Monte-Carlo simulation in which the numbers of neutrino interactions in the Kamiokande detector were obtained from neutrino interaction

cross sections and calculated atmospheric neutrino fluxes, and the detection efficiencies, etc., were also taken into account. At around that time, it was thought that these expected numbers had about 20 – 30% errors which resulted from errors primarily in the observed cosmic-ray fluxes. As the ratio of the numbers of ν_e and ν_μ events was calculated with better accuracy, however, the error was estimated to be less than 5%. For these reasons, the above-mentioned Kamiokande results were considered not to be explained by the systematic errors in the calculations. On the other hand, it was possible to explain these results if oscillations between muon and tau neutrinos were postulated. This attracted much attention at that time.

Before going on, let me explain the neutrino oscillation. Here we consider two types of neutrinos for simplicity, muon neutrino ν_μ and tau neutrino ν_τ . If neutrinos have non-zero mass (in this case, neutrinos having definite masses are linear combinations of ν_μ and ν_τ), transmutation of neutrino in flight occurs in such a way that a neutrino which was initially ν_μ changes to ν_τ and then changes back to ν_μ . This phenomenon is called the neutrino oscillation. Conversely, if neutrino

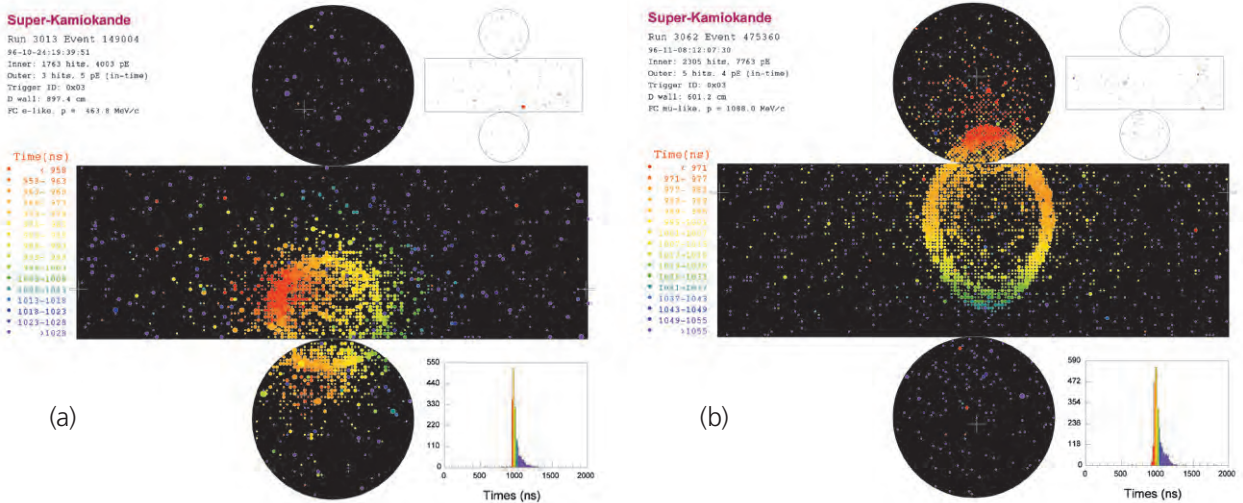


Figure 2. Examples of (a) electron neutrino and (b) muon neutrino events observed in Super-Kamiokande. The sizes of the circles in this figure show the observed light intensity. Also, the color of the circles shows the timing information of the observed light.

oscillation is discovered, it gives evidence for non-zero neutrino mass. Fig. 3 shows the probability for a neutrino, which was initially ν_μ , to remain ν_μ as a function of the flight distance. Here, the mass of the heavier neutrino state is assumed to be about $1/10^7$ of the electron mass. If neutrino mass is heavier than this value, the period of oscillation is shorter, and vice versa. Therefore, we can find the heavier neutrino mass from the measurement of the rate of neutrino's transmutation. In reference to Fig. 3, it should be noted that the "zero" survival probability is actually realized in a special case. Generally, the extent of ν_μ disappearance is somewhere between a tiny level and complete disappearance. The effect of neutrino oscillation is maximized in the case of "zero" survival probability in Fig. 3. This is the easiest case to observe the neutrino oscillation.

Let us now think about combining Fig. 3 and the atmospheric neutrino before returning to the real experiment. Roughly speaking, neutrino interactions at energies around 1GeV are most frequently observed in atmospheric neutrino experiments. Looking at Fig. 3, it is clear that if the heavier neutrino state has about $1/10^7$ of the electron mass, the ν_μ survival probability becomes

0 after a ν_μ traveled about 500 km, showing clear oscillation effects. If neutrinos produced in the upper atmosphere come from directly above, their distance of flight to the detector is about 15 km on the average, so that neutrinos do not yet oscillate. Neutrinos coming from the opposite side of the earth, however, reach the detector after several times of oscillations because the earth's diameter is about 12,800 km.

Though the Kamiokande results were very interesting, they were not necessarily accepted by many physicists. At that time, there were at least three detectors that could observe atmospheric neutrinos other than Kamiokande, but their observation results were not consistent. Because of this situation, we had to wait for the next generation neutrino detector, namely, Super-Kamiokande (SK) which would have overwhelming statistical accuracy.

Atmospheric neutrino observations in SK and neutrino oscillations

As soon as the Super-Kamiokande experiment was commissioned in 1996, the observed atmospheric neutrino data greatly increased since its effective mass for observation was about 20 times that of

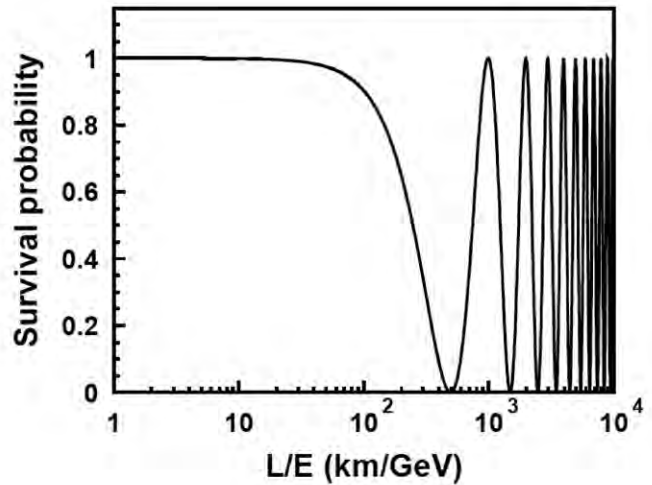


Figure 3. The survival probability of muon neutrinos is shown as a function of L/E , where L (km) is the distance and E (GeV) is the energy. The mass of the heavier neutrino state is assumed to be $1/10^7$ of the electron mass.

Kamiokande. Also, having accumulated more than 10 years of observational data already, and further continuing observation for longer than any other previous experiments, Super-Kamiokande makes it possible to investigate atmospheric neutrinos using far more observational data.

The most significant method to show neutrino oscillations of atmospheric neutrinos is to compare the numbers of neutrinos coming from above and below and to study if they are consistent with the expected numbers. Without neutrino oscillations, calculations show that these numbers are nearly the same. Therefore, if the number of events of the neutrinos coming from below is significantly smaller than that from above, then it must be compelling evidence for the neutrino oscillation. Furthermore, if neutrino oscillations are taking place between muon neutrinos and tau neutrinos, electron neutrinos do not take part in these oscillations. Therefore, an up-down asymmetry should be observed in muon neutrino events but not in electron neutrino events. Along these lines, the zenith-angle distributions of the atmospheric neutrino events have been precisely measured. The results with the Super-Kamiokande data up to 2008 are shown in Fig. 4, where a deficit

of the upward-going neutrino events is clearly evident. Also, the zenith-angle distributions show that the effect of up-down asymmetry is more prominent at higher energies. This is because of the following reason. At low energies the angular correlation between the incoming neutrino and the electron or muon produced in the neutrino reaction is poor, and consequently the direction of the muon is not a good indicator of the up-down asymmetry. These results led to the discovery of neutrino oscillation in 1998.

By comparing the data and the expected distribution with neutrino oscillation, shown in Fig. 4, neutrino's basic physical quantities can be measured. First of all, the mass of the heavier neutrino state is estimated to be about $0.05\text{eV}/c^2$. It is $1/10^7$ of the mass of the electron, the lightest particle other than the neutrinos. But, it may be that the heaviest neutrino mass should be compared with the heaviest quark (top quark) mass. In this case, the ratio is about $1/(4 \times 10^{12})$. The probability of muon neutrino disappearance due to neutrino oscillations is consistent with the theoretically allowed maximal value shown in Fig. 3. If the experiment had better accuracy, periodical decrease and increase of the

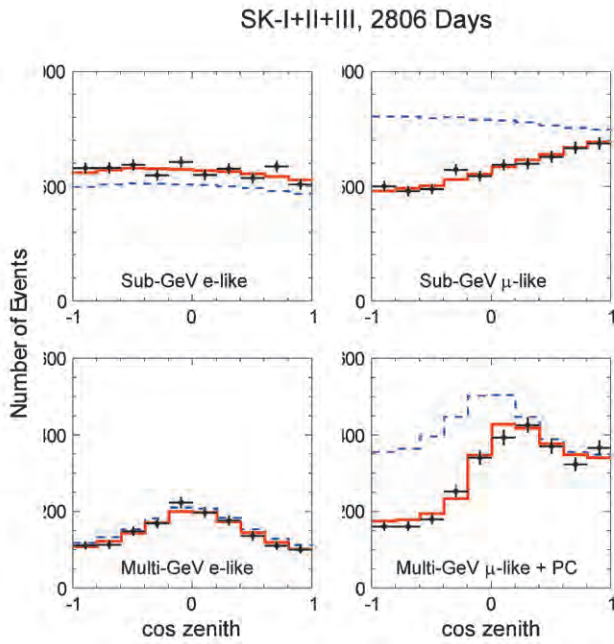


Figure 4. Zenith-angle distribution of the atmospheric neutrinos observed in Super-Kamiokande. $\cos\theta = -1$ corresponds to the upward-going direction and $\cos\theta = 1$ corresponds to the downward-going direction. The two panels on the left side show electron events (mostly electron neutrino events) and the two panels on the right side show muon events (mostly muon neutrino events). The events shown in the upper panels have visible energy of less than 1.3 GeV, and the events shown in the lower panels have that of greater than 1.3 GeV. The lower right panel (for muon events) also includes those events in which muons penetrate through the detector. The broken histograms show the expected distributions without neutrino oscillations, and the solid histograms show the expected distributions with neutrino oscillations, assumed between muon neutrinos and tau neutrinos.

survival probability of ν_μ would be seen. Such variation is averaged out, however, in the data shown in Fig. 4. That is to say, the survival probability of ν_μ maximally decreases and increases, but it is observed as the averaged value (a half). In any case, the effect of the neutrino oscillation seems to be maximal. Physicists call it as a *large mixing*. Although the tiny neutrino mass seems to be explained by a promising idea of the *seesaw mechanism*, it seems that fundamental understanding of the reason for the large mixing is yet to be obtained, requiring further consideration by theorists. Further accurate measurements will be needed experimentally as well.

Detection of tau neutrinos

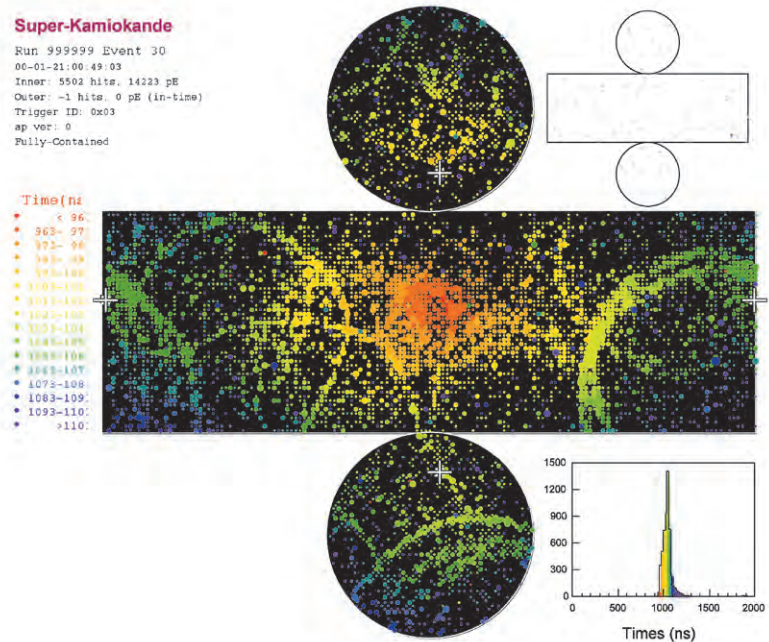
Thus far we have seen that neutrinos oscillate between muon neutrinos and tau neutrinos. To be precise, however, our arguments are the following. Namely, muon neutrinos transmute into other neutrinos due to the neutrino oscillation, and because the other neutrinos are not electron neutrinos, they should be tau neutrinos. It would therefore be decisive evidence if we can confirm the

transmutation to tau neutrinos by detecting them.

For this reason, evidence has been sought after for tau neutrino production due to the neutrino oscillation in the atmospheric neutrino observation in Super-Kamiokande. Unfortunately, this search is not easy for the following reasons. First of all, the interaction rate is low because the threshold of the tau neutrino interaction is relatively high (about 3.5 GeV) due to the heavy tau mass and the atmospheric neutrino flux rapidly decreases with increasing energy. Furthermore, tau neutrino interactions are not clearly distinguished from the background events called *neutral-current* events, because the produced tau particles immediately decay, and, in particular, only hadrons such as pions exist (other than neutrinos) in the final state in 65% of the tau decay. A typical Monte-Carlo simulated tau neutrino event is shown in Fig. 5. Analysis of such an event seems difficult because of many overlapping Cherenkov rings.

On the other hand, there is an advantage characteristic to atmospheric neutrinos. Consider studying the zenith-angle distribution by selecting *tau neutrino-like* events. Tau neutrino events should

Figure 5. An example of a Monte-Carlo simulated tau neutrino event.



be all upward-going events because they are produced by neutrino oscillations. Background events other than muon neutrino events, on the other hand, should exhibit up-down symmetry. Therefore, if we can show an excess of upward-going events by studying the zenith-angle distribution of the tau neutrino-like events, we will be able to statistically show the existence of the tau neutrino events.

Based on this idea, the existence of the tau neutrinos produced by neutrino oscillations has been studied. The results of this study, though statistically not decisive yet, showed that the data were consistent with the production of tau neutrinos by neutrino oscillations. We hope that more significant conclusions can be obtained with increasing data in the near future. Also, searches for tau neutrinos are performed in accelerator experiments. It is expected that tau neutrinos produced by neutrino oscillations will be decisively observed in the near future.

Conclusions

As has been explained in this article, neutrino oscillation was discovered by the studies of

atmospheric neutrinos, and details of neutrino oscillation phenomena have been studied in the high-statistics observations by Super-Kamiokande. Thus far, mainly neutrino oscillations between muon neutrinos and tau neutrinos have been studied. As there are three kinds of neutrinos, however, we have to study neutrino oscillations between three kinds of neutrinos. We already know from solar neutrino and reactor neutrino observations that electron neutrinos also oscillate. Furthermore, the recent data obtained in the T2K accelerator neutrino oscillation experiment and in other experiments suggest that muon neutrinos oscillate into electron neutrinos, though the oscillation probability is not very high. If atmospheric neutrinos are observed with very high statistical accuracy, we will be able to observe all these neutrino oscillations. Moreover, it is considered possible to measure the order of masses of the three neutrino states with definite mass, exploiting the unique characteristics of atmospheric neutrinos that travel through the earth. Therefore, studies of atmospheric neutrinos will keep contributing to neutrino physics for many years to come.

Our Team

Masahiro Kawasaki

Research Field: **Theoretical Physics**

Principal Investigator

I am mainly working on particle cosmology. In particular, I am interested in inflation cosmology, baryogenesis and axion cosmology. The inflationary universe can not only solve cosmological problems such as the horizon problem but also produce primordial density perturbations which are perfectly consistent with anisotropies in the cosmic microwave background radiation observed by WMAP and Planck. Now inflation is a new paradigm of cosmology. I have been studying inflation models in supergravity and obtaining constraints on the reheating temperature after inflation by considering the cosmological effects of gravitinos which are predicted in supergravity.



Since inflation dilutes away pre-existing matter, the baryon number and dark matter should be produced after inflation. I am working on the Affleck-Dine baryogenesis in supersymmetric theories and Q-balls which are non-topological solitons produced in the Affleck-Dine mechanism. I am also studying the cosmological consequences of axions which are a promising dark matter candidate.

Artan Sheshmani

Research Field: **Mathematics**

Project Researcher (Adjunct Assistant Professor)

My research is on Gromov-Witten/Donaldson-Thomas theory, Calabi-Yau geometries and mathematical aspects of String theory. Recently, together with collaborators, I have studied and proved the modularity property of DT invariants of CY3's predicted in the famous S-duality modularity conjecture in string theory in many cases. I also work on the interaction between GW/DT theories and Homological projective duality conjecture by Kuznetsov, as well as proving the relation between



geometry of Hilbert scheme of singular surfaces and quantum topology of higher dimensional knots, using representation theory and algebraic geometric techniques.

Chengcheng Han

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

My research interests include the following:

- (1) Higgs physics. I study Higgs physics at the colliders, predicted by various new physics models like supersymmetry and little Higgs theory.
- (2) Phenomenology of supersymmetry. I examine various direct and indirect experimental constraints on the new physics models, and study their phenomenology at colliders like Tevatron, LHC and ILC. I also perform MC study for searching new particles at the colliders.
- (3) Dark matter, especially the dark matter physics in low energy supersymmetry. I interpret cosmic dark matter as the LSP in supersymmetry, and try to explain the Planck relic density and other detection results, then analyze the implications of the phenomenology at the colliders.



Kaori Hattori

Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc

I have been working on a ground-based Cosmic Microwave Background (CMB) experiment, POLARBEAR, aiming to observe polarization with a high sensitivity. Our goal is to reveal the early history of our universe through observing polarization modes created by the inflation. The POLARBEAR telescope is currently observing in the Atacama Desert, Chile (elevation of 5,200 m). Meanwhile, we are preparing for an upgraded experiment, POLARBEAR-2 with a higher sensitivity. To achieve the required sensitivity, we will install more than 7,000 superconducting

detectors at cryogenic temperature. My research focuses on how we can achieve such large detector arrays. This study aims not only to conduct a ground-based experiment, but also to perform a Japanese-led satellite experiment, LiteBIRD.



Changwoo Joo

Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc

We are developing/constructing a new Silicon Vertex Detector (SVD) for the Belle II experiment at the super KEKB collider. Because of higher luminosity, the SVD requires a new design and better performance. My topic is Electrical Quality Assurance (EQA) of the new SVD to guarantee good quality as a tracking detector. First I check the electrical functionality to confirm the connection of electronics and readout chips. Then I survey the performance of SVD modules including noise level, signal to noise

ratio, time resolution and dead time. My feedback will help the SVD production force to make a better quality SVD module. In this way, we can make the highest-quality SVD possible for the Belle II experiment.



Our Team

Shing Chi Leung

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

I study Type-Ia supernovae, which are the explosions of carbon-oxygen white dwarfs due to thermonuclear runaways, by running computer simulations with Professor Ken'ichi Nomoto. We are interested in understanding the relations among various parameters of Type-Ia supernovae and their influences to the galactic chemical evolution. In particular, we want to derive constraints on the theoretical explosion mechanisms from observational



data, from which we can refine our usage of Type-Ia supernovae in the precision measurement of dark energy.

Evangelos Routis

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

My research is in the field of algebraic geometry with a focus on degenerations of algebraic objects. In particular, I study compactifications of configuration spaces of points on algebraic varieties and moduli problems associated with them. Additionally, I am interested in Gromov-Witten theory and enumerative geometry. More specifically, I study moduli spaces of stable maps from curves to Fulton-MacPherson



type targets from the point of view of logarithmic geometry, as well as their connections to other curve counting theories.

Alessandro Sonnenfeld

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

How do early-type galaxies form and evolve? How do the properties of these galaxies depend on their dark matter halo? I address these questions using strong gravitational lensing as my main investigation tool. I joined the Kavli IPMU, so that I could look for new strong gravitational lenses in the Hyper Suprime-Cam (HSC) survey. Thanks to its very large field of view, HSC will allow us to find more strong



lenses than what has ever been possible with any other survey.

David Stark

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

My research is focused around trying to understand how galaxies form and evolve, with an emphasis on the physics governing galaxy gas reservoirs, the raw fuel for star formation. Using multi-wavelength observations, I examine how galaxies acquire (or lose) their gas reservoirs, and how this gas gets converted into dense star-forming clouds. I am especially interested in how galaxy environments, from group scales up to large-scale



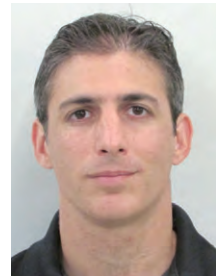
structure, influence these processes. Some of my other research has explored the potential for star formation in high velocity clouds and the baryonic Tully-Fisher relation.

Itamar Yaakov

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

My research is focused on non-perturbative aspects of quantum field theory. I am especially interested in defects and their role in duality, supersymmetric gauge theory, and their mathematical applications. My recent work has centered on extracting exact results using supersymmetric localization. Some of the most challenging aspects of strongly coupled quantum field theory, for which we have few if any analytic tools, such as finding the spectrum,



computing correlation functions, and figuring out the low energy behavior, can be greatly simplified using supersymmetry and localization.

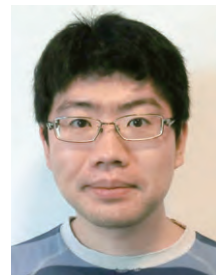
Kazuya Yonekura

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

Quantum field theory is one of the most fundamental frameworks of physics. It explains almost all the phenomena of physics at short distances via models such as the standard model of particle physics. It also often has interesting relations with mathematics, especially in supersymmetric quantum field theories.

I am working on aspects of quantum field theory and its applications. Recently it has been understood that there are lots of things which cannot be captured by a conventional approach starting from a Lagrangian. Sometimes there are no known



Langrangians for some theories which can still be constructed by string theory. In particular, there is no renormalizable Lagrangian in higher dimensions, and hence we need new methods to understand them. I am aiming to understand those new sides of quantum field theory.

Our Team

Workshop on “Analytic Representation Theory of Lie Groups”

Yoshiki Oshima

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

The workshop “Analytic Representation Theory of Lie Groups” was held at the Kavli IPMU for four days from July 1, 2015 (Organizer: Professor Toshiyuki Kobayashi, PI at the Kavli IPMU). Four professors including Vershik were invited from Europe and 13 researchers gave 20 hours of talks in total. In the workshop the central subject was on the following two programs advocated by Kobayashi.

- A: “Discover new phenomena in global analysis by using representation theory as a hint.”
 B: “The study of branching laws of infinite-dimensional representations.”

Lie groups are a classic object that arose as continuous transformation groups and since then the theory of Lie groups has been developed, interacting with various fields in mathematics and physics. One can often find symmetries behind classical analysis such as Fourier analysis and special functions and they are described in terms of Lie groups.

Conversely, based on the extensive development of the representation theory, the programs have aroused a new trend in which studies aim to discover new phenomena in global

analysis by using representation theory as a hint.

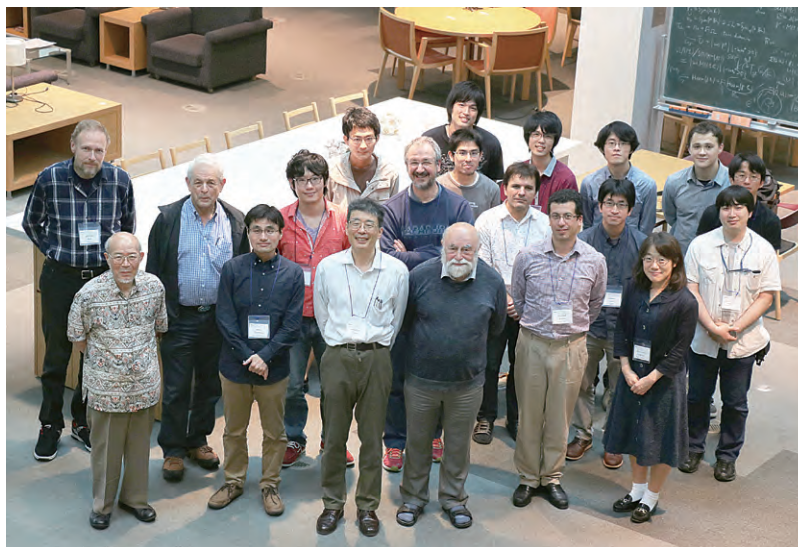
From this point of view, Orsted explained Kobayashi-Mano’s deformation theory and Ben Said-Kobayashi-Orsted’s deformation theory which includes the Fourier transform and the Dunkl transform. Kobayashi asked whether geometric quantizations and limits commute and then suggested a geometric idea for constructions of minimal representations.

Symmetry breaking operators, which control information of restrictions of representations, often came up in our discussion. This can be seen in Pevzner’s talk on the study of differential symmetry breaking operators via the F-method introduced by Kobayashi, Ochiai’s talk on an application of symmetry breaking

operators to automorphic forms, and a talk by the author on branching rules of unitary representations by using symmetry breaking operators.

Vershik constructed representations of certain infinite-dimensional groups, called current groups, using complementary series representations. His talk showed the participants a new aspect of representation theory. Bianchi discussed new results on the covariogram problem which have been obtained by applying relations between geometric invariants and the asymptotic distribution of the zero set of the Fourier transform.

By focusing analytic aspects on representation theory, we found that these programs expand in many directions and the workshop was very fruitful and successful.



Tokyo-Berkeley Summer School “Geometry and Mathematical Physics”

Toshitake Kohno

Kavli IPMU Principal Investigator

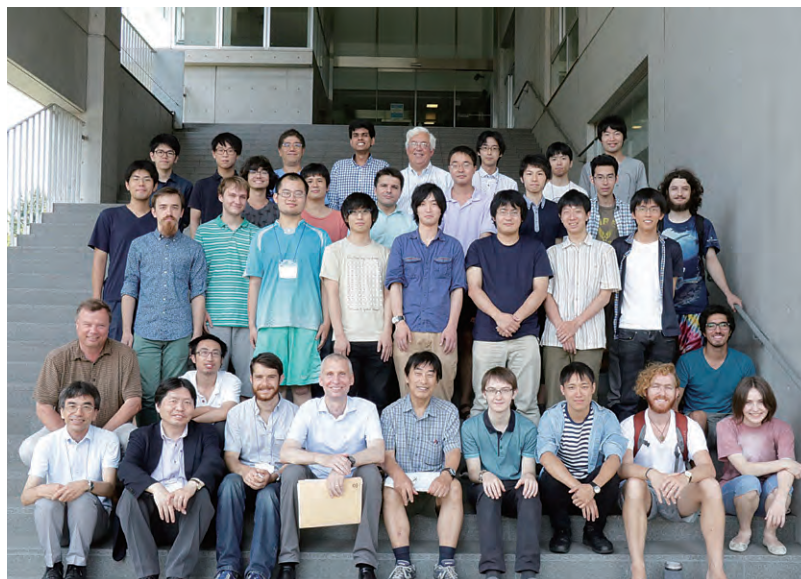
This school was held in the framework of the program for Strategic Partnership between the University of Tokyo and the University of California, Berkeley. We invited five students from the University of California, Berkeley, five students from the National Research University Higher School of Economics and one student from Yau Mathematical Sciences Center, Tsinghua University. Moreover, many Japanese students from both fields of mathematics and physics attended the school and the total number of participants was about 80. To support students, we used the funding of the Leading Graduate Course for Frontiers of Mathematical Sciences and Physics (FMSP) and Japan Student Services Organization (JASSO).

The school's subjects covered various topics coming from interaction between mathematics and physics such as the theory of period integrals, Gromov-Witten invariants, mirror symmetry and Donaldson-Thomas invariants. In the first week, there were three introductory lectures. First, Kyoji Saito gave an introduction to the theory of period integrals starting from the classical theory of elliptic integrals. He explained how such classical theory leads to the construction of the flat Frobenius

structure and the theory of primitive forms. Todor Milanov described a relationship between Gromov-Witten invariants and integrable systems. Then, Akishi Ikeda gave an introduction on a derived category of coherent sheaves on algebraic varieties and Bridgeland stability conditions. On the last day of the first week there was a student session and 14 students gave presentations on their research interests. The program of the second week consisted of mini-courses and 90-minute lectures. The lecturers of the mini-courses were Mikhail Kapranov, David Morrison, Nicolai Reshetikhin and Yukinobu Toda. Mikhail Kapranov described a combinatorial approach to Fukaya categories of surfaces and the concept of Fukaya categories with coefficients. David Morrison started with the

origin of mirror symmetry in string theory and discussed variations of this theme. Nicolai Reshetikhin explained a method of Batalin-Vilkovisky quantization. Yukinobu Toda talked about moduli of Bridgeland semistable objects on 3-folds and Donaldson-Thomas invariants. There were lectures by Kentaro Hori and Masahito Yamazaki. Kentaro Hori talked about the partition function on the hemisphere of two-dimensional supersymmetric sigma models and Masahito Yamazaki gave an introduction to cluster algebras and their applications.

The school was extremely lively, and there were many stimulating discussions among the participants including students. We hope to continue holding this kind of school in the future.



“Kavli IPMU-Durham-KIAS Workshop: New Particle Searches Confronting the First LHC Run-2 Data”

Michihisa Takeuchi

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

The international workshop was held at the Kavli IPMU on September 7 - 11, 2015. This workshop was co-organized by the Kavli-IPMU, Durham University, and KIAS. The organizing committee consists of Michihisa Takeuchi, Shigeki Matsumoto, Mihoko Nojiri, Kai Schmits, Pyungwon Ko, and Michael Spannowsky.

The aim of the workshop was to discuss new physics discoveries at the LHC just after the first LHC Run 2 results became public at the end of August (where the collision energy had been upgraded from 8 TeV to 13 TeV). There were several anomalies and divergences from the Standard Model predictions reported during Run 1; they are to be re-examined during Run 2. It was very timely to hold this workshop at this moment.

The workshop mainly consisted of 2 invited talk sessions in the morning and an invited talk and short talk sessions in the afternoon. In total, we had 10 speakers invited from abroad, 2 speakers invited from the Kavli IPMU, and 26 short talks. There were 67 participants from 11 countries (33 of the participants were from Japan).

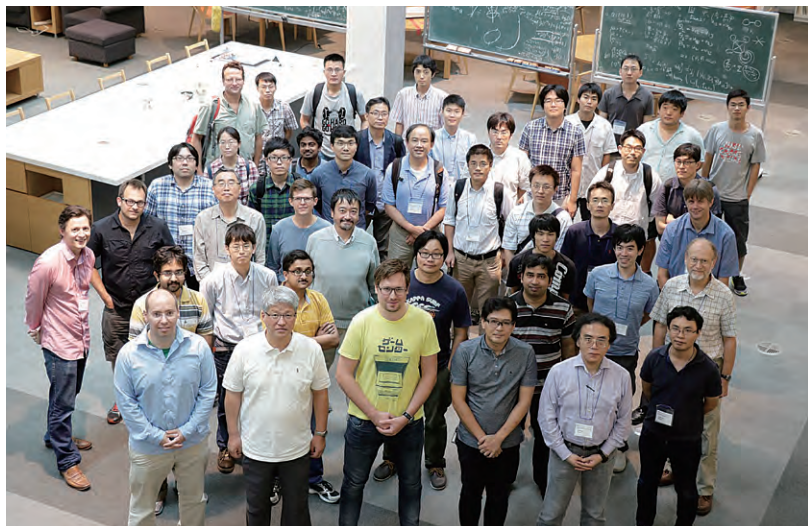
Mihoko Nojiri launched the workshop with an overview for Run 2 and Bryan Webber gave two

talks on event generations and jet substructures. In the afternoon, Yang Bai talked about non-relativistic particle production at the LHC. On the second day, 8 TeV results and 13 TeV prospectives at ATLAS and CMS were presented by Paul de Jong and Teruki Kamon, respectively, and Valentin V. Khoze talked about the Higgs Portal. On the third day, Tsutomu Yanagida gave a talk on Quarks and Leptons as Quasi-Nambu-Goldstone Fermions. On the fourth day, Seung Joon Lee talked about spin 1/2 composite particles, James B. Dent talked about the general framework of the effective field theory regarding dark matter at the LHC, and Graham Kribs talked about stealth dark matter. On

the final day, Matthew Mccullough talked about the Relaxion and Lian-Tao Wang closed the workshop with a talk on spin 1 composite particles.

There were also short talks on new discovery strategies, kinematical variables at the LHC, a model to explain the diboson anomaly, lepton flavor violation, two-Higgs-doublet models, and dark matter searches at the LHC.

The workshop successfully closed with an announcement by Michael Spannowsky regarding a plan to have the next workshop at Durham University next year. It was a very good opportunity for lots of discussions with broad range of topics.



MEXT Scientific Research on Innovative Area Inauguration Symposium “Why Does the Universe Accelerate? – Exhaustive Study and Challenges for the Future – ”

Masahiro Takada

Kavli IPMU Professor

The MEXT Scientific Research on Innovative Area “Why does the Universe accelerate? – Exhaustive study and challenges for the future –” (PI: Hitoshi Murayama) is newly launched in FY2015. During Sep 20 – 21, we had the inauguration symposium at Lecture Hall of the Kavli IPMU. We had over 100 participants even in the middle of Silver Week holidays.

There is observational evidence for two periods of accelerated cosmic expansion: at the very beginning, known as inflation; and the present. Since Newton’s and Einstein’s gravity is known as an attractive force, gravity can only “pull” the expansion to slow it down. Hence cosmic acceleration is the biggest mystery in cosmology. What is “pushing” the Universe to speed it up? We often invoke “inflation” and “Einstein’s cosmological constant” as theories, but they have many unnatural features and are far from being satisfying explanations. The purpose of this research area is to understand the origin of the accelerated cosmic expansion, as well as its interplay with dark matter that competes with the

acceleration to build galaxies and clusters of galaxies. To address this problem never encountered before, we propose to conduct research based on a comprehensive approach: theory units ranging from cosmic acceleration due to inflation (A01: Misao Sasaki, Kyoto U.), decelerated expansion phase due to dark matter (A02: Fuminobu Takahashi, Tohoku U.), and the late-time cosmic acceleration due to dark energy (A03: Naoshi Sugiyama, Nagoya U.); observational units based on CMB experiments (B01: Masashi Hazumi, KEK), galaxy imaging surveys (B02: Satoshi Miyazaki, NAOJ), galaxy redshift surveys (B03: Masahiro Takada, IPMU), and the Thirty-Meter Telescope (B04: Tomonori Usuda, NAOJ); then ultimate units developing tools of combining different cosmological datasets to extract cosmological information (D01: Eiichiro Komatsu, MPA/IPMU) and seeking an ultimate theory of cosmic acceleration from super-string theory with a top-down perspective (C01: Hiroshi Ooguri,

Caltech/IPMU). This research program will be carried out over five-year duration (FY2015 - FY2019).

Representatives from each research group gave talks at the meeting introducing the background, scientific objectives, and planned research programs during the period. We also had contributed talks mainly by young researchers, stimulating various discussions. At the launch of this research program, there were many expectations and a lot of enthusiasm and excitement, and the research teams were able to re-realize responsibility for ensuring the success of the proposed research. The symposium was highly successful and moved the momentum forward.

The symposium was successfully run by other local organizers: Teppei Okumura, Kiyoto Yabe, Yuki Moritani, Hiroko Niikura, Ryoma Murata and Kazuyuki Akitsu. We also thank the Kavli IPMU administrative office members, especially Shoko Ichikawa for their dedicated support.



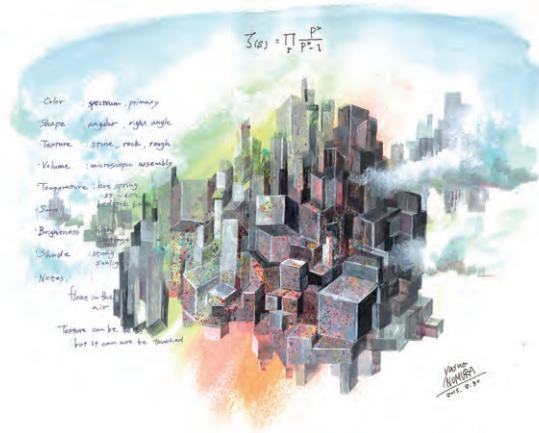
Invisible Halo

Yasuo Nomura

For four weeks from August 17th to September 11th, I stayed at the Kavli IPMU as a visitor in the artist-in-residence program. There, I created a piece of art at the corner of an office allocated to me. Though somewhat different than what usually appears in this journal, I would like to write something which serves as a memorandum record of knowledge acquired by one artist (myself) through interactions with researchers at the forefront of science. I may have incorporated my own misguided interpretations of scientific theories here and there; however, I would like to ask that you please overlook such instances as they constitute part the essence of artistic creativity within the context of this discussion.

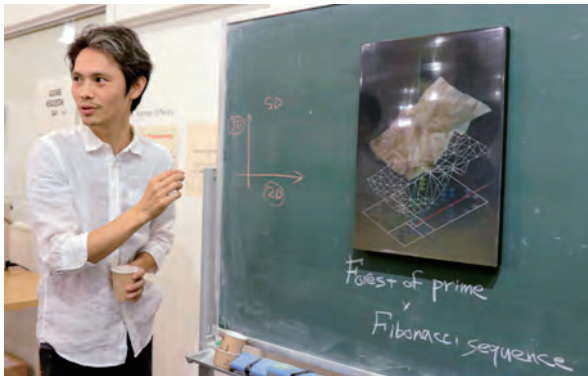
Halos are a very special meteorological phenomenon for me. On a winter night more than 10 years ago, I observed by chance, a scene wherein the moon was shining in the night sky and surrounded by a clear threefold rainbow. The indescribable feeling of wonder I had at that time gave me a strong sense of curiosity with respect to the many unknowns of the world. A few years later, I came by chance to know that such a phenomenon is referred to as a halo. Since then, whenever I stood at an important crossroad, I would look up at the night sky and would find myself looking right at a halo. For me, halos became something of a valuable fortune teller for my own life.

My visit to the Kavli IPMU might very well have been guided by such a halo. One of the research groups I came to know here was working in pursuit



A workshop was held based on a theme: "To output images of landscapes in the minds of researchers." By means of an artistic approach, we tried to visualize mathematical expressions familiar to researchers, in order to conceptualize them through the writing out of keywords such as colors, shapes, temperatures, flavors, style of research, the periods of time during which researchers were able to concentrate. The picture represents the author's conceptualization of the zeta function.

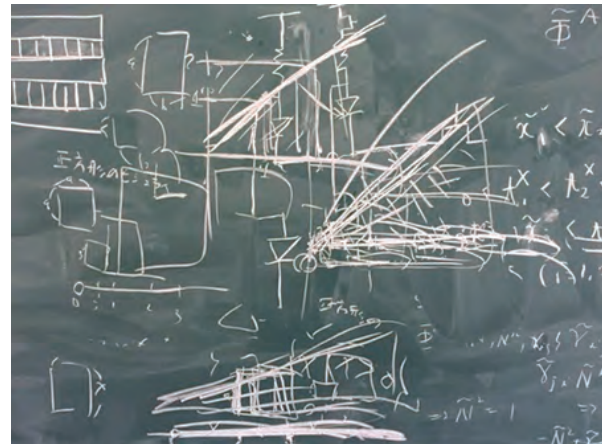
of halos comprised of space's mysterious and hugely abundant dark matter. These kinds of halos are different from phenomena of rainbows that I had observed previously. I heard, however, that their pursuit is an attempt to answer questions on the effects of dark matter (which is still invisible entity to mankind at present), on the surrounding space through the analysis of gravitational lensing and other phenomena. Surrounding our home, the Milky Way galaxy, there is a spherical region wherein almost all the matter contained is considered to be dark matter. In astronomy, this region is referred to as the galactic halo. I felt a strong sense of synchronicity towards this phenomenon. During my creative activities, synchronicity and inspiration are the most important



I gave a presentation of my own paintings at my welcome party. The researchers gathered there took an interest in paintings and models, both created with a motif of prime numbers.

source of creativity. When I encountered these things, I have repeatedly experienced the opening of a road in front of me leading to the direction I was to go next. When one bravely steps ahead into a frontier, one often experiences unexpected intuition. My stay at the Kavli IPMU was exactly such an occasion.

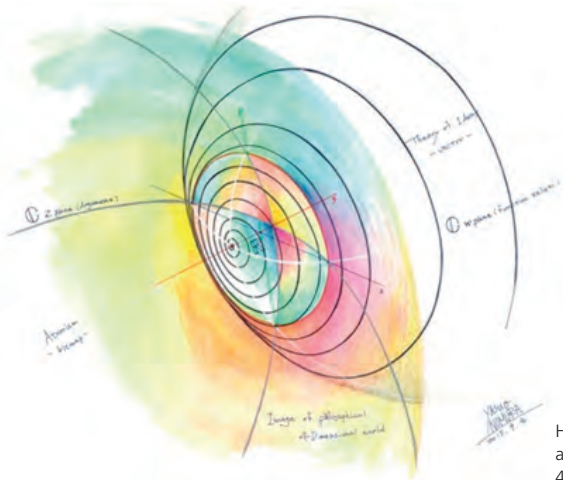
I am a painter. For this precious occasion, which enabled me to directly come in touch with the forefront of science, I set the following theme: “To verify if it is possible to reproduce higher-dimensional theory into a two-dimensional picture, and, if possible, to find a method and a clue to do so.” As you know, painting is a world on a plane surface. Within contemporary art, painting is already considered classical. In a way, it is considered to be an almost dead medium because every possible representation has been exhausted. My own personal view is that the discovery of non-Euclidean geometry (considered to be a great turning point in the dramatic progress of science in the nineteenth and twentieth centuries) might be the remote cause of the death of painting.



Every day at tea time, I exchanged ideas with researchers using familiar blackboards at the Kavli IPMU.

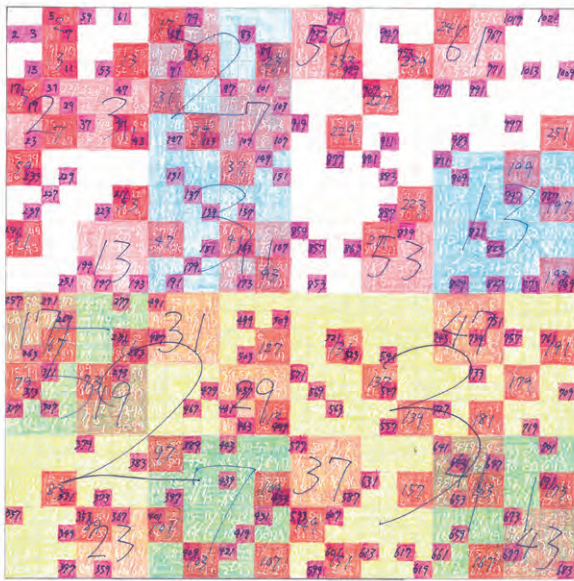
Techniques consummated by painters that allow for the skillful reproduction of three-dimensional space on a two-dimensional plane, went well with the human sense of sight.

However, in the process of pursuing the more fundamental aspects of nature over that which is visible, a wide range of knowledge has been accumulated in the field of science, which logically introduces higher-dimensional entities that go beyond our immediate human senses. From a certain point, I think bearers of conventional painting, namely, painters including myself, have not been able to keep pace with the accumulation of concepts that have been becoming more and more abstract. I cannot help think that the present situation of contemporary art (which is concentrated on the capitalism-based art of marketing) shows that those who have dropped out from the sphere of accumulation of human knowledge are aiming to prolong the life of art based on their own insider logic. I would like to breathe new life into this kind of trend.



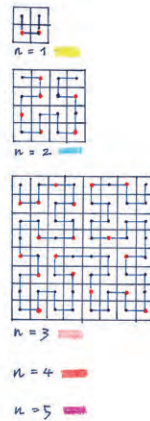
How can we understand the world of complex numbers? These images show the appearance of three-dimensional space using dimension $2 \times$ dimension 4. Mathematicians have requested a logical "brush up" of these conceptualizations. This constitutes an issue to be addressed going forward.

Mission to primes



Toward unraveling the mystery of the distribution of prime numbers: an artist's conceptualization of a project of trying to find regularity in the direction of unknown higher dimensions by launching a rocket flying along the trajectory of a Peano curve (which can fill a higher-dimensional space), with plotted positions of prime numbers along its trajectory.

Order $n = 1 - 5$ Hilbert curves in the unit square and mapping only primes



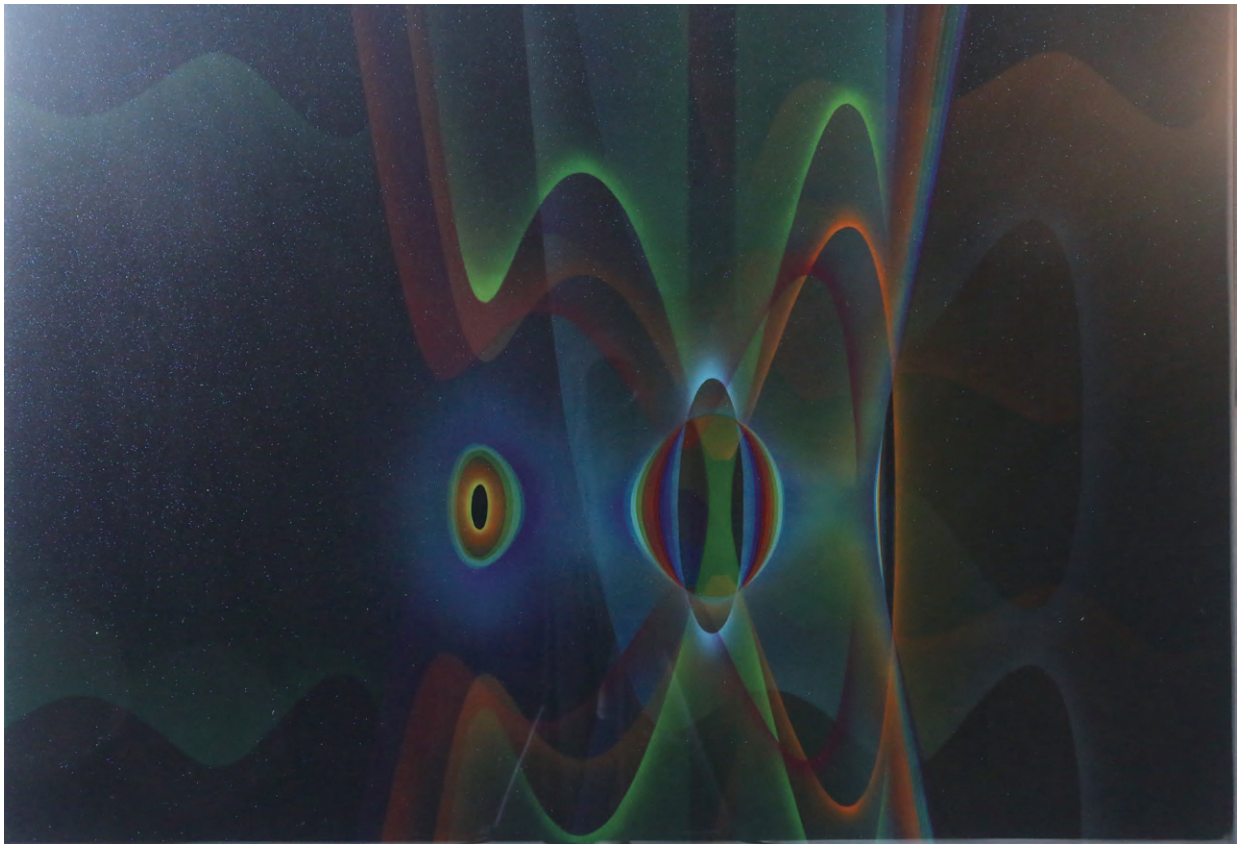
Theoretically, Peano curves can be available for space-filling about N-dimensional hypercube. Let's launch the probe rocket of the space-filling curve!!

VISU
KAVI
2015.8.27

Needless to say, theories at the forefront of modern science are highly abstract, and all deal with the invisible. At first, air, magnetic forces, and gravitational forces, among other things, were also "invisible" to us. I think it is thanks to the approach of visualizing what is invisible ("visualize" in this case meaning to "understand the nature of"), and the act of grasping concepts, that science has accumulated knowledge such as the world of elementary particles (which are dictated by quantum mechanics), the world of super strings (which unify everything), neutrinos (which

pass through the Kamiokande), dark matter (the main component of matter in the Universe), as well as other theories and concepts. Since the discovery of non-Euclidean geometry, abstraction by means of mathematical expressions has shown that we can think over the concept of "dimensions", which is something that lies beyond our senses.

I want to learn this process, and in this way I want to think over the essence of painting once again based on present-day human knowledge. If we want to capture the "beauty" of nature by looking



Invisible Halo #h / 2015 / 728x515mm / acrylic, silicone and glitter on panel

at its fundamental laws, we have to visualize what is invisible after we painters have grasped these concepts of higher-dimensional physical laws that modern science presents.

I think that Galileo's famous phrase "the Universe is written in the language of mathematics" may be interpreted as "only mathematical descriptions make it possible to visualize what is invisible." This time, I wanted to hear by all possible means how most researchers conceptualize these higher-dimensional theories. In fact, I found that many researchers do understand and "feel" invisible objects by means of the language of mathematics, which they use as a means for mutual communication. Higher dimensions are invisible to researchers just as they are invisible to us painters, though they deal with them every day. What is peculiar about researchers is that they do have a means to "see" what is invisible without resorting to using their visual senses. This I think is truly astonishing. It is probably the most creative and

most beautiful point that mankind has ever reached with respect to the accumulation of concepts. How can we capture the invisible halo? Mankind may not be able to directly look at the fundamental "beauty" that lies within nature through all eternity, but it may be possible to capture the perceptive effects it creates within the encompassing environment. I came to believe firmly that for this purpose, we artists must train in order to acquire the language of mathematics. That is the only way.

I would like to thank Kavli IPMU Director Murayama who showed a generous understanding of this artist-in-residence program, Administrative Director Haruyama, researchers who openheartedly responded to my daily ideas, the administrative staff, and, in particular, a member of the Kavli IPMU Public Relations group, Aya Tsuboi, who enthusiastically coordinated and worked hard to make this program a reality. I sincerely hope that interactions between the arts and sciences will further develop hereon.

Urashima Effect: a Version

Alexander A. Voronov

Professor, School of Mathematics, University of Minnesota
and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

We all know that when a human travels at a speed close to the speed of light, time slows down and so does the age process. If the travel speed is close enough to the speed of light, time slows more and more dramatically, almost to the point of stopping entirely.

What is described in the tale about the young fisherman Urashima Taro's trip to the undersea palace* is evidence of visits of aliens to medieval Japan during the Kamakura and Muromachi

Riding on the turtle's back, Taro took in the beauty of the sea.



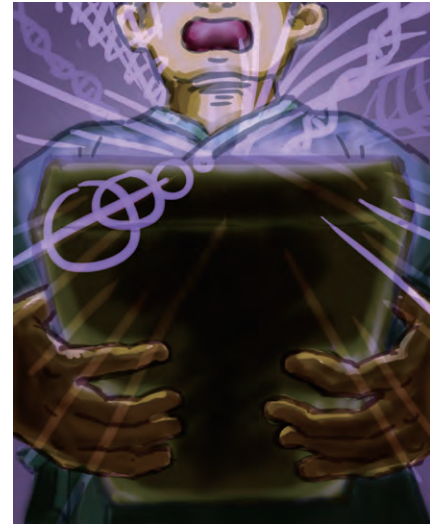
The author performing stage one of the Urashima effect experiment: fishing

periods. The aliens landed on Earth during the early Kamakura era and took the young fisherman on their spacecraft. Such extraterrestrial crafts at that time looked like flying saucers and thereby resembled the shape of a sea turtle. The aliens took Taro along for a few circles around the Milky Way at an unimaginable speed and performed nasty experiments on the poor guy. They wanted to find an explanation, obvious to any psychologist of the Freudian school of thought today, why, instead of beating on the outer shell of their spacecraft with sticks, like the younger generation of humans did, his brain took a different path and worked out a scheme of purchasing the unidentified lying object (ULO) for an undisclosed sum of money.

Before returning the young man to Earth a couple of hours later, the aliens erased his memory and filled it with images associated with having earthly good time: feasting and drinking in the company of beautiful young women in the surroundings of apparent wealth. When the young fisherman came

back to Earth, it turned out that three hundred years had elapsed, and the Muromachi shoguns had already established governance of the country. To Taro's great dismay, his house and mother had long been gone. He was of course still a young man, perhaps just a couple of hours older. However, relativity theory was not widely accepted in Japan at that time, and the contemporary storytellers could not admit that Taro had not aged; the risk of their losing the trust of the population and the shogunate was at stake. This is why they came up with the ridiculous story of the beautiful lacquered box that he had brought with him as a princess' gift. Some scientists at the Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe at the University of Tokyo still argue that the box was real and realized the evil plan of the aliens to scatter dark energy around our planet...

These days the effect of time dilation in the theory of relativity is sometimes called the Urashima effect.



Opening the box, Taro felt a dark energy he did not understand, but saw nothing else inside.

* https://en.wikipedia.org/wiki/Urashima_Tar%C5%8D



A play of Japanese fable Urashima Taro Story, portrayed by past researchers at the Kavli IPMU during their Japanese class** completion ceremony held in January 2012. (From left) Jyotirmoy Bhattacharya as a child in the village, Mikhail Verbitsky as Taro's father, Marcus Werner as the princess, John Kehayias as Urashima Taro, and Valentin Tonita as the turtle.

**Kavli IPMU visitors have the possibility to study Japanese language and culture by taking Japanese classes with Masami Nishikawa, a Japanese Instructor at the Kavli IPMU.

Tea Break

News

Kavli IPMU PI Takaaki Kajita Receives the 2015 Nobel Prize in Physics

On October 6, 2015, the Royal Swedish Academy of Sciences announced it would award the 2015 Nobel Prize in Physics to Takaaki Kajita in Japan and Arthur B. McDonald in Canada “for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass.” Dr. Kajita is Director of the University of Tokyo’s Institute for Cosmic Ray Research and a Kavli IPMU Principal Investigator. The Nobel Committee for Physics has recognized his work carried out on atmospheric neutrino oscillations at the Kamiokande and Super-Kamiokande detectors in Kamioka, which produced definite proof that neutrinos have mass.

8th External Advisory Committee Meeting

On July 24, 2015, the 8th Meeting of the Kavli IPMU External Advisory Committee was held. News about the Kavli IPMU receiving a WPI funding extension, and how the institute plans to use the extension to tackle competitive challenges were reported to Chairman Steve Kahn (Stanford/SLAC), and committee members John Ellis (King’s College London), Young-Keel Kim (University of Chicago), Sadayoshi Kojima (Tokyo Institute

of Technology), David Morrison (UC Santa Barbara), and Sadanori Okamura (Hosei University). This time, one of the committee members Nigel Smith (SNOLAB) was absent. The Committee also discussed topics such as future support from the University of Tokyo, and the importance of raising the profile and goal of the WPI program for Japan’s future.



Director Murayama presenting an overview to the External Advisory Committee members.

Hyper Suprime-Cam’s First Dark Matter Map Created

An international team of researchers including the National Astronomical Observatory of Japan, Kavli IPMU, and Princeton University released a dark matter map they had created using the Hyper Suprime-Cam (HSC). This is the first scientific research result produced by HSC. The high-powered HSC mounted on the Subaru Telescope in Hawaii allowed researchers to study 2.3 square degrees of night sky in great detail, revealing nine clumps of dark matter, each weighing as much as a galaxy cluster. The result was published in the July 1 edition of the *Astrophysical Journal*.

Second and Third Lectures at the “Science Café Universe 2015” Attract Crowds

Inside the giant planetarium at Tamarokuto Science Center in Nishitokyo City on July 5, Kavli IPMU Professor Naoki Yoshida gave a talk titled “Exploring the Milky Way: Intersection between Modern

Cosmology and Cosmoarchaeology” to around 50 guests, many of them being junior high school and high school students. Starting with the Tanabata (the July 7 star festival) legend of Japan and China, Professor Yoshida talked about from the Milky Way galaxy to the large-scale structure of the universe, while projecting images onto the entire planetarium dome.

On July 12, this year’s science café series ended with a session on “Differential Geometry of Shapes: Soft Shapes and Solid Shapes” by Kavli IPMU Assistant Professor Tomoyuki Abe. The 40 or so guests, of which about half were junior high school or high school students, not only heard the lecture but also learned about manifolds by passing around models of shapes, and working on solving equations together. Professor Abe concluded his lecture by briefly addressing the link between geometry and general relativity.



Naoki Yoshida’s Q&A session took place outside the planetarium.



Tomoyuki Abe giving a lecture.

Booth at the 2015 Super Science High School Student Fair

At the peak of summer, all nine institutes in the World Premier

International Research Center Initiative (WPI) family, including the Kavli IPMU, spent two days meeting students at the 2015 Super Science High School Student Fair (August 5 – 6). The WPI booth was one of 300 booths present at this year's fair. Curious students came up to Kavli IPMU staff asking what kind of research is being carried out to understand the Universe, and what they would need to study to join the Kavli IPMU in the future.

Women in Science Event Encourages Students to Pursue Research

Teenagers and their parents were invited to hear what sort of research women scientists carry out today, and to take part in experiments of their own during a science event co-hosted by the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) and the Kavli IPMU on August 22, 2015. Thirty-eight junior high school and high school girls listened to ICRR Assistant Professor Michiko Oishi's talk, "Looking for the Origin of Cosmic Rays," and Kavli IPMU Postdoctoral Researcher Yuki Moritani's talk, "Blackholes or Pulsars? Uncovering the Secret behind Gamma-Ray Binaries." Students also assembled a miniature model of an atmospheric Cherenkov telescope array with small parabolic mirrors, and tried their own group experiment using laser light source to see which group could make the most accurate observations. Students commented that they were grateful to be given the chance to talk with speakers.

The event provided the 20 or so parents the chance to ask Dr. Moritani and Kavli IPMU project academic support specialist Tomoko Morii about how choosing science as a career has affected them, and what they should do to support their daughters.

A number of parents commented they were able to get a better image of what a woman scientist does, and some of them kept asking questions even after the event had finished.



Conversations at the Kavli IPMU's Fujiwara Interaction Area.

Contemporary Artist Stays at the Kavli IPMU

Under the Kavli IPMU's first artist-in-residence program, contemporary artist Yasuo Nomura stayed at the institute from August 17 to September 11, 2015. Nomura spent his time taking part in tea time and seminars. At his welcoming party, around 20 Kavli IPMU researchers were treated to his presentation about how he turns Ulam spirals into two-dimensional pieces of art. Around 10 researchers took part in a tour of Nomura's temporary art workshop, where he introduced sketches of pictures he had made that were influenced by the institute, and further five researchers tried their own hands at drawing in Nomura's art workshop. Some researchers requested the art workshop be extended from a few hours to a few days. A number of researchers also said art helped to give them a different perspective to look at their research. "Every day I find something new. It is a perfect environment to stimulate work," said Nomura. Hopefully this will be a start to a long collaboration between art and science.

Kavli IPMU Seminars

1. "Can we explain AMS-02 antiproton and positron excesses simultaneously by nearby supernovae without pulsars nor dark matter?"
Speaker: Kazunori Kohri (KEK)
Date: Jul 01, 2015
2. "Not-so-simple stellar populations in nearby, resolved massive star clusters"
Speaker: Richard de Grijs (KIAA)
Date: Jul 02, 2015
3. "How does the black hole nature arise in supersymmetric gauge theories at strong coupling?"
Speaker: Takeshi Morita (Shizuoka U)
Date: Jul 03, 2015
4. "(Daniele Faenzi) Homological projective duality for determinantal varieties (Zheng Hua) Some geometric problems associated to the elliptic sklyanin algebras"
Speaker: Daniele Faenzi (Bourgogne U) and Zhen Hua (HKU)
Date: Jul 06, 2015
5. "Study of dense QCD matter and its application to physics of compact stars"
Speaker: Motoi Tachibana (Saga U)
Date: Jul 06, 2015
6. "(Daniele Faenzi) Homological projective duality for determinantal varieties (Zheng Hua) Some geometric problems associated to the elliptic sklyanin algebras"
Speaker: Daniele Faenzi (Bourgogne U) and Zhen Hua (HKU)
Date: Jul 07, 2015
7. "Hunting with CHITAH: Gravitationally Lensed Quasars for Cosmology"
Speaker: Sherry Suyu (ASIAA)
Date: Jul 07, 2015

8. "Memories of a Planet (Q&A Session to be followed)"
Speaker: John Hernlund (ELSI)
Date: Jul 08, 2015
9. "Matter Effect from Non-Standard Interactions of the Neutrino"
Speaker: Tatsu Takeuchi (Virginia Tech)
Date: Jul 08, 2015
10. "Cosmological constraints from weak lensing: present measurements and future challenges"
Speaker: Fabian Kohlinger (Leiden Observatory)
Date: Jul 09, 2015
11. "R Parity Violation From Discrete R Symmetries and Recent Nucleon Decay Searches in the Super-Kamiokande Experiment"
Speaker: Volodymyr Takhistov (UC Irvine)
Date: Jul 15, 2015
12. "B Physics: New Physics and the Next Generation"
Speaker: Thomas Browder (Hawaii U)
Date: Jul 22, 2015
13. "The future of collider physics"
Speaker: Nima Arkani-Hamed (IAS)
Date: Jul 22, 2015
14. "The Amplituhedron"
Speaker: Nima Arkani-Hamed (IAS)
Date: Jul 23, 2015
15. "Initial results from a new AKARI/IRC data analysis pipeline optimised for extragalactic deep field images"
Speaker: Helen Davidge (Open U)
Date: Jul 23, 2015
16. "LHC at 13 TeV: First collisions and future prospects"
Speaker: Young-Kee Kim (U Chicago) and John Ellis (KCL)
Date: Jul 23, 2015
17. "Pseudo-Observables in Higgs decays"
Speaker: Gino Ishidori (UZH)
Date: Jul 27, 2015
18. "Grassmann Matrix Quantum Mechanics"
Speaker: Dionysios Theodoros Anninos (IAS)
Date: Jul 27, 2015
19. "Extremal chiral ring states in AdS/CFT are described by free fermions"
Speaker: David Berenstein (UC Santa Barbara)
Date: Jul 29, 2015
20. "Phenomenology of the Higgs Triplet Model at the LHC"
Speaker: Andrew G. Akeroyd (U Southampton)
Date: Jul 29, 2015
21. "Around de Jong's conjecture"
Speaker: Ambrus Pal (Imperial College London)
Date: Jul 29, 2015
22. "Observing the First Stars with 21-cm Cosmology"
Speaker: Rennan Barkana (Tel Aviv U)
Date: Jul 31, 2015
23. "Holographic quantum error-correcting codes: Toy models for the bulk/boundary correspondence"
Speaker: Beni Yoshida (Caltech)
Date: Aug 03, 2015
24. "Finding nice generators for braid-like groups"
Speaker: Tathagata Basak (Iowa State U)
Date: Aug 04, 2015
25. "Probing spectral bounds from modular bootstrap"
Speaker: Joshua Qualls (NTU)
Date: Aug 04, 2015
26. "Multiple Lagrangian Intersections"
Speaker: Oren Ben-Bassat (U Oxford)
Date: Aug 05, 2015
27. "Particle cosmological probes on light dark matter"
Speaker: Kenji Kadota (IBS, Korea)
Date: Aug 05, 2015
28. "N=(4,4) gauged linear sigma model for exotic five-brane"
Speaker: Tetsuji Kimura (Tsukuba U)
Date: Aug 06, 2015
29. "The Higgs mechanism at the graviton level: The Vainshtein mechanism in time domains"
Speaker: Ivan Arraut (Tokyo Univ of Science / CAS)
Date: Aug 11, 2015
30. "High-Precision Modeling of Cosmological Structure Formation: a Community-Driven Approach with Halotools"
Speaker: Andrew Hearin (Yale U)
Date: Aug 12, 2015
31. "Boundary effect of anomaly-induced action"
Speaker: Che-Min Shen (LeCosPA)
Date: Aug 12, 2015
32. "Coronagraphic Imaging of habitable exoplanets"
Speaker: Olivier Guyon (NAOJ Hawaii Observatory)
Date: Aug 24, 2015
33. "Hyperscaling-violating Lifshitz hydrodynamics from black-holes"
Speaker: Yoshinori Matsuo (Crete U.)
Date: Aug 27, 2015
34. "The BV and MV formalism for the Quantum Master Equation"
Speaker: Alexander Voronov (U Minnesota)
Date: Sep 01, 2015
35. "The CMS excess and lepton flavour violation in the (supersymmetric) inverse seesaw"
Speaker: Cedric Weiland (Universidad Autónoma de Madrid)
Date: Sep 02, 2015
36. "Galactic Rotation Curves with Dark Matter Self-Interactions"
Speaker: Ayuki Kamada (UC Riverside)
Date: Sep 03, 2015

37. "Heavy Higgs searches in a Higgs-portal B-L Model"
Speaker: Banerjee Shankha (Harish-Chandra Research Inst)
Date: Sep 04, 2015
38. "Schubert, Dunkl, Grothendieck, Givental and Gromov and Witten Calculi for flag varieties"
Speaker: Anatol Kirilov (Kyoto U)
Date: Sep 10, 2015
39. "Frozen"
Speaker: Yuji Tachikawa (U Tokyo)
Date: Sep 11, 2015
40. "The Verlinde Formula in logarithmic conformal field theory"
Speaker: Simon Wood (ANU)
Date: Sep 16, 2015
41. "Two Higgs Doublets under Non-Abelian SU(2)_H"
Speaker: Wei-Chih Huang (TU Dortmund)
Date: Sep 25, 2015
42. "Resurgence, exact quantization and complex instantons"
Speaker: Gokce Basar (U Maryland)
Date: Sep 28, 2015
43. "CMS recent results & Higgs CP study using H \rightarrow tau tau final state"
Speaker: Yuta Takahashi (CERN, CMS collaboration)
Date: Sep 28, 2015
44. "Dimensions of derived categories of commutative rings"
Speaker: Ryo Takahashi (Nagoya U)
Date: Sep 28, 2015
45. "Unitarization of gravity scattering amplitude"
Speaker: Yu-tin Huang (National Taiwan U)
Date: Sep. 29, 2015
46. "Cosmic Reionization On Computers"
Speaker: Nick Gnedin (Fermilab / U Chicago)
Date: Sep 30, 2015

Personnel Changes

Reappointment

Yu Nakayama was appointed as a Kavli IPMU Postdoctoral Fellow on September 1, 2015. He had been at the Kavli IPMU from September 1, 2011 to August 31, 2012 and September 1, 2013 to August 31, 2014 as a Kavli IPMU Postdoctoral Fellow. He then stayed at the Division of Physics, Mathematics and Astronomy, the California Institute of Technology as a Shirman Fairchild Research Assistant Professor.

Miho N. Ishigaki was appointed as a Kavli IPMU Postdoctoral Fellow on September 1, 2015. She had been at the Kavli IPMU from April 1, 2013 to August 31, 2015 as a JSPS Postdoctoral Fellow.

Atsushi Shimono was appointed as a Kavli IPMU Postdoctoral Fellow on August 1, 2015. He had been at the Kavli IPMU from September 1, 2011 to July 31, 2015 as a Kavli IPMU Academic Support Specialist.

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 Claire Nicole Lackner [September 1, 2012 – May 31, 2015] moved to Element Analytics in the US as a Data Scientist.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Jonathan David Maltz [September 16, 2013 – September 17, 2015] moved to the University of California, Berkeley as a Postdoctoral Researcher.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Charles Milton Melby-Thompson [September 1, 2012 – September 20, 2015] moved to Fudan University in China as a Postdoctoral Research

Fellow.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Rene Meyer [September 8, 2012 – September, 30, 2015] moved to Stony Brook University as a Postdoctoral Associate.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Satyanarayan Mukhopadhyay [October 1, 2012 – September 30, 2015] moved to the Department of Physics and Astronomy, the University of Pittsburgh as a Postdoctoral Fellow.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Mauricio Andres Romo Jorquera [July 16, 2012 – September 15, 2015] moved to the Institute for Advanced Study as a Postdoctoral Researcher.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Charles Martin Siegel [August 16, 2015 – August 15, 2015] moved to the U.S. Department of Energy's Pacific Northwest National Laboratory as a Postdoctoral Fellow.

JSPS Postdoctoral Fellow David Alexander McGady [May 1, 2015 – August 31, 2015] returned to Princeton University.

JSPS Postdoctoral Fellow Hironao Miyatake [April 1, 2014 – August 31, 2015] moved to the California Institute of Technology/NASA Jet Propulsion Laboratory as a Postdoctoral Fellow.

JSPS Postdoctoral Fellow Natsumi Nagata [April 1, 2014 – August 31, 2015] moved to the University of Minnesota as a Keith A. Olive Postdoctoral Fellow.

Entanglement Entropy

Tadashi Takayanagi

Professor, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University,
and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

Since in quantum mechanics we interpret a particle as a wave, we can take a linear combination of physical states. For example, let us consider a system with two spins of electrons. For the first example, we can think of a state ($|\Psi_1\rangle$) in the figure below) defined by the condition that one of the two spins is up (called spin A), while the other is down (called spin B). Such a direct product state is a classical state. On the other hand, we can consider another state ($|\Psi_2\rangle$) obtained by taking a linear combination of the previous state and its opposite state with equal weight, which is called an EPR pair. Such a state which cannot be written as a direct product state has a non-zero correlation between A and B and thus has quantum entanglement. Even though the total state is uniquely fixed, if we look at its subsystem, there is ambiguity on which state is realized. A quantity which measures the amount of quantum entanglement is entanglement entropy S_A , which is defined as the von Neumann entropy for the reduced density matrix. This estimates how many EPR pairs can be extracted from the entanglement between A and B.

$$S_A = -\text{Tr} [\rho_A \log \rho_A]$$

(i) $|\Psi_1\rangle = |\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B \sim \left[\begin{array}{c} \uparrow \\ \textcircled{A} \\ \uparrow \end{array} \quad \begin{array}{c} \downarrow \\ \textcircled{B} \\ \downarrow \end{array} \right]$
 $S_A = 0$

(ii) $|\Psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B + |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B)$
 $S_A = \log 2 \quad \sim \left[\begin{array}{c} \uparrow \\ \textcircled{A} \\ \uparrow \end{array} \quad \begin{array}{c} \downarrow \\ \textcircled{B} \\ \downarrow \end{array} \quad \text{or} \quad \begin{array}{c} \downarrow \\ \textcircled{A} \\ \downarrow \end{array} \quad \begin{array}{c} \uparrow \\ \textcircled{B} \\ \uparrow \end{array} \right]$

歴史的な業績

IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし

梶田さんの1998年の大発見は、当然ノーベル賞を与えられるべきだ、とずっと思っていました。今までの素粒子物理学のノーベル賞は、すべて「標準理論」という現在の最高の理論を作るのに貢献した人たちが取ってきました。一方、梶田さんと、共同受賞のArt McDonaldのお二人は、標準理論だけでは宇宙を説明することができないことを実験的に初めて示したのです。標準理論が物理学の終着点ではなく、今後更に大きな枠組みに変わっていくのだ、という方向性を示した歴史的な業績です。

実は「なぜ宇宙に我々が存在するのか。1対1でできた物質と反物質のバランスを10億分の1だけ崩し、完全に消滅せずにごくわずかの物質だけが残った。どうしてこのバランスを崩すことができたのか。」という文字どおり我々の存在がかかった大問題がありますが、ニュートリノが質量を持っていることがわかったために、ニュートリノが物質と反物質を入れ替える橋渡しをし、我々を完全な消滅から救ってくれた「父親」ではないか、という期待が生まれました。この考え方はカブリ数物連携宇宙研究機構の福来・柳田お二人の理論ですが、梶田さんの発見の後俄然有力視されるようになり、今では日本ではハイパーカミオカンデ実験を計画中、アメリカの素粒子物理でもこの研究を最優先で進めています。世界の素粒子物理学の研究の流れを変えた研究です。

梶田さんはKavli IPMU発足時から主任研究員として活躍されてきました。我々のメンバーがノーベル賞に輝いたことは、機構一同大変喜んでます。今年の

ブレークスルー賞も梶田さんに加えて鈴木洋一郎さん、ニューホライズン賞に立川裕二さん、と機構のメンバーが受賞しました。Kavli IPMUに集まる研究者の質の高さがわかる、素晴らしいニュースとなりました。これからもこうした世界で注目される研究成果が出てくることでしょう。楽しみです。

Director's
Corner

大気ニュートリノとニュートリノ振動*

はじめに

今から約100年前、ビクトール・ヘスが自ら気球に乗って上空の放射線強度を測定し宇宙線が発見されました。その後の研究でこの宇宙線は陽子や原子核が主成分で、またそのエネルギーは非常に高エネルギーまで延びていることが判明しました。一方で、現在に至るまで宇宙線がどこでどのようなメカニズムで生成されているかは十分わかってはおらず、現在でもこの起源を求めて多くの研究がなされています。

宇宙線が大気中に入射すると、大気中の窒素や酸素といった原子核と相互作用し、その際に多くのパイ中間子が生成されます。パイ中間子のうち電荷がプラスかマイナスのものはミューオンとミューニュートリノに崩壊します。さらに、ミューオンの寿命は2マイクロ秒とわりあい長いのですが、大気上空で生成されるミューオンの多くは地表に到達する前に、電子（あるいは陽電子）とミューニュートリノと電子ニュートリノに崩壊します(図1)。なお、本稿では簡単のために電荷、あるいは粒子・反粒子の区別については基本的に無視します。これからもニュートリノと言ったときにはニュートリノと反ニュートリノの両方を意味していることを了解してください。

このように生成されたニュートリノを大気ニュートリノと呼びます。1962年に加速器実験でミューニュートリノが発見されると、大気ニュートリノの存在を確かめる実験が南アフリカとインドの鉱山の地下深くで行われました。これらの実験によって1965年

に大気ニュートリノが観測されました。本稿では宇宙線が生成するニュートリノを観測して行っているニュートリノ振動の研究について述べます。

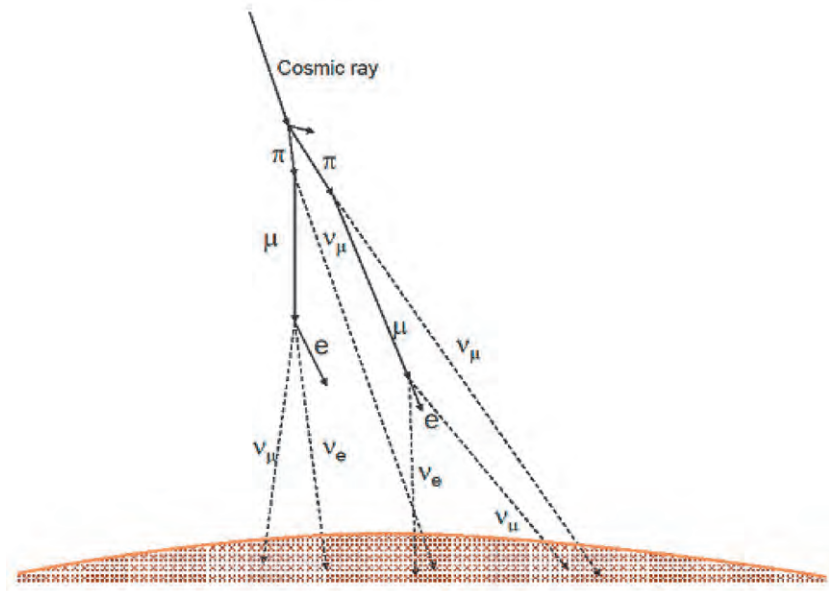
カミオカンデでの大気ニュートリノ観測

大気ニュートリノが多くの研究者に注目されるようになったのは1980年代後半です。1965年に観測された大気ニュートリノは、しばらくの間広く注目される研究分野としては発展しませんでした。一方、1980年代に陽子崩壊実験が世界の数カ所で始めると、大気ニュートリノは陽子崩壊を探す際の最も邪魔なバックグラウンドとなりました。そのため、このバックグラウンドを理解する必要がありました。それらの実験の一つがカミオカンデ実験でした。カミオカンデは岐阜県神岡にある鉱山の地下1,000メートルに設置された、有効質量約1,000トンの純水中での光の速度以上の高速で走る荷電粒子が放射するチェレンコフ光を、直径50cmの光電子増倍管1,000本で測定する装置でした。

ミューニュートリノの相互作用で生成されたミューオンは水中で少しずつエネルギーを失いながら進むのに対し、電子ニュートリノの相互作用で生成された電子は水中で電磁シャワーを形成するので、ミューオンと電子の水中での振る舞いは大きく違います。カミオカンデでは電子やミューオンはリング状のチェレンコフ光として観測されますが、水中での電子とミューオンのふるまいの違いはチェレンコフ光のリングの形

* IPMU Kavli News No.15 September 2011から再掲。

図1 大気ニュートリノの生成。

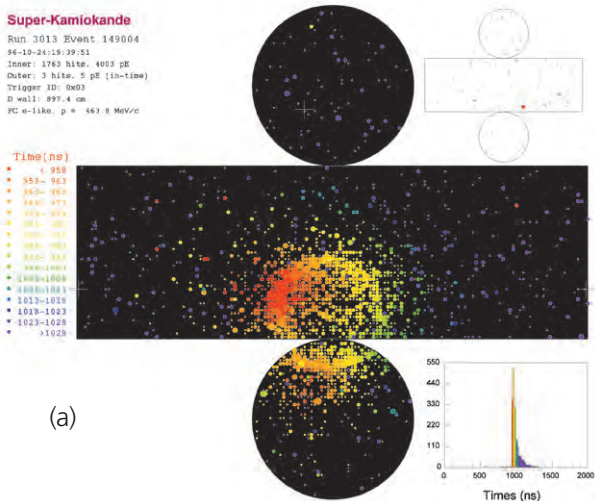


状の違いとなるため、ミューオンと電子の識別ができません。参考のため、図2に本稿の後半で述べるスーパーカミオカンデで観測された電子ニュートリノとミューニュートリノ事象のチェレンコフ光のリングのパターンを示しました。この考えに基づいて、カミオカンデでは電子型のチェレンコフリングが1つだけ観測され電子ニュートリノ相互作用と考えられる事象と、ミュー型のチェレンコフリングが1つだけ観測されミューニュートリノ相互作用と考えられる事象を識別し、それぞれの事象数を数えました。その結果、電子ニュートリノ事象はほぼ予想通りの数が観測されているにも関わらず、ミューニュートリノ事象の数はおよそ予想値の60%程度でした。

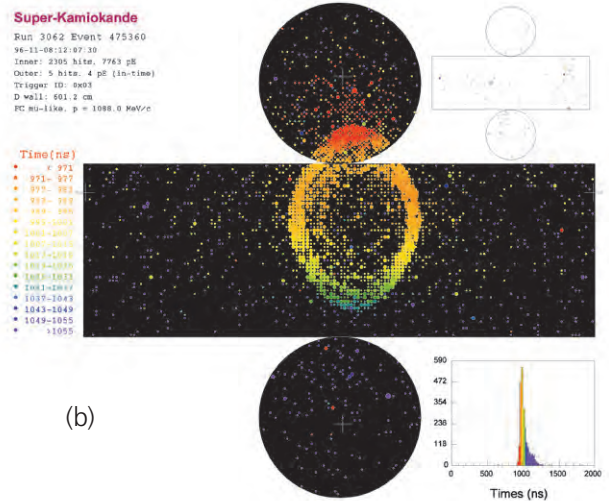
ここで予想値とは、計算から求めた大気ニュートリノのフラックスとニュートリノ相互作用断面積からカミオカンデ測定器内のニュートリノ相互作用の数を求め、更にカミオカンデ測定器の検出効率などを考慮してモンテカルロ・シミュレーションで求めたものです。当時この予想頻度には宇宙線フラックスの観測値の誤差などから20から30%程度の誤差が考えられていましたが、電子ニュートリノとミューニュートリノの比は正確に計算できるので、その誤差は5%以内

と見積もられました。これらの理由のため、上記の結果は計算の誤差などでは説明できないと考えられました。一方、例えばミューニュートリノとタウニュートリノ間のニュートリノ振動を仮定すれば上記のデータは説明できるということで、当時注目されました。

話を進める前に、ここでニュートリノ振動について述べておきます。ここでは簡単のためにミューニュートリノとタウニュートリノの2種類のニュートリノを考えます。もしニュートリノに質量があると、最初ミューニュートリノだったものが飛行中にタウニュートリノになり、またもとに戻るといった具合に飛行中にニュートリノの種類が変わります。これをニュートリノ振動と言います。つまり、ニュートリノ振動が見つければ、ニュートリノが質量を持っている証拠となります。図3にニュートリノの飛行と共に最初ミューニュートリノだったものがミューニュートリノのままの確率がどうなるかを示しました。このとき、重い方のニュートリノの質量として電子の質量の約 $1/10^7$ を仮定しました。もしニュートリノの質量がこれより重ければこの振動周期が短くなり、逆に軽ければ振動周期は長くなります。したがって、ニュートリノが別なニュートリノに移り変わる早さを観測すれ



(a)



(b)

図2 スーパーカミオカンデで観測された (a) 電子ニュートリノと (b) ミューニュートリノ事象の例。図中丸の大きさが観測された光の強さを示す。また丸の色は光の観測された時間情報を表す。

ば、重い方のニュートリノの質量がわかることになります。もう少しだけ図3に関連して言うておくと、図3ではあるところでミューニュートリノの確率がゼロになっていますが、これは特殊な場合です。一般にはミューニュートリノの減り方はほんの少しから、図3で示されるゼロまでのどこかになるはずです。そして観測的に一番見つけやすいのは一番効果が大きい図3の場合です。

実際の実験の話に戻る前に、図3と大気ニュートリノを組み合わせて考えてみます。大気ニュートリノ実験ではおおざっぱに言って1 GeVのエネルギーのニュートリノ相互作用が多く観測されます。図3を見るとわかるように、もし重い方のニュートリノの質量が電子の質量の約 $1/10^7$ であれば、500 km程度走るとミューニュートリノである確率はゼロとなってニュートリノ振動の効果がはっきり見えるはずです。大気の上空で生成されたニュートリノが真上から飛んできたとすると、その飛行距離は平均15 km程度なので、まだニュートリノは振動していません。一方、地球の直径は約12800 kmなので、地球の反対側から飛来するニュートリノは振動を何回も繰り返して飛んで来るこ

とになります。

カミオカンデの結果は興味深いものでしたが、必ずしも多くの研究者に受け入れられたわけではありませんでした。当時はカミオカンデ以外にも世界中で3つほど大気ニュートリノを測定できる装置がありましたが、その観測結果は一致していませんでした。このような状況のため、圧倒的な統計精度を持つ次世代のニュートリノ測定器、つまりスーパーカミオカンデを待つ必要がありました。

スーパーカミオカンデでの大気ニュートリノ観測とニュートリノ振動

スーパーカミオカンデが1996年に観測を開始すると、大気ニュートリノ観測に対する有効体積がカミオカンデより約20倍大きいので、観測データの量は格段に上がりました。またスーパーカミオカンデの観測は既に10年以上となり、今までの他の実験より長く観測を続け、更に多くのニュートリノのデータを用いた研究が可能となっています。

大気ニュートリノでニュートリノ振動が起こっていることを最も明確に示せるのは、上から飛来する

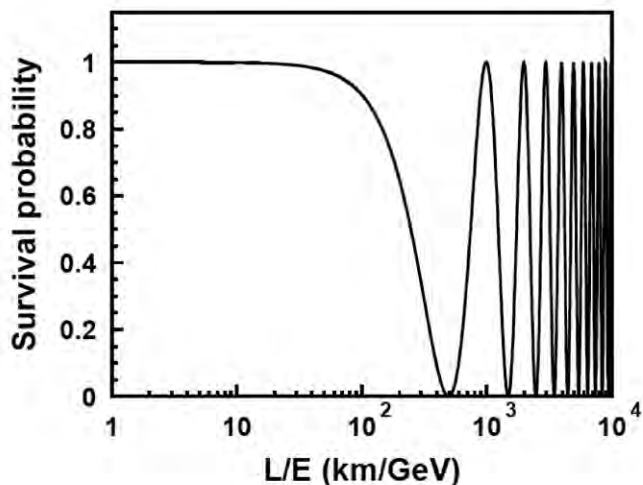


図3 ミューニュートリノがミューニュートリノとして残る確率を L/E の関数として示した。ここで $L(\text{km})$ は距離、 $E(\text{GeV})$ はエネルギーを表す。重い方のニュートリノの重さは電子の重さの $1/10^7$ を仮定している。

ニュートリノと下から飛来するニュートリノの数を比べ、予想値と合っているかどうか調べることで。ニュートリノ振動がなければ観測されるニュートリノ数は上下ほぼ同じと計算されているので、もし下から来るニュートリノの事象数が上から来るものの事象数より有意に少なければ、ニュートリノ振動の動かぬ証拠となります。更に、もしニュートリノ振動がミューニュートリノとタウニュートリノ間で起こっているなら、電子ニュートリノはニュートリノ振動と無関係なので、上下非対称性はミューニュートリノ事象には観測されますが、電子ニュートリノ事象には観測されないはず。このような考えに沿って、ニュートリノ事象の天頂角分布が精密に調べられています。その結果を図4に示しました。図4はスーパーカミオカンデの2008年までのデータをまとめたものですが、明確に上向きミューニュートリノ事象の欠損が確認できます。また、天頂角分布を見てみると、エネルギーが高い事象の分布のほうが上下非対称性の効果が顕著です。これは低エネルギーではニュートリノとニュートリノ反応の結果出てくるミューオンや電子との角度相関が悪くなって、ミューオンの方向を見ても上下非対称性がはっき

りわからなくなるためです。このようにして、1998年にニュートリノ振動が見つかりました。

図4のデータとニュートリノ振動ありの予想値とを比較することでニュートリノの基本物理量が測定されます。まず、ニュートリノ質量について、重い方のニュートリノは $0.05 \text{ eV}/c^2$ 程度と推定され、ニュートリノ以外で一番軽い電子と比べると $1/10^7$ の重さです。今述べているのは、一番重いニュートリノの質量ですので、おそらく比べるべきは一番重いクォーク(トップクォーク)の質量でしょう。この場合にはおおよそ $1/(4 \times 10^{12})$ となります。また、ニュートリノ振動でのミューニュートリノの減り方ですが、これは図3で示した理論値と矛盾しません。もし実験の精度がよければ、ミューニュートリノが増えたり減ったりするのがはっきり見えるはずですが、図4ではそれが平均化されて観測されています。つまり、最大限減ったり増えたりしているのですが、平均化されて半分になって観測されているということになります。いずれにしても、ニュートリノ振動の効果は考えられる範囲で一番大きいようです。これを研究者は「大きい混合」という言葉で表します。おそらくニュートリノ質量が小さい原因につい

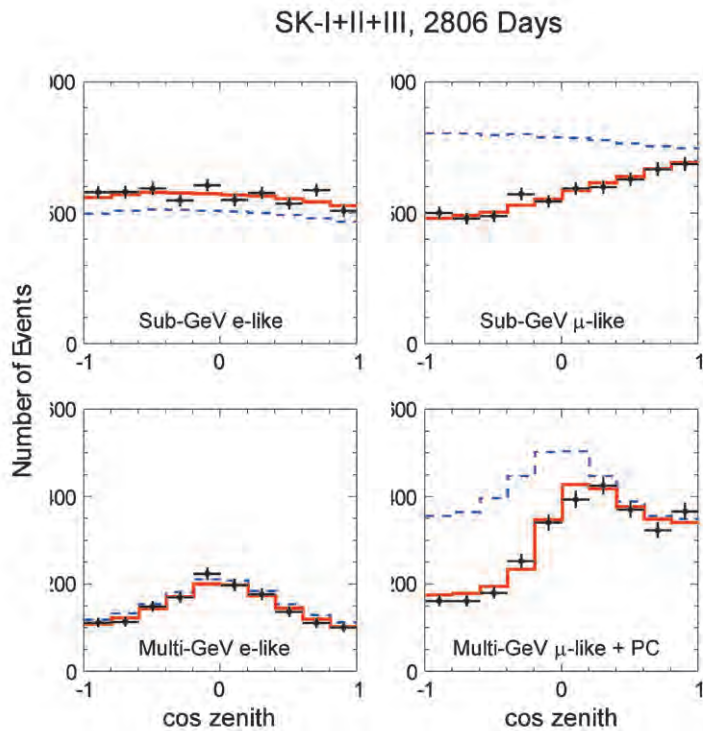


図4 スーパーカミオカンデで観測された大気ニュートリノの天頂角分布。 $\cos\theta = -1$ が上向き、 $\cos\theta = 1$ が下向きの事象を示す。左の2つの図は電子事象（多くは電子ニュートリノ事象）を示し、右の2つの図はミュオン事象（多くはミュオンニュートリノ事象）を示す。左右とも上の図は見えているエネルギーが1.3 GeV以下の事象を示し、下は1.3 GeV以上を示す。下のミュオン事象に関してはミュオンが測定器を突き抜けて行った事象も含む。点線のヒストグラムはニュートリノ振動が無い場合の予想値を示し、実際のヒストグラムはミュオンニュートリノとタウニュートリノ間のニュートリノ振動を仮定した分布を示す。

ては「シーソー機構」という有望な考えがあるのかと思われませんが、大きい混合については、まだその根本的な理解に至ったとは言えない状況かと思われま。理論家の皆さんに考えていただくと共に、実験的にも更に精度よく測定をしていくことが必要でしょう。

タウニュートリノの検出

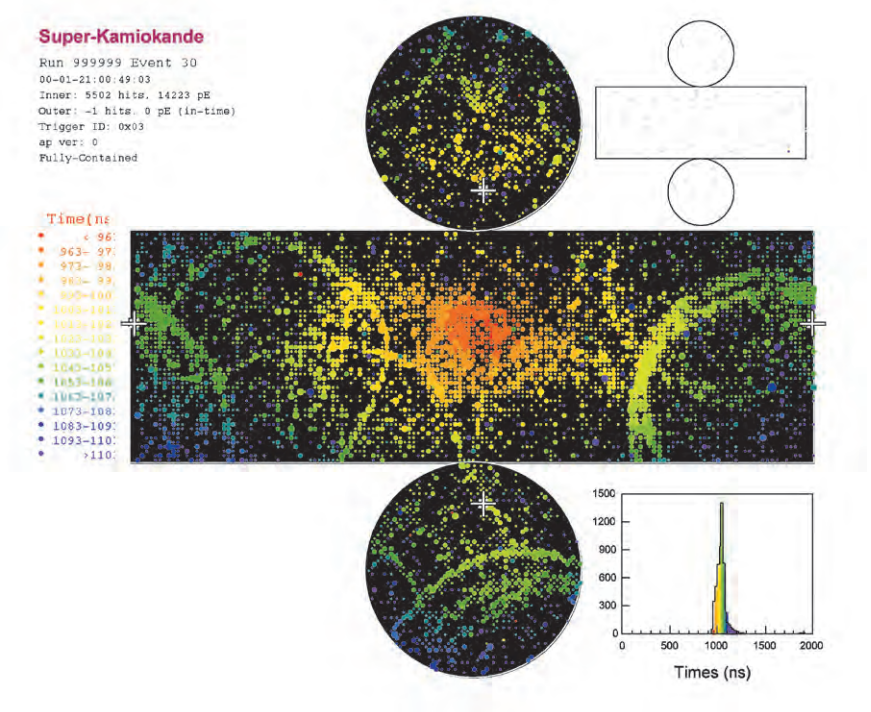
今までミュオンニュートリノとタウニュートリノ間のニュートリノ振動であると述べてきましたが、厳密には、ミュオンニュートリノが振動して別なニュートリノに転移し、その別なニュートリノは電子ニュートリノではないので、タウニュートリノであるべしというのが今までの議論です。従って、タウニュートリノに転移した証拠をタウニュートリノの検出で確認できれば決定打となります。

このような理由から、スーパーカミオカンデでは大気ニュートリノ中でニュートリノ振動によりタウニュートリノが生成された証拠を探しました。残念な

がらこの探索は簡単なものではありません。というのは、タウニュートリノの相互作用の敷居値は相互作用で生成されるタウ粒子が重いために、約3.5 GeVと割合に高く、また大気ニュートリノのフラックスはエネルギーが上がると共に急激に下がるため、この反応が起こる頻度が低いからです。それだけではなく、更に、タウニュートリノ反応で生成されたタウ粒子はすぐに崩壊し、特に65%の崩壊では終状態に（ニュートリノ以外は） π 中間子などのハドロンのみを含んでいるため、中性カレント事象と呼ばれる事象と明確な区別が付きにくいのです。図5にモンテカルロシミュレーションによる典型的なタウニュートリノの事象を示しました。多くのチェレンコフリングが重なり、解析は難しそうです。

一方で、大気ニュートリノ特有の利点もあります。もし、「タウニュートリノらしい事象」を選び出し、それについて天頂角分布を調べれば、タウニュートリノはニュートリノ振動によって生成されるので上向き事象しかなく、一方、バックグラウンドはミュオン

図5 タウニュートリノのモンテカルロシミュレーション事象の例。



トリノ事象を除いては上下対称となるためです。このため、「タウニュートリノらしい事象」の天頂角分布を調べ、上向き事象の超過を観測できれば、統計的にタウニュートリノ事象の存在を示すことができます。

このような考えに基づいて、スーパーカミオカンデではニュートリノ振動で生成されたタウニュートリノの存在の有無を調べました。その結果、統計的にはまだ決定的とは言えないものの、データはニュートリノ振動によってタウニュートリノが生成されたとして矛盾がないものでした。今後データが増えると共に、より明確な結論が出せるものと期待されます。また加速器を用いた実験でもタウニュートリノの探索が行われており、近い将来にはニュートリノ振動の結果生成されたタウニュートリノの観測が間違いのないものになると期待されています。

おわりに

以上述べてきたように、大気ニュートリノの研究

からニュートリノ振動が発見されスーパーカミオカンデにおける高統計の観測によってニュートリノ振動現象の詳細が研究されています。今までは主にミューニュートリノとタウニュートリノ間のニュートリノ振動について調べられてきましたが、ニュートリノには3種類あるので、最終的には3種のニュートリノ間のニュートリノ振動現象を調べる必要があります。既に、太陽ニュートリノと原子炉ニュートリノの観測から電子ニュートリノも振動することがわかっていますし、また加速器ニュートリノ振動実験 T2K をはじめ、近頃のデータはミューニュートリノがあまり高い頻度ではないものの電子ニュートリノに振動することを示唆しています。大気ニュートリノは、もし非常に高い統計精度で測定ができれば、これら全てのニュートリノ振動が測定可能で、またニュートリノが地球を通過してくるといふ他にはない特徴から、ニュートリノの重さの順番なども観測が可能だと考えられています。このため、大気ニュートリノは将来に亘ってニュートリノ物理に貢献していくと考えられます。

Our Team

川崎 雅裕

かわさき・まさひろ 専門分野:理論物理学

主任研究員

私は主に素粒子論的宇宙論の研究を行っています。特に、インフレーション宇宙論、宇宙のバリオン数生成、アクシオンに関する宇宙論に興味をもっています。インフレーション宇宙は地平性問題などの標準宇宙の問題を解決できるだけでなく、初期密度揺らぎを生成することができ、それがWMAPやPlanckなどによる宇宙背景放射の観測で確かめられ、宇宙論の新たなパラダイムとなっています。私はインフレーションを超重力理論の枠組みで実現する研究や超重力理論で予言されるグラビティーノの宇宙論的影響からインフレーション後の再加熱温度に制限を与える研究を行ってきました。また、インフレーションによってそれ以前に



あった物質は薄められてしまうので、バリオン数やダークマターはインフレーション後に作られなければなりません。私は超対称性理論で実現されるアフレック・ダイン機構によるバリオン数生成と、それに伴って生成されるQボールと呼ばれるノントポロジカルソリトンについて研究しています。さらに、ダークマターの有力な候補であるアクシオンについて、その宇宙論的影響を調べています。

アルタン・セシュマニ

Artan Sheshmani 専門分野:数学

特任研究員 (非常勤講師)

私はグロモフ-ウィッテン(GW)ノドナルドソン-トーマス(DT)理論、カラビ-ヤウ幾何学、そして弦理論の数学的側面について研究しています。最近、私は共同研究者と共に、弦理論において良く知られている3次元カラビ-ヤウ多様体(CY3)のDT不変量のS双対性モジュラー予想について研究し、多くの場合でこれを証明しました。さらに、私はGW/DT理論とクズネツォフによるホモロジカル射影双対予想の間の関係について研究



し、また、表現論と代数幾何的手法を用いて特異曲面のヒルベルトスキームの幾何学と高次元結び目の量子トポロジーの間の関係を証明しようとしています。

韩 成成 ハン・チェンチェン 専門分野:理論物理学

博士研究員

私は次のような研究を行っています。

- (1) ヒッグス物理。超対称性やリトルヒッグス理論のような種々の新しい素粒子モデルにより予言される、コライダーでのヒッグス粒子の物理の研究。
- (2) 超対称性の現象論。実験からの新しい素粒子モデルに対する様々な直接および間接的制限を検討し、テバトロン、LHC、ILC等のコライダーにおけるこれらのモデルの現象論を研究。また、コライダーにおける新粒子探索についてモンテカルロ法を用いて検討。
- (3) ダークマター、特に低エネルギーでの超対称モデル



でのダークマターの物理。宇宙のダークマターを超対称モデルのLSP（電氣的に中性で最も軽い粒子）と解釈し、Planck衛星の観測によるダークマターの残存密度および他の観測結果の説明を試み、それから推論されるコライダーでの現象論を解析。

服部 香里 はっとり・かおり 専門分野:実験物理学

博士研究員

私は、宇宙マイクロ波背景放射偏光の精密観測を通して初期宇宙を明らかにすることを目指し、地上実験POLARBEARに参加して研究を行っています。現在、POLARBEAR望遠鏡は、チリ、アタカマ高地（標高5,200メートル）で観測を行っていますが、さらに高感度の観測を目指すアップグレード実験POLARBEAR-2が予定されています。POLARBEAR-2では、高感度を達成するために超伝導検出器の数を増やす予定であり、



私はそれをいかに達成するかの研究を行っています。さらに、この研究をLiteBIRD衛星計画につなげていくのが目標です。

朱 倉佑 ジョー・チャンウー 専門分野:実験物理学

博士研究員

私たちはBelle IIおよびSuperKEKB実験のための新しいシリコン崩壊点検出器(SVD)の開発・製作を行っています。ルミノシティが上がるため、SVDには新たなデザインと性能の向上が必要とされます。私は、新しいSVDの飛跡検出器としての良好な品質を保証するための電氣的性能保証(EQA)を担当しています。まず、電子回路と読み出しチップの接続をチェックするため、電氣的な機能を調べます。次に雑音レベル、信号対雑音比、時間分解能、不感時間等のSVDモジュール



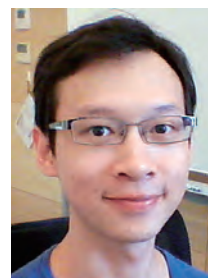
の性能一式を測定します。SVD製作チームは、私からのフィードバックをSVDモジュールの性能向上に役立てています。このような方法によりBelle II実験のために最高の性能を有するSVDの製作が可能となっています。

Our Team

梁 成志 レオン・シンチー 専門分野:天文学

博士研究員

私は、熱核暴走反応による炭素-酸素白色矮星の爆発であるIa型超新星を、野本憲一教授と共に計算機シミュレーションを行うことにより研究しています。私たちはIa型超新星の様々なパラメータの間の関係と、銀河の化学進化に対するそれらのパラメータの影響を理解することに興味があります。特に、観測データから爆発機構の理論に対する制限を導きたいと考えていま



す。その制限を用いてダークエネルギーの精密測定にIa型超新星を利用する方法を改良することができます。

エバンゲロス・ルーティス Evangelos Routsis 専門分野:数学

博士研究員

私の研究分野は代数幾何学で、代数的対象の退化に焦点を当てて研究を行っています。とりわけ、代数多様体上の点の配置空間のコンパクト化とそれらに伴うモジュライ問題を研究しています。加えて、グロモフ・ウイッテン理論と数え上げ幾何学にも興味もっています。具体的には、対数的幾何学の視点で曲線からFulton-MacPherson型のターゲット空間への安定写像の



モジュライ空間、並びにそれらと他の曲線の数え上げ理論との間の関係を研究しています。

アレッサンドロ・ソネンフェルド Alessandro Sonnenfeld 専門分野:天文学

博士研究員

早期型銀河はどのように形成され進化するのでしょうか？ これら銀河の性質は、どのようにダークマターハローに依存するのでしょうか？ 私は、強い重力レンズを主要な研究手段としてこれらの問題に取り組んでいます。Kavli IPMUに加わったことにより、ハイパー・シュブリーム・カム (HSC) によるサーベイで新たな強い重力レンズ現象を探ることができるようになりました。HSCを用いるとその超広視野のおかげで、これ



までの他のどのサーベイよりも多くの強い重力レンズ現象を見つけることが可能になります。

デイヴィッド・スターク David Stark 専門分野:天文学

博士研究員

私は、銀河がどのようにして形成され進化するのかを理解する試みの中で、特に銀河が星を作る際の材料となるガスの物理を中心に研究を行っています。多波長での観測を通じて、銀河がどのようにしてガスを獲得する（あるいは失う）のか、また、このガスがどのようにして星が形成されるような高密度のガス雲になるのかを調べています。特に興味をもっているのは、銀河群から宇宙の大規模構造に至る銀河の周辺環境が、これらの物理過程にどのように影響を及ぼしてい



るかという点です。この他、高速運動しているガス雲中の星形成の可能性、バリオンのタリー・フィッシャー関係について等の研究があります。

イタマル・ヤーコヴ Itamar Yaakov 専門分野:理論物理学

博士研究員

私は場の量子論の非摂動的側面に焦点を当てた研究を行っています。特に、双対性、超対称ゲージ理論、およびこれらの数学的応用における defect (欠陥) とその役割に興味をもっています。最近では、超対称性 localization を用いて厳密な結果を得ることに集中しました。強結合の場の量子論の最も難解な側面の幾つか、例えばスペクトルを見出すこと、相関関数を計算すること、低エネルギーでの振る舞いを理解すること等に



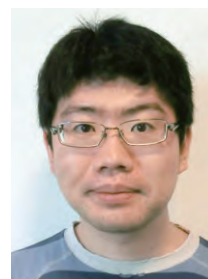
は解析的なツールがほとんどありませんが、超対称性と localization を用いることにより非常に簡単化することができます。

米倉 和也 よねくら・かずや 専門分野:理論物理学

博士研究員

場の量子論は物理学における最も基本的な枠組みの一つです。場の量子論は素粒子の標準模型などを通じて、小さな距離のスケールの物理現象のほとんどを説明します。またしばしば、特に超対称性を持った理論などで、数学と面白い関係をもったりします。

私は、場の量子論の様々な側面やその応用について研究しています。近年、ラグランジアンから始めるような従来のやり方では捉えきれないことが場の量子論には沢山あることが理解されてきました。時にはラグランジアンそのものが知られていないにもかかわらず、



ストリング理論で作れるものもあります。特に、高次元ではくりこみ可能なラグランジアンがないので、それらの理論を理解するには新しい手法が必要となります。私はそのような場の理論の新しい一面を理解することを目指しています。

Our Team

研究集会 “Analytic Representation Theory of Lie Groups”

大島芳樹 おおしま・よしき
Kavli IPMU 博士研究員

研究集会 “Analytic Representation Theory of Lie Groups” は、2015年7月1日から4日間にわたり、Kavli IPMU で開催されました（主催者：小林俊行主任研究員）。Vershik氏をはじめヨーロッパから4人の研究者を含む13人による計20時間の講演が行われました。本集会では小林俊行氏が提唱した以下の2つのプログラムを中心のテーマとしました。

A：“表現論を手がかりとしてそこから大域解析における新しい現象を発見する”。

B：“無限次元表現の分岐則の研究”。

リー群は連続的な変換群として19世紀に現れた古典的な対象ですが、現在に至るまで数学や物理の様々な分野と互いに影響を及ぼし合いながら発展してきました。フーリエ解析や特殊関数などの古典解析の背後にはしばしば対称性があり、それらはリー群の表現によって記述されます。一方で、近年の表現論の大きな発達を踏まえて、逆に表現論を手掛かりとしてそこから大域解析における新しい現象を発見するという最近の研究の方向があります。

Orsted氏はこのような立場から、Kobayashi-Manoの変形理論と、Ben Said-Kobayashi-Orstedによるフーリエ変換、Dunkl変換を取り込んだ変形理

論の解説を行いました。小林俊行氏は幾何学的量子化と極限が可換か？という問題を提起して、それから極小表現を構成する幾何学的アイデアを提案しました。

また、表現の制限についての情報を統制する作用素である symmetry breaking operator もたびたび話題にあげられました。Pevzner氏は微分作用素で表される symmetry breaking operator への小林氏が導入したFメソッドによるアプローチ、落合啓之氏は symmetry breaking operator の保型形式への応用、筆者は symmetry breaking operator を用いたユニタリ表現の分岐則の記述に

ついてそれぞれ話しました。

Vershik氏の講演では補系列表現を使ってカレント群とよばれる無限次元群の表現を構成し、参加者に表現論への新たな視点をもたらしました。また、Bianchi氏はコバリオグラム問題に、フーリエ変換の零点の漸近挙動の分布と幾何学的不変量の関係式を応用して得られた最新の結果について講演しました。

表現論の解析的側面に的を絞って行った集会で、これらのプログラムがさまざまな方向に広がりを見せていることが発見でき、集会は大変有意義なものとなりました。



東京ーバークレーサマースクール 「幾何学と数理物理」

河野俊文 こうの・としたけ

Kavli IPMU 主任研究員

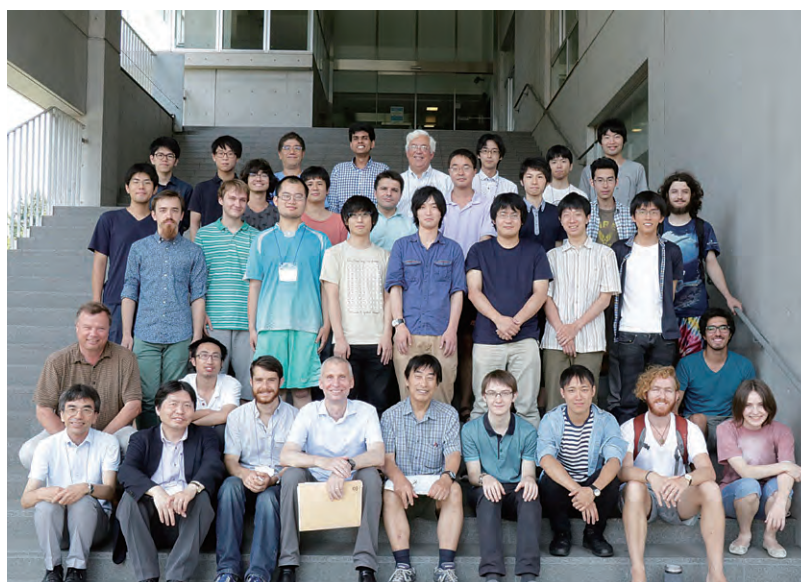
このスクールは東京大学とカリフォルニア大学バークレー校との間の戦略的パートナーシップ構築プログラムの一環として開催されました。カリフォルニア大学バークレー校とロシア国立高等経済学院 (HSE) からそれぞれ5名、また精華大学ヤウ数理科学センターから1名の学生をスクールに招きました。国内の数学、物理双方の学生も多く参加し、スクールの参加者の総数は約80名でした。スクールの開催にあたって、学生への資金援助のため数物フロンティア・リーディング大学院 (FMSP) および日本学生支援機構 (JASSO) からの補助を得ました。

スクールで扱ったテーマは、数学と物理学との関わりに由来する、周期積分の理論、グロモフ-ウィッテン不変量、ミラー対称性、ドナルドソン-トーマス不変量等です。第一週目は、三つの入門的な講義が組まれました。まず、斎藤恭司が古典的な楕円積分の理論から始めて、周期積分の理論について述べました。そして、古典的な理論がいかにして、平坦フロベニウス構造や原始形式の理論につながっていくかを説明しました。次に、トードル・ミラノフがグロモフ-ウィッテン不変量と可積分系との関わりについて講義しました。さらに、池田暁志が代数多様体上の接続層の導来圏とブリッジランドの安定性条件について解説しまし

た。第一週目の最終日に学生によるセッションを行い、14名の学生が自身の研究内容についての発表を行いました。第二週目のプログラムは、ミニコースと90分講演からなっていました。ミニコースの概要は次の通りです。ミハイル・カプラノフは曲面の深谷圏の組み合わせ的な方法と、係数付きの深谷圏の概念について述べました。デイビッド・モリソンは、ミラー対称性の弦理論における源流から始めて、そのさまざまな発展について説明しました。ニコライ・レシェティキンがBV量子化の方法について述べ、戸田幸伸は3次元多様体上のブリッジランドの

意味での準安定な対象のモジュライについて解説しました。これらに加えて、堀健太郎の2次元超対称シグマ模型における半球上の分配関数についての講義と山崎雅人のクラスター代数についての講義がありました。

スクールは非常に活気に満ちたもので、学生を含む多くの参加者の間で活発な議論がなされました。今後もこのようなスクールを継続して開催していきたいと考えています。



“Kavli IPMU-Durham-KIAS Workshop: New Particle Searches Confronting the First LHC Run-2 Data”

竹内道久 たけうち・みちひさ
Kavli IPMU 博士研究員

標記の国際ワークショップが、2015年9月7日から11日まで Kavli IPMU で開催されました。この研究会は Kavli IPMU、イギリスの Durham 大学、韓国の KIAS の共催で、竹内道久 (Kavli IPMU)、松本重貴 (Kavli IPMU)、野尻美保子 (KEK, Kavli IPMU)、Kai Schmitz (Kavli IPMU)、Pyungwon Ko (KIAS)、Michael Spannowsky (Durham) が組織委員を務めました。

LHC 実験が 8 TeV (Run 1) から 13 TeV (Run 2) にエネルギーを増強して再稼働を開始したのを機に、理論、実験双方から専門家を集め、LHC Run 2 における新粒子、新物理発見について議論する場を設けることを目的として本研究会は行われました。LHC Run 1 においては、di-boson アノマリーをはじめ、標準模型の予言からのずれがいくつか報告されており、Run 2 での更なる検証が待たれています。既に 13 TeV 重心系エネルギーにおける物理解析用データの供給が継続中であり、本研究会直前の 8 月には Run 2 での最新結果がいくつか公表されるなど、とてもタイミングの良い研究会になりました。

研究会は、午前に 2 つ、午後 1 つの招待講演とショートトークセッションを主に構成され、海外から 10 名 +

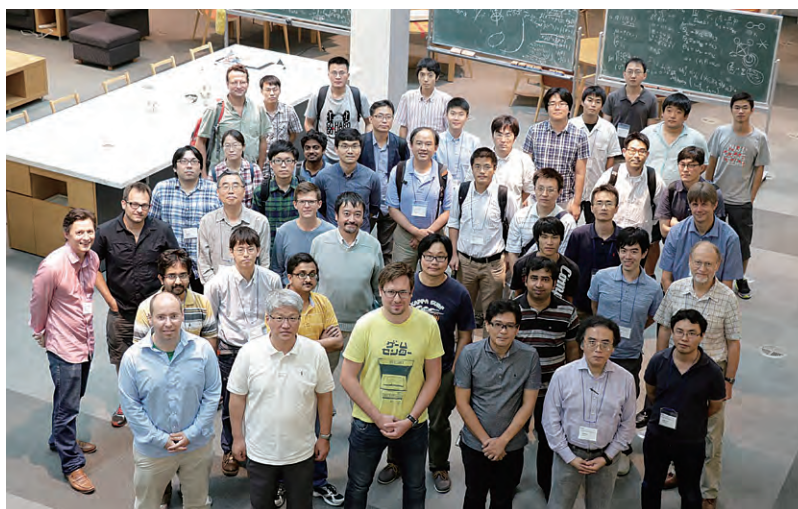
Kavli IPMU から 2 名による招待講演、26 のショートトークが行われました。11 カ国から、計 67 名が参加者し、うち日本からは 33 名の参加者がありました。

招待講演は、初日は野尻氏の Run 2 にむけた overview で始まり、Bryan Webber 氏がイベント生成とジェット構造について 2 つの講演を行い、午後には Yang Bai 氏が LHC における非相対論的粒子生成の講演を行いました。2 日目は、午前中に ATLAS, CMS での 8 TeV での成果、13 TeV での最新結果と展望の報告が Paul de Jong、Teruki Kamon 氏によって、午後には Higgs Portal に関する講演が Valentin V. Khoze 氏によって行われました。3 日目の朝には柳田勉氏が第一、第二世代フェルミオン、スクォークを準南部ゴールドストーンと解釈する理論を紹介し、4 日目は Seung Joon Lee 氏による スピン 1/2 の composite 粒子である トップパートナー、James B. Dent 氏による LHC における暗黒物質探索における有効理論の一般的取り扱い

い、Graham Kribs 氏による複合粒子ダークマターの一つであるステルスダークマターに関する講演が行われました。最終日は Matthew McCullough 氏が naturalness 問題を解決する新しい概念 Relaxion を紹介し、Lian-Tao Wang 氏による LHC における スピン 1 の composite 粒子に関する講演によって本研究会が締めくくられました。

また、毎日の招待講演の後には LHC での新物理探索方法、運動学変数の提案、di-boson アノマリーを説明する模型の提案、レプトンフレーバーの破れ、two-Higgs-doublet 模型、LHC でのダークマター探索等、幅広い話題に関するショートトークが行われました。

閉会の際には、Spannowsky 氏から Durham 大学で次回の会議開催を予定していることが伝えられ、盛会のもと終了しました。コライダー物理学、標準理論を超える物理、ダークマター、ヒッグスなど、幅広い話題が LHC 実験における検証という文脈で議論される素晴らしい機会となりました。



新学術領域研究「なぜ宇宙は加速するのか？」 —徹底的究明と将来への挑戦」発足シンポジウム

高田昌広 たかだ・まさひろ
Kavli IPMU 教授

現在の宇宙が加速膨張していること、そして宇宙初期にもインフレーションという加速膨張の時期があったことが、観測的に確からしいことが分かっています。これは「引力である重力は宇宙の膨張を減速させるはずである」という直感に反し、現代宇宙論の大問題となっております。いったい何が宇宙膨張を「後押し」し加速させるのか？インフレーション、アインシュタインの宇宙定数という「理論」が「説明」に使われているものの、様々な不自然さを抱えており、到底満足できる説明とは言えません。本新学術領域研究では、宇宙膨張の加速の原因を究明、また加速に逆らって銀河・銀河団などの宇宙の構造形成を引き起こすダークマターの引力とのせめぎ合いを理解することを目的とします。この加速宇宙の物理を徹底的に究明するため、インフレーションによる加速 (A01: 京大 佐々木節)、ダークマターによる減速 (A02: 東北大 高橋史宜)、ダークエネルギーによる加速 (A03: 名大 杉山直) という三つの宇宙膨張の時期を、宇宙背景放射 (B01: KEK 羽澄昌史)、銀河イメージング (B02: 国立天文台 宮崎聡)、銀河分光 (B03: IPMU 高田昌広)、宇宙膨張の直接測定 (B04: 国立天文台 臼田知史) の四つの手法でアプローチし、そのデータを究極物理解析 (D01: MPA/IPMU 小松英一郎) で

統一的に読み解き、究極理論 (C01: Caltech/IPMU 大栗博司) に結びつける計画研究を遂行します。H27年度からH31年度までの5年間の研究プログラムです。

研究会では、各計画研究班から、研究の背景、期間内での研究目標、計画について紹介がありました。また、若手研究者を中心とした一般講演もあり、活発な議論が交わされました。特に、如何に各研究テーマを跨がる共同研究、連携を推進し、また若手研究者を取り込んでいき、「加速宇宙」の研究を展開するかについての議論に多く

の時間を費やしました。本新学術領域研究を開始するにあたり、機運が大いに高まり、期待、興奮、また大きな責任を再認識することができた大変良い機会となり、会議は大盛況に終わりました。

最後に研究会の運営にあたり、奥村哲平、矢部清人、森谷友由希、新倉広子、村田龍馬および秋津一之の尽力が必要不可欠でした。また開催にあたり多くのサポートをして下さったカブリIPMUの事務スタッフの皆様、特に市川尚子さんに感謝いたします。



不可視のハ口

野村康生

去る8月17日から9月11日までの4週間、アーティスト・イン・レジデンス・プログラムのビジターとして、研究室の一角でアート作品の滞在制作を行った。いつもこちらに寄稿される記事とは多少毛色が異なるが、一人の芸術家が最先端科学の現場に触れることで得た知見を備忘録的に綴っておきたいと思う。端々に私の思い違いや、科学理論への誤った解釈が含まれているだろうが、その誤読もまたアートの創造においてエッセンスとなり得るため、今回はご容赦願いたい。

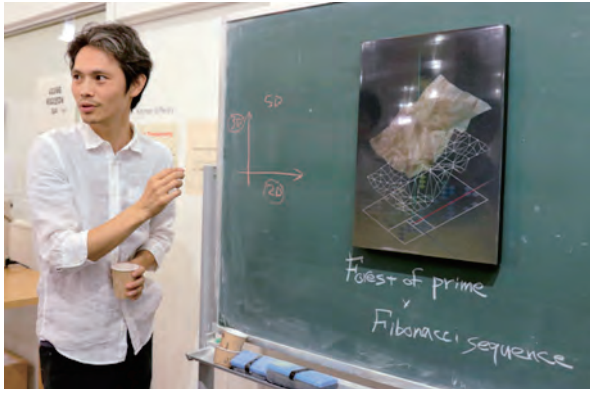
私にとってハ口はとても特別な気象現象である。十数年前の冬の夜だったか、ふと見上げた夜空にぼっかり浮かぶ月の周りを、三重の虹が鮮やかに取り囲んでいる景色を偶然目撃した。その時の得も言われぬ不思議さは、この世界に未知なるものがまだまだ沢山あるのだという好奇心を私に強く抱かせた。その現象にハ口(月暈)という名前があることも数年の後に偶然知った。それ以来、大きな岐路に立たされる度に夜空に顔を出す姿を目にした。いつしかハ口は人生の吉兆を占う大切なものとなった。

今回の滞在も、そんなハ口へ導かれてのことだったのかもしれない。ここで目にしたある研究グループは宇宙空間に広がる未知なるダークマターのハ口を追っていた。それは私の見た虹の現象とは異なるが、現代の人類にはまだ不可視の存在であるダークマターについて、周囲の空間に及ぼす影響を重力レンズ効果などの解析によって解明する試みだという。私たちの暮らす天の川銀河の周囲にも球状にひろがる領域があり、

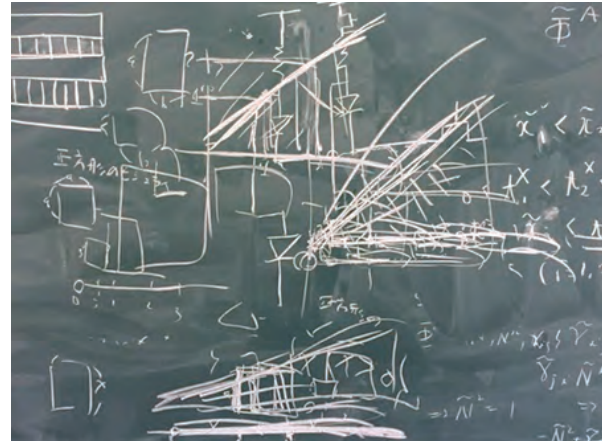


「科学者の頭の中にある風景をアウトプットする」というテーマのもと行ったワークショップ。科学者が日頃慣れ親しんでいる数式に色、形、温度、香り、研究のスタイルや集中できる時間といったキーワードを書き出し、アートのアプローチによってイメージを肉付け視覚化してみる試みを行った。画像は筆者の考える「ゼータ関数」のイメージ図。

含まれる物質のほとんどがダークマターだと考えられている。その領域のことを天文学では銀河系ハ口と呼ぶのだそうだ。私はそこに強いシンクロニシティを感じ取った。私の創作活動においてシンクロニシティや



ウェルカムパーティを開催していただき、自作のプレゼンテーションを行った。集まった科学者のみなさんは素数をモチーフにした作品や模型に関心を寄せて下さった。



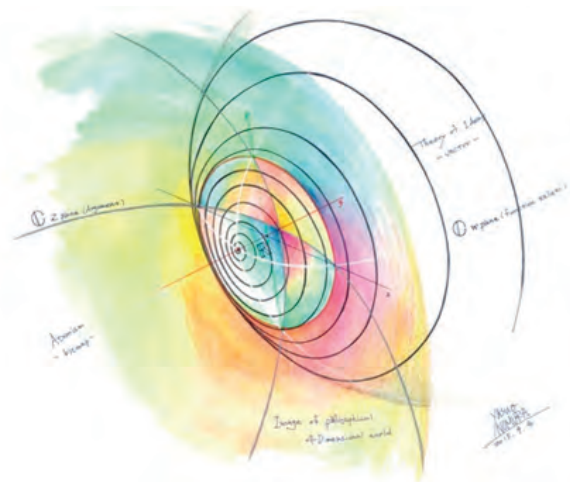
毎日のティータイムでは Kavil IPMU でお馴染みの黒板を使って、科学者とアイデアの意見交換を行った。

閃きは最も重要な創造の源であり、それらと出会う度に次に進むべき道が眼前に開かれる体験を幾度となく繰り返している。未開の領域へ勇気をもって一步を踏み出すとき、自分でも予想さえしなかった直感が働くものだ。Kavil IPMU への滞在は私にとってそうした機会となった。

私の専門は絵画である。今回この最先端科学の最前線に直に触れられるまたとない機会に際し、私はあるテーマを設けて臨んだ。「現代科学が想定する高次元の理論を、二次元の絵画に如何にして落とし込むことが可能か検証し、手法や糸口を見出すこと。」ご存知の通り、絵画は平面の世界である。現代美術においてはもはや古典的で、あらゆる表現がやり尽くされたことにより一方では“死に体”と見なされているメディアである。あくまで私見だが、19世紀20世紀の劇的な科学的飛躍の大きな転換点と考えられる“非ユーク

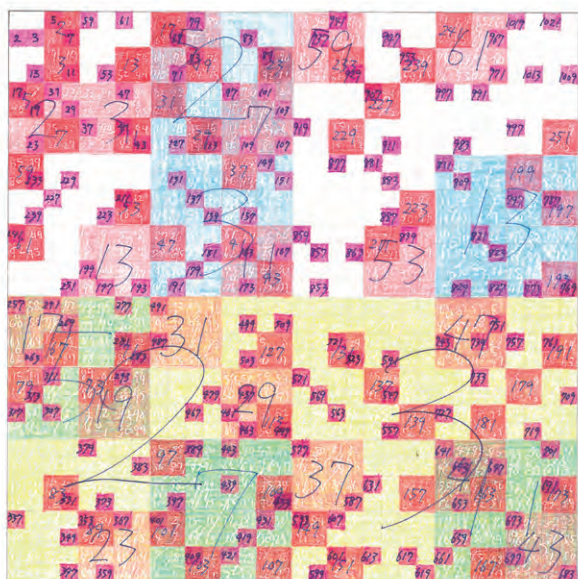
リッド幾何学の発見”はこの絵画の死の遠因であったのではないかと思う。絵画が磨き上げてきた三次元空間を二次元平面に巧みに描き出す技法は、視覚という人間の感覚器官の性質とよくマッチしていた。

だが、目に見える自然よりも、より根源的な性質を探求していく過程において、直接的な感覚を超えて論理的に高次元の存在を導入せざるを得ない様々な知見が科学分野において蓄積された。そうした高度に抽象化していく概念の積み上げに、従来の絵画の担い手たち、つまりは私のような画家たちはある時期から並走することができなかったのではないかと思う。現代美術が資本主義をベースにしたマーケティング術に労を費やしている現状も、人類の知の積み上げからドロップアウトした人々が内輪の論理の中で芸術の延命措置を図っている様に見えてならない。私はそんな風潮にもう一度新たな息吹を吹き込みたい。

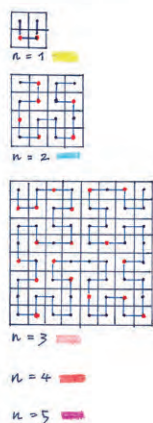


複素数の世界をどう捉えるか、2次元×2次元=4次元から3次元空間が現れる図。数学者からはより論理的なブラッシュアップの要請があり、今後の課題である。

Mission to primes



Order $n = 1 - 5$ Hilbert curves in the unit square and mapping only primes



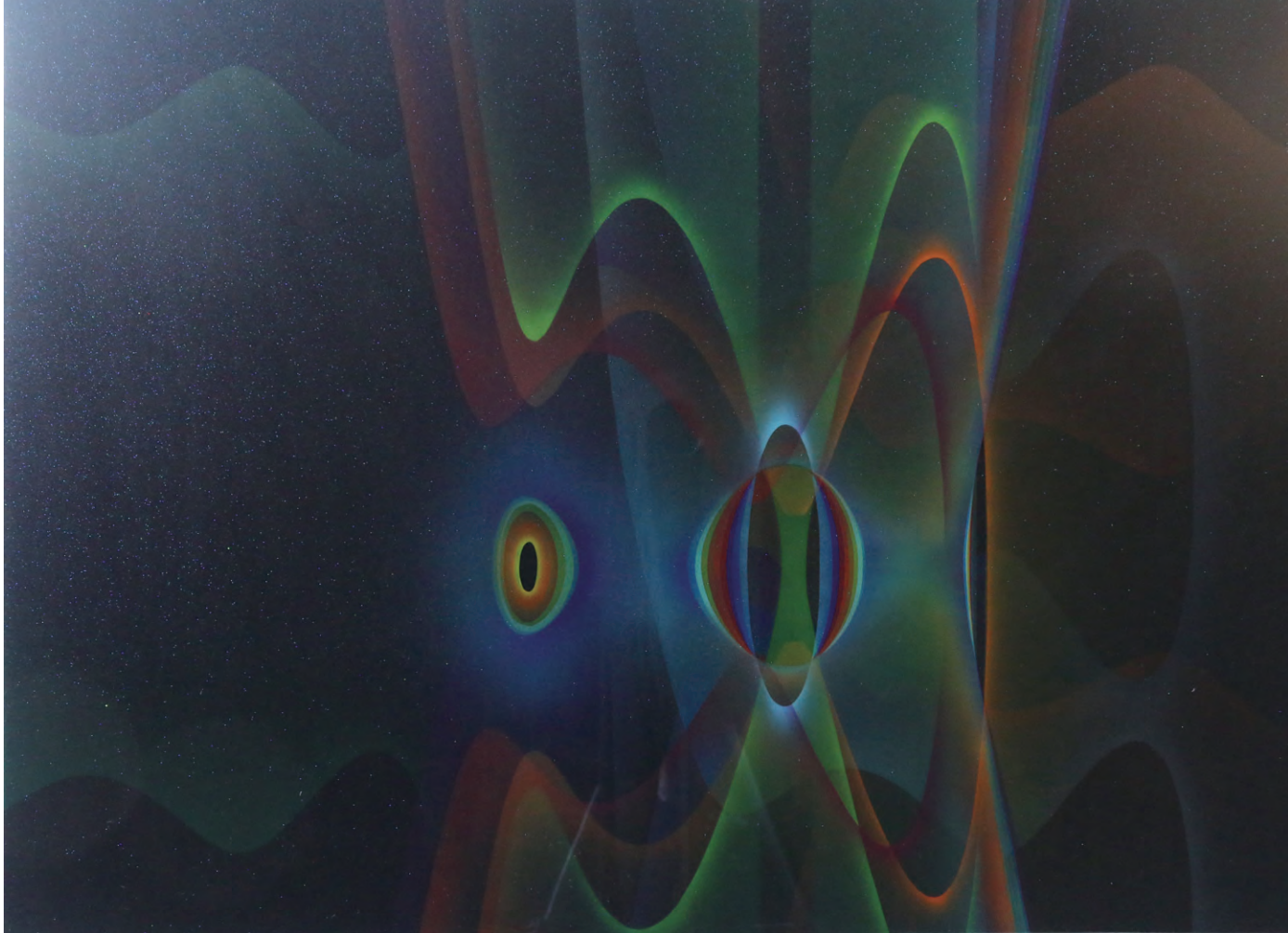
Theoretically, Peano curves can be available for Space-filling about N-dimensional hypercube.
Let's launch the probe rocket of the Space-filling curve!!
Yasuo NAKAJIMA
2015.8.27

素数分布の謎解明に向けて、高次元空間を空間充填可能なベアノ曲線の軌道で進むロケットを打ち上げ、その軌跡から素数の位置をプロットして未知なる高次元方向への規則性を発見しようというプロジェクト構想図。

当然ながら、対象となる現代科学の最先端理論は高度に抽象化されており、軒並み不可視な存在である。はじめは空気、磁力や引力なども感覚的な人間の眼には不可視であった。量子力学が作用する素粒子の世界、はたまたそれら全てを統合する超ひも理論の世界、カミオカンデを通過するニュートリノ、宇宙の大部分を占めるダークマターなど、科学が積み上げてきた知はそれら不可視の存在をいかにして可視化するか（「見える」とは「分かる、性質を理解する」ということだ）というアプローチ、概念を獲得する営みだと考

える。非ユークリッド幾何学の発見以降、数式による抽象化は“次元”についての概念も私たちの知覚を超えたところに考えを巡らせることができることを指し示した。

このプロセスを学び取り、現代人類の知見をもってして今一度絵画の絵画性について思考を巡らせた。自然の“美”をその根源的な法則から捉えたいと考えるのであれば、現代の科学が提示する高次元の物理法則を、その概念について我々画家も獲得した上で、不可視なものを可視化させねばならない。



Invisible Halo #h / 2015 / 728x515mm / acrylic, silicone and glitter on panel

「宇宙は数学の言語で記述されている」というガリレオの有名な一節も「唯一、数学の記述法のみが不可視な存在を可視化することを可能にする」と読み替えることができる様に思う。私は今回、多くの研究者がそれら高次元の理論をどういうイメージによって捉えているのか是非でも聞き出したいと考えていたが、実際多くの研究者が不可視の対象物を数学的言語によって把握、実感し、互いのコミュニケーションの道具として使用していた。彼らにとっても日常的に扱っているはずの高次元は不可視な存在には変わらないのだ。ただ彼らは視覚に依らない“見る”ための道具をもっているということである。これは本当に驚くべきことだと思う。人類が到達した概念の積み上げの最も創造的で美しい瞬間ではないだろうか。「不可視のハロ」を如

何にして捕まえるか。未来永劫人類は自然に宿る本質的な“美”を直接目で見ることはできないかもしれないが、知覚できる周辺にそれが及ぼす影響を捉えることはできる可能性がある。そのためにはまず我々芸術家にも数学の言語を獲得するための修練が必要なのだと確信した。それに尽きるのである。

この度こうした実験的プログラムへの寛大な理解を示してくださった村山機構長をはじめ、春山事務部門長、毎日私の妄想に気さくに応じてくださった研究者の皆様、事務スタッフの皆様、そして何よりもこの企画を構想、実現に向けて尽力してくださった広報部の坪井あやさんに深く感謝を申し上げたい。ここからより発展的なアートとサイエンスの交流が進んでいく事を切に願う。

Special
Contribution

浦島効果異説

アレクサンダー A. ヴォロノフ

ミネソタ大学数学科教授、Kavli IPMU客員上級科学的研究員

人が光速に近いスピードで移動すると時間の進み方が遅くなり、従って年を取る速度も遅くなることは誰でも知っています。移動速度が光速に非常に近づくと、時間の進み方はさらに劇的に遅くなり、ほとんど止まってしまいます。

年若い漁師、浦島太郎が海底の竜宮城を訪れた物語は、鎌倉・室町時代という中世の日本に異星人がやってきた証拠なのです。異星人は前期鎌倉時代に地球に着陸し、太郎を宇宙船に乗せました。当時、このような宇宙船は空飛ぶ円盤のように見え、ウミガメの形

そして太郎は亀の背中に乗って遠い竜宮城へ向かった。



魚を釣り上げて浦島効果実験の第一階を実行している筆者

に似ていました。異星人は太郎を乗せたまま、想像を絶する速度で天の川を巡り、哀れな太郎を使って意地悪な実験を行いました。彼らは、なぜ太郎が人間の子ども達のように宇宙船の外殻を棒でたく代わりに、別の途を考えて、金額は幾らか分からないがULO(未確認静止物体)*を買い取る案に行き着いたのか、今日のフロイト学派の心理学者なら誰にでも明らかなことですが、その理由を知りたいと思ったのです。

2時間後に太郎を地球に連れ戻す前に、異星人は太郎の記憶を消去し、財宝に囲まれ、若く美しい女性にかしずかれ、飲めや歌えと面白おかしく過ごしたイメージで一杯にしたのです。太郎が地球に戻った時は、300年後で既に室町幕府が国を治めていました。太郎がひどく驚いたことに、自分の家も母親もとうの昔に消え去っていました。勿論、太郎はまだ若者のままで、恐らく2時間しか年を取っていませんでした。しかし、当時の日本では相対論は広く受け入れられてはいませんでしたので、同時代の物語作家は太郎が年を取っていないことを認めるわけにはいきませんでした。彼らは人々と將軍家の信頼を失う危機に瀕していました。

太郎が乙姫からもらった美しい漆塗りの箱を持ち帰ったという馬鹿げた話を彼らが思いついたのは、これが理由です。東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構では、何人かの科学者が、太郎の持ち帰った箱は本物で、ダークエネルギーを地球のまわりにまき散らそうという異星人の邪悪な計画を実現した、という説を未だに唱えています。

今日では、相対性理論における時間の遅れは、時に浦島効果と呼ばれています。

*ULO (unidentified lying object) は、未確認飛行物体UFO (unidentified flying object) をもじって、着陸して止まっているUFOのことを指す。



箱を開けた太郎は得体の知れないチカラを感じたが、中には何も見当たらなかった。



2012年1月：日本語クラス** 修了報告会で当時在職していた研究者らによる浦島太郎物語劇。(左から) 村の子供役のJyotirmoy Bhattacharya、太郎の父役のMikhail Verbitsky、乙姫役のMarcus Werner、浦島太郎役のJohn Kehayias、亀役のValentin Tonita。

**Kavli IPMUに滞在するビジターは、西川正美日本語インストラクターによる授業を受け、日本語や日本の文化について学ぶ機会があります。

Tea Break

梶田隆章主任研究員、2015年ノーベル物理学賞受賞

2015年10月6日にスウェーデン王立科学アカデミーから、今年のノーベル物理学賞を「ニュートリノが質量をもつことを示すニュートリノ振動の発見」により東京大学宇宙線研究所所長でKavli IPMU主任研究員を兼務する梶田隆章教授とクイーンズ大学(カナダ)のA. マクドナルド教授に授与すると発表されました。梶田教授は、岐阜県神岡の鉱山の地下に設置されたカミオカンデおよび後継のスーパーカミオカンデ検出器により大気ニュートリノ振動現象を捉え、ニュートリノが質量をもつ決定的な証拠を示したことが評価されました。

第8回 Kavli IPMU外部諮問委員会開催

2015年7月24日にKavli IPMUの第8回外部諮問委員会が開催され、Steve Kahn (Stanford/SLAC) 委員長およびJohn Ellis (King's College London)、Young-Kee Kim (University of Chicago)、小島定吉(東京工大)、David Morrison (UC Santa Barbara)、岡村定矩(法政大学)の各委員が出席しました。Nigel Smith委員(SNOLAB)は欠席でした。今回はWPI支援延長が決定したことの意義、延長期間において提示した挑戦的課題を実現して行くことの重要性、今後の東京大学の支援、および日本にとってWPIプログラムを推進することの重要性と方向性などについて様々な有益な意見をいただきました。



村山機構長の概要説明。

Hyper Suprime-Cam が描き出した最初のダークマター地図

ハワイのすばる望遠鏡に搭載された超広視野主焦点カメラHyper Suprime-Cam (ハイパー・シュプリーム・カム、HSC) で研究を行う国立天文台、Kavli IPMU、プリンストン大学などの研究グループが、HSCの最初の科学的成果を発表しました。2.3平方度にわたる天域におけるダークマターの分布を明らかにすることで、銀河団規模のダークマターの集中がこの天域に9つ存在することを突き止めた本研究成果は、アメリカ天文学会の発行する天体物理学専門誌アストロフィジカル・ジャーナル (Astrophysical Journal) の2015年7月1日号に掲載されました。

「サイエンスカフェ宇宙2015」第2回および第3回

7月5日、多摩六都科学館とKavli IPMU共催の「サイエンスカフェ宇宙2015」シリーズ2回目となる「天の川探索: 現代宇宙論と宇宙考古学の交差点」がKavli IPMUの吉田直紀教授を講師として多摩六都科学館のプラネタリウムで開催され、中高生を含む約50名が参加しました。吉田教授はプラネタリウム全天へ映像を映し出しながら、七夕伝説の話からはじまり、天の川銀河や宇宙の大規模構造まで、講演を行いました。

今年最後となる7月12日には、Kavli IPMUの阿部知行助教を講師として、「微分から見た幾何学～やわらかい図形・かたい図形」が開催され、中高生が4割を占める約40名が参加しました。講演は、途中で模型を会場に回したり、参加者が皆で計算をするなど、

「多様体」をテーマに、数学とは、図形とは何か、という本質に迫る話を面白く噛み砕いたもので、最後は幾何学と一般相対性理論との結びつきを紹介して締めくくられました。



プラネタリウムの外で質問に答える吉田直紀さん。



阿部知行さんの講義風景。

SSH全国大会でブース展示

2015年8月5日と6日の2日間、Kavli IPMUは世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)の他8拠点と共に、インテックス大阪(大阪市)で開催された「平成27年度スーパーサイエンスハイスクール生徒研究発表会(通称:SSH全国大会)」においてブース展示を実施しました。SSH全国大会は、主にSSHに指定された高校が集まり日頃の研究活動を発表する機会と、約300の出展がありました。

WPIブースにも高校生が訪れ、「宇宙に興味があるが、どのような研究が行われているのか」、「大学で何を勉強すれば、将来Kavli IPMUで研究できるか」など熱心な質問が相次ぎました。

女子中高生理系進路選択支援イベント「宇宙ヲ覗クト?」開催

2015年8月22日、東京大学宇宙線研究所(ICRR)とKavli IPMUの共催による女子中高生を対象とした理系進路

選択支援イベント「宇宙ヲ覗クト?」が開催され、38名の女子中高生が参加しました。参加者は、ICRRの大石理子助教による「宇宙線が生まれた場所を探して」とKavli IPMUの森谷友由希研究員による「ブラックホール? それともパルサー? ~ガンマ線連星の正体に迫る」の2つの講義を聴講した後、パラボラ鏡を使って大気チェレンコフ望遠鏡アレイのミニチュア版を製作し、レーザー光源を使って班別に観測精度を競う実験を行いました。参加者からは「講義や懇談会、ティーチングアシスタントとお話はとてもためになった」、「とても楽しかった」と好評でした。

また、今回は参加者の保護者と講師との懇談会も並行して行い、森谷研究員とKavli IPMUの森井友子学術支援専門職員が、自身の理系選択の経験を語りました。参加した22名の保護者からは「研究者お二人の生き活きとした話が心に響いた」、「研究職に就いている女性の話を聞いて具体的にイメージ出来るようになった」と大いに参考になったようで、終了後も質問が続きました。



Kavli IPMUの藤原交流広場で懇談。

現代美術作家 Kavli IPMU で滞在制作

2015年8月17日から9月11日まで、現代美術作家(画家)の野村康生さんがKavli IPMUで滞在制作(Artist In Residence)を行いました。野村さんは連日ティータイムやセミナーに参加して研究者と議論をする他、20名弱が参加したワインとチーズのウェルカム・パーティで、今取り組んでいる、ウラムの素数螺旋をモチーフに高次元

を2次元で表現するという課題について、プレゼンテーションを行いました。また、居室での制作風景紹介には10数名、研究者を対象としたアートの演習には5名が参加し、次回は数日単位のプログラムを望むとの声もありました。野村さんは「毎日課題が見つかる。刺激に富み、制作に理想的な環境」と述べ、多くの研究者が「アートは創造的に頭を使う助けになることがある」と述べています。Kavli IPMUで芽生えたアートとサイエンスの融合の試みが、今後どのように成長するか楽しみです。なお、本誌44ページ - 47ページに野村さんの特別寄稿が掲載されていますので、併せてご覧ください。

人事異動

再任

2011年9月1日から2012年8月31日および2013年9月1日から2014年8月31日の期間博士研究員としてKavli IPMUに在籍した中山優さんがカリフォルニア工科大学にShirman Fairchild Research Assistant Professorとして滞在后、2015年9月1日付でKavli IPMU博士研究員として採用されました。

2013年4月1日から2015年8月31日まで東京大学特別研究員(日本学術振興会特別研究員)としてKavli IPMUに在籍した石垣(新田)美歩さんが、2015年9月1日付でKavli IPMU博士研究員として採用されました。

2011年9月1日から2015年7月31日までKavli IPMU学術支援専門職員として在籍した下農淳司さんが2015年8月1日付でKavli IPMU博士研究員として採用されました。

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。]

Claire Lacknerさん [2012年9月1日 - 2015年5月31日]、Kavli IPMU 博士研究員から米国Element Analytics社のData Scientistへ。

Jonathan David Maltzさん [2013年

9月16日 - 2015年9月17日]、Kavli IPMU 博士研究員からカリフォルニア大学バークレー校博士研究員へ。

Charles Milton Melby-Thompsonさん [2012年9月1日 - 2015年9月20日]、Kavli IPMU 博士研究員から復旦大学博士研究員へ。

Rene Meyerさん [2012年9月8日 - 2015年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員からStony Brook大学Postdoctoral Associateへ。

Satyanarayan Mukhopadhyayさん [2012年10月1日 - 2015年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員からUniversity of Pittsburgh、Department of Physics and Astronomy 博士研究員へ。

Mauricio Andres Romo Jorqueraさん [2012年7月16日 - 2015年9月15日]、Kavli IPMU 博士研究員からプリンストン高等研究所博士研究員へ。

Charles Martin Siegelさん [2012年8月16日 - 2015年8月15日]、Kavli IPMU 博士研究員からPacific Northwest National Laboratory 博士研究員へ。

David McGadyさん [2015年5月1日 - 2015年8月31日]、日本学術振興会特別研究員/JSPS欧米短期の任期終了に伴い、プリンストン大学に復帰。

宮武広直さん [2014年4月1日 - 2015年8月31日]、東京大学特別研究員(日本学術振興会特別研究員)からカリフォルニア工科大学/NASAジェット推進研究所博士研究員へ。

永田夏海さん [2014年4月1日 - 2015年8月31日]、東京大学特別研究員(日本学術振興会特別研究員)からミネソタ大学Keith A. Olive 博士研究員へ。



エンタングルメント・エントロピー

高柳 匡 京都大学基礎物理学研究所教授、Kavli IPMU客員上級科学研究员

ミクロな物理法則を記述する量子力学では粒子を波と解釈するので物理的状態の重ね合わせを考えることができます。例えば2つの電子のスピンからなる系を考えます。まず、片方 (A) のスピンの向きが上向きで、もう片方 (B) が下向きである状態を考えることができます (下図の $|\Psi_1\rangle$)。このように直積で書かれている状態は、古典的状态です。一方、その状態とスピンの向きが逆の状態を均等に重ね合わせた状態 (下図の $|\Psi_2\rangle$) は量子的状态 (EPRペアと呼ぶ) で、このように直積で書けない状態ではAのスピンとBのスピンに相関があり、量子エンタングルメントを有すると言います。全体の状態は一意に決まっていますが、一部を抜き出すと実現される状態に不確定性があります。量子エンタングルメントの強さを測る量がエンタングルメント・エントロピー S_A で、下のようにAに制限された密度行列に対するフォン・ノイマン・エントロピーと定義されます。AB間から何個分のEPRペアが取り出せるか見積もる量です。

$$S_A = -\text{Tr} [\rho_A \log \rho_A]$$

(i) $|\Psi_1\rangle = |\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B \sim \left[\begin{array}{c} \uparrow \\ \textcircled{A} \end{array} \begin{array}{c} \downarrow \\ \textcircled{B} \end{array} \right]$
 $S_A = 0$

(ii) $|\Psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B + |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B)$
 $S_A = \log 2 \sim \left[\begin{array}{c} \uparrow \\ \textcircled{A} \end{array} \begin{array}{c} \downarrow \\ \textcircled{B} \end{array} \text{ or } \begin{array}{c} \downarrow \\ \textcircled{A} \end{array} \begin{array}{c} \uparrow \\ \textcircled{B} \end{array} \right]$