

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

Dark Matter Study as a Bridgehead for New Physics Exploration

Round Table Dialogue Between a Philosopher and Physicists



45

No.

March 2019

Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Announcement**
3 **Message from Readers**
- 4 **Feature**
Dark Matter Study as a Bridgehead for New Physics Exploration
Shigeki Matsumoto
- 9 **Tea Break**
What IPMU Stands For?
Alexander A. Voronov
- 10 **Our Team**
Robin Kooistra
Chiara La Licata
Hyunbae Park
Samantha Stever
- 12 **Round Table Talk**
Dialogue Between a Philosopher and Physicists
Markus Gabriel
Hitoshi Murayama
Yasunori Nomura
- 27 **Workshop Report**
Extremely Big Eyes on the Early Universe at Kavli IPMU
Alvio Renzini
John Silverman
- 28 **Workshop Report**
Representation Theory, Gauge Theory and Integrable Systems
Hiraku Nakajima
- 30 **Workshop Report**
Interdisciplinary Approach to Cancer Therapy
Pietro Caradonna
Shin'ichiro Takeda
- 32 **News**
- 35 **Editor's Note**
- 36 **Black Hole Shadow** Shiro Ikeda

Japanese

- 37 **Announcement**
37 **Message from Readers**
- 38 **Feature**
新物理探査の橋頭保としての暗黒物質研究
松本 重貴
- 43 **Tea Break**
IPMUとは何の略語?
アレクサンダー A. ボロノフ
- 44 **Our Team**
ロビン・コーイストラ
キャラ・ラ リカタ
朴 賢培
サマンサ・スティーヴァー
- 46 **Round Table Talk**
哲学者と物理学者の対話
マルクス・ガブリエル
村山 斉
野村 泰紀
- 61 **Workshop Report**
初期宇宙観測のための超大型望遠鏡国際会議
@Kavli IPMU
アルヴィオ・レンツィーニ
ジョン・シルバーマン
- 62 **Workshop Report**
表現論、ゲージ理論と可積分系
中島 啓
- 64 **Workshop Report**
Interdisciplinary Approach to Cancer Therapy
ピエトロ・カラドンナ
武田 伸一郎
- 66 **News**
- 67 **編集後記**
- 68 **ブラックホールシャドウ** 池田 思朗



Shigeki Matsumoto is a Principal Investigator at the Kavli IPMU. He is a theoretical physicist working on particle physics and particle cosmology. After having received his Ph.D. from Tohoku University in 2000, he held postdoctoral positions at the Japan Society for the Promotion of Science, the Institute for Cosmic Ray Research of the University of Tokyo, and the High Energy Accelerator Research Organization (KEK). He became an Assistant Professor at Tohoku University in 2007, an Associate Professor at Toyama University in 2008, and a Kavli IPMU Associate Professor in 2010. Since 2017, he has been a Kavli IPMU Principal Investigator. He received 2007 Particle Physics Medal: Young Scientist Award in Theoretical Particle Physics.

松本重貴: Kavli IPMU主任研究員。専門は素粒子物理学理論、素粒子論的宇宙論。2000年に東北大学から博士の学位を取得。日本学術振興会特別研究員、東京大学宇宙線研究所研究員、高エネルギー加速器研究機構研究員を経て、2007年に東北大学助教。2008年に富山大学准教授。2010年Kavli IPMU准教授、2017年より主任研究員を務める。2007年度素粒子メダル奨励賞受賞。

Announcement

The March 2019 issue (No. 45) is our last for Kavli IPMU News. We have come a long way with IPMU / Kavli IPMU since our first issue in March 2008. During this period, IPMU / Kavli IPMU has achieved remarkable progress. We want to thank all of our readers and all who have supported us over the years. Editor

Message from Readers

Thank you to the Kavli IPMU for the opportunity to interview your researchers. The Asahi Shimbun was lucky to snatch the chance to work with founding director Hitoshi Murayama shortly after he was relieved of his responsibilities, and look forward to working with him in our new weekly education column.

**Science and Medical Section,
Asahi Shimbun
Ryutaro Ito**

The cover of every issue of the Kavli IPMU News carried the big face of one of their researchers, reminiscent of the Time magazine's cover announcing 'Person of the Year'. Many people must have felt his/her eyes looking at them from the bookshelf of the library of their institutions. They could not help taking it in hand. The Kavli IPMU News was in a perfect bilingual format. Its content included the new results of forefront researches, interviews with distinguished scientists, news, announcements of various events, etc. In particular, pictures of the researchers newly joined the Institute appeared on every issue with brief introduction of their researches to demonstrate the growth of the Institute to both inside and outside.

I talked in Vol. 14 about how the Institute was born and heard from Robert Williams in Vol. 35 the story behind the scene about the accelerating universe and the Hubble Space Telescope. I miss the Kavli IPMU News, which remained the flagship public booklet of the Institute even in the era when the main stream of publicity is websites and SNSs. I would like to express my respect to the chief editor Dr. Kenzo Nakamura and those who were engaged in the Kavli IPMU News, which was always with the Kavli IPMU, an Institute built from scratch 10 years ago.

**Professor Emeritus,
The University of Tokyo
Sadanori Okamura**

The (Kavli) IPMU News is a record of the institute's growth, full of memorable events and significant research achievements. It has played an important role in visualizing the rapid development of IPMU, from zero to a highly visible international research center.

When I worked at the IPMU's administrative office, we were asked to create a system specific to a WPI center. Our role was to make the center a paradise for researchers. The office staff were given opportunities to venture into uncharted territory

in the Japanese national university system at that time. Sometimes, office staff appeared in the magazine, making it possible for readers to capture a glimpse into the unique and challenging administrative office.

I was sad to hear the IPMU News will finish as a publication, but I believe it will remain as a precious reference allowing people to see the glorious achievements of Kavli IPMU 50 or 100 years from now. Currently, I am working at the University of Tokyo's second WPI center, the International Research Center for Neurointelligence (IRCIN). There, I will inherit IPMU's challenging spirit and make my mark in a different way from the IPMU News.

**Deputy General Manager,
IRCIN, The University of Tokyo
Midori Ozawa**

I did not notice the announcement that Issue no. 45 would be the last one. This is sad news ... I liked the magazine very much.

Here is what I have thought of for the "Tea Break" section.*

**Professor, University of Minnesota
Alexander A. Voronov**

* See page 9.

Message

Dark Matter Study as a Bridgehead for New Physics Exploration

Where Can We Find New Physics ?

In past decades, people tried to develop the field of particle physics based on the so-called electroweak naturalness, namely how the electroweak scale (the energy scale creating the electromagnetic and weak forces from more fundamental ones; about the masses of the weak bosons, W and Z, which mediate the weak interaction, 10^{11} eV = 100 GeV) should be naturally explained. In fact, many new physics scenarios such as supersymmetry, extra-dimension and composite Higgs have been proposed in this context, and have been and are still being tested by various experiments and observations including the large hadron collider (LHC). However, people have recently started doubting this guiding principle, the electroweak naturalness, because new physics signals predicted by those scenarios have not been detected there at all. To be more precise, the doubt is that, although the electroweak scale should be naturally explained, it may be achieved by some

other mechanisms (or ideas) which are totally different from what we have thought about thus far. People have very recently started seeking new mechanisms based on this consideration, but no one has yet succeeded in proposing a critical mechanism that many people agree with.

Uncovering the Nature of Dark Matter Attracts Attention

Under these circumstances, people start taking a new strategy: developing particle physics by resolving the cosmic dark matter problem. Dark matter was proposed by Fritz Zwicky in 1934 in order to explain the motion of galaxies inside the Coma Cluster, and its existence was established at the beginning of this century thanks to cosmological observations such as the fluctuation of the cosmic microwave background. Its detailed nature, however, is unknown. Moreover, it is known that no dark matter candidate exists in the standard model. As a result, once the nature of dark matter is clarified, it can be used as a bridgehead to launch out into

an exploration of new physics. In other words, the strategy is that we first determine the nature of dark matter and then explore new physics beyond the standard model.

Next, let me summarize what we know about dark matter. First, dark matter is electrically neutral. In fact, dark matter can have a very tiny electric charge, or $O(1)$ charge if it is vastly heavy; however we do not consider such special cases in this article. Next, dark matter has, at least, a non-zero mass and moves non-relativistically in the present universe; namely its speed is much slower than that of light in the present universe. Third, its lifetime should be much longer than the age of the universe (13 billion years). Moreover, dark matter hardly interacts with ordinary matter like nuclei. Finally, as quantitative knowledge, it is known that the averaged mass density of dark matter in the universe, which is sometimes called dark matter abundance, is about $2 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$.

In spite of this knowledge, it is still difficult to say that we have enough information about dark matter. For instance, even if we assume that dark matter is an elementary particle, its mass is merely predicted to be in a range between 10^{-55} g and 10^{-5} g ; namely there is uncertainty of fifty orders of magnitude. Since such huge uncertainty makes it impossible to perform a comprehensive search of dark matter experimentally, we are currently trying to detect dark matter based on several influential hypotheses such as the thermal dark matter, axion, sterile neutrino, and primordial black hole hypotheses. Among these, the search for dark matter based on the thermal dark matter hypothesis

is more developed than the others. I would therefore like to focus on this hypothesis and describe its present status and prospects in this article.

Thermal Dark Matter Hypothesis

The thermal dark matter hypothesis is as follows: dark matter is an (undiscovered) elementary particle and its abundance observed today was produced by the so-called freeze-out mechanism. In the freeze-out mechanism, dark matter is assumed to be in chemical and kinematical equilibrium with the thermal bath composed of standard model particles during a very early epoch of the universe. However, it eventually decoupled from the bath because the reaction rate which was maintaining the equilibrium becomes smaller than the expansion rate of the universe. After the decoupling, the amount of dark matter in the universe becomes constant, determining dark matter abundance today. Fig. 1 shows typical behavior of the amount as a function of m/T , with m and T being dark matter mass and the temperature of the universe, respectively. Dark matter abundance is seen to coincide with that of equilibrium when $m/T \sim O(1)$, while it deviates from the equilibrium at $m/T \sim O(10)$ and eventually becomes constant. This mechanism is also applied to other phenomena of cosmology (big-bang nucleosynthesis and recombination) and explains observational results successfully. Because of this fact, the thermal dark matter hypothesis is regarded as one of the natural hypotheses about dark matter. When dark matter mass is around the electroweak scale, the thermal dark matter is called

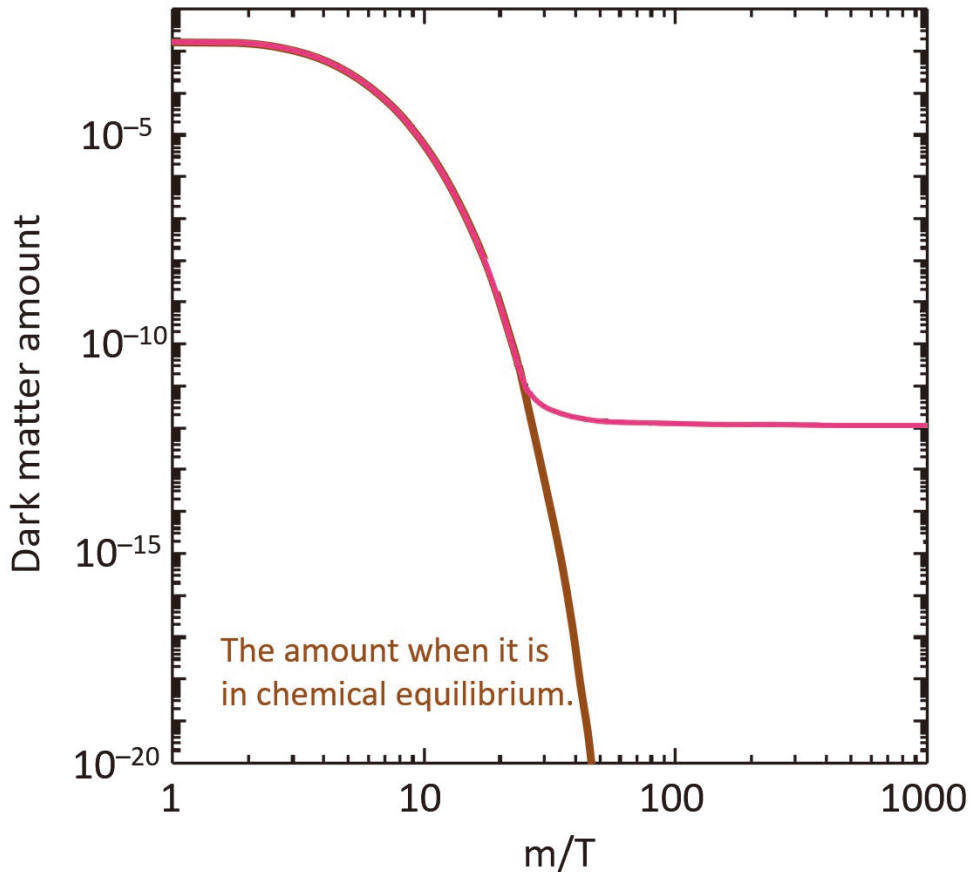


Figure 1. Typical behavior of the dark matter amount (the ratio of the number density of dark matter to the number density of radiation). Here, m is the mass of the dark-matter particle and T is the temperature of the universe, both expressed in units of energy.

WIMP (Weakly Interacting Massive Particle), and it is intensively discussed in various new physics scenarios beyond the standard model.

Since thermal dark matter is assumed to be in equilibrium in the early universe, it inevitably interacts with standard model particles. The detection of the thermal dark matter relies on this fact, and the important question here is which standard model particle the dark matter interacts with. The strategy of dark matter detection depends strongly on the answer to this question. Hence, the thermal dark matter is classified based on its quantum numbers in order to search for it systematically and comprehensively. The quantum

number is nothing but a charge associated with a force, for instance, the electric charge of the electromagnetic force. Dark matter is electrically neutral as mentioned above, and it should not carry a charge of the strong interaction, a color charge; otherwise it would already have been discovered by various experiments. As a result, the quantum numbers we should focus on are those of the weak and gravitational forces. The quantum number of the weak force is called a weak charge, while one of those of the gravitational force is a spin. Another quantum number of the gravitational force is nothing but mass, and it is determined by requiring that the abundance of dark matter,

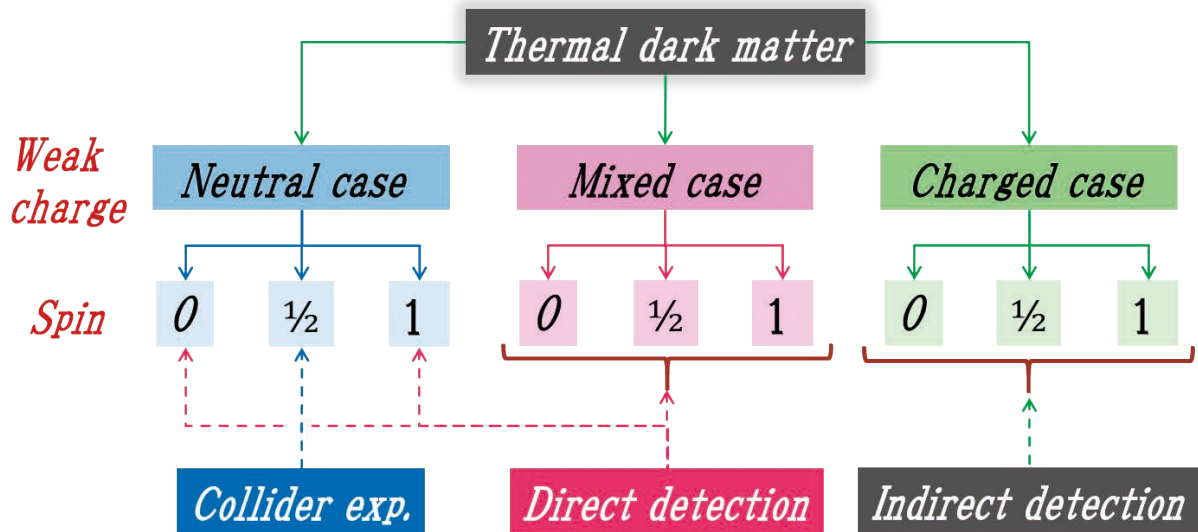


Figure 2. Classification of the thermal dark matter and the most efficient detection method for each case.

which is computed after fixing its weak charge and spin, coincides with the result of cosmological observation. In other words, the mass becomes a derived quantum number.

Classification of Thermal Dark Matter

This classification is summarized in Fig. 2. First, thermal dark matter has a weak charge in the unit of $1/2$, namely, $0, 1/2, 1, \dots$. There is, however, an exception: dark matter may be described by the mixing (linear combination) of states which have different weak charges. Within the familiar electromagnetic dynamics, it corresponds to the case that we consider the particle whose electric charge is given by the mixing of, e.g., 0 and 1 . Of course, such a mixing occurs only for the weak force because of the electroweak symmetry breaking, and never occurs for other forces. As a result, dark matter can be classified into three categories: it has no weak charge (neutral under the weak force), has a non-zero weak charge, or has mixed weak

charges. Next, if we restrict ourselves considering a renormalizable theory to guarantee enough magnitude of interactions between dark matter and standard model particles, the spin of dark matter is restricted to be either $0, 1/2$, or 1 . Thanks to the nature of the relativistic quantum field theory, once the weak charge and the spin of dark matter are fixed, all interactions between dark matter and standard model particles are uniquely determined, which allows us to discuss physics of the thermal dark matter quantitatively.

How to Find Thermal Dark Matter Based on Its Classification

The above classification of thermal dark matter has indeed been proposed by us (researchers studying particle phenomenology at the Kavli IPMU), and we are now comprehensively studying how dark matter in all the categories can be detected in the near future based on various collaborations with experimental and observational researchers. Some results of our study concerning the type of

experiment, seeming to be the most efficient for detection in each category, are also shown in Fig. 2.

First, in the case where dark matter has mixed weak charges, the scattering cross section between dark matter and a nucleus is always predicted to be large, for its origin is the same as those of the mixing. As a result, direct dark matter detection in underground laboratories is very efficient for detecting such dark matter, and indeed many experiments are now being conducted around the world. Moreover, various future projects such as the XENONnT,^{*1} where it was decided that the XMASS group (in which some of our colleagues in our institute are involved) would join, have been proposed and approved. When dark matter is actually in this category, it will be detected in the near future.

Next, when dark matter has a non-zero weak charge, its mass is generally predicted to be in the TeV scale, which makes difficult to detect it in the near future at collider experiments. On the other hand, we pointed out that its annihilation cross section is significantly enhanced thanks to the Sommerfeld effect,^{*2} which makes indirect dark matter detection very efficient. In particular, the observation of gamma-rays from Milky Way satellites^{*3} by the CTA collaboration^{*4} is expected to play an important role; however, in order to maximize its sensitivity, we also need to know precisely how dark matter is distributed in each satellite. Fortunately, this problem will be overcome by the PFS project at the Subaru telescope organized mainly by Kavli IPMU. Moreover, when third generation direct dark matter detection experiments such as the DARWIN project,^{*5} the successor of XENONnT, become available, it will be possible to detect the TeV-scale dark matter. Here, it is important to address the fact that such TeV-scale dark matter is predicted by the so-called anomaly mediated SUSY breaking scenario^{*6} (Pure Gravity Mediation model, etc.), the one attracting

the most attention after the discovery of the Higgs boson, and thus detecting the TeV scale dark matter is now regarded as an urgent issue of particle physics. In addition, some new physics models predict dark matter having a non-zero weak charge is produced not only by the freeze-out mechanism but also by some other non-thermal ones. In such cases, the mass region around the electroweak scale also becomes important to search for. The future LHC (HL-LHC) and lepton collider such as the international linear collider (ILC) experiments will play an important role in searching for such electroweak dark matter.

Finally, we consider the case in which the thermal dark matter is neutral under the weak force. When the spin of dark matter is 0 or 1, its scattering cross section off a nucleus is predicted to be large in general. Hence, the direct dark matter detection is again efficient, as in the case of dark matter having mixed weak charges. On the other hand, when the spin is 1/2, the scattering cross section does not necessarily become large. In particular, when dark matter interacts mainly with leptons (leptophilic dark matter), mainly with the Higgs boson by the pseudo-scalar coupling (CP violating Higgs portal dark matter) or is lighter than the proton (light

*1 XENONnT is a direct dark-matter search experiment to be conducted at the Gran Sasso underground laboratory LNGS in Italy, using 8 tons of liquid xenon. The experiment aims at detecting dark matter particles through measurement of nuclear recoil events due to scattering of dark-matter particles with xenon nuclei.

*2 The Sommerfeld effect is the effect in which a long-range force between the initial-state particles significantly changes the inelastic-scattering cross section between them compared to that without a long-range force. It is known that if the dark matter particle is sufficiently heavier than the particles that mediate the weak force (W and Z bosons), it will act as a long-range force for dark-matter particles and significantly enhances their annihilation cross section.

*3 Among satellite galaxies, those called dwarf spheroidal galaxies have particularly low luminosity and small mass. As their masses are considered to be dark-matter dominated, they are included in the main objectives of dark-matter search with gamma-ray observations.

*4 CTA (Cherenkov Telescope Array) is a gamma-ray observatory in the 20 GeV~100 GeV gamma-ray energy region.

*5 DARWIN (DARK matter WImp search with liquid xenoN) is a direct dark-matter search experiment using 50 tons of liquid xenon.

*6 One of the supersymmetric models which has attracted particular attention since the discovery of the Higgs boson. It is known as the simplest model that, while accounting for the Higgs mass and being compatible with grand unified theories, is free from the problems which often arise in supersymmetric models, i.e., the problems related to flavor and cosmology.

dark matter), most of their parameter regions are experimentally uncharted and new methods that are different from those we have considered so far are required. For former two cases, dark matter production (mono-photon process, etc.) and the precise measurement of the Higgs boson in future lepton colliders such as ILC will play an important role. On the other hand, for the light dark matter, a new light mediator (a scalar or vector particle) is also predicted in addition to dark matter itself because of the nature (renormalizability) of the relativistic quantum field theory. High luminosity collider experiments such as Belle II and various K meson experiments are mandatory to detect such light but very weakly interacting particles. Recently, it has also been pointed out that the Higgs boson decay to a pair of mediators can be an important method for dark-matter search. In this case,

precision measurements of rare Higgs boson decays will become important.

Conclusion

In conclusion, people are currently making great efforts to look for a new physics scale in particle physics after the completion of the standard model (discovery of the Higgs boson) and non-observation of new physics signals. Clarifying the nature of dark matter is certainly expected to play an important role in this context. As mentioned in the latter half of this article, in recent decades, closer collaboration between theorists and experimentalists in various fields has never been more crucial than it is today. The Kavli IPMU provides an ideal environment under these circumstances and I will continue to vigorously develop such dark matter studies.

Tea Break:

What IPMU Stands For?

There is an anecdote that the remarkable German mathematician and mathematical physicist of the late 19th and early 20th centuries David Hilbert once said, upon hearing that one of his students had dropped out to study poetry: "Good, he did not have enough imagination to become a mathematician."

We would like to appeal to your imagination and announce a competition for the best suggestion on how someone unfamiliar with the meaning of the abbreviation IPMU could guess what it stands for. For instance,

The Institute for the Pretty Much Unknown,
The Infrared in Physics and the Mathematics of the Ultraviolet ...

We will post the best answers on the Kavli IPMU website and on a poster in the tea hall, making it even more appropriate for the Tea Break rubric.

(Contributed by Alexander A. Voronov)

Our Team

Robin Kooistra

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

The intergalactic medium (IGM) in large-scale filaments plays an important role in the formation and evolution of galaxies. My interest lies in studying the properties of the IGM gas and how it affects the galaxies within the filaments, as well as the connection of the large-scale structure to the underlying cosmology. Through simulations I make predictions for observations of the IGM targeting emission lines of neutral hydrogen in emission (i.e.,

21 cm in the radio) or in absorption through Lyman-alpha forest tomography.



Chiara La Licata

Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc

My primary interest focuses on experimental high energy physics, in particular on using indirect probes for discovering or constraining the existence of particles beyond the Standard Model. I am currently a member of the Belle II experiment, and in the last three years, I have been deeply involved in the development of the radiation monitoring system to protect the silicon vertex detector. The first run of Belle II is about to start. I will follow the

commissioning of the monitoring system and prepare to look at the first data.



Hyunbae Park

Research Field: **Astrophysics and Cosmology**

Postdoc

I work on modeling of the Temperature Anisotropy in the Cosmic Microwave Background induced by the kinetic Sunyaev-Zel'dovich (kSZ) effect. The kSZ signal has information about spatial distribution of ionized IGM (intergalactic medium) in the space. It tells us about how ionization spread from galaxies during the epoch of reionization and how the gas density field evolved after the reionization.



Samantha Stever

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

During my PhD at IAS in Paris, I studied the effect of cosmic rays, which create a parasitic signal on the sensitive detectors used for modern space missions. I measured a semiconducting bolometer to determine the nature of the detector's thermal and electrical response to radiation. As a postdoc at Kavli IPMU, I am expanding my study of this problem to LiteBIRD using experimental and modelling techniques. I will also examine other systematic effects arising from the



polarization modulator (half wave plate), its coupling with the detectors, and the effect this has on the B-mode signal.

Round Table Talk: Dialogue Between a Philosopher and Physicists

Markus Gabriel

Professor, Director of the International Center for Philosophy, Bonn University

Hitoshi Murayama

Kavli IPMU Principal Investigator, and Professor, UC Berkeley

Yasunori Nomura

Kavli IPMU Principal Investigator, and Professor, UC Berkeley

Physicists Talk about What Science Is

Murayama: I would like to thank Markus for joining us for this conversation shortly after your lecture.*1 In our earlier conversation you pointed out that, precisely speaking, what people usually attribute to Popper is not what he actually said. So, one thing we can go for is to repeat my understanding of how science is defined according to Popper, though it might not be what Popper actually said. Then, we can discuss what is your real response is on this definition. Is that the right thing to talk about?

Gabriel: Why not? That makes sense.

Murayama: So, first of all, we are scientists and we have been taught in a specific way what science is about, how it should be conducted, and sometimes we find it very constraining. That sort of the narrow definition, which we normally



Markus Gabriel

Hitoshi Murayama

Yasunori Nomura

attribute to Popper and which scientists agree, is not really what we would like to do sometimes, especially when we talk about big questions about the universe and so on. So, that's why I would like to get your input on what we think the definition of science is in a traditional sense and what kind of other thinking is going on in the philosophy of science in the past and what your take is on this question. So, that's one thing we can talk about.

Nomura: In fact, Hitoshi, do you and me completely agree? Maybe not.

Murayama: Yeah, we'll see.

Gabriel: Maybe both of you try to just state what you think science is, and then I map this onto a philosophical conceptual space.

Murayama: Okay. Here is, I think, what I was taught in elementary school what science is about. The

science is about trying to understand the phenomena around us. To understand this, of course we need to take quantitative data on what is happening around us, and once we have quantitative data, you come up with a theory that tries to explain those data.

Once you have a theory that is successful enough to explain all the data you've got, then you start making further predictions out of the theory and then confront new set of data to see if those predictions will agree with the new set of data, and if they don't, you say, "Aha, I falsify this theory," and this is the process, which we were taught, I thought by Popper, as the definition of science.

Now, if it does succeed to explain the new set of data, then you say, "Okay, my theory is consistent with data." I would never say my theory

*1 On June 11, 2018, Markus Gabriel gave a talk entitled "Science and Metaphysics" at Kavli IPMU and IRCN joint seminar held at the Faculty of Medicine Experimental Research Bldg., on the University of Tokyo's Hongo campus. This round table discussion was held after the joint seminar.

is true. Then, you repeat the process until you hit the point that is again falsified. Then, you change your theory and then try to, again, address all the data we have explained before to see if that success is still retained, and if it is, then you make further prediction and then start taking data again and compare that to the data to see the theory is still right or wrong. Again, you never say it's right even if it is consistent with the data. You only say it's wrong if it does not explain the data, and then you try to expand the theory further. This is the process we are taught of what science is about.

Nomura: I think that's agreeable. I think no scientist can say that "I disagree."

Murayama: Okay. Maybe some twist?

Nomura: Yeah, small ones. One thing is that you said we never say something is true. Indeed, people sometimes make a statement like "Newtonian Dynamics is wrong" because of the fact that the real dynamics is, at least, special relativity. I think such a statement is misleading. Of course, this is a kind of language issue and in scientist's approach, it doesn't matter. I mean, we don't care if someone wants to say that Newtonian dynamics is wrong because of special relativity, or if someone says that Newtonian mechanics is true because it explains phenomena very well in a certain regime. The fact is that you must first define the word "true." We can use this word to mean "contemporary truth," and then Newtonian dynamics was certainly true, at least in the 19th century. Similarly, we can use the word to mean "true in a certain regime for all practical purposes." In this sense Newtonian dynamics is still true now.

Anyway, I think the basic attitude of science is always like that. We don't care any language issues, as long as we understand what we are talking about. In this case I don't care if you say the theory is true or wrong.

The fact is only that the theory applies in a certain regime in certain precision. In some extreme cases, however, it may become obvious that the theory is simply an approximation of another theory—in the case of Newtonian dynamics the special relativity—and then we must consider this new theory if we want to describe these cases. To me, this way of thinking is one way to define science. In this sense, science is very operational. Having said that, the definition of science, at least natural science, also includes the process of trying to explain the same set of data by the smallest number of assumptions. In fact, this last point is important because otherwise you can just list all the data to describe Nature and call the list a "theory."

Murayama: That's right. You can have one theory for every single data.

Nomura: Yes, that is the worst form of "theory." Then you try to minimize the number of assumptions from there, and then your theory will have an explanatory power. Such a theory usually makes predictions, namely it does not only reproduce what you already observed but also something else—as Hitoshi said; I'm just repeating it here—and then you do experiments and confirm these predictions.

A problem is that some people have gone too far. They say that only if all these processes are completed, say within the time scale of 10 or 20 years, then the theory can be called science.

Murayama: Hopefully, within 10

years.

Nomura: I totally agree with the basic attitude, but the question is that of time scale. This is, for example, an origin of the statement that string theory is not science. I do not agree that the definition of science includes the condition that all these cycles must be completed within a certain time. Falsifiability we talk about should not be like this. Whether a theory is science or not should be determined if it is **in principle** falsifiable—especially if the theory has a reasonable chance to be "true"—though we should of course keep trying to see if there are predictions that can be tested in shorter time scales.

Gabriel: That indeed seems to be a deep disagreement, and that's very interesting but it's a difference.

Nomura: Yeah, the difference is even among scientists.

Of course, if someone says that I don't want to invest my time for something whose confirmation time scale could be 100 years, that's fine. It's their decision, and I don't have any objection. But I strongly disagree with the statement that people working on things that might take long time to confirm are not scientists, the statement that some people actually make. The statement is, in fact, dangerous because no one really knows future technical advancement and also some other predictions may be found which can be confirmed at a shorter time scale.

Murayama: As you know, I sometimes made such a criticism myself but that was not about string theory itself but more about the people who were doing it because they have the attitude that they don't need to bother making predictions or test them, and that's the attitude I

was deadly against because then that's not a scientific attitude. It's not the same thing as calling string theory not science but rather calling certain attitude of people doing string theory nonscientific. I made that distinction.

Nomura: Okay, good. Then I might have misunderstood you at some point. But I would still say that even things people whom you criticize are doing are not worthless efforts as human's activity—it is, at least, mathematics. In general, I believe we must be extremely careful in dismissing others or what others are doing.

Murayama: Another thing about—I think what we are taught not in sort of the textbook way but on the way we are doing research—is about the quality of theory, namely, that we highly value theories, which are more universally applicable, a broader range of applicability.

We value theories that look more beautiful and, of course, we can't really define what we mean by beautiful, but there is some aesthetic sense of it, and we also value theories that are useful, and in the case of string theory, it had not been verified experimentally in a way we normally speak of but has been incredibly useful in spawning new ideas and that also created a new connection to mathematics and so on.

So academically, there was a very fruitful ground to conduct research. That's another quality we value. So, in addition to this narrow definition of science we were taught, there are these additional qualities. Somehow we got sort of engrained why we actually keep doing research and what we aim for, and that's a difficult aspect we can define in terms of what is science.

Nomura: Yeah, this may be

complicated. At this point we are not precisely defining science in such a way that Markus can comment precisely, but this may be the nature of the issue—I mean, it may have a lot of aspects like Hitoshi mentioned. And some of these aspects are different from what we were talking about when we discussed falsifiability etc. But anyway, listening to all these things what would you say?

What Science is—Philosopher's View

Gabriel: I think that you are highlighting an important part of the scientific activity. So clearly, there is a success criterion as well as an overall legitimacy criterion. The overall legitimacy criterion is what you call falsifiability in principle or testability in principle, right? Science proceeds by making claims about the universe that can be tested. If we assert something that is in principle, or in virtue of the meaning of the terms employed in the statement, beyond the reach of any instrument we use for measurements, we simply make no statement at all about the universe.

Nomura: “God exists” is a good example.

Gabriel: There are other things too, such as “life is a dream.” The idea that reality might not be at all what it seems to us is also not a scientific hypothesis, as science minimally relies on the availability of data. If data were not even data, we could not proceed scientifically to establish anything.

If I tell you that life is a dream, there is of course a testable hypothesis available too: how long is the dream and so on. If I then reply that life might be something even crazier, such as a nightmare in the

mind of an immaterial demon, this hypothesis would easily explain all the data. However, there are infinitely many other hypotheses which explain all the data in one fell swoop.

Nomura: Yeah, and this is the theory no one can...

Gabriel: It's a very simple theory. It's extremely elegant. It's very universal. But there must be a little bit more action here because there are some non-falsifiable things that are kosher. For instance, if I'm conscious and I think I'm conscious, then that is not falsifiable. To be conscious and to think that one is conscious means that one is right. Not everything that is not falsifiable is problematic and unscientific. Otherwise, we could not formulate the criterion of falsifiability itself.

So, I can be wrong about the state that I am in. I can be wrong about the neural support of consciousness, but not about the fact that I am conscious right now. Being aware and being aware of being aware are the same thing, so there is no falsifiability gap, but that is alright. Therefore not everything which exists is the object of a falsifiable investigation.

Nomura: Okay, there may be something more here.

Murayama: But when you talk to me, if I respond, then you can tell I am conscious.

Gabriel: Yes. Exactly! That can be wrong.

Murayama: That is the external test.

Gabriel: Yes, that's the external test. There is an external test and it's also very important that this fact about consciousness, which I mentioned, is grounded in the brain. If there were no relations between consciousness and the brain, we should conclude that there is something wrong with thinking that we are conscious

because then we would have something that is not falsifiable and not grounded in anything that is falsifiable. Hence, there is a deeper relation between existence and falsifiability, maybe even a very deep one. So, that's the in-principle criterion. I think that's kind of fine.

However, I will be careful as a philosopher and let's see how this maps onto science. Scientists are very used to thinking of the in-principle criterion and the success criterion. The one is dynamic, the other one is more static. There is the dynamic side of theory change, the activity of adjusting to incoming data and then changing the model where necessary, and then there is a more general criterion, the demarcation problem as we call it in philosophy of science: falsifiability as an answer to the question what makes an investigation a part of science.

Nomura: Such in-principle falsifiability is, at least, necessary.

Gabriel: Yeah, necessary. Not sufficient.

Nomura: ...to eliminate theories like "God exists"...

Gabriel: Yeah, stuff like that.

Nomura: ...or like "Fossils of dinosaurs were made by UFO" .

Gabriel: The demon stuff, yeah, stuff like that, like demons.

Nomura: Yes, your demon is a good example too.

Gabriel: There are infinitely many such examples.

Discussion about Underdetermination

Nomura: Yeah. Using the falsifiability criterion more than that, however, is dangerous, which some people are doing and I'm against. I also want to talk about your "underdetermination" which you mentioned in your

talk. You, as a philosopher, thought about this, but I was also thinking something like that, like underdetermination.

Gabriel: That is what we call underdetermination...

Nomura: For example, Hitoshi said that "I am conscious—you must know I am conscious, right?" But I don't know! Why? Because I don't have his consciousness. I don't really know.

Murayama: But you have seen my function. I responded to your function ...

Nomura: Oh, yeah, but that may only be a function, right? I could say that only I am conscious and what I see as Hitoshi is just a function. However, because similar responses are obtained from Hitoshi as those from myself, the simplest assumption is that these two are both conscious. In fact, this is exactly how science goes. Namely, although I cannot exclude the possibility that only I am conscious and you're like, for example, demons, ...

Gabriel: Or everyone is zombie...

Nomura: ... I cannot exclude such a possibility, but I don't need to think about it in doing science. Making this kind of "assumptions" is a very fundamental part of the "definition" of science, which you probably agree.

Gabriel: No doubt. But here's something where I would introduce maybe a more cautionary way of speaking and then let's see what you have to say about this because we got into a discussion about. So, I would stick to a picture where there really are "facts". Now, here's why.

Murayama: So, the "fact" is the same thing as "truth"?

Gabriel: Yes. Let me define this a bit more.

Nomura: Yes, what you talked about

in your talk – yeah.

Gabriel: I don't think of truth as representational, so I don't think that truth is a relation between a theory and reality or a statement and a fact. I think of a truth as just a fact.

Murayama: Okay, so that's something that exists.

Gabriel: Yes. Exactly!

Murayama: Whatever the definition.

Gabriel: Yes, exactly. That's how I think about a truth. For instance, when I say it's a truth that I'm here and stuff like that, or it's a truth that there are more than two people in this room, with everything ("people", "room", "in", etc.) well defined...

Nomura: Yeah, you have to define what the people and so on.

Gabriel: Sure. But here's a view that, I think, cannot be correct. A view according to which once all the terms are well defined, there is never a fact. That can't be true, right? Because once your terms are well defined, either things are as presented or not. So, imagine I tell you exactly what I mean by an elementary particle, which is hard enough but okay, then there is going to be an answer to the question whether in a well-delineated space-time region, there is an even or odd number of certain molecules, say. Let's take an even simpler question. I mean that's hard but I'll make it simpler. Let's take a random arm of the milky way, define a precise time slot for it, and now there is either an even or odd number of stars in that part of the milky way.

Nomura: After you define the star.

Gabriel: We assume that we fully settled the meaning of "star" on the basis of astrophysics.

Murayama: Which is hard to answer but anyway.

Gabriel: It's super hard.

Nomura: Practically. We're not talking

about a practical issue...

Gabriel: No. Some of those might be impossible to answer, even when well defined.

Nomura: Do you think so? This is indeed a big question. It is exactly related to your theme, totality etc., namely whether there is something that is not answerable in principle.

Gabriel: Exactly. I have to think about that. Maybe for no good reason, but my bet is that there would be.

Take black holes, you had said very interesting things about black holes yesterday,^{*2} anyhow some regions of the universe, meaning the object under investigation by physics, are such that it might indeed be the case that there are properties in that region that we can never figure out because, for instance black holes, given that they suck all the information in and none comes out, and if it's true, which is questionable—you made very interesting points about that in your talk—but if it's true then physics cannot know anything about the region of the universe where no information comes out. Then clearly there are physical facts that physics cannot discover.

Quantum Mechanics and Philosophy Seem to Have Interesting Relation

Nomura: Then, such objects should simply not be included, even in the list of things to describe.

But the issue, in fact, is even deeper. Here is the view I always have had. An important problem in quantum mechanics is that of a measurement. Usually we think

^{*2} On June 10, 2018, Y.N. spoke on "Beyond the Universe" and Gabriel on "Universe, World, and Reality" at a public lecture hosted by Kavli IPMU. There was also a dialogue between the two lecturers; see *Kavli IPMU News* No. 42, p. 19.

we can solve it by the concept of information amplification in many worlds—by the way, this information amplification has potentially very interesting implications for where consciousness is, which we can talk about later—but to actually implement it we always assume the existence of an external object that is observing the system. In classical mechanics, this is not too much of a problem because you can define everything precisely, for example as a kind of computer simulation, but in quantum mechanics the existence of an "external thing" making some sort of observation is deeply ingrained in its formulation.

So, quantum mechanics applies to a subsystem—everybody agrees that it works perfectly then—but what scientists really wanted is to find a framework which includes external observers, namely "full things" including such observers. But your philosophy says that such a framework might not exist. The theory might be consistent without it. I think this is quite possible. Maybe physics can do in principle is only to talk about subsystems.

While I think it quite possible, usual scientists don't think that way, which is striking. Having said that, I would say that the only way scientists can reach that conclusion, if we could reach, is asymptotic. In fact, this is quite a general phenomenon. A "proof" of a theory in natural science does not go like that in mathematics. You just have to keep increasing your confidence about the theory, in some sense by lowering the confidence for alternatives.

Murayama: ...empirical science...

Nomura: Yeah.

Gabriel: That's why it is empirical.

Nomura: Yes, that's why the only way

for scientists to reach this conclusion, or confirm Markus's view, is to try to build a theory including external observers and keep failing it. This is the only way science can "reach" there.

Murayama: That's right. I agree with that.

Gabriel: Yes. I agree with that too and I think that this is why this model that I give, of the no-totally view, might be a very good description of what science is doing because science at most is reaching for totality asymptotically, and it keeps failing in that respect but in very specific ways.

Science as an epistemic virtue is the degree of distance between an impossible ideal and its capacity to nevertheless approach it, so science is, if you like, searching for the biggest natural number. Well, there is no such thing. You will never find it, right? But nevertheless, as it does so, it finds always more numbers. It adds and adds, so it's a very successful operation, even though it defines a limit that cannot be reached by the nature of that limit.

Nomura: This analogy is interesting. But I want to be a little more careful about my view. If the world were classical, then I think I might have totally opposed to your thought.

Gabriel: Yeah, of course we can come to it, right.

Nomura: So, it is very interesting that quantum mechanics, which looks like a very physics thing and is not a theory of philosophy per se, seems important. Quantum mechanics is really affecting how I think about the nature. Because of quantum mechanics, I feel that what Markus says might be true, although I certainly can't be conclusive.

Murayama: Can you elaborate on that?

Nomura: Okay. Although I still think that even a quantum world might ultimately be described internally, at least the issue is there. In the Copenhagen way of thinking, for example, to test a prediction you have to make a measurement.

Usually you just say that such a measurement is described by decoherence.^{*3} Suppose you have a quantum state which is an equal superposition of spin up and spin down, and you interact with it. The initial state is then the product of you not knowing the spin state times the spin up plus down, and after you interact with the spin, the state becomes a superposition of “spin up and you think the spin is up” and “spin down and you think the spin is down.” Then you may write down the result on a piece of paper, which further amplifies the up/down information, and so on. But at which point did you really make a measurement? To elucidate the issue, suppose we have only two degrees of freedom, a spin and me. Let us, for simplicity, refer to my mental state finding spin up as A and my mental state finding down as B. Then you could say that the state after the interaction is—this is nothing other than von Neumann measurement—equal to “up A” plus “down B,” and you may think that you have measured spin up or down. This is wrong.

Murayama: Yeah, because it can still be either way.

Nomura: No. Not in that sense.

Murayama: Oh, not in that sense?

Nomura: No, the conclusion is more fundamentally wrong because you can write down exactly the same state as “(up + down) times (A + B)” plus “(up – down) times (A – B)”, since the cross terms cancel. Then



you might say that the measurement was done in the x direction, rather than in the z direction.^{*4} A standard answer to this question of what measurement you made is that it is determined through a succession—not just a single interaction—of processes: for example, I also write down the result in a note, somebody reads it, and so on. Namely, the measured information is the information that is amplified in the sense that many people can share it.

Incidentally, you cannot share the entire information about a subsystem because of the no-cloning theorem of quantum mechanics.^{*5} Only an exponentially small amount of information can be shared by multiple entities, and if this sharing happens you say that the information is classicalized. But at what point does this really occur? Maybe you always need some external entity, or a sufficiently large amount of amplification may be enough to claim that things are classicalized. In the latter case we don't need to go as far as no-totality, but we don't really know.

Where Is Consciousness?

Nomura: But it is still true that things become classical only after some amplifications. And, since our thinking

^{*3} process in which quantum coherence of a state—the origin of strange quantum behaviors—is lost from the system due to its interactions with environment. This makes the system appear classical.

^{*4} In quantum mechanics, a spin can take only two independent states, which one can take to be “up” and “down.” These are the states which, when the z-component of the angular momentum is measured, give definite answers: +1/2 and -1/2 in certain units. An intriguing thing is that the states which give definite answers when the x-component is measurement are given by “superpositions” of these two states: (up plus down) and (up minus down), giving the x-component to be 1/2 and -1/2, respectively.

^{*5} In quantum mechanics, full information contained in a quantum state cannot be copied faithfully. This results from the fact that any operation in quantum mechanics acts linearly. Suppose there is a copy machine that converts a spin up into two up's—which we write as (up)²—and a down into (down)². Now, imagine that we send a superposition state (up + down) into this copy machine. Since the action of the machine must be linear, this produces the state (up² + down²), which is not a copy of the original state, (up + down)², since the information about interference terms is dropped. This obstruction for duplicating information does not occur in classical mechanics, which does not have the concept of a superposition.

is probably classical—we are not having a “superposition thinking”—the question of where consciousness might be answered only after such amplification, and in this sense consciousness may involve something outside a brain because the brain is interacting with a lot of things. This is what I meant to say in passing earlier.

Gabriel: I'm very happy with what you're saying.

Nomura: Things become classical only after information amplification, but how much amplification you need? This may be a quantitative question associated, for example, with how stable the information needs to become. But it is certainly true that amplification occurs through interactions, so that your brain state is copied to photons in some form, and so on. So, where the information, namely consciousness, actually is?

Gabriel: What you're describing could be a legitimate version of the age-old assumption that consciousness has something to do with quantum mechanics. But it might not be consciousness; it might be thought. The mental state I am in as a theorist right now leads to classicalization. It turns something into classical amplification. So the operation that you're describing, which is obviously related to the measurement problem and so on, that operation could be essentially tied to thought.

Murayama: Can you again define the difference between consciousness and thought?

Gabriel: Okay, so here's what I mean. I'll give you a notion of thought with which I'm working here. We can both think the same thought. For instance, Tokyo is a city. I tell you what I mean by city. I tell you what I mean by Tokyo and so forth. We can then think the same thing, namely that

Tokyo is a city. I'll give you another thought. “Tenno” is the Japanese word for emperor. So, that's a thought. Now if you agree and I agree, is there something to which we both agree?

I would say yes and philosophers call—in a certain tradition, which I think is right; the mathematician, Gottlob Frege introduced this notion—he called that to which we both agree a thought and Frege distinguishes between a thought and thinking. I can think that thought and you can think the thought, and we both think the same thought. So, the thought is not in my head. Otherwise, we couldn't be thinking the same thought. The thought is not in my head, only the activity of thinking it is.

Nomura: By the way, the concept you are talking about applies only in classical physics. This is because you are assuming that information can be duplicated. In quantum mechanics, the full information cannot be copied. There is a very simple reason for that—the principle of linearity.*5

Gabriel: Interesting.

Nomura: So, you cannot have an exact copy machine in quantum mechanics. This is why our world classicalizes because a definition of being classical is that we can share the information exactly and...

Gabriel: Yes, exactly. Once we share information, we are on the classical level. We have to be. Thought is classical.

Nomura: Yes, a classical thing. But our world is quantum mechanical, deep down. So, the notion you are talking about must become something very interesting at the fundamental level. Perhaps even a concept like two share the same thought might not be precisely defined at such level

because in quantum mechanics, to specify the state of the world, you really have to give a quantum state. And the state is a global concept—you have to know everything about the system in principle.

In this context, the relevant question is why we can admit an approximately classical treatment of nature, not—unlike sometimes posed—why quantum mechanics admits nonlocal phenomena, such as an EPR pair.*6 The nonlocal nature of a state is intrinsic in quantum mechanics. Nevertheless, you can predict what happens if I just dropped this phone which I have in my hand without knowing what's happening in Andromeda, despite the fact that the quantum state must include everything in the world...

So, your information and my information, those are shared—minute you say something like those, you are already separating your quantum state into pieces and entering into a classical regime. So, how does such classicality emerge? I don't know whether this is a philosophical question, but it is very interesting.

Riddle of the Unity of the Proposition

Gabriel: I think it is a very philosophical question that is amenable to a scientific treatment. It is, in a certain sense, **the** philosophical question because it's a question of how thought emerges in a non-thinking environment. Only parts of

*6 In quantum mechanics, one can consider a quantum state in which two objects, e.g., spins, are correlated in such a way that the state of each object cannot be described independently of that of the other. This phenomenon is called entanglement, and the EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) pair is a specific form of entanglement between two objects.

the universe think.

What if we have a picture where reality, indeed, is what we are thinking about, so the thought has a physical trace, a signature in the universe? If we can assign a physically kosher signature to a thought, then we cross the gap between thinking and reality because now we can understand how what we are doing when we are thinking is grasping a thought because we know much more about what we do when we are thinking in the brain and what must happen on the object side when reality stabilizes or classifies into a thought.

This might be related to a really famous riddle. It is called the Riddle of the Unity of the Proposition.^{*7} This is not solved. A student of mine just wrote a brilliant thesis about it, but it does not amount to a complete solution. It's brilliant but it doesn't work. The other reviewer said we could still give him Ph.D. as he thought the issue through—that's what we do in philosophy—and he indeed got the best grade because the solution was brilliant. But it can't be the whole story.

Here is the problem of the Unity of the Proposition. There must indeed be an answer that physics can give. Bertrand Russell kind of discovered this problem, but it is in fact older—it had already been discussed in Plato. Imagine that I think a certain thought such as that the dog is on the mat. If I think that the dog is on the mat—or let's take something that is actually

^{*7} The unity of the proposition is the problem of explaining how a sentence expresses more than just what a list of proper names expresses and how a sentence comes to be true or false? For example, if "Socrates is wise" consists of just a name for Socrates, and a name for the universal concept of Wisdom, how could the sentence be true or false?

there in this room, so the bottle is on the table. Alright? Now, on my definition of thought, that the bottle is on the table is the thought that the bottle is on the table.

Murayama: Say that again.

Nomura: Yeah, right. To understand it better...

Gabriel: On my definition of thought, okay, here is what the thought is. The bottle on the table—the thought that the bottle is on the table is not in my mind. It is here. What you perceive is both a bottle on the table, and the thought that the bottle is on the table. There are not two things in reality, but an inseparable unity of information and object.

Murayama: Okay.

Gabriel: So, there is something in my mind right now. I see the bottle from here. You see it from there, but we both see the same thing, the bottle on the table. Hitoshi, you see it from there, I see it from here, and Yasunori, you see it from there, but there is one fact: the bottle on the table. That's why it is fair to say that once I define all of my terms precisely...

Nomura: You have become a scientist!

Gabriel: Philosophers are scientists too, you know...

Nomura: It's a bit nasty to talk about making everything precise every time, but...

Gabriel: Not nasty, ...defining things is very important. Anyway, imagine we completely define our concepts at the highest level—namely giving you the highest, the most fine-grained scientific account of what I mean...

Nomura: Okay. That is not the point here anyway.

Gabriel: You know, we really fix the meaning of bottle, table, etc.

Nomura: Okay.

Gabriel: Now we have the thought

the bottle is on the table. You process the thought in the way in which your organism does it for you and I do it for me and let's call that thinking. So, the activity of processing a thought is thinking. What I am thinking is the thought, but what I am thinking when I am thinking that thought is really the bottle on the table.

Murayama: So, you're saying that this object is the thought.

Gabriel: Indeed.

Murayama: Okay.

Gabriel: This is what philosophers call a fact.

Nomura: Okay, but I didn't get what is the puzzle...

Gabriel: I said something which I hope is true, right? So, it doesn't yet come with a puzzle. But here is a problem now. Can thoughts be false? Can there be negative facts?

Murayama: Can thoughts be false?

Gabriel: Yes; "Can there be negative facts?" So, imagine there are no negative facts. Here is a positive fact—the bottle is on the table. Now, is there a negative fact here too, for instance, the fact that there is no pig on the table?

Nomura: Negative fact means... that there is no pig on the table?

Murayama: It's a fact.

Nomura: Yeah, that is a fact.

Gabriel: Yeah, but is the fact negative? The fact that there is a table entails that there is no pig exactly where the table is. Is reality composed of positive and negative facts?

Nomura: It seems that there is only a fact that molecules, or particles or whatever, are configured in a certain way...

Gabriel: For sure, molecules are involved in facts, and those facts are not negative. But now the problem is this. Suppose no fact is ever negative,

and there are just more positive facts. Then, imagine that I change the facts. Currently, the facts are such that there is a bottle. Now, I change them. By this, I didn't create a negative fact. There is just a new fact, not a negative fact.

Murayama: Yeah. That is a new fact.

Nomura: Of course, you could define it as a negative fact, but that would just be a convention...

Gabriel: The question is: If there are no negative facts, then how can I make a mistake in thinking? Imagine I think something. I think a thought. I process reality. How can I make a mistake if there are no negative facts? Then, reality would be coming in all the time and that's it. Facts will be coming in. How do we explain the subjectivity, i.e. fallibility, of our relationship with reality?

Nomura: I would say the following. For example, despite the fact that the bottle is here—in the sense that Hitoshi has a thought that the bottle is here on the table and you also share the thought that the bottle is on the table, and everybody shares the same thought—despite that, if I am having a thought that there is no bottle, then that can be taken as a definition of mistake.

Gabriel: Yes, that would be a mistake. But now that mistake is a relation between something that's going on in you and something that's here on the table, right? And now you see if that's your theory, you see you have the correspondence theory of truth. Because now you're saying that you have a theory of mistakes, and you make a mistake if what's here doesn't correspond to what's there. And correspondingly, now you can define what happens when you don't make a mistake. If you don't make a mistake, then what's here (in my

mind) corresponds to what's there on the table. That is the correspondence theory of truth. Now, you have it.

How Truth/Falsity Is Defined in a Quantum Mechanical World?

Nomura: Yeah. I am saying something like that, but not quite. A mistake in my theory is defined only statistically.

At least in a quantum mechanical world, you always have to think about things in terms of a confidence level or something like that. Suppose that—I also gave you this example earlier^{*8}—suppose that the mass of a particle called the Z Boson is, let's say for simplicity, 90 GeV. That corresponds to the existence of a peak at 90 GeV in some spectrum—with the existence of such a peak, we usually say that the mass of the particle is 90 GeV. But, maybe the “true value” is 80 GeV. Since in quantum mechanics everything is statistical, a rare coincidence may have happened that the result of an experiment is pretending that the mass is 90 despite the fact that the true value is 80. You might still say that “it can't be the case because other experiments also found 90.” But the result of this other experiment may also be a statistical fluke. If you think in this way, you can't do anything.

So, when we do science, we are always using, at least implicitly, the concept of typicality, and we temporarily view a thing as a truth if it is highly confident in this sense. So, if we had 100 people seeing the bottle here on the table and I am the only person who does not see or measure it, then it would give a higher confidence that I am making a mistake. And if you have thousand people seeing it and I am still saying it's not there, then it becomes more

confident that I am making a mistake...

Gabriel: Yeah, but here's the problem.

Murayama: Yeah, then you can never say you made a mistake.

Gabriel: Yes, you can never say that you either made a mistake or that you got it right.

Nomura: But I think this logic is still true nevertheless because...

Murayama: What do you think is true then?

Gabriel: Now, Yasunori, what you said seems to imply that there is no falsifiability either. Because if there is no absolute truth, then there is no absolute falsity. You can also not falsify a theory.

Nomura: I agree.

Gabriel: Agree?

Nomura: Yes, I agree.

Gabriel: ...then you can stop using a theory...

Nomura: I mean, I'm saying that falsifiability must also be a statistical statement exactly as the statement “I am making a mistake” in the previous example is a statistical statement. Likewise, “the mass of the Z Boson is 90 GeV” is also a statistical statement, at least in a quantum mechanical world, and practically even in a classical world, I think.

Murayama: That is the standard way of approaching quantum...

Nomura: Yes, I think so.

Gabriel: That's true.

Nomura: Indeed, things are always like that. Any criterion, such as true or false, is in fact almost always continuously connected, and so you must cut somewhere. And your example—a bottle on the table—is not an exception. This is important.

^{*8} After M.G.'s seminar, there was a panel discussion by three panelists including M.G. and Y.N., where the example discussed here was talked about prior to this round table discussion.

I claim we must always think in this way at the fundamental level.

Gabriel: Always, and there is no fixed number.

Nomura: Yes, exactly.

Gabriel: You work as you go and then all these contextual parameters are coming in.

Nomura: Exactly!

Gabriel: You work as you go. You cannot give a calculus for it. If there is no absolute certainty, there is no falsifiability either!

Nomura: I'm very sympathetic to that.

Murayama: Yes, that contextual part is really true in a sociological sense in physics community. If you claim to have discovered new particle, like the Higgs Boson, the stake is so high that it requires 99.9997%.

Gabriel: Exactly! You raise the stake.

Murayama: But when you say that somebody is handing you a theory, there should be a new particle, nobody really cares. You take the data. You have excluded the hypothesis. Then, even at the level of 90% confidence level, you would take that as a fact—"Okay it didn't exist."

Nomura: Yes, that's sociological but interesting...

Murayama: Yeah, that's the definition you mentioned.

Gabriel: You see, this shows, in a certain sense, that the falsifiability criterion also fails.

Nomura: In the exact sense.

Gabriel: Yeah, in the exact sense.

Murayama: Because it's not 100%.

Nomura: Yeah. I think the case of a dolphin is also the same—I mean, if we trace the motion of all the atoms by, e.g., a very strong computer, then we don't necessarily have to introduce the concept of dolphin, human, or anything like that, since we just have to follow the motion

of all elementary particles, which contains all the information. Almost all the concepts we are talking about are implicitly and intrinsically approximate, like artificially dividing a continuous thing, and this division must even be statistical, at least in a quantum world. In fact, we might even be able to turn the argument around and say that this is the reason why the fundamental law of physics takes the form which quantum mechanics does...

Gabriel: So, what's really going on is a certain—if you like, within thinking—fluctuation, a probability fluctuation at the level of thinking too, right? There are certain points of the wave and they are relative to contextual parameters themselves and then we say, okay, we call this falsification, and this confirming evidence, and this data. But you see this is very different from Popper's picture of falsification because the falsification picture is one which worked like the following: all ravens are black and then you find a white one and it's like, damn, I was wrong. So, you take this back.

That was the model, where really the falsification picture presupposes that there are facts and either you get them or you don't, and Popper just said that you never get all the facts. You always get a partial glimpse and the more facts come in, maybe some disconfirming facts come in too and that's it. So, Popper would say that science goes like this. All ravens are black. False, there is a white raven, and then it's like "damn, forget about the black ravens." What do I know about ravens? That's the conclusion. Then, I'm not interested in ravens anymore.

Murayama: That's a really sad definition of science.

Gabriel: Yeah. That's not what it is,

right? So, there has to be middle ground level, where the dynamics simply can't stop. Right? But this is not driven by inductive data sampling.

Nomura: As I emphasized, always you are using statistical inference to reduce the number of assumptions, namely getting a better theory. For example, suppose your theory predicts that all ravens are black, but you observe a white one. Then you usually say that you falsify the theory, and that's okay. But in principle, you cannot exclude the possibility that you instantly became achromatopsia, so that you couldn't process the color correctly, and then got back to normal. You cannot exclude this exactly, so we are implicitly assuming that such a thing occurs only with an extremely small probability, implying that your theory is excluded at a very, very high confidence. Like this, we are always using statistics.

Gabriel: Some version of so-called holism is probably correct here. Quine proposed to think of physical theory as a web of beliefs whose end points are measurements. We are in touch with the universe, but we extend our belief system with the help of physics. Science is not just a collection of sensory data and inductive claims.

Murayama: Does it need to be really human sensory system or it can be extended by instruments?

Gabriel: Yes, it can be extended by instruments and thus by measurements.

Murayama: Okay. That's good.

Nomura: This is precisely why the issue is interesting. In a classical world, the probabilistic nature in these processes is usually attributed to incomplete knowledge, namely you don't know enough with precision.

Murayama: Like a weather forecast.

Nomura: Yeah. But if you know perfectly the location and velocity of all the elementary particles and have a hyper-strong computer, then we don't need to introduce such a probabilistic nature...

Gabriel: Yeah, then it will be fine.

Discussing Consciousness Again

Nomura: But quantum mechanics says that this is not the case. Probability seems to be much more fundamental. But then this brings us to the issue of consciousness. You could say "Oh wait, you say that probabilities are the only thing that can physically exist, but I exist in a specific place in specific time." This may require something like going back to consciousness—do I have to introduce consciousness in the definition of physical law? I doubt, but I don't have a definite conclusion.

Gabriel: But here is how you could maybe map decoherence^{*3} onto that picture, so not do it with consciousness but do it with thought. So, what if a measurement—in the sense of the measurement problem—takes place once I stabilize a thought environment, so it's not internal. Consciousness is typically seen as something very private, intimate, right? I can't see your consciousness. That's typically implicit in the concept of consciousness.

But if we have this other concept of thinking, then maybe that could do it, where thinking is putting me as a measurement system—the whole animal that I am—putting me in touch with my environment and my environment now, the environment of an animal, is going to be classical. Otherwise, the animal couldn't survive. The animal doesn't jump over probabilities. That's why Schrödinger's

cat is so aptly chosen. It's an animal. That's why we are like "okay, is it dead or alive?" So for that it matters for animals to be dead or alive, so maybe we are the kinds of systems that as thinkers...

Nomura: I'm sympathetic. In fact, in one of the papers^{*9} I even said something like that. The classicalization relevant here may just be information amplification—that's the possibility I discussed. I'm not pushing consciousness is very important and necessary.

Gabriel: No. It's not consciousness. We are not talking about consciousness.

Nomura: Maybe yes, but I'm not a proponent of that.

Gabriel: But that's really not the proposal here. It's really a much more objective proposal, nothing having to do with "subjective consciousness".

Murayama: So how does thinking and thought work, to address this question?

Gabriel: Okay. So here is the picture. A thought can be true or false. Determinately it has two states, A or B, on/off. That's why you can translate thoughts into information.

Murayama: Okay. So, that is classical.

Gabriel: That's classical. I think thought is classical.

Liar Paradox

Nomura: Yeah, but because you are referring to "A or B"- or "Yes or No"-type statement often, I would raise this. What do you think about "I am a liar"-type situation?^{*10}

Gabriel: Oh, yeah. So, well, I think that can be solved because the liar paradox is the following proposition. L: L is false. So, this is how you formalize it. It's simple. Now, an interesting solution—there are many

solutions to it—but here is the one I really like. A recent one by a friend of mine, Sebastian Rödl, a German philosopher, he says the liar paradox is just nonsense. There is no paradox. Here is how.

So, imagine I look at you and I just utter the words "I told you," and now you ask me "What? What did you tell me?" Out of the blue, it's like "I told you" and you look at me "what?" and it's like "well just that. I told you!" Now, "what did you tell me?" is a good question, right? So, I'm not saying anything if I just claim "I told you." I can't tell you **it** without saying what it is. So, the liar paradox just doesn't specify truth conditions. It contains a statement apparently saying about itself that it is false without specifying what "it" is.

Nomura: Yeah, that is interesting. But, is this something you have to "solve"? I thought that when Gödel proposed it, he meant to show that there is an intrinsic limitation in Boolean yes or no logic, and not presented as a paradox. This is just a feature of Boolean logic, that it cannot be complete.

Gabriel: Yeah. That's one way of dealing with it or you can say accept, for instance, dialetheism, which is an interesting logical view. According to this view, you can say that the liar sentence is both true and false.

Murayama: Both true and false?

Nomura: Yeah. You are just saying that Boolean is not enough—you

^{*9} Y. Nomura, "Quantum mechanics, spacetime locality, and gravity," *Found. Phys.* 43 (2013) 978, arXiv:1110.4630 [hep-th].

^{*10} "I am a liar": if he is correct (TRUE), then he is a liar (FALSE); if what he is saying is wrong (FALSE) then he is not a liar (TRUE). (Perhaps, a better sentence was "This sentence is false.") Y.N. raised this as a possible example for something that cannot be answered simply by Yes or No.

have to extend it.

Gabriel: Exactly, that can be done.

Murayama: That's along the same line of thinking then.

Gabriel: Yes. That can be done. That's one form of paraconsistent logic.

Nomura: Okay.

Gabriel: So, no problem. But my solution is even easier. I think that when I say "I am lying" and I am not telling you anything, then I am not lying. So, that's why there is no paradox. You need to say something in order to create a paradox.

Murayama: But if you say "I always lie", then it is a paradox.

Gabriel: Now, yeah. Now, it becomes a paradox. Yeah. I always lie. But, then I would say the answer to this is no. If someone tells me "I always lie" then I could say "no" because what you've just said is neither true nor false, so you don't always lie.

That's why we typically formulate it like this. We abstract from the speakers because otherwise you can just deny that this is a legitimate speech act. You can just say "don't speak this way," right? So, if we formalize it, usually we say something like proposition L, so we call the sentence L and the sentence L says L is false, right? So, now it's true.

Nomura: Exactly, so negative feedback is always outside the Boolean logic.

Gabriel: Indeed. So, we know that this indeed causes problems, and I think that this is part of why I think there is no totality, even in logical space because if there were totality in logical space, the liar would be in there too. So, you have to rule out something, for instance the liar. You have to be justified in ruling out the liar paradox and other paradoxes in order to have a theory at all.

Nomura: Interesting. I believe this



is related with quantum mechanics, why quantum mechanics is formulated in a way that it applies only to subsystems. I've always felt that this may be related with Gödel's.^{*11}

Gabriel: Yes, I think so too.

Murayama: Okay. Yasunori. That's why you brought this up.

Nomura: Yes. I always thought this way.

Gabriel: My theory on the fundamental level is a kind of generalization of what we know from Gödel's theorems and their consequences. There are still problems in Gödel. For instance, if you assign a Gödel number to a sentence without accounting for the fact that the sentence has meaning, you did not really do the trick. Gödel needs a theory of semantic meaning before he can prove what he wanted to prove. Gödel doesn't give you a theory of meaning. He gives you a formal system, which prints out a string of symbols. If no one is around to understand them, no proof ever occurred.

Now, if my arguments are sound, they provide us with a generalized Gödel scenario. I worked out a generalized incompleteness theorem, so wherever you shoot for completeness, you can't get it. That's my argument. It's very strong and general—so it has to apply to quantum mechanics too.

Nomura: Yes, that's what I am saying.

Gabriel: Yes. Absolutely!

Nomura: Wow, it seems we have only 10 minutes. We had a lot fun, but how to assemble all these in the form of an article? Isn't it too difficult? ...

Through an Encounter with Philosopher Science Knows What It Is

Gabriel: Yeah, we can wrap it up. You see, for instance if we tackle this very specific issue, which came out now at the end, I mean I clearly formulate with my theory something that is

^{*11} A set of two theorems formulated by mathematician Kurt Gödel. They state that every formal axiomatic system capable of modelling basic arithmetic is "incomplete," i.e., has some intrinsic limitations.

in principle falsifiable, in principle testable, then it has consequences for our way of doing and understanding quantum mechanics clearly, because now you have to choose and so you could falsify what I am saying. It's a high-stakes claim. If you can show that quantum mechanics is a complete system, then you would have falsified what I am saying.

Nomura: At least, in a quantum mechanical world.

Gabriel: Yeah, at least. That is something general.

Nomura: Because mathematically Gödel is an example of your...

Gabriel: Yes, mathematically I'm right anyhow.

Nomura: Yeah, because philosophy is more general...

Gabriel: So, I'm right anyhow. (Everyone laughed.) But I have an additional stronger claim. The hypothesis is that the general view, the generalized stable view, my generalized Gödel thing, must have consequences within quantum mechanics too, something I see in work by Carlo Rovelli too with whom I once discussed this in a public event in Marseille.

Nomura: A narrow version of your philosophy seems like the claim that your principle also applies to the physical world.

Gabriel: Yes, that's the narrow hypothesis.

Nomura: I think this is at least a reasonable chance to be true.

Gabriel: Yeah. Yes. That would be remarkable, right? That, I think this has real consequences for physics, right?

Nomura: I think so. What we are searching for, i.e., a complete logical framework of whole Nature, may be something that does not exist, but again the only way to scientifically

know it is to keep trying and failing. So, in that sense, what we will be doing must be the same anyway, but it is always good to have in mind the other possibility offered by a big philosophical thinking, which says that failure may not necessarily mean that we are weak but may indicate something fundamental—such a complete framework simply does not exist. This is literally where philosophy and science meet, and it's fun.

Gabriel: Yeah, this is a really fun question. I think we have now achieved an understanding of some of the things I say as a philosopher and things that actually show up in physics that we can continue fully articulating. But if we articulate that, I think this is a philosophy of science that I have never seen. I doubt that the scientific hypothesis that we have formulated and with ramifications and consequences for understanding of science, knowledge, and reality—I doubt that anyone has ever formulated it.

Murayama: So, philosophy of science can be tested experimentally.

Gabriel: Yes. That's the claim. Science can know what science is if it talks to philosophers. Philosophy of science as it is currently practiced in my view is a failure. We need to cooperate and bring actual metaphysics (or rather what I call ontology) and physics together.

Murayama: That's really amazing. Yeah.

Gabriel: So, science itself becomes reflective and thereby we falsify Heidegger's famous claim that science doesn't think. Science itself is a form of philosophy.

Nomura: Yes, I strongly support that idea.

Gabriel: Yeah.

Nomura: Like one branch of

philosophy.

Gabriel: It's a branch of philosophy.

Murayama: I think every scientist would agree with that.

Nomura: Yeah. But it's not completely well articulated because it's slightly person dependent, I mean at a detailed level. The basic theme is probably shared by almost all scientists, but it's very interesting to even study this.

Gabriel: Yes, there is no research project on this, right? I mean...

Murayama: One thing I'm sure you know that some scientists use the word philosophy in a somewhat derogatory fashion.

Gabriel: I know. Yeah.

Murayama: In a negative way.

Gabriel: Stephen Hawking and so on, philosophy is dead and so on. But then they don't define philosophy. So, Stephen Hawking's claim "philosophy is dead" is maximally unscientific, right?

Nomura: Because he didn't define...

Gabriel: "Philosophy" or "science" for that matter.

Murayama: Excluding something he didn't define. That's great.

Gabriel: Yeah. Great! Saying that philosophy is dead is like, well, I don't know what they mean but if they mean that Jesus is dead with the word philosophy, then it's true, he died, if he ever lived. But if they really mean philosophy is dead, then they are saying physics is dead too.

Nomura: Yep, because physics is a form of philosophy. That's what we're talking about. Everything is philosophy!

Gabriel: Yes. Absolutely! So, this remarkable feedback loop, you know... So, science can look upon science within science.

Murayama: That's great. Yeah.

Toward Changing Misconception of Science by General Public

Gabriel: You know this as a scientist, but that has never been built into a philosophy of science. All philosophy of science that I know of is dualistic. They think of science there, philosophy there. So, the scientists do their stuff. They are basically super smart engineers, right? They build machines and figure out things, right?

Nomura: And calculate.

Murayama: That's the perception.

Gabriel: Yeah, that's the perception but that's a terrible perception. That's a terrible misunderstanding.

Murayama: Right, exactly! I strongly oppose that.

Nomura: Yeah. That's not what science is.

Gabriel: No, no way.

Nomura: But on the other hand, many scientists seem to be just doing that, so that's why this kind of interaction is interesting and potentially useful because science is not just engineering or calculations.

Gabriel: No, even though you need to do that. You might behave like that but that doesn't mean that what you are doing is that. If we achieve this level of self-reflection, then a lot of public perceptions of both philosophy and science would totally change. And given that modernity—modern democracy and so on—is logically drawing on technology and science but with a bad understanding of what that is, what we are doing now has much bigger consequences than merely answering a certain problem. If you articulate this in the right way... Think of the social consequences if we brought actual science and actual theoretical philosophy together!

Murayama: That's really important too because there was actually

new study of truth waves I have seen, which talks about how public perceives science. By and large, people tend to trust science. That's the sort of what comes up in the survey, but they clearly state that they feel decoupled from science because they don't know what scientists are actually doing and how they are thinking and so on and so forth. They aren't quite sure whether they can really trust the stuff. So, that disconnect is actually causing social problems.

Gabriel: Yes. A real social problem, which in turn becomes a scientific problem when we figure out what the social problem is, so we get this loop back into the picture.

Nomura: Two comments. At the very least, what we have demonstrated today and yesterday is that at least in Japan, there is a public demand. Look at today's event! This was done in a room on the 13th floor of some random building, and yet the room was packed. In our dialogue yesterday*² as well, there was large audience. So, the demand is there.

Gabriel: Yeah. No doubt.

Nomura: The second is that—this is seconding Hitoshi's comment—people may not really know what scientists are doing and how they work. For example, in today's event, someone asked the role of intuition in science, right?

Gabriel: Yeah. Yeah.

Nomura: I said that in doing science we certainly use intuition, but the final outcome, whatever a physical law or alike, should not rely on intuition. And he was like "Wow! That makes things clear!" I thought I just said an obvious thing, but that was eye-opening to someone. So, maybe even intellectual people, like those coming to our events and

asking good questions, may not really know what we are doing and under what philosophy. So, discussion like this in public settings would be very helpful.

Murayama: That's absolutely clear.

Gabriel: I think the demand is very large. I mean the fact that—and it's coming from different directions—... So, I became aware of the power of that demand by being contacted by scientists...

Murayama: Uh-huh.

Gabriel: Yeah, Hitoshi, like you, which confirms exactly. I was invited here, right? So, my activity and your activity overlapped, so that at some point I had an e-mail in my e-mail box. And the fact that I got these invitations means that within the system of science itself, that arises, right?

This must have something to do with the state of the art in science, so science itself is even becoming more reflective, and as it does, it changes its nature. So, there is something very progressive going on right now, and then given that the social system of science is deeply interconnected with modern technology, and therefore democracy and so on, there is this additional feedback loop. So, there are a lot going on, and in Germany there is clearly that demand too.

Nomura: Oh, I also had the third comment. I enjoyed today's dialogue a lot!

Gabriel: That's likely the most certain thing.

Nomura: Yeah. This is really true, confidence level 99.99...

Gabriel: Me too. Yeah. This was great!

Murayama: It has always been a question to myself "what exactly I'm doing?" because the scientific methods have been sort of taught and enforced on me—it didn't come

out of me. Because I'm practicing myself, and it's my life, why I'm doing this and why that is important and what does it mean. I think those questions would keep coming up. And this dialogue was very helpful—it didn't answer those questions, I have to say, but we've been thinking about it.

Nomura: Yes, that's what we can be thinking about. Philosophy is about thinking!

Gabriel: Yeah, philosophy doesn't answer anything! (laugh)

Nomura: Not necessarily, though sometimes it does...

Gabriel: Within the division of labor, my role, I think, as a general philosopher is to look at different pockets of scientific knowledge and then all these feedback loops are starting. And now we are ready in this whole fluctuating network, and we know if we change something

here, then given that it's a field—that's why I have the field metaphor in my philosophy, field of sense—so if you do something in this field, probably there are entanglement phenomena across fields of sense.

Murayama: Okay.

Nomura: Great! Nice meeting you.

Gabriel: Good. We'll continue.

Murayama: Thank you so much, Markus.

Gabriel: Thank you very much.

Kavli IPMU Seminars

→ *continued from page 35*

- | | | |
|---|---|--|
| <p>48. "Holographic RG flows from 7D gauged Supergravity"
Speaker: Alessandra Gnechchi (CERN)
Date: Mar 07, 2019</p> <p>49. "Coulomb branches of symmetrizable quiver gauge theories"
Speaker: Hiraku Nakajima (Kavli IPMU)
Date: Mar 07, 2019</p> <p>50. "Emergent inflation from a Nambu–Jona-Lasinio mechanism in gravity with non-dynamical torsion"
Speaker: Antonino Marciano (Fudan U)
Date: Mar 11, 2019</p> <p>51. "Integrable coupled sigma-models"
Speaker: Benoit Vicedo (U York)
Date: Mar 12, 2019</p> <p>52. "Higgs signatures in primordial non-Gaussianities"
Speaker: Yi-Peng Wu (RESCEU, U Tokyo)
Date: Mar 13, 2019</p> <p>53. "What are derived manifolds?"
Speaker: David Carchedi (George Mason U)
Date: Mar 14, 2019</p> <p>54. "The Inconsistent Universe:</p> | <p>Problems with KiDS, or with LambdaCDM?"
Speaker: Benjamin Joachimi (UCL)
Date: Mar 19, 2019</p> <p>55. "The holographic dual of the Omega-background"
Speaker: Kiril Hristov (Inst for Nuclear Energy and Nuclear Research (INRNE) at Bulgarian Academy of Sciences)
Date: Mar 19, 2019</p> <p>56. "Cosmology with weak gravitational lensing: challenges and opportunities"
Speaker: Elisa Chisari (U Oxford)
Date: Mar 19, 2019</p> <p>57. "The Higgs Trilinear Coupling and the Scale of New Physics"
Speaker: Spencer Chang (U Oregon / National Taiwan U)
Date: Mar 20, 2019</p> <p>58. "Black hole information and Reeh-Schlieder theorem"
Speaker: Kazuya Yonekura (Tohoku U)
Date: Mar 20, 2019</p> <p>59. "How Dark is the Universe? Intensity Mapping in Broadband and Beyond"
Speaker: Yi-Kuan Chiang (Johns Hopkins U)
Date: Mar 22, 2019</p> <p>60. "Maximally supersymmetric backgrounds and partial N=2 →</p> | <p>N=1 rigid supersymmetry breaking"
Speaker: Sergei Kuzenko (U Western Australia)
Date: Mar 25, 2019</p> <p>61. "Nilpotent Goldstino superfields in supergravity and cosmological constant"
Speaker: Sergei Kuzenko (U Western Australia)
Date: Mar 26, 2019</p> <p>62. "The potential of generalized Kahler geometry"
Speaker: Marco Gualtieri (U Toronto)
Date: Mar 26, 2019</p> <p>63. "Are the small parameters in the quark sector related?"
Speaker: Dipankar Das (Lund U)
Date: Mar 27, 2019</p> <p>64. "Alternative Fayet-Iliopoulos terms in supergravity"
Speaker: Sergei Kuzenko (U Western Australia)
Date: Mar 27, 2019</p> <p>65. "Elliptic Artin groups I"
Speaker: Kyoji Saito (IPMU)
Date: Mar 30, 2019</p> <p>66. "Elliptic Artin groups II"
Speaker: Yoshihisa Saito (Rikkyo U), Hiroki Aoki (Tokyo U of Science)
Date: Mar 31, 2019</p> |
|---|---|--|

Extremely Big Eyes on the Early Universe at Kavli IPMU

Alvio Renzini

Associate Scientist, INAF, Astronomical Observatory of Padova

John Silverman

Kavli IPMU Associate Professor

With the advent of giant telescopes 20 - 40m in diameter, the next decade will see a transformational phase for ground-based optical/near-infrared astronomy. The construction of three such telescopes has already started or will soon start: the Thirty Meter Telescope (TMT), the Extremely Large Telescope (ELT), and the Giant Magellan Telescope (GMT), with the Japanese astronomical community being a prominent member of the TMT. To promote alertness on the opportunities they offer for our understanding of the distant Universe, a three-part conference series started with the kickoff meeting at UCLA this past January, followed by the second conference at Kavli-IPMU (March 25 - 29) while the third conference will be held in Rome this September.

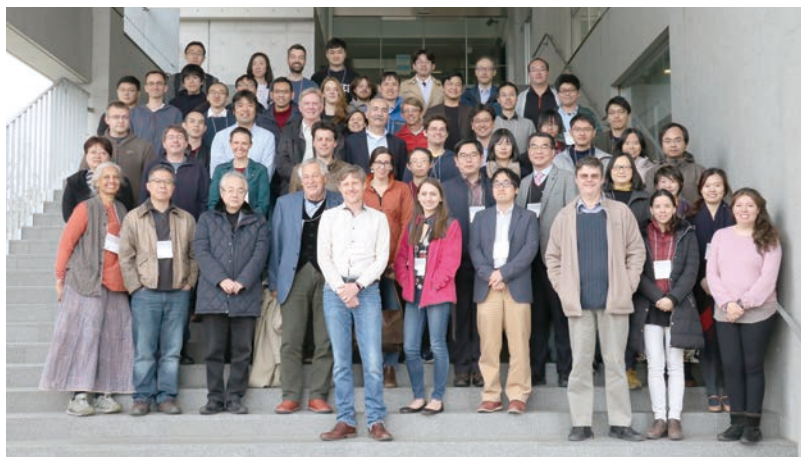
The workshop was attended by over 70 participants from the Asia/Pacific region, US and Europe. The status and capabilities of each telescope were reported, making

clear that, while the ELTs will come after several years of JWST (James Webb Space Telescope) operation, still they will outperform it in various ways. First, being diffraction limited thanks to advanced adaptive optics, they will have 3 to 6 times better spatial resolution, or just 20 - 40 parsecs at redshift = 7. The ELTs will also offer higher spectral resolution, access to shorter wavelengths, higher spectroscopic multiplex and a much longer lifetime.

These unparalleled capacities will allow giant leaps forward in our understanding of first galaxies and cosmic reionization, of the coevolution of galaxies and their central supermassive black holes, of the baryon cycle in and out galaxies feeding star formation and spreading metals out of them, and of physical processes responsible for halting star formation in galaxies. The current state of the art was illustrated in over 50 presentations,

also emphasizing that galaxies must be seen in the context of their large scale environment. In this respect, the large surveys being conducted with Subaru's Hyper-Suprime Cam and in the near future with the Prime-Focus Spectrograph are paving the way for the ELTs. We also heard from theoreticians constructing ever larger and more detailed simulations of galaxies and their need for observational constraints from the next generation of giant telescopes.

Several important issues emerged and were discussed at the conference. How to optimize the three telescopes ensuring they together cover the broadest possible range of capabilities, hence allowing the largest variety of science programs? Indeed, it will not be possible for each individual telescope to support all the instruments that would exploit its large aperture. Therefore, some complementary capability between the three telescopes will be highly beneficial, leaving then to the ingenuity of the science teams to take advantage of them. Thus the ultimate aim of the workshop was to look forward from the current research and prepare for the exciting future opportunities offered to optical and near-infrared astronomy.



Representation Theory, Gauge Theory and Integrable Systems

Hiraku Nakajima

Kavli IPMU Principal Investigator

From Feb. 4 to Feb. 8, 2019, Kavli IPMU hosted a workshop on “Representation theory, gauge theory and integrable systems” organized by Hiraku Nakajima (Kavli IPMU), Francesco Sala (Kavli IPMU), Yuji Tachikawa (Kavli IPMU), and Yutaka Yoshida (Kavli IPMU). It was supported in part by JSPS Grant Number 16H06335 and by financial support from MEXT.

The workshop focuses interfaces among representation theory, gauge theory and integrable systems. There have been numerous connections in recent decades, such as computation of partition functions in gauge theories via representation theory and integrable systems, realization of representations of quantum algebras via moduli spaces in gauge theories, new examples of quantum algebras via gauge theory, and so on. The workshop brought together mathematicians and physicists, including both experts and young people in these related areas from Japan and overseas to discuss new developments and investigate potential directions for future research.

The talks of Nekrasov, Bershtein, and Yamazaki were devoted to relations between 4 or 5 dimensional SUSY (supersymmetric) gauge theories and isomonodromic deformation of differential or difference equations, Painlevé equations. In particular,

solutions of Painlevé equations are described by gauge theory partition functions, and bilinear relations, known as Hirota type equations, are derived from properties of SUSY gauge theories.

The talks of Yanagida and Yang were devoted to Hall algebras of categories of coherent sheaves of certain algebraic varieties. Yanagida used coherent sheaves on abelian surfaces and gave a new proof of the bispectral property of Macdonald-Ruijsenaars difference operators as an application. Yang studied the cohomological Hall algebra for coherent sheaves on \mathbb{C}^3 supported on the union of coordinate 2-planes, and its relation to Yangian of $\widehat{\mathfrak{gl}}(1)$ and the vertex operator algebra recently introduced by Gaiotto and Rapcak.

Hosseini and Okuda discussed the formula of partition functions, given by the localization technique. Hosseini’s talk was devoted to those of 5-dimensional SUSY gauge theories on a toric surface times the circle, and Okuda’s talk was for line operators in 4-dimensional SUSY gauge theories. Kanno explained representation theory of quantum toroidal algebra of $\widehat{\mathfrak{gl}}(1)$, in particular, intertwiners between its Fock representations. They are related to the refined topological vertex, the building block of the refined version of the topological string partition functions

of toric Calabi-Yau 3-folds.

The talks of Gukov and Pei were about construction of modular tensor categories from a class of 4-dimensional SUSY quantum field theories, and relation between representation theories of vertex operator algebras and geometry of Coulomb branches.

McBreen and Hilburn talked about mysterious relations between Higgs and Coulomb branches of 3-dimensional SUSY gauge theories, called symplectic duality. McBreen proposed a categorical version of the Hikita conjecture, which states an equivalence between the categories associated with Higgs and Coulomb branches. One of the categories is supposed to be the derived category of constructible sheaves on the loop space, whose rigorous foundation is a challenging problem. Hilburn explained the relation between symplectic duality and Langlands duality. Langlands duality also appeared in the talk of Hausel, where he explained examples of branes in moduli spaces of Higgs bundles of a group and its Langlands dual, and their relation under the semiclassical limit of the mirror symmetry.

The talks of Kato and Su were devoted to the relation between equivariant quantum K-theory/cohomology and equivariant K-theory/homology of affine Grassmannians.

Kato introduced the third object, the equivariant K-theory of a semi-infinite flag variety, to connect them vigorously. Su, following the idea of Teleman, defined the action of the latter via shift operators acting on quantum cohomology. Affine Grassmannians are associated with finite dimensional complex reductive groups. There is a growing interest in double affine Grassmannians, which are affine Grassmannians for affine Kac-Moody groups. Muthiah explained

an approach to define the analogous double affine flag varieties and their Schubert subvarieties. He discussed Hecke algebras, Bruhat order, etc. in this setting.

Kimura explained a definition of quiver W-algebras associated with a quiver, based on qq-character defined via 4d SUSY quiver gauge theories. The talk of Appel was devoted to an approach to the reflection equation and its solution K-matrices via the category of representations of

quantum symmetric pairs, constructed as quantization of small K-matrices.

It was unfortunate that a few invited speakers canceled their visits at the last moment. But participants told us that it was an exciting and fruitful workshop with many interesting talks on hot topics. Personally, I was very happy to have a discussion on Coulomb branches of gauge theories, and started a collaboration with participants.



Workshop

Interdisciplinary Approach to Cancer Therapy

Pietro Caradonna

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

Shin'ichiro Takeda

Kavli IPMU Assistant Professor

An important movement towards discussion of urgent issues faced by modern cancer research began on the 27th of March. 70 researchers from 8 countries participated in a workshop called the "Interdisciplinary approach of applying cutting-edge technologies at the frontier of cancer research". Its objective was to understand the challenges of eradicating cancer, and to report on the latest developments of cutting-edge technologies used in clinical applications.

Professor Tadayuki Takahashi, a committee organizer and Principle Investigator at Kavli IPMU, opened this inaugural workshop. Addressing an audience consisting of scientists from the field of nuclear medicine, chemistry, physics, engineering, and pharmaceutical sciences, Professor Takahashi asked: "how can we all work together to help physicians establish new treatment for advanced cancers in order to boost cancer survival rates?"

Over the course of 2 days, 16 world-leading interdisciplinary scientists presented their current and future research activities to stimulate new ideas. We heard from eminent medical doctors about current state of affairs in cancer treatment and research. For instance, in Japan over 30% of cancer

patients have advanced cancer when diagnosed, and only 14% of stage IV cancer patients will survive after five years using current technologies and treatment.* With the objective of eradicating cancer at the cellular level, Professor Hideyuki Saya from the Division of Gene Regulation at the Institute for Advanced Medical Research at Keio University School of Medicine discussed the need for new methods and technologies which can be used to distinguish between cancer stem cells in order to eliminate both the cancer stem cells themselves and their derivatives.

Particle accelerators play a crucial role in cancer therapy and in the production of radio pharmaceuticals. The Paul Scherrer Institute in Switzerland use proton therapy with remarkable success, treating more than 7,000 patients with a 98% cure rate, while in Japan, RCNP, Osaka Univ. has started Astatine-211 production by cyclotron aiming for new alpha-ray therapy. The development of a new 100-million-dollar radio pharmaceutical facility will be completed by 2023 at TRIUMF in Canada for the purpose of developing advance rare isotope. These movements will inevitably lead to the development of new detection

systems.

A recurring theme during the Workshop was highlighting the transferrability of technology and methods developed in high energy physics experiments and in the field of astrophysics to the field of medical imaging. The advancement and present limitations of fast detectors, digital photon counting through to the application of machine learning for signal processing, data analysis and optimized readout algorithms were discussed.

Future development of high energy resolution detectors and reaching beyond the 100 micrometer scale, and visualization of in vivo multiple drug delivery system to boost survival rates is underway at Kavli IPMU. Energy resolution is essential for multi-probe visualization, and particularly for imaging the alpha-emitting cancer therapy isotope Astatine-211 of which there is active collaboration between Kavli IPMU and the National Cancer Center at Kashiwanoha, Japan where experiments for detecting

* T. Matsuda et al., Research Group of Population-Based Cancer Registries of Japan. Population-based survival of cancer patients diagnosed between 1993 and 1999 in Japan: a chronological and international comparative study. *Japanese Journal of Clinical Oncology* 2011; 41: 40-51.

Astatine-211 are currently being performed.

It will likely require new benchmarks of human ingenuity to overcome the unique hurdles facing cancer research. An obvious catalyst for ingenuity is

to bring together interdisciplinary researchers from across the World to create new and novel imaging devices to detect the radio pharmaceuticals and just as importantly to also understand what we are seeing.

With that in mind, the organizing committee is pleased to announce that the "INTERdisciplinary Approach to Cancer Treatment (INTERACT)" will be held annually, with the next event being held in France in 2020.



The participants of the inaugural workshop titled "Interdisciplinary approach of applying cutting-edge technologies at the frontier of cancer research" to discuss urgent issues in modern cancer research and to report on the latest developments of cutting-edge technologies used for clinical applications.

Hitoshi Murayama Named University Professor

On March 27, 2019, the University of Tokyo announced that Kavli IPMU Principal Investigator Hitoshi Murayama had been given the new title of University Professor. The university established this new title to recognize important individuals within the institution who are making significant contributions to his or her academic field internationally, and who are continuing to lead research activities that will contribute to further developments in their field in the future. Murayama is one of four academics to be given this title, which took effect from April 1.



Hitoshi Murayama

Masami Ouchi Awarded 15th JSPS Prize and Japan Academy Medal

Masami Ouchi, University of Tokyo Institute for Cosmic Ray Research Associate Professor and Kavli IPMU Scientist, was awarded the 15th JSPS (Japan Society for the Promotion of Science) Award and the 15th Japan Academy Medal in recognition of his work



Masami Ouchi

“Observational Studies of the Early Universe with Ly α Emitters.” An award ceremony was held at The Japan Academy on February 7, 2019.

The JSPS Prize recognizes young researchers with fresh ideas, who have the potential to become world leaders in their field. The purpose of the Japan Academy Medal is to honor outstanding young researchers. Up to six awardees (6 researchers this year) are selected every year from among the annual winners of the JSPS Prize (25 researchers this year).

Masamune Oguri Awarded This Year's Hayashi Chushiro Prize

Masamune Oguri, the University of Tokyo Research Center for the Early Universe Assistant Professor and Kavli IPMU Associate Scientist, has been awarded the fiscal year 2018 Hayashi Chushiro Prize.

The prize recognizes researchers who have made significant contributions to planetary science, astronomy, or astrophysics, and has been awarded since 1996 by the Astronomical Society of Japan. The prize itself was made to commemorate the lifetime achievements of outstanding Japanese theoretical astrophysicist Chushiro Hayashi.

Oguri has been recognized for his contribution to the fundamental understanding of gravitational lensing in astronomy. He has for a long time studied gravitational lensing from a theoretical and observational point-of-view, which has provided valuable insight into studies in cosmology and astronomy.

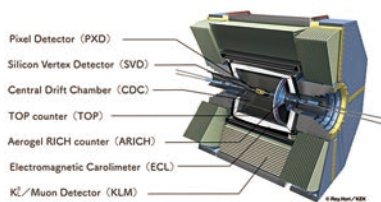


Masamune Oguri

Belle II Experiment Starts Taking Data

Kavli IPMU is participating in the Belle II experiment hosted by KEK. It is an asymmetric electron-positron colliding beam experiment aiming to find new physics beyond the standard model. On March 11, 2019, it was announced the “SuperKEKB” project had started “phase 3,” which meant taking and analyzing real electron-positron collision data.

The SuperKEKB project has involved two major ingredients. One is upgrading the asymmetric electron-positron colliding-beam accelerator KEKB, which was in operation between 1999 and 2010 and broke the world record for electron-positron collision frequency (called luminosity), to the SuperKEKB accelerator. The new accelerator has 40 times higher design luminosity than its predecessor. The other is a new detector called Belle II, placed around the collision point. The project has been moving towards completion, achieving several milestones on the way, which have been called phases 1, 2, and 3. In phase 1, the SuperKEKB accelerator had its first successful test run in February 2017. For phase 2, researchers successfully installed components, including the Belle II detector, into the accelerator. They carried out an electron-positron collision in March 2018 and observed the first collision event by the Belle II detector in April that year. Then, the BEAST (a dedicated detector system for machine commissioning) in the heart of the Belle II detector was replaced with the Vertex Detector (VXD), inching the project towards taking its first real data in the phase 3 period.



The Belle II detector (Credit : Rey,Hori/KEK).

The VXD is particularly important because it will analyze the particles and anti-particles in detail, looking for differences in behavior. If an undiscovered particle such as dark matter does exist, it is likely the VXD would play an important role in its discovery. Such a finding would open a new world of physics. Kavli IPMU researchers had finished constructing and commissioning a part of the Silicon Vertex Detector (SVD), which resides inside the VXD, in May last year (see *Kavli IPMU News* No. 42, p. 17).

The researchers will continue to contribute to the project, analyzing the new data that is about to come in, and hopefully uncover a new branch of physics.

Kavli IPMU / ELSI / IRCN 4th Joint Public Lecture: "A Question of Origins"

On January 20, 2019, the 4th Public Lecture series "A Question of Origins" was held at the Miraikan in Odaiba, Tokyo. The first three events of this public lecture series had been jointly hosted by the two WPI centers Kavli IPMU and the Tokyo Institute of Technology's Earth-Life Science Institute (ELSI). This year, the University of Tokyo's International Research Center for Neurointelligence (IRCN), a new WPI center selected in 2017, joined as a co-hosting institute. Kavli IPMU, ELSI, and IRCN respectively pursue the origin of the Universe, the origin of the Earth and life, and the origin of human intelligence. These

three WPI centers planned this public lecture as an event to convey the latest findings of their research in an easy-to-understand way, as well as to offer a diverse range of perspectives under a common theme "A Question of Origins," which is fundamental to mankind.

After an opening address by WPI Program Director Akira Ukawa, ELSI Project Associate Professor Yutetsu Kuruma talked about "understanding the origin of life by an artificial cell synthesis." IRCN Principal Investigator Kuniyoshi Sakai talked about "the origin of human intelligence," and Kavli IPMU Principal Investigator Hiraku Nakajima talked about "a geometrical approach to the origin of the universe."



Kavli IPMU Principal Investigator Hiraku Nakajima giving a talk.

After the lectures, the three speakers took part in a round table discussion entitled "What does it mean to question origins?" which was moderated by Yukihiro Nobuhara, Professor of the Graduate School of Arts and Sciences, the University of Tokyo, who specializes in philosophy of mind. Finally, there was a discussion between the lecturers and the audience, and the event ended successfully.



Round-table discussion. From left to right: Yukihiro Nobuhara, Yutetsu Kuruma, Kuniyoshi Sakai, and Hiraku Nakajima.

AAAS 2019 Annual Meeting in Washington D.C.

The American Association for the Advancement of Science (AAAS) 2019 annual meeting was held at the Marriot Wardman Park in Washington D.C. from February 14 through 17, 2019. At this AAAS annual meeting, the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), and the WPI centers including the Kavli IPMU jointly hosted the WPI booth for three days starting February 15 to raise global visibility of the WPI program, and make the WPI centers better known by overseas researchers so that they recognize the WPI centers as a place to do their research. During the three days, the WPI booth was visited by about 120 people, including researchers, journalists, and students.

Kavli IPMU Seminars

1. "The activation of black holes and the accretion rates onto them depend both on gas fraction and bulge types"
Speaker: Hassen Yesuf (KIAA Beijing)
Date: Jan 10, 2019
2. "Binary neutron star formation and the origin of GW170817"
Speaker: Chris Belczynski (Nicolaus Copernicus Astronomical Center, Polish Academy of Sciences)
Date: Jan 15, 2019
3. "Melonic supertensor models"
Speaker: Chi-Ming Chang (UC Davis)
Date: Jan 15, 2019
4. "Compensating strong coupling with large charge - Part I"
Speaker: Susanne Reffert (U Bern)
Date: Jan 15, 2019
5. "Decaying particles at the MeV

- scale: connection to dark matter, BBN and the CMB”
 Speaker: Sebastian Wild (DESY)
 Date: Jan 16, 2019
6. “From Galaxy Zoo to LSST: Citizen Science and the rise of the machines”
 Speaker: Chris Lintott (U Oxford)
 Date: Jan 16, 2019
 7. “The progenitors of core-collapse supernova explosions”
 Speaker: Carl Fields (Michigan State U)
 Date: Jan 17, 2019
 8. “Compensating strong coupling with large charge - Part II”
 Speaker: Domenico Orlando (INFN)
 Date: Jan 17, 2019
 9. “An exploratory study of Higgs-boson pair production at hadron colliders”
 Speaker: Chih-Ting Lu (NCTS Taiwan)
 Date: Jan 17, 2019
 10. “Graph neural network for stop pair and tt productions at the LHC”
 Speaker: Jin Min Yang (ITP, Beijing)
 Date: Jan 18, 2019
 11. “Classifying 5d SCFTs using Calabi-Yau 3-folds”
 Speaker: Patrick Jefferson (Harvard U)
 Date: Jan 22, 2019
 12. “The derived Riemann-Hilbert correspondence”
 Speaker: Mauro Porta (U Strasbourg)
 Date: Jan 22, 2019
 13. “Partially Composite Supersymmetry”
 Speaker: Tony Gherghetta (U Minnesota)
 Date: Jan 23, 2019
 14. “The Swampland Conjectures and some Physics Implications”
 Speaker: Luis Ibanez (UAM)
 Date: Jan 24, 2019
 15. “The Restless Universe (How the Periodic Table Got Built up)”
 Speaker: Shri Kulkarni (Caltech)
 Date: Jan 24, 2019
 16. “Black hole entropy and (0,4) SCFTs from F-theory”
 Speaker: Kilian Mayer (U Utrecht)
 Date: Jan 29, 2019
 17. “Supersymmetric Super-GUT Models”
 Speaker: Jason Evans (KIAS)
 Date: Jan 30, 2019
 18. “Recent progress of Volume Conjectures”
 Speaker: Qingtao Chen (NYU, Abu Dhabi)
 Date: Jan 31, 2019
 19. “Imprint of double-detonation mechanism in early light curves for Type Ia supernovae”
 Speaker: Petr Baklanov (ITEP Moscow)
 Date: Jan 31, 2019
 20. “Galaxies and their dark matter halos, an observer’s perspective”
 Speaker: Alessandro Sonnenfeld (Leiden U.)
 Date: Jan 31, 2019
 21. “The epoch of reionization with the Prime Focus Spectrograph”
 Speaker: Sune Toft (DAWN, Copenhagen)
 Date: Feb 01, 2019
 22. “Highest weight categories and exact categories”
 Speaker: Agnieszka Bodzenta (U Warsaw)
 Date: Feb 01, 2019
 23. “Limit on the Axion Decay Constant from the Cooling Neutron Star in Cassiopeia A”
 Speaker: Jiaming Zheng (U Tokyo)
 Date: Feb 06, 2019
 24. “Precision Cosmology from Gravitationally Lensed Supernovae”
 Speaker: Peter Nugent (LBNL)
 Date: Feb 07, 2019
 25. “Motivic Chern classes and Iwahori invariants of principal series”
 Speaker: Changjian Su (U Toronto)
 Date: Feb 12, 2019
 26. “Challenges for cosmology in the swampland era”
 Speaker: Pablo Soler (Heidelberg U)
 Date: Feb 12, 2019
 27. “Representations of quivers over Frobenius algebras”
 Speaker: Tamas Hausel (IST Austria)
 Date: Feb 12, 2019
 28. “Non-standard electroweak phase transitions in extensions to the standard model: Monopoles and Scale invariance”
 Speaker: Suntharan Arunasalam (U Sydney)
 Date: Feb 12, 2019
 29. “Recent advances in lattice weak matrix elements for searching new physics”
 Speaker: Amarjit Soni (BNL)
 Date: Feb 13, 2019
 30. “A stack of broken lines, associativity, and Morse theory of a point”
 Speaker: Hiro Tanaka (MSRI Berkeley)
 Date: Feb 14, 2019
 31. “Leptogenesis via Neutrino Oscillation”
 Speaker: Yuta Hamada (Crete center for theoretical physics, U Crete)
 Date: Feb 15, 2019
 32. “Studying QCD modeling of uncertainties in photon spectra from dark matter annihilation”
 Speaker: Adil Jueid (Shanghai Key Laboratory for Particle Physics and Cosmology, Shanghai Jiao Tong U)
 Date: Feb 15, 2019
 33. “Schrödinger, Klein-Gordon and Dirac equations, atomic wave functions and operator product expansion”
 Speaker: Yu Jia (IHEP, Beijing)
 Date: Feb 18, 2019

34. "Fundamental physics with multi-messenger cosmology"
Speaker: Alvise Raccanelli (CERN)
Date: Feb 18, 2019
35. "The fundamental plane for Gamma-Ray Burst X-ray afterglows"
Speaker: Maria Dainotti (Jagiellonian U / Stanford U)
Date: Feb 19, 2019
36. "Towards new science with LSST: Tools and techniques for mining large datasets"
Speaker: Mario Juric (U Washington)
Date: Feb 21, 2019
37. "Intrinsic Mirror Symmetry"
Speaker: Mark Gross (U Cambridge)
Date: Feb 25, 2019
38. "Flux compactifications and the hierarchy problem"
Speaker: Wilfried Buchmuller (DESY)
Date: Feb 25, 2019
39. "Towards a 5-sigma constraint on the sum of the neutrino masses"
Speaker: Francisco A. V. Navarro (Center for Computational Astrophysics, Flatiron Inst)
Date: Feb 25, 2019
40. "Holographic Complexity in the Jackiw-Teitelboim Gravity"
Speaker: Kanato Goto (U Tokyo)
Date: Feb 26, 2019
41. "Mimetic Gravity: Pros and Cons"
Speaker: Mohammad Ali Gorji (Inst for Research in Fundamental Sciences)
Date: Feb 26, 2019
42. "Tabletop experiments using light and atom"
Speaker: Shoji Asai (U Tokyo)
Date: Feb 27, 2019
43. "Firewalls in General Relativity"
Speaker: Surjeet Rajendran (UC Berkeley)
Date: Feb 28, 2019
44. "Broad composite resonance and its signals at the LHC"
Speaker: Ke-Pan Xie (Seoul National U)
Date: Mar 01, 2019
45. "Integrated approach to cosmology"
Speaker: Andrina Nicola (Princeton U)
Date: Mar 01, 2019
46. "Equivalent Calabi-Yau manifolds via GLSM"
Speaker: Michal Kapustka (Inst of Mathematics, Warsaw)
Date: Mar 05, 2019
47. "Black hole entropy, hyperbolic 3-manifold and analytic torsion"
Speaker: Dongmin Gang (Seoul National U)
Date: Mar 05, 2019
- continued on page 26 →**

Personnel Changes

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 Professor Tsutomu Yanagida [October 1, 2007 – March 31, 2017 as an IPMU/Kavli IPMU Principal Investigator and April 1 2009 – March 31, 2019 as an IPMU/Kavli IPMU Professor] moved to Shanghai Jiao Tong University as a Distinguished Chair Professor.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Chengcheng Han [September 16, 2015 – March 31, 2019] moved to Nanjing Normal University as a postdoctoral fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Akishi Ikeda [April 1, 2015 – March 31, 2019] moved to Osaka University as a Specially Appointed Associate Professor (Part time).

Kavli IPMU postdoctoral fellow Shigeki Inoue [April 1, 2016 – March 31, 2019] moved to NAOJ as a

project researcher.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Miho Ishigaki [April 01, 2013 – August 31, 2015 as a JSPS postdoctoral fellow, and then – January 31, 2019 as a Kavli IPMU postdoctoral fellow] moved to Tohoku University as a project researcher.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Michihisa Takeuchi [October 1, 2014 – March 31, 2019] moved to the center for Theoretical Studies, Nagoya University as an Associate Professor.

JSPS postdoctoral fellow Naonori Sugiyama [November 1, 2014 – March 31, 2016 as a Kavli IPMU postdoctoral fellow, and then – March 31, 2019 as a JSPS postdoctoral fellow] moved to NAOJ as a Project Assistant Professor (NAOJ Fellow).

Editor's Note

As announced on page 3, this is the last issue of Kavli IPMU News. The editor thanks all the readers of this magazine. Since the launch of IPMU, many administrative members contributed in publishing IPMU News / Kavli IPMU News. I would particularly like to thank Rika Tanaka and Miyuki Onuki, who served as assistant editors during certain periods, Fusae Miyazoe, Tomomi Hijikata, Marina Komori, and Motoko Kakubayashi, who served as members of the public relations team, Aya Tsuboi, who uploaded the magazine online, Yuuko Enomoto, Midori Ozawa, Akiko Fujita, and Rieko Tamura, who provided various information, and Kayoko Kubota, Ayako Nakada, Mika Miura, and Shoko Ichikawa, who managed the list of mailing addresses for IPMU News / Kavli IPMU News.

Editor: Kenzo Nakamura

Black Hole Shadow

Shiro Ikeda

Professor, The Institute of Statistical Mathematics, The Research Organization of Information and Systems, and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

On 10 April 2019, in six coordinated press conferences around the world, an image of a black hole shadow was released as the first result of the Event Horizon Telescope. I have been involved in the project for around six years and am proud of this result.

The project was challenging not only for astronomy but also for data science. We needed new imaging methods for this very-long-baseline interferometer and that is why some data scientists, including me, have been involved in the project.

As was the case for the EHT, data science will become more important in astronomy and physics. I hope I can make a good contribution to IPMU as a data scientist.



The Event Horizon Telescope Collaboration

Announcement

Kavli IPMU Newsは、2008年3月発行の創刊号以来、著しい発展を遂げたIPMU / Kavli IPMU と共に長い道のりを歩んできましたが、このNo. 45をもって刊行を終了致します。これまでご愛読いただきました皆様、ご支援いただきました皆様に心より感謝申し上げます。

編集担当

Message from Readers

さまざまな取材でお世話になりました。誠にありがとうございました。前機構長の村山斉先生にはこの4月から、ご多忙な責務から（少しだけ？）解放されたチャンスをつかまえ、朝日新聞朝刊でコラム連載をいただいております。この春に新設した「教養面」のページで、隔週水曜日の掲載。題して「村山斉の時空自在」です。今後ともよろしく願います。

朝日新聞社・科学医療部
伊藤隆太郎

本誌がついに45号で終巻となると聞きました。Webによる広報発信が主流になってゆく流れの中で、格調高い形式と内容を崩さず、いつも表紙に「研究者の顔」を大きなサイズで掲げたKavli IPMU News は、新着書架に並んでいるだけで、思わず「なんだこれは」と人の手に取らせる圧倒的な力を持っていました。形式的に完全なバイリンガル構成であったこともユニークな特長でした。最先端の研究成果の解説、著名な研究者へのインタビュー、各種イベントのニュースなどがあり、手に取った人は必ずいくつかの記事に目を通したくなったことと思います。また、表紙の「顔」に加えて、新たに加わ

ったメンバーの顔も研究内容とともに毎号掲載され、内外に向けて組織の発展のアピールに貢献しました。

私も14号ではインタビューでIPMU 誕生前夜の話をし、35号ではRobert Williams 氏とのRound Table Talkで、宇宙の加速膨張の発見とハッブル宇宙望遠鏡の関わりの舞台裏を聞き出すことができました。何もないところから誕生して以来10年あまり、Kavli IPMUと共にありその発展を支えてきた flagship 広報誌がなくなることには一抹の寂しさを感じます。チーフエディターの中村健蔵さんをはじめとして長年発行に尽力された方々に心から敬意を表します。

東京大学名誉教授
岡村定矩

IPMU News は機構の発展と共に多くの忘れ難い出来事や研究上の重要な情報が詰まっている、IPMU の成長アルバムです。ゼロからスタートした IPMU が「目に見える国際研究拠点」として猛スピードで発展する姿を可視化する大きな役割を果たして来ました。

私がかつて在籍していた IPMU 事務局は『研究者天国』を作るために誕生した WPI 拠点特有の組織で

す。スタッフは、従来の国立大学では考えられないような自由な発想を持って、未知の領域に挑戦する機会を与えられました。そのような事務職員の姿も時には誌面に登場し、ユニークでチャレンジングであった事務部の様子をも垣間見ることができました。

IPMU News が今回で最終号となることは非常に残念ですが、50年後、100年後に Kavli IPMU の輝かしい業績を振り返る時、まず最初に紐解かれるバイブルとなるものと確信しています。そして、私が現在在籍している本学二つ目のWPI 拠点であるニューロインテリジェンス国際研究機構 (IRCIN) においても IPMU のチャレンジ精神を受け継ぎ、IPMU News とはまた違った方法で目に見える足跡を残していく積りです。

東京大学ニューロインテリジェンス
国際研究機構 (IRCIN) 副事務長
小澤みどり

第45号が最後というアナウンスには気がつきませんでした。悲しい知らせです... この雑誌がとても好きでした。

Tea Break コーナーに思いついた最後の原稿を送ります。^{*}

ミネソタ大学数学科教授
アレクサンダー A. ボロノフ

^{*} 41 ページに掲載。

新物理探査の橋頭保としての暗黒物質研究

新物理はどこに?

素粒子物理学の分野では、前世紀から今世紀にかけ、いかに自然に電弱対称性の破れのスケール、つまり基本的な力から弱い力と電磁気力が生じるエネルギースケール（弱い力を媒介するウィークボゾンの質量程度、1000億電子ボルト = 100 GeVのエネルギースケール）を自然に説明するのか、を主な指導原理として発展してきました。この文脈において活発に議論されたトピックが、超対称模型、余剰次元模型、複合ヒッグス模型であり、これらを検証するための実験や観測がこれまで行われ、また現在も続いています。しかし、近年の大型ハドロン加速器実験（LHC）をはじめとする様々な実験において、これら新物理の確かな証拠を見つけられないこともあり、この指導原理に疑義が生じています。確かに電弱対称性の破れのスケールは自然に説明されるべきですが、これまでに提案されてきた模型とはかなり異なった機構やアイデアで説明されるのでは? という疑義です。ごく最近ではこの考えに沿った研究も盛んになってきましたが、未だ皆が納得す決定的なアイデアの提案には至っていません。

注目される暗黒物質の正体解明

そこで注目されつつあるのが、暗黒物質の正体解明を指導原理として素粒子物理学を発展させる戦略で

す。暗黒物質は、1934年にフリッツ・ツビッキー博士により銀河団内の銀河の運動を説明するための未知なる物質として導入され、今世紀に入り宇宙背景放射の揺らぎ観測等を通じその存在が確立しましたが、その具体的な性質については未だ不明です。更に、素粒子標準模型の枠内に暗黒物質の候補となり得る素粒子、あるいはそれらから構成される物質は存在しません。そのため、暗黒物質の正体が解明されれば、それを橋頭保として新物理探査へと船出することが可能となります。つまり、まずはあらゆる手法を用いて暗黒物質の正体を明らかにし、そして標準模型の背後に存在する新物理探査を行おう、という戦略です。

ここで、暗黒物質の性質について現在までに分かっている主なことについてまとめておきます。まず、暗黒物質は電氣的に中性です。もちろん、暗黒物質粒子が非常に微小な電荷を持つことや、とても重い場合に多少の電荷を持つことは許されますが、このような極端な例について今回は考えないことにします。次に、暗黒物質は少なくとも零でない質量を持ち、現在の宇宙で（スピードが光速に比べ十分に小さい）非相対論的に運動しています。また、宇宙の年齢（約130億年）に比べて十分に長い寿命を持っています。更に、通常の物質と殆ど反応（相互作用）をしません。最後に、定量的な知見として、宇宙に存在する暗黒物質の平均質量密度（1立方センチメートルあたりの質量、通称暗黒物質質量）が約 $2 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ であることも知られ

ています。

しかしながらこれらの知見を踏まえても得られている情報は決して多いとは言えず、例えば暗黒物質が未知なる素粒子であると仮定したとしても、その質量が 10^{-55} gから 10^{-5} gの50桁の範囲にある、といった大雑把なものが導き出せるのみです。このような広範囲の質量にわたって暗黒物質の正体を実験的に探ることは不可能ですので、現在では幾つかの有力な仮説に基づいてその検出が試みられています。有名な仮説としては熱的暗黒物質仮説、アクシオン仮説、ステライル・ニュートリノ仮説、原始ブラックホール仮説等が挙げられますが、これまでのところ熱的暗黒物質仮説に基づいた探査が最も精力的に行われているため、本稿ではこの仮説に焦点を当て、その現状について要点を絞って解説したいと思います。

熱的暗黒物質仮説

熱的暗黒物質仮説とは「暗黒物質が（未知なる）素粒子であり、現在観測されている暗黒物質量は凍結機構により説明される」とする仮説です。凍結機構とは何かというと、宇宙初期において暗黒物質は他の物質との反応を通じて熱化学平衡にありましたが、やがて平衡を保とうとする反応率が宇宙の膨張率を下回ることで、その暗黒物質量（平均質量密度）が決定されたとする機構のことです。この様子を図示したもの

が図1です。ここで、暗黒物質の質量 m と宇宙の温度 T はいずれもエネルギーの単位で表されるものとします。宇宙の温度が暗黒物質の質量と同程度の時には暗黒物質量が熱化学平衡時のものと一致していますが、やがて温度が暗黒物質の質量の数10分の1以下に下がるとその量が平衡時のものからずれ、最終的に一定数残ることが見て取れます。同様の凍結機構が初期宇宙におけるビッグバン軽元素合成や宇宙の晴れ上がりにも適応され成功を収めていることもあり、それを暗黒物質質量に応用したものが熱的暗黒物質仮説の本質であることから、これは極めて自然な仮説と言えます。特に暗黒物質の質量が、上述の電弱対称性の破れのスケールと同程度の場合、この仮説を満たす暗黒物質はWIMP（Weakly Interacting Massive Particle）とも呼ばれ、具体的な標準模型を超える新物理の観点でも盛んに議論されています。

熱的暗黒物質は初期宇宙において他の物質と熱化学平衡にあったと仮定されるため、必然的に標準模型の素粒子と相互作用を持ちます。熱的暗黒物質の検出は、まさしくこの事実を当てに行われます。問題は標準模型のどの素粒子と相互作用を持つのかですが、それにより検証戦略も異なってきます。そこで、熱的暗黒物質を包括的に探査するため、その量子数に基づいた系統的な分類が行われます。量子数とは自然に存在する力に対する“電荷”のことであり、具体的には電磁気力における電荷が例として挙げられます。

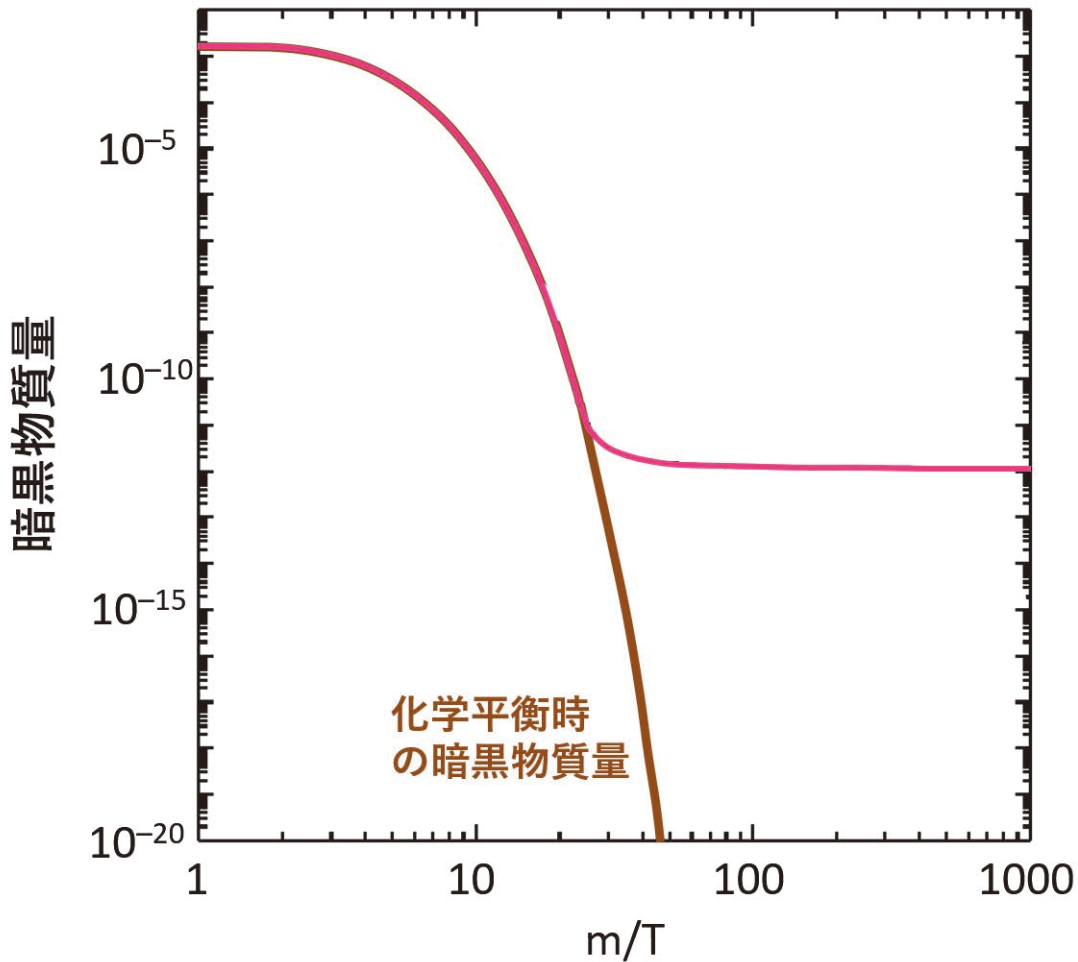


図1：熱的暗黒物質仮説における暗黒物質質量（暗黒物質と輻射の数密度比）の典型的な振舞い。ここで m は暗黒物質の質量、 T は宇宙の温度で、共にエネルギーの単位で表されるものとする。

上述の通り熱的暗黒物質は電気に中性であり、また強い力に対する電荷（カラー荷）を持つならば既に発見されているはずであるという事実を考慮しますと、ここで注目すべきは弱い力と重力に対する量子数ということになります。弱い力に対する量子数は弱荷と呼ばれ、重力に対する量子数（の一つ）はスピンです。

重力に対するもう一つの量子数は質量に他なりません。これは弱荷やスピンで熱的暗黒物質を分類した後に、計算により予言される暗黒物質質量が近年の宇宙観測の結果を再現するべしという要請からその範囲が導かれます。つまり熱的暗黒物質の質量は、この分類において従属的なアウトプットとなります。

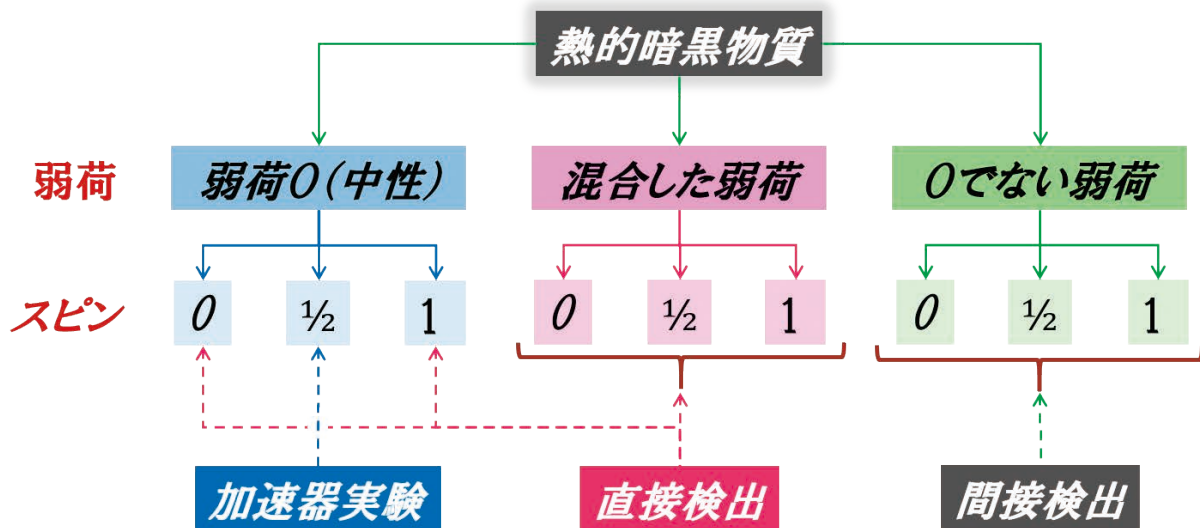


図2：熱的暗黒物質の分類と、それぞれのケースにおける有効な検出方法。

熱的暗黒物質の分類

熱的暗黒物質をその弱荷とスピンの基づいて分類したものを図2にまとめます。まず熱的暗黒物質の弱荷に関して、基本的には1/2を単位に 0、1/2、1、…の値のいずれかを持ちますが、例外が存在します。それは異なる弱荷が混じった（例えば弱荷 0と1/2 が混じった）ケースです。親しみのある電磁気学を例にとりますと、電荷0と電荷1が混じった素粒子を考えることに相当します。この混合は電弱対称性の自発的な破れに伴い引き起こされるのですが、もちろんこれは弱い力でのみ起こり電磁気力や強い力では起こりません。その結果、弱荷が0（弱い力に対して中性）である、特定の0でない弱荷を持つ、混合した弱荷を持つ3種類に分類されます。一方、熱的暗黒物質のスピンの関しては、暗黒物質と標準模型の素粒子との相互作用の

強さを保証する「繰り込み可能な相互作用」を念頭に置きますと、0、1/2、1の3種類に限定されます。相対論的場の量子論の特性により、熱的暗黒物質の弱荷（あるいはその混合）とスピンを決めることで標準理論の素粒子達との相互作用、つまりラグランジアンが一意に決まり、各々のケースについて熱的暗黒物質を系統的かつ定量的に探査することが可能となります。

分類に基づく熱的暗黒物質の検出法

上述の熱的暗黒物質の分類はKavli IPMUにおいて素粒子現象論を主に研究する研究者達により提案されたもので、現在では、種々の熱的暗黒物質が具体的にどのように検出され得るのかについて、様々な実験グループとの議論や共同研究を通して研究が進展しています。これらの議論からまとめられた、各々の熱的暗

黒物質のケースにおける最も有効と思われる検出実験についても図2に示してあります。

まず弱荷が混合したケースでは、その混合の起源となる相互作用が、熱的暗黒物質粒子とヒッグス粒子（あるいは弱い相互作用を媒介するZ粒子）との結合を呼び、必然的に核子との散乱が大きいと予言されます。そのため、地下実験における直接検出探査が非常に有効となり、実際、世界各国において精力的にそれらの実験が進められています。また、Kavli IPMUも参加している日本のXMASSグループが参加を決定したXENONnT 実験^{*1}をはじめとして、大型の直接探査実験計画が提案され、そして承認されており、もし暗黒物質がこのケースに相当するならば近い将来に検出されることが期待されます。

次に、特定の0でない弱荷を持つケースでは、一般にその質量が陽子の数千倍と予言され、加速器実験における探査が難しくなります。一方、筆者らにより暗黒物質の自己対消滅がゾンマーフェルト効果^{*2}により著しく増大することが明らかにされ、間接検出実験がその探査に大変に有効となることが判明しています。特に日本とドイツのCTAグループ^{*3}による（天の川銀河の）伴銀河のガンマ線観測が注目されています^{*4}が、暗黒物質を高感度で探査するためには、伴銀河内の暗黒物質分布に関する詳細な情報が必要となります。この点については、日本のすばる望遠鏡を用いた分光観測計画 PFS（Kavli IPMUが推進主体）が重要な役割を果たします。更に地下実験における直接探査が第3世代（XENONnTの次世代であるDARWIN実験^{*5}等）に移行した際には、このケースの熱的暗黒物質も探査可能となり、これら将来実験の実現が望まれます。本ケースの熱的暗黒物質は、LHC実験におけるヒッグス粒子発見後に特に注目されたアノマリー伝達機構に基づいた超対称模型^{*6}（Pure Gravity Mediation 模型等）において予言されており、暗黒物質の間接探査や直接探査における検証が喫緊の課題となっています。また幾つかの新物理模型においては、凍結機構のみならず他の非熱過程においても本ケースの暗黒物質が生

成されるシナリオが議論されており、その際にはテラスケール（1兆電子ボルト=1 TeVのエネルギースケール）のみならず電弱対称性の破れのスケールの質量領域の探査も大事になります。この場合、将来におけるLHC実験や国際線形加速器実験（ILC）等の将来レプトン加速器実験での探査が重要となります。

最後に、弱荷を持たないケースでは、そのスピニングが0や1のときは核子との散乱が大きく予言され、弱荷が混合したケースと同様に地下実験における直接探査が有効となります。一方、スピニングが1/2のときには必ずしも散乱が大きくなるわけではありません。特に熱的暗黒物質が主にレプトンと相互作用をする場合、主にヒッグス粒子と特殊な相互作用（擬スカラー結合）をする場合、更にはその質量が陽子以下となる「軽い暗黒物質」の領域が未探査であり、これまで議論されてきたものとは異なる手法を用いた探査が必要となります。前者の2つの例においては、ILC等の将来レプトン加速器実験における暗黒物質生成やヒッグス粒子の詳細な測定が重要な役割を果たします。一方、軽い暗黒物質領域については、場の量子論の特性により軽い暗黒物質のみならず軽い媒介粒子（スカラー粒子かベクター粒子）の存在が予言されます。これら軽い粒子の探査には、Belle II 実験やK中間子の稀崩壊実験

*1 XENONnTとはイタリアのグランサッソ国立研究所（LNGS）地下実験施設で行われる予定の暗黒物質の直接探査実験のことで、8トンの液体キセノンを用いる。暗黒物質とキセノン原子核との散乱により生じる反跳を捉えることを目的としている。

*2 ゾンマーフェルト効果とは、始状態の粒子間に働く長距離力が、非弾性散乱の断面積を長距離力が働かない場合と比べて著しく変更する効果のこと。暗黒物質が弱い力を媒介する素粒子（W、Zボソン）より十分に重いと、弱い力は暗黒物質にとって長距離力として働き、対消滅断面積等が著しく増大することが知られている。

*3 CTAとは20 GeV~100 GeV 領域に渡るガンマ線天文台（Cherenkov Telescope Array、チェレンコフ望遠鏡アレイ）の略称。

*4 伴銀河の中でも、特に「矮小楕円体銀河」と呼ばれる極めて暗い小さな銀河は、その質量の大部分が暗黒物質であるとされており、このためガンマ線観測による暗黒物質探査の主な対象の一つとなっている。

*5 DARWINとは約50トンの液体キセノンを用いる暗黒物質の直接検出実験（DARK matter WImp search with liquid xenON）の略。

*6 ヒッグス粒子発見後に特に注目を集めた超対称模型の一つ。ヒッグス質量を説明し大統一理論とも相性が良い一方、超対称模型でしばしば問題となるフレーバーやコスモロジーに関する問題を回避する最もシンプルな模型として知られている。

等の高輝度加速器実験がその検証に必要不可欠になります。また最近ではヒッグス粒子から媒介粒子への崩壊も重要な探査手法となり得ることが指摘され、その場合にはヒッグス粒子の稀崩壊に対する精密測定が重要となります。

おわりに

以上の通り、素粒子物理学の分野では、標準模型の完成と新物理のシグナル未発見の現状を受け、標準模

型を超える次の新物理のスケールの同定に全力が注がれています。この観点から暗黒物質の正体説明が役割を果たすことが期待されており、本稿でその現状と将来の見通しについて解説しました。後半でやや詳しく述べた通り、ここ数十年において、今ほど様々な分野の理論と実験の研究者の密な議論に基づいた素粒子物理学の研究が喫緊の課題である時代はありませんでした。その意味において、Kavli IPMUは望み得る最高の環境を提供してくれており、今後もこの線に沿って研究に邁進して行きたいと考えています。

Tea Break:

IPMUとは何の略語？

ドイツ人の数学者で数理物理学者でもあったダフィット・ヒルベルトは、19世紀末から20世紀初頭にかけて活躍し優れた業績を挙げました。彼が残したこんな逸話があります。ある時、彼の学生の一人が詩を学ぶために退学したと聞いてこう言いました。「結構なことだ。彼は数学者になるには想像力が足りなかった。」

さて、皆さんの想像力に訴えたいことがあります。IPMUという略語の意味について知らない人が見当をつけるとしたら何と言うか、気の利いた答えを競い合うことにしたいと思います。例えば、

The Institute for the Pretty Much Unknown,
The Infrared in Physics and the Mathematics of the Ultraviolet ...

優れた解答はKavli IPMUのウェブサイトに掲載すると共に、Tea Timeの会場の藤原交流広場に掲示し、Tea Breakというタイトルに一層ふさわしいものにします。

(アレクサンダー A. ボロノフ)

Feature

Our Team

ロビン・コーイストラ Robin Kooistra 専門分野: 天文学

博士研究員

大規模銀河フィラメント中の銀河間物質 (IGM) は銀河の形成および進化において重要な役割を果たします。私は、銀河間ガスの性質および銀河間ガスがフィラメントの中にある銀河に及ぼす影響並びに大規模構造と宇宙論との関係に興味があります。シミュレーションにより、中性水素が放射する輝線 (波長21 cmの電波)、あるいはライマン・アルファの森トモグラフィーによる吸収を対象とするIGMの観測を予言します。



キャラ・ラ リカタ Chiara La Licata 専門分野: 実験物理学

博士研究員

高エネルギー物理学実験、特に間接的な手法により標準模型を超えるような素粒子を発見すること、あるいはその存在に制限を与えることが私の主な研究テーマです。現在、私はBelle II実験グループに参加しており、過去3年間に渡りシリコン・バーテックス検出器を保護するための放射線モニターシステム開発に深く関わってきました。

Belle II実験は、間もなく第1期の物理データ取得が開始されるところです。私はモニターシステムの立ち上げに従事するとともに、最初のデータを吟味する準備を進めます。



朴 賢培

パク・ヒョンベ 専門分野: 天体物理学・宇宙論

博士研究員

私は、運動学的スニヤエフ・ゼルドビッチ (kSZ) 効果に起因する宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性のモデリングを研究しています。kSZ信号はイオン化した銀河間物質の空間分布に関する情報を含んでいます。この情報から、宇宙の再電離期に銀河からどのようにイオン化が広がったのか、また宇宙の再電離期後にガス密度場がどのように進化したのかについての情報が得られます。



サマンサ・スティーヴァー

Samantha Stever 専門分野: 天文学

博士研究員

パリ高等研究所での博士課程在学中、私は最新の科学衛星に使用される高感度検出器に寄生信号を生じる宇宙線の効果を研究し、放射線に対する検出器の熱的、電気的応答の性質を決定するため、半導体ポロメーターを用いた測定を行いました。Kavli IPMUでは博士研究員として、この宇宙線の効果の研究を発展させ実験的手法およびモデリングの手法を用いてLiteBIRDに適用する積りです。また、私は偏光変調器（半波長板）



に起因する他の系統誤差、偏光変調器と焦点面検出器とのカップリング、これらがBモードの信号に及ぼす影響も吟味するつもりです。

Round Table Talk : 哲学者と物理学者の対話

マルクス・ガブリエル Markus Gabriel
ボン大学教授、同大学国際哲学センター所長

村山 斉 むらやま・ひとし
Kavli IPMU主任研究員、カリフォルニア大学バークレー校教授

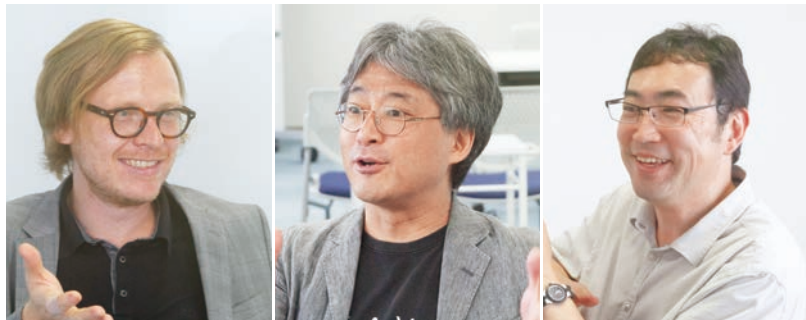
野村 泰紀 のむら・やすのり
Kavli IPMU主任研究員、カリフォルニア大学バークレー校教授

科学とは何か—物理学者が語る

村山 ガブリエルさん、先ほど講演^{*1}されたばかりだということにこの座談会に参加していただき、ありがとうございます。以前お話しした際、あなたは「通常ポパーが言ったとされることは、正確に言うと、彼が実際に言ったこととは違う」ということを指摘されました。そこで、ポパーによる科学の定義についての私の理解—実はそれはポパーが実際に言ったことではなかったかもしれませんが—をもう一度お話しして、それからその定義についてあなたがどう考えるか聞かせていただく、ということから始めてはいかがでしょうか？

ガブリエル いいんじゃないでしょうか。それは意味があると思います。

村山 では、私から口火を切らせてもらいますが、私たちはもちろん科学者であり、科学とはどういうものであるか、どのように行われるべきものであるか、具体的に教えられてきましたが、時には非常に窮屈に感じます。通常ポパーに帰せられ、科学者も同意する科学の狭い定義は、特に宇宙などのような大きな問題を議論するときには従い



マルクス・ガブリエル

村山 斉

野村 泰紀

たくない場合もあります。そういうわけで、私たちが伝統的な意味で科学の定義と考えるものについて、また過去に科学哲学で他のどのような考え方が議論されていたのか、それからこの問題についてあなたはどのように考えられるかといったことについてガブリエルさんからインプットをいただきたいと思えます。こういった内容の議論が一つできると思えます。

野村 実のところ、村山さんと私の意見が完全に一致しているかという、多分そうではないと思います。

村山 そうですね。話を進めていけば分かるでしょう。

ガブリエル 恐らく科学とは何かについてお二人にそれぞれの考えを語っていただき、その後で私がそれを哲学の空間に投影してみてもはどうでしょうか。

村山 そうしましょう。私が「科学とはどういうものか」について小学校で教えられたことは、こうだと思います。

科学とは身の回りの現象を理解しようと試みることである。そのためには、もちろん身の回りで起きていることについての定量的なデータをとることが必要で、定量的なデータが得られればそれを説明しようとする理論を考え出すことになる。

得られたデータ全てをうまく説明する理論が得られたら、その理論を使ってさらに予言を試みる。そして新たなデータセットと突き合わせて予言と一致するか調べてみる。そして、もし一致しなければ「この理論は反証された」とする。ポパーによるものだと思うのですが、これが私たちが科学の定義として教えられたプロセスです。

そしてもしその理論が新たなデータセットを完璧に説明した場合は、「理論はデータと一致する」と言い、決して「理論が正しい」とは言いません。その後、再び理論が反証されるに至るまでそのプロセスを繰り返します。反証されたところで理論を修正し、以前

^{*1} 2018年6月11日に東京大学本郷キャンパスの医学部教育研究棟において開催されたKavli IPMUとIRCIN（ニューロインテリジェンス国際研究機構）の共催によるセミナーで、ガブリエルさんは「科学と形而上学」と題して講演し、セミナー終了後にこの座談会が行われました。

説明できた全てのデータと突き合わせ
てみて、理論の成功が保たれているか
調べます。もしそうであればさらに予
言を行い、再びデータを取り始めて予
言と比較します。たとえ理論がデータ
と一致したとしても、やはり決して「理
論が正しい」とは言いません。理論が
データと食い違う場合だけ「理論が間
違っている」と言い、理論をさらに拡
張しようと試みます。これが「科学と
はどういうものか」について私たちが
教えられたプロセスです。

野村 それなら同意できると思いま
す。明確に反対と言える科学者はいな
いでしょう。

村山 ちょっと曲解しているかもしれ
ませんが。

野村 そういうところも少しはあるか
もしれないと思います。一つは、私た
ちは何が正しいとは決して言わない
とおっしゃった点です。実際に、少な
くとも特殊相対論まで理論を拡張しな
ければならない事をもってして「ニュ
ートン力学は間違っている」というよ
うなことを言う人もいます。私はこ
ういったステートメントは誤解を招く
と思います。もちろん、これは一種の言
葉の問題であり、科学的事実それ自体
にとっては問題ではありません。つま
り、特殊相対論を理由としてニュート
ン力学は間違っていると言う人がいて
も、ある領域では現象を非常に良く説
明するのでニュートン力学は正しいと
言う人がいても、どちらでもよいので
す。正確には、まず「正しい」という
言葉を定義すべきなのです。私たち
はこの言葉を「ある時代の事実」を意
味するものとして使うことができ、そ
うするとニュートン力学は少なくとも
19世紀には実際に正しかったのです。
同様に、この言葉を「ある領域で全
ての実用的な目的に対して正しい」と
いう意味に使うことができます。この
意味では現在でもニュートン力学は
まだ正しいのです。

いずれにしても、私は科学の基本的
な立場は常にそういったものであると
思います。物事が明確に定義されてい

る限りにおいて、言葉の問題は気にし
ないのです。例えばこの場合、理論が
正しいと言っても間違っていると言っ
ても、その言葉が正しく使われている
限り構わないのです。

理論がある領域においてある精度で
適用され得るということだけが事実で
す。しかし、極端な領域においてはあ
る理論が実は別の理論の近似に過ぎな
いということが明らかになるかもしれ
ません。ニュートン力学の場合は特殊
相対論です。そしてこういう場合を記
述したければ新しい理論を考慮しな
ければなりません。私にとっては、こ
ういった考え方こそが科学を定義する
方法の一つです。この意味で、科学とは
非常に「戦略的」です。また、科学、
少なくとも自然科学の定義は、同じデ
ータセットを最小限の仮定で説明しよ
うとするプロセスも含んでいます。実
際、この最後の点は重要で、もしそ
うでなければ自然を記述するためには単
に全てのデータをリストするだけで良
く、そのリストを「理論」と呼べる
ということになります。

村山 そうですね。一つ一つのデー
タにそれぞれ理論が一つあるというこ
とになります。

野村 その通り、それは最悪の「理論」
です。そこで仮定の数をできるだけ小
さくしようと、そうすると理論が説
明力を持つようになります。普通、そ
のような理論は観測結果を再現する
だけでなく、それ以外の何かを予言
するので—村山さんが言われたこと
を、ここでは繰り返しているだけで
すが、—私たちは実験してそれを確か
めます。

ここで、一つの問題は極端なことを
言う人がいることで、理論が科学と
言えるのは、これら全てのプロセスが
例えば10年か20年で完結する場合に
限ると主張します。

村山 10年以内であってほしいです
ね。

野村 基本的な姿勢には全く賛成で
すが、問題は時間スケールです。例
えば、これが弦理論は科学ではないとい

うステートメントの起源なのです。こ
ういう全てのサイクルがある時間内に
完結するべしという条件を科学の定
義に含むことに、私は賛成しません。
私たちが話す反証可能性はそのよう
なものであるべきではないのです。理
論が科学か否かは—特に、理論が「
真」であるというそれ相当の可能性
がある場合—それが**原理的に**反証可
能かどうかにより決定されるべきで
す。もちろんもっと短い時間スケ
ールで検証できる予言があるかどう
か調べる試みは続けるべきですが。

ガブリエル それは本当に奥深い意
見の相違に見えます。いや、まったく
興味深い違いです。

野村 そうです。科学者の間にさ
えある相違点です。

勿論、確認するための時間スケ
ールが100年にもなるかもしれない
ようなものに自分の時間を費やした
くはないと言う人がいても、それは
構いません。それは本人が決める
ことで、私が反対する筋合いでは
ありません。しかし、確認のために
長い時間を要するかもしれないよ
うな類いの科学をやっている人達
は科学者に非ずといったステ
ートメント、実際そういう事を言
っている人達がいるのですが、それ
には強く反対します。将来の技術
的進歩を本当に予見できる人は誰
もいないし、あるいはもっと短い
時間スケールで確認できる別の予
言が見いだされるかもしれない
ので、そういうステートメントは
危険であるとさえ思います。

村山 ご存知のように私も時々
そういう批判をしました。でも、それ
は弦理論そのものよりはそれをやっ
ている人たちについての批判とい
う面が強いもので、予言したり
それをテストしたりすることなど
どうでも良いというような姿勢
を彼らが示すからです。それ
では科学的な姿勢とは言えない
ので、その姿勢に私は極めて強
く反対しました。しかし、それは
弦理論を科学に非ずと言うのと
同じことではなく、弦理論をや
っている人たちのある種の姿勢
を非科学的と言っているのです。それ

は区別しました。

野村 それなら結構です。すると私は多分どこかで村山さんのことを誤解したかもしれません。しかし、それでもこう言いたいのですが、あなたが批判している人たちがやっていることは人間の活動として無価値なことではありません。少なくともそれは数学なのです。一般論として、私はこう信じているのですが、他人や他人がしていることを否定することには私たちは極めて注意深くなければなりません。

村山 もう一つの観点は教科書のようなものではなく、研究を行う過程で教えられたものと思いますが一理論の質についてです。つまり、私たちはより一般的に適用される、より広い適用範囲をもつ理論を高く評価します。

私たちはより美しく見える理論を評価します。もちろん私たちは「美しい」という言葉で意味することを実際には定義できないのですが、そこには多少の美的感覚があります。それから、役に立つ理論も評価します。弦理論の場合には私たちが普通話するような意味では実験的に立証されていませんが、新しいアイデアを生み出す上で非常に役に立ち、また数学等との新たな関係も創出しました。

従って、学問的には研究を行う非常に実り多い土壌がありました。私たちが評価するもう一つの特徴がそれです。ですから、私たちが教えられた科学の狭い定義に加えて、こういった付加的な特質があります。どうやら私たちに研究を続ける理由や研究で何をを目指すのかといったようなことが多少身に染みついてしまっているようです。それは科学とは何かという観点からは定義するのが難しい側面です。

野村 そうですね、それは複雑な問題かもしれません。今のところ私たちはガブリエルさんが厳密にコメントできる程度まで科学を厳密に定義してはいないのですが、それはこの問題の本質かもしれません。つまり、村山さんが言われたような多面性があるのかわ

りません。そして、そういう側面の幾つかは私たちが反証可能性等を議論したときに話していたこととは違うものです。いずれにしても、こういったことを聞いてガブリエルさんはどうお考えでしょうか？

科学とは何か—哲学者の見解

ガブリエル あなた方は科学的な活動の重要な部分を強調しているのだと思います。明らかに成功規準ばかりでなく、全体的正当性規準もあります。全体的正当性規準とはあなた方の言われる原理的反証可能性あるいは原理的検証可能性のことです。そうでしょうか？科学は宇宙に関して検証可能な主張を行うことにより進歩します。もし、私たちが原理的に—より正確にはどんな測定装置を使っても—測定できないようなことに関する主張をするなら、それは単に宇宙について全く何も言っていないこととなります。

野村 「神は存在する」が良い例です。

ガブリエル 他にも「人生は夢である」のようなものもあります。科学は、最低限データの存在に依存するものですから、現実私たちに見えているものとは全く違うかもしれないという考えも科学的な仮説ではありません。もしもデータと思うものがデータとは無縁のものであるとすると、私たちが科学的な手法で何かを確立するということができなくなります。

私が「人生は夢である」と言ったとすると、もちろん検証可能な仮説もあります。その夢はどれくらい長いのかとか...そこで私が「人生は非実体的なデーモンの心の中の悪夢のような、何かもっと突拍子もないものかもしれない」と応じたとすると、その仮説は容易に全てのデータを説明するでしょう。しかし、他にも全てのデータを一気に説明する仮説は無限にあります。

野村 ええ、その理論は誰も反証できません。

ガブリエル これは実に簡単な理論です。極めてエレガントで、非常に一般

的です。

しかし、反証可能ではないが真であるということがあるため、ここでもう少し考察を加える必要があります。例えば、もし私に意識があり、かつ自分に意識があると考えたら、それは反証可能ではありません。意識があり、かつ自分に意識があると考えられることは、その人が正しいということの意味します。反証可能でないこと全てが問題であり非科学的であるということではありません。もしそうであるとする、反証可能性規準自体を定式化することができません。

私が自分の状態について間違えて認識している可能性はあります。私が意識を支える神経活動について間違えて認識している可能性もあります。しかし私が今現在意識があるという事実については間違えようがありません。意識があるということと、意識があることを意識しているということは同じことです。ですから反証可能性について両者の間に違いはありませんが、それは構いません。従って、存在するものすべてが反証可能かどうか調べる対象であるとは限りません。

野村 そうですね、まだ何か考えるべきことがあるかもしれませんね。

村山 しかし、あなたが私に話しかけて私が応えたとしましょう。するとあなたは私に意識があると言うことができます。

ガブリエル 全くその通りです！間違っている（反証できる）可能性はあります。

村山 外部テストです。

ガブリエル その通り、外部テストです。外部テストがあり、私が述べた、意識が脳に基づいているという事実も非常に重要です。もし意識と脳が無関係だとすると、私たちに意識があると考えられることには、反証可能ではなく、かつ反証可能な何ものにも基づいていない何かがあることになるため、何らかの誤りがあると結論するべきです。ですから、存在と反証可能性の間にはもっと深い関係があります。それどこ

ろか、非常に深い関係かもしれません。従って、それは原則的規準です。そう考えてほば問題ないと思います。

しかし、私は哲学者として注意深くすることにしますが、これがどういう風に科学に投影されるか考えてみましょう。科学者は原則的規準および成功規準を考えることに非常に慣れています。一つは動的であり、他方はもっと静的です。理論の変更には、得られるデータに適合させ必要であればモデルを変更する活動という動的な側面があり、そして科学哲学で「線引き問題」と呼ぶもっと一般的な規準、すなわち研究を科学的なものとするものは何かという質問に対する答えとしての反証可能性があります。

野村 少なくとも、そのような原則的
反証可能性は必要です。

ガブリエル ええ、必要ですが、十分
ではありません。

野村 「神が存在する」といったよう
な理論を排除するために...

ガブリエル そう、そのようなもので
す。

野村 あるいは「恐竜の化石はUFOが
作った」のような...

ガブリエル デーモンのようなもの
も。

野村 その通り、あなたのデーモンも
良い例です。

ガブリエル そういう例は無限にあり
ます。

決定不全性について語る

野村 そうですね。しかし、反証可能
性規準をそれ以上に使用することは危
険です。そうしている人たちがいます
が、私は反対です。あなたが講演で述
べた「決定不全性」についても話をし
たいと思います。これについて、あな
たは哲学者として考察されましたが、
私もそれと同じようなこと、つまり決
定不全性のようなことを考えていまし
た。

ガブリエル ええ、まさに私たちが「決
定不全性」と呼ぶものです。

野村 例えば、村山さんがこう言いま
した。「私には意識があります。あな
たは私に意識があることを知っている
はずではないですか？」しかし、私は
知りません！ なぜか？ 村山さんの意
識を私はもっていないからです。本当
に知りません。

村山 しかし、あなたは私の機能を見
たでしょう。私はあなたの言動に反応
しましたよ。

野村 そうですが、それは単なる機能
かもしれません。私が確実に言えるの
は私には意識があるということだけ
で、私が村山さんであるとして見るも
のは単なる反応にすぎません。しか
し、村山さんからも私自身からと似た
反応が得られることから、最も簡単な
仮定は二人とも意識があるということ
です。実際、まさにこれが科学のやり
方です。つまり、私だけに意識があり、
あなたは例えばデーモンのようなもの
である可能性は完全には排除できない
のですが...

ガブリエル あるいは、皆ゾンビかも
しれません。...

野村 そういう可能性は排除できない
のですが、科学をする上ではそういう
可能性を考慮する必要はありません。
こういった深いレベルでの「仮定」を
することは科学の「定義」の非常に基
本的な部分であり、多分同意していた
だけだと思います。

ガブリエル 全くその通りです。しか
し、ここには私が多分もっと注意深い
話し方で紹介しようとするところがあり
ます。そして、もうその議論に入っ
ているので、あなた方がそれについて何
を言うか聞いてみたいと思います。私
は「事実」が本当に存在するという描
像に立ちます。なぜかと言うと、こ
ういうことです。

村山 その「事実」は「真実」と同じ
ものですか？

ガブリエル そうです。定義してみま
しょう。

野村 講演であなたが言われたことで
すね。

ガブリエル 私は真実を表象的なもの

とは考えません。ですから、真実を理
論と現実、あるいはステートメントと
事実の間の関係とは考えません。真実
とは単なる事実と考えます。

村山 そうすると存在するものでは
ね。

ガブリエル その通りです！

村山 定義がなんであれ...

ガブリエル その通り、それが真実に
ついての私の考え方です。例えば、「私
がここにいることは真実である」と
か、「この部屋の中に2人以上の人が
いるのは真実である」言ったとしま
す。もちろん、全て（「人」、「部屋」、
「中」）は明確に定義します。

野村 ええ、「人」とは何か等々定義
する必要があります。

ガブリエル 勿論そうです。しかし、
次のような考え方は正しいはずはない
と考えます。全ての用語が明確に定義
されたとして、それでも事実は存在し
ない、という考え方です。それは正し
いはずはないですよ。なぜなら、用
語が明確に定義されたなら、物事は描
写された通りであるか、そうでないか
のいずれかとなります。素粒子とは何
を意味するかを明確に定義したとしま
しょう。それはすごく難しいけれど、
それはともかくそうしたとすると、例
えば空間のあるはっきり区画された領
域の内部にある分子の数が偶数なのか
奇数なのか、という質問には答えがあ
ります。もっと簡単な例にしましょう。
それでも難しいですが、より簡単にし
ます。天の川銀河の任意の渦状腕を一
つ考え、正確な時間帯を定義します。
すると、天の川銀河のその部分にその
時間帯に存在する星の数は偶数か奇
数かのいずれかです。

野村 星を定義した後ですね。

ガブリエル 天体物理学に基づいて
「星」の意味を確定させたものと仮定
します。

村山 それは難しいですね。

ガブリエル ものすごく難しいです。

野村 実際上は... でも、実際的な問題
を話しているわけではないので...

ガブリエル 実際的な問題を話しては

いません。こういう問題の中には、明確に定義されても原理的に答えることが不可能なものがあるかもしれませんね。

野村 ガブリエルさんはそう思いますか？これは実際非常に大きな問題です。これは、つまり原理的に答えられないことがあるか否かは、まさに「totality (総体)」等のようなあなたのテーマに関連していますね。

ガブリエル その通りです。私が考えなければならないことですね。多分これといった理由はないのですが、私はそういう問題があるという方に賭けます。

ブラックホールを考えると、昨日の野村さんの話で非常に面白いことを伺いました。^{*2}宇宙のある領域では、物理の研究対象という意味ですが、ブラックホールのように入ってくる情報を全て飲み込み、何も出てこないの私たちには決して理解できないという性質を持つことが事実かもしれず、もしそれが本当なら—あなたは、昨日、それは疑わしいと非常に興味深い指摘をされましたが—それが本当なら物理は情報が何も出てこない宇宙の領域については何も知ることができないわけで、そうすると明らかに物理が発見できない物理的事実があるということになります。

量子力学と哲学の間にあり得る興味深い関係

野村 そういうものは除いておくべきです。記述すべきことの定義に加えることさえするべきではありません。

しかし、実はこの問題はもっと奥深いものです。私は常に次のように考えてきました。量子力学における重要な問題は、観測の問題です。通常私たちはこの問題を、観測とは多世界において情報が増幅される過程であるとす

ることで解決できると考えています。一とところで、この情報増幅は意識がどこに存在するかということについて、潜在的に非常に興味深い意味を有していて、それについては後で話すことができるかと思いますが... —しかし、その概念を実際に理論に組み込むためには、私たちは常に系を観察している外部の何者かの存在を仮定しているのです。このことは、古典力学では大きな問題にはなりません。なぜなら古典力学では、世の中の全てを例えば一種のコンピューターシミュレーションのようなものとして正確に定義できるからです。しかし量子力学では、ある種の観測を行っている「外部のもの」の存在は、その理論的定式化に深い影響を与えています。

量子力学を部分系に適用した場合、完全にうまくいくことは誰もが認めています。しかし、研究者が本当に望んでいたことは、外部の観察者を含む枠組み、すなわちこのような観察者を含む「全てのもの」を包含する枠組みを見出すことでした。しかし、あなたの哲学はそのような枠組みは存在しないかもしれないと主張します。それが無くても理論は矛盾しないかもしれませんが。それは実際、あり得ることだと思えます。もしかすると、物理学が扱うことのできるのは、原理的に部分系だけなのかもしれません。

私はその可能性は十分あると考えますが、おそらく普通の研究者はそういう風には考えないでしょう。いずれにしても、私は研究者がその結論に至る唯一の道筋は、到達できるとすればですが、漸近的にのみであると考えます。実は、これは全く一般的な現象です。自然科学における理論の「証明」は数学における証明のようなものではありません。ある意味で、別の理論の可能性が低くなることによって、その理論の信頼度が高まっていく、という過程を続けていくしかないのです。

村山 経験主義的科学...

野村 そうです。

ガブリエル 経験主義的である理由が

それですね。

野村 ええ、研究者がこの結論に到達する、あるいはあなたの見方が正しいと確認する唯一の途は、外部の観察者を含む理論を作ろうと試み、それに失敗し続けることだろうと思います。

村山 そうですね。同意します。

ガブリエル 全くその通りです。私も同意します。私の提示しているモデル、すなわち「総体は存在しない」という考えが、科学の営みを非常に的確に記述するものであるかもしれないのはそのためですね。なぜなら、科学は漸近的に総体にたどり着こうとしていますが、まさにその点において、非常に具体的な失敗を重ね続けているからです。

認識論的徳としての科学は、不可能な理想とそれでもその理想に近づこうという能力との隔たりの程度であって、従って科学とは、言ってみれば最大の自然数を探しているようなものです。ええ、そんなものはありません。決して見つけられないですよ。しかし、それでも探してみれば常にもっと多くの(もっと大きな)数が見つかります。これはその性質により決して到達できない極限を定義しているわけですが、それにもかかわらず探せばどんどん増えて行きますから大変な成功を収める作業と言えます。

野村 面白い例えですね。しかし、私の考えをもう少し注意深く述べてみたいと思います。もしも世界が古典的だったならば、私はあなたの考えには賛成しなかったでしょう。

ガブリエル もちろんその話しをしましょう。

野村 量子力学は物理学の理論であって、哲学の理論ではありません。しかし、このような問題を考えるときには、それは非常に重要になります。量子力学は私の自然に対する考え方に大きな影響を与えています。もちろん最終的な答えではありませんが、世の中が量子力学であるからこそガブリエルさんが言われることが正しい可能性があると考えられます。

^{*2} 2018年6月10日に開催されたKavli IPMU主催の一般講演会「宇宙×世界」において野村さんが「我々の宇宙を超えて」と題して、続いてガブリエルさんが「宇宙・世界・実在」と題して講演し、その後さらに二人の対談が行われました。Kavli IPMU News No. 42, p. 39参照。

村山 もっと詳しく言ってもらえますか？

野村 私は量子力学でさえ究極的には内部的に閉じた形で定義され得るかもしれないと思ってはいますが、しかし少なくともそれには議論の余地があります。例えば、コペンハーゲン流の考え方では予言をテストするには測定しなければなりません。

普通、こういった測定はデコヒーレンス^{*3}によって記述されます。スピン上向きとスピン下向きの量子状態の等しい重ね合わせを仮定し、あなたがその状態と相互作用するとします。すると始状態は、(スピンの状態を知らないあなた) × (スピン上向き + スピン下向き) で、スピンと相互作用した後、状態は (スピン上向きでスピン上向きと考えるあなた) と (スピン下向きでスピン下向きと考えるあなた) の重ね合わせになります。その結果を紙に記録すると上向き/下向きの情報が増幅されます。これを続けます。しかし、実際にあなたが測定したのはどの時点でしょうか。問題をはっきりさせるために、自由度が2つだけしかなかったとしましょう。スピンと私とします。簡単のため、私がスピン上向きを見出す心的状態をA、スピン下向きを見出す心的状態をBとしましょう。すると相互作用—これはフォン・ノイマン測定に他ならないのですが—の後の状態は “スピン上向き × A” + “スピン下向き × B” に等しいため、これをもってスピン上向きか下向きかが測定されたと考えるかもしれません。しかし、それは間違いです。

村山 まだどちらでもあり得るからですね。

野村 いや、その意味ではありません。

村山 え、その意味ではないのですか？

野村 ええ、この結論はもっと基本的な意味で間違っています。なぜなら、交差項が打ち消し合うため同じ状態を (スピン上向き + スピン下向き) × (A+B) + (スピン上向き - スピン下向き)



× (A-B) と書けるからです。すると上下方向ではなく、それと「垂直」の方向について測定したと言っても良いことになります。^{*4} どんな測定をしたのかというこの問題に対する標準的な答えは、一度だけの相互作用ではなく、例えば私がノートに結果を記録し、誰かがそれを読むといったようなプロセスの連続によって決められるということです。つまり、多くの人が情報を共有するという意味で増幅された情報が測定された情報なのです。

ところで、量子複製不可能定理^{*5}のために部分系についてのすべての情報を共有することはできません。指数関数的に小さな情報量のみが多数の部分系で共有され、この共有が起きると情報が古典化されたと言います。しかし、それが実際に起きるのはどの時点でしょうか？ ものが古典化されたと主張するには常に「外部のもの」を必要とするのかもしれませんし、もしくは十分大きな増幅で足りるのかもしれませんが、後者の場合、「総体は存在しない」とまで言う必要はなくなります。が、本当のところは分かりません。

意識はどこに存在するのか？

野村 分からないのですが、ものはある増幅過程を経てのみ古典的になる、

ということは間違いのない。すると私たちの思考は多分古典的なので、つまり「重ね合わせ思考」は存在しないので、意識はどこに存在するのかという問題は恐らくこのような増幅を受けた後にのみ答えられるのかもしれませんが。この意味で、意識は脳の外の何かと関連するものかもしれませんが。なぜなら脳は多くのものと相互作用しているからです。これが私の言おうとしたことです。

^{*3} 奇妙な量子力学的振る舞いの原因である量子系のコヒーレンス (可干渉性) が、環境との相互作用により失われる現象のことを言い、これにより系は古典的に振る舞うようになります。

^{*4} 量子力学では、スピンは独立な2つの状態だけをとることが許され、それらを「上向き」と「下向き」の状態とすることができます。これらの状態の角運動量のz軸成分を測定すると、ある単位でそれぞれ+1/2 と -1/2 という確定値が得られます。興味深いことに、z軸と直交するx軸方向の角運動量成分を測定した場合に+1/2 と -1/2 という確定値を与える状態は「上向き」状態と「下向き」状態の重ね合わせとして、それぞれ「上向き + 下向き」、「上向き - 下向き」で与えられます。

^{*5} 量子力学では、量子状態に含まれる全情報を忠実に複製することは不可能です。これは量子力学ではあらゆる演算が線形であることによるものです。一つの上向きスピンを二つの上向きスピン (これを (上向き) ^2 と書くことにします) に、一つの下向きスピンを (下向き) ^2 に変える複写機があったとしましょう。そこで、この複写機に重ね合わせ状態 (上向き + 下向き) を送り込むことを考えると、複写機の動きは線形でなければならぬので、この操作により生成される状態は (上向き ^2 + 下向き ^2) です。しかし、この状態は干渉項に関する情報が欠落している分だけ最初の状態のコピー (上向き + 下向き) ^2 とは異なります。なお、重ね合わせの概念を持たない古典力学の世界では、情報を複製することに対するこの障害は発生しません。

ガブリエル その話はすごく嬉しいです。

野村 ものごとは情報増幅を経てのみ古典的になりますが、どれだけの増幅が必要でしょうか？これは、情報がどれくらい安定になる必要があるかに伴う定量的な問題かもしれません。しかし、相互作用を通じて増幅が起きることは確実に正しいので、脳の状態が何らかの形で光子にコピーされ、さらに同様のプロセスが続くということは確かです。すると、実際は情報、すなわち意識はどこに存在するのでしょうか？

ガブリエル 意識は量子力学と関係があるという昔からの仮説を合理的に表現するとあなたの説明のようになるのかもしれませんが、それは意識ではなく思想^{*6}なのかもしれません。理論家としての私の心的状態は今現在古典化を起こしてしています。つまり、何かを古典的に増幅しています。ですから、あなたが説明されている作用、それは明らかに測定の問題等に関係していますが、その作用は本質的に思想に結びついているのかもしれませんが。

村山 もう一度意識と思想の違いを定義していただけますか？

ガブリエル 私の言っている意味はこうです。今この場での文脈における思想の概念を説明しましょう。私たち二人が同じ思想を考慮することが可能です。例えば、「東京は都市である」です。私が都市とは何を意味するかあなたに説明します。また私は東京が何を意味するかを説明します。すると私たちは、同じこと、つまり「東京は都市である」を考慮することができます。別の思想を考えましょう。『「天皇」はemperorに相当する日本語です。』これが思想です。もしあなたが同意し、私が同意する場合、私たち2人が同意する「何ものか」が存在するのでしょうか？

私は“yes”と言うでしょうし、哲学者は—私も正しいと考えるある伝統によって、数学者のゴットローブ・フレーゲがこの概念を導入したのですが—、彼は私たち両方が同意するも

のを思想と呼びました。フレーゲは思想 (thought) と思考 (thinking) を区別しました。私はその思想を考慮ことができ、あなたもその思想を考慮ことができ、私たち2人とも同じ思想を考えています。従って、その思想は私の頭の中にはありません。さもないと私たちは同じ思想を考慮することはできません。その思想は私の頭の中にはなく、私の頭の中にあるのは単にそれを考えるという行為のみです。

野村 ところで、あなたが言われている概念は古典的な物理学においてのみ当てはまります。それは情報がコピーできると仮定しているためです。量子力学では全情報はコピーできません。それには非常に簡単な理由、線形原理^{*5}があります。

ガブリエル 興味深いですね。

野村 そのため、量子力学では完全なコピー機はあり得ません。これが私たちの世界が古典化する理由です。なぜなら古典的であることの定義は、私たちが情報を正確に共有できることであり...

ガブリエル 全くその通りです。私たちは情報を共有するとその途端、古典的なレベルに存在するはずで、それに違いありません。思想は古典的です。

野村 そうです、古典的なものです。しかし、私たちの世界は、本当は量子力学的なのです。ですから、あなたが話している概念は基本的なレベルではかなり興味深いものになるでしょう。もしかすると、そのようなレベルでは2人が同じ思想を共有するというような概念でさえ正確には定義できないかもしれません。なぜなら、量子力学では世界の状態を指定するには、量子状態を与えなければならないからです。そして、量子状態とは大局的な概念であるため、それを指定するには原理的には世界の全てを知らなければなりません。

こう考えると、考えるべき問題は、よく言われるようになぜ量子力学はEPRペア^{*7}のような非局所的現象を許すのかということではなく、なぜ基本

理論が量子力学であるにもかかわらず、私たちは自然を近似的に古典的、局所的に取り扱うことが許されるのかということなのです。量子力学では状態の非局所的性質は本質的なものです。それにもかかわらず、もし私が今持っているこの携帯電話を落としたら一体どうなるかは、アンドロメダ銀河で何が起きているかを知らなくても予言できるのです。量子状態は世界の全てを含んでいなければならないはずなのに...

従って、あなたの情報と私の情報、もしくは思想、が共有されている、こういうことを言うや否や、それは既に古典的な領域に入った量子状態のことを話していることになるのです。では、このような古典的特質はどのようにして現れるのでしょうか？これが哲学的問題かどうかは分かりませんが、非常に興味深いことです。

命題の統一の謎

ガブリエル それは科学的に扱うことができる、非常に哲学的な問題であると思います。ある意味、哲学そのものと言えるかもしれません。思考というものが存在しない状況からどのように思想が生じるのかを問うている訳ですから。宇宙のほんの一部だけが考えるということをするのです。

もし私たちが現実とは実際に私たちが思考しているものである、従って思

^{*6} ここで初めて現れ、以下頻繁に使われる「思想」という言葉は、少し先でガブリエルさんが説明しているように数学者（であり現代論理学の祖である）ゴットローブ・フレーゲが導入した概念を表す用語（ドイツ語でゲダンクGedanke）で、英語ではthought、日本語では思想という訳語が当てられています。なお、精選版日本国語大辞典（小学館）で哲学用語としての「思想」の意味が以下のように解説されています。（イ）思考されている内容。広義には意識内容の総称。狭義には、直接的な知覚や具体的な行動と対比して、文や推論などの論理的な構造において理解されている意味内容。[哲学字彙(1881)] (ロ) 統一された判断体系。

^{*7} 量子力学では、例えばスピンのような2つの対象が相関していて、それぞれの対象の状態を他方の対象の状態と独立に記述することができないような量子状態を考慮することができます。この現象は「量子もつれ」と呼ばれ、量子もつれの関係にある2つの対象のことを特にEPR (Einstein-Podolsky-Rosen) ペアと呼びます。

想は物理的な痕跡を有する、つまりシグネチャ (signature) を持つはずであるという描像を持つとしたら、どうなるでしょうか？もし私たちが思想に対して物理的に妥当なシグネチャを割り当てることができたら、私たちは思考と現実の間の論理的な飛躍を超えることができます。なぜなら、その時には、思考している時にすることがどのように思想を把握するかを理解できるからです。なぜなら、脳において思考している時に何をしているのか、そして、現実が思想へと安定化あるいは古典化する時に対象の側において何が起きていなければならないかについて、もっとずっと知っているからです。

このことはすごく有名な謎に関係があるかもしれません。「命題の統一」^{*8}の謎と呼ばれているもので、まだ解決していません。それについて、私の学生の一人が優れた学位論文を書いたところですが、完全な解答を与えたわけではありません。優れた論文ですが、うまくいかない点があります。もう一人の審査員は—哲学ではそうするのですが—それでも彼はその問題を考え抜いたのだから博士の学位を与えても良いだろうと言い、実際に解法が優れていたため、彼は最高の評価を得ました。しかし、それで全てが解決したことにはなり得ません。

命題の統一の問題とはこういうことです。それには物理学が与えることのできる解答があるに違いありません。この問題はバートランド・ラッセルが発見したようなものですが、実はもっと古くて、既にプラトンが議論していました。私が「犬がマットの上にいる」というような思想を考えていると思ってください。いいですか、もし私が、「犬がマットの上にいる」と考えたら—

それより実際にこの部屋にあるものを考えましょう。「ボトルがテーブルの上にある」にしましょう。いいですか？私の思想の定義によると、「ボトルがテーブルの上にある」とは「ボトルがテーブルの上にある」という思想です。

村山 もう一度言ってください。

野村 そうですね、もっとよく理解するために...

ガブリエル ええ、私の思想の定義によると、思想とはこういうことです。テーブルの上のボトル—「ボトルがテーブルの上にある」という思想は、私の心の中に存在するものではありません。それはここに存在します。あなた方が認識することは、テーブルの上のボトルと、「ボトルがテーブルの上にある」という思想の両方なのです。現実中存在するのは2つのことではなく、情報と対象という不可分で一体的なものです。

村山 分かりました。

ガブリエル 今現在、私の心の中に何かが存在しています。私はここからボトルを見えています。あなたはそれをそこから見えています。しかし、私たちは二人とも同じもの、「テーブルの上のボトル」を見えています。村山さんはそこから、私はここから、野村さんはそこから見えています、存在する事実の一つ、「テーブルの上のボトル」です。ですから、こう言っても良いわけですから、こう言っても良いわけですから、私が全ての用語をひとたび正確に定義すれば...

野村 あなたは科学者になりましたね！

ガブリエル 哲学者も科学者ですよ。

野村 いつも全てを正確にしながら話すなんて感じ悪いですが、でも...

ガブリエル いやいや、感じは悪くないですよ...ものを定義することは非常に大事です。とにかく、私たちが議論する概念を最高レベルまで完全に精密化する、つまり、私が言うことについて、最高にぎめ細かい科学的説明をしてみてください。

野村 いいでしょう。いずれにしても今ここでの論点ではないですものね。

ガブリエル いや、本当にボトルやテーブルなどの意味を明確にしましょう。

野村 いいでしょう。

ガブリエル さて、私たちは「テーブルの上にボトルがある」という思想をもっています。その思想をあなた方はあなた方の生命体でもって、そして私は私の生命体でもって処理しています。それを「思考」と言いましょ。つまり、思想を処理する過程が思考です。思考しているものが思想です。しかし、私とその思想を思考しているとき、私が思考しているものは実際にはテーブルの上のボトルなのです。

村山 すると、この物体が思想だと言っているわけですね。

ガブリエル その通りです。

村山 分かりました。

ガブリエル これは哲学者が事実と呼ぶものです。

野村 それは良いとして、何が謎なのか分かりませんでした。

ガブリエル 今、私が言ったことは真であると期待していることで、まだ謎の話になってはいません。それでは、これが問題です。思想は「偽」であり得るでしょうか？否定的事実というものが存在し得るでしょうか？

村山 思想は偽であり得るか？

ガブリエル そうです。「思想は偽であり得るか？」です。否定的事実というものは存在しないとしましょう。ここに「ボトルがテーブルの上にある」という肯定的事実が存在します。では、ここに否定的事実も存在するでしょうか。例えば「テーブルの上に豚はいない」という事実です。

野村 否定的事実が意味することは...「テーブルの上に豚はいない」ですか？

村山 それは事実です。

野村 そう、それは事実です。

ガブリエル そうですが、その事実は否定的ですか？「テーブルが存在する」という事実は必然的に「まさにテーブルがある位置には豚は存在しない」を伴います。現実には肯定的事実と否定的事実から成り立っていませんか？

^{*8} 命題の統一とは、いかにして文は命題となるのか、つまり文が名辞の列挙以上のもの、要するに真もしくは偽と判定されるもの(命題)になるのか、という問題です。例えば「ソクラテス」は「ソクラテス」を、「賢い」は「賢さ」を表しているだけです。それなのに「ソクラテスは賢い」という文を作ると、それは真偽の判定が可能一つの命題になります。それはどうしてかという問題です。

野村 分子、または粒子、あるいは何であれ、それらがある決まった方法で配置されているという事実しかないように思えますが...

ガブリエル もちろん、分子は事実に含まれており、それらの事実は否定的ではありません。しかし、問題はこうということです。否定的な事実は決して存在せず、単により多くの肯定的事実が存在すると仮定しましょう。そこで私が事実を置き換えると思って下さい。現在の事実は「ボトルがある」というようなことです。それを置き換えてみます。これにより私は否定的事実は創りませんでした。存在するのは否定的事実ではなく、単に新しい事実です。

村山 そうです、それは新しい事実です。

野村 もちろんあなたはそれを否定的事実と定義することもできただしょう、しかしそれは単なる取り決めに過ぎません。

ガブリエル 問題はこうです。もし否定的事実が存在しないとしたら、どうしたら思考する際に間違えることができるでしょうか？ 私が何かを考えるとしましょう。ある思想を考えます。現実を処理します。もし否定的事実というものがないならば、どうやって間違えるということができのでしょうか？ すると常に現実だけが現れるということになるでしょう。以上です。事実だけが現れます。どうやって私たちの現実との関係の主観性、つまりそれが間違っていることもあり得るということの説明をしますか？

野村 私ならこう言うでしょう。例えば、ここにボトルがあるという事実にもかかわらず—村山さんはこのテーブルの上にボトルがあるという思想をもち、あなたもテーブルの上にボトルがあるという思想を共有し、誰もが皆同じ思想を共有するという意味で—それにもかかわらず、もし私がボトルは存在しないという思想をもつなら、それが誤りの定義と考えられます。

ガブリエル ええ、それは誤りと呼べ

るでしょう。しかしその場合、誤りとはあなたの中で起きていることこのテーブルの上のものとの関係ですよね？ いいですか、もしそれがあなたの理論とすると、それは真理の対応説ということになります。なぜなら、あなたは誤りについての理論をもっていると言い、誤りとはここにあるものがそこにあるものと対応しないことだと言っているからです。同様に、あなたが間違っていない時に何か起きるかということも定義することができます。もしあなたが間違っていないとすると、ここ（私の心の中）にあることがテーブルの上にあるものに対応します。これは真理の対応説です。それがあなたの理論です。

量子力学の世界で真偽はどのように定義されるか？

野村 ええ、私が言ったのはそのようなことですが、全く同じというわけではありません。私の理論で誤りは統計的にのみ定義されます。

少なくとも量子力学の世界では、ものごとは常に信頼度あるいはそれと類似の観点から考えなければなりません。これは先ほどお話しした例ですが、*9 Zボゾンと呼ばれる粒子の質量を簡単のため90 GeVと仮定しましょう。それはある分布の90 GeVのところにピークが存在することに対応し、このようなピークの存在から通常私たちは粒子の質量が90 GeVであると言います。しかし、「本当の値」は80 GeVかもしれません。量子力学ではあらゆるものが統計的であるため、本当の値が80であるという事実にもかかわらず、実験では稀な偶然によって質量が90に見えてしまうということが起きたのかもしれませんが。それでもあなたは「他の実験でも90という結果だったので、80が本当だということはありません」と言うかもしれません。しかし、他の実験の結果も統計的な偶然かも知れません。こういう風に考えると何も言えなくなってしまいます。

そこで、科学の世界では私たち

は常に、少なくとも暗黙のうちに、typicality（典型的であること）という概念を用いて、あることの信頼度が高い場合にはそれを真実とみなすことにしているのです。従って、もし100人がこのテーブルの上のボトルを見ているのに私一人が見ていない、あるいは測定していないのならば、私が間違いを犯しているということの信頼度が高まります。そして、もし1000人が見ているのに、それでも私が無いと言うならば、私が間違いを犯しているということの信頼度はさらに高まります。

ガブリエル ですが、問題があります。**村山** そうですね。その場合、間違えたとは決して言えないことになります。

ガブリエル その通りで、間違えたとも正しいとも決して言うことができません。

野村 それでもこの論理は正しいと思います。なぜなら...

村山 そうすると正しいというのはどういうことだと考えるのですか？

ガブリエル 野村さん、あなたが言ったことは、反証可能性も存在しないということの意味しているように見えます。なぜなら、もし絶対的な真が無いならば、絶対的な偽も無いからです。また、理論を反証することもできません。

野村 それに私も同意します。

ガブリエル 同意？

野村 ええ、同意します。

ガブリエル そうすると理論などというものは意味のない...

野村 私が言っていることは、今挙げた例の「私は間違いを犯している」が統計的なステートメントであるのと全く同様に、反証可能性もまた統計的なステートメントであるはずだということです。同様に「Zボゾンの質量は90 GeVである」も、少なくとも量子力学の世界では統計的なステートメントであ

*9 この座談会に先立ち、ガブリエルさんのセミナーの後で行われたガブリエルさん、野村さんを含む3人のパネリストによるパネルディスカッションでこの例についての話がありました。

り、古典の世界でさえも実際にはそうであると思います。

村山 それは標準的なアプローチですね、量子力学の...

野村 ええ、私はそう思います。

ガブリエル 確かに。

野村 実際、ものごとは常にそのようなものなのです。真か偽かのようなものは、どんな規準も実は常に連続的につながっていて、どこかでカットを入れなければなりません。あなたが挙げた例、テーブルの上のボトルも例外ではありません。これは重要な点です。私の主張は、基本的なレベルでは私たちは常にこのように考えなければならぬということなのです。

ガブリエル 常にそう考える、そして決まった値というものはない。

野村 その通りです。

ガブリエル 研究を進めていくと、その状況に応じて必要な値が決まってくる。

野村 その通り！

ガブリエル 進めながら値を決めてゆく。必要な値は計算によって決まるものではない。絶対的な確かさも無ければ、絶対的な反証可能性も無い！

野村 その考え方に大変共感を覚えませう。

村山 そうです。その状況に応じて変わる部分というのは、社会学的な意味で物理学のコミュニティの中でも全く当てはまります。もしヒッグス・ボゾンのような粒子を発見したと主張するならば、要求される基準はとて厳しく、信頼度99.9997%が要求されます。

ガブリエル その通り、とても厳しい基準です。

村山 しかし、誰かが新しい理論をつくり新粒子を予言したといった場合には、誰もそれに重きをおかないでしょう。この場合、データを取り、その仮説を排除する上では、それが信頼度90%であったとしても十分なものと捉え、「その粒子は存在しなかった」と言うことになるでしょう。

野村 ええ、それは社会学的なことですが、しかし面白いですよ。

村山 ええ、それがあなたが述べた定義です。

ガブリエル いいですか、これはある意味で反証可能性規準も破綻することを示しています。

野村 厳密な意味では。

ガブリエル そうですね、厳密な意味では。

村山 なぜなら100%でないから。

野村 そうです。イルカの例でも同じだと思います。つまり、もし全ての原子の運動を、例えば超強力なコンピューターで追えるとするならば、全ての情報を含む全素粒子の運動が追えるのだから、必ずしもイルカだの人間だのといった概念を導入する必要は無くなります。私たちが話しているほとんど全ての概念は、本質的に連続なものを暗黙のうちに人為的に分割した近似的なものなのです。その上、少なくとも量子の世界では、この分割は統計的であればなりません。実際、この議論を逆転させてこう言うことさえできるかもしれません。「これが物理学の基本法則が量子力学のような形をとる理由だと...」

ガブリエル つまり、実際に起こっていることはある変動、そう言いたければ思考のなかでの変動、それと思考レベルでの確率の変動だということですよ？ 変動する波を考えてみると、コンテクスト変数（状況に応じて変わる要因）自体と相関しているような点が幾つか存在し、私たちはよし、これは反証だとか、これは確認だとか、これはデータだとか呼びます。しかし、これはポパーの反証の描像とは非常に異なるものです。なぜなら彼の反証の描像とは次のように機能するものだったからです。「全てのカラスは黒い」と主張したが、白いカラスが見つかったので「しまった！間違っただけだ」というようなものです。そこで主張を撤回します。

それがモデルだったわけで、実際には反証の描像が幾つかの事実の存在と、個々の事実についてそれを得られるか否かの二者択一を前提とするもの

でした。ポパーは、全ての事実を得ることは決してないと言っただけです。得られるものは常に全体のごく僅かの一部であり、やがて更なる事実が得られるが、中には恐らく反証となる事実も含まれる。それだけです。ポパーなら科学とは以下のように進むのだと言うでしょう。全てのカラスは黒い。間違いだ、白いカラスがいる。「しまった！黒いカラスのことは忘れよう。」カラスについて知っていることは何だろうか？（白いカラスもいる）それが結論だ。これ以上カラスに興味は無い。

村山 その科学の定義は実に情けないですね。

ガブリエル そうですね。実際の科学の定義とは違いますよね？ 従って、科学のダイナミクスが簡単にストップできないような中間の立場があるに違いありません。そうでしょ？ しかし、それは帰納的なデータ収集によって駆動されるものではありません。

野村 私が強調したように、仮定の数を減らすため、すなわちより良い理論を得るためには常に統計的な推論を使っているのです。例えば、あなたの理論が全てのカラスが黒いと予言し、それにもかかわらず白いカラスを見つけたとします。すると通常、それにより理論を反証したと言います。それはそれで結構です。しかし原理的には、あなたが瞬間的に色覚異常を起し、そのため色を正しく知覚できず、その後正常に戻ったという可能性も排除できません。これを厳密に排除することはできないのですが、私たちはこのようなことが起きる確率は極めて小さいということを知っており、それを暗黙のうちに仮定します。その意味するところは、あなたの理論は極めて高い信頼度で否定されるということです。このように、私たちは常に統計を使っているのです。

ガブリエル ここでは、恐らくホーリズム（全体論）のあるバージョンが当てはまるのだと思います。クワインは物理の理論を、その末端が測定結果であるような信念の網目構造として考え

ることを提唱しました。私たちは宇宙と接触していますが、物理学の助けにより信念体系を広げて行きます。科学は単なる感覚データと帰納的主張の総和ではありません。

村山 それは本当に人間の感覚システムであることが必要ですか、それとも測定装置によっても拡張され得るものですか？

ガブリエル ええ、測定装置によって、従って観測によって拡張され得るものです。

村山 それなら結構です。

野村 この問題が興味深い理由がまさしくここにあります。古典力学的な世界では、この信念体系の拡張にともなう確率的要素は不完全な知識に帰せられます、すなわちあなたの知っていることの精度が不完全だということにです。

村山 天気予報のように。

野村 ええ。しかし、もし全ての素粒子の位置と速度を完全に知り、超強力なコンピューターがあれば、このような確率的性質を持ち込む必要はない...

ガブリエル ええ、それなら大丈夫です。

再び意識を議論する

野村 しかし、量子力学はそうではないと主張します。確率ももっとずっと基本的なように見えます。しかし、これは意識の問題を引き起こします。例えばあなたはこう言うかもしれませんが。「ちょっと待って下さい。あなたは確率のみが物理的な存在だと言うけれども、私は特定の場所に特定の時間に存在していますよ。」と。これは、何か意識のようなものに立ち戻ることを要求するのかもしれませんが—物理法則を定式化するには意識を持ち込まなければならないのでしょうか？それは疑わしいとは思いますが、はっきりした結論は持ち合わせていません。

ガブリエル しかし、多分こうすればその描像にデコヒーレンス^{*3}を持ち込むことができるかもしれません。意

識ではなく、思想を使うのです。それで、もし私がひとたび思想環境を安定化したら「測定の問題」の意味での測定が行われる、従ってそれは内部的なものではないとしたらどうでしょうか。意識とは何か非常に個人的な、心の奥に秘めたものというのが典型的な見方ではないでしょうか？ 私にはあなたの意識は見えません。意識の概念は、このことを暗に含んでいます。

しかし、もしこの思考という別の概念を考えてみると、多分うまくできるかもしれません。この場合、思考が私を測定システム—動物としての私、丸ごとがです—と化し、環境と接触させ、その環境、すなわち動物のまわりの環境が古典的になっていきます。さもないと動物は生き残れないでしょう。動物は確率を跳び越えたりしません。シュレディンガーの猫が選ばれたことが非常に適切な理由がそれです。動物だからです。動物だから「死んでるのか、それとも生きてるのか？」などと問うことのできるのです。そのためには、死んだり生きたりする動物であることが重要なのです。恐らく私たちは、考えることができるシステムというようなもので...

野村 私はそれに共感を覚えます。実際、私は論文の一つでそのようなことを言ったことさえあります。^{*10} ここでいう古典化とは情報の増幅に他ならないかもしれません。それが私の議論した可能性です。私は必ずしも意識が重要であり必要であるとは考えませんが。

ガブリエル 意識ではありません。意識について話している訳ではありません。

野村 しかしもしかしたら意識なのかもしれません。そうであるという提案はしませんが。

ガブリエル しかし、ここで提案していることは意識と関係したことはありません。もっとずっと客観的な提案であって、「主観的意識」とは無関係なものです。

村山 それで、思考 (thinking) と思

想 (thought) はこの問題に取り組む上でどういう働きをするのでしょうか？

ガブリエル そうですね、こういう描像です。思想は真か偽かどちらかです。明確に A か B あるいは on か off の2つの状態があります。それが思想を情報に翻訳できる理由です。

村山 分かりました。すると思想は古典的ですね。

ガブリエル 古典的です。思想は古典的であると思います。

嘘つきのパラドックス

野村 しかし、あなたがしばしば A または B、あるいは Yes または No というタイプのステートメントについて触れるので、こういう質問をしたいと思います。「私は嘘つきです」というタイプのステートメントの位置づけをどう考えますか？^{*11}

ガブリエル うーん、そうですね、その問題は次のように解決できると思います。嘘つきのパラドックスは命題「L: Lは間違いである。」として定式化される単純なものです。解決法には幾つかありますが、一番好きなのは私の友人のドイツ人哲学者、セバスチャン・レドル (Sebastian Rödl) が最近与えたもので、彼によれば嘘つきのパラドックスは単なるナンセンスです。つまり、こういうことです。

私があなたを見て「言った。」とつぶやいたとします。そこであなたが「何？何を言ったの？」と私に聞いたとします。出し抜けに「言った。」と言われたあなたが私を見て「何を？」と聞いたのに対して、「それを。」と

^{*10}Y. Nomura, "Quantum mechanics, spacetime locality, and gravity," *Found. Phys.* 43 (2013) 978, arXiv:1110.4630 [hep-th].

^{*11}「私は嘘つきです。」というステートメントの真偽を考えると、もしステートメントが正しければ(真)、それは嘘(偽)だということになり、もしステートメントが間違い(偽)ならばその人の言ったことは嘘ではない(真)ことになります。野村さんは単純にYesかNoとは答えられない例としてこういうものがあり得ると問題提起しました。(例としては、「この文章は間違いです。」の方が恐らくもっと適切なステートメントでした。)

返したようなことを想像して下さい。さて、「あなたは私に何を言いましたか？」は真っ当な質問ですよね？そこで、もし私が単に「言った。」とだけ主張したとすると、実は私は何も言っていないのです。「それ」が何かを言わずにあなたに「それ」を言うことはできないのです。従って、嘘つきのパラドックスは、単に真理条件を指定していないだけなのです。一見「それ」自身について主張するステートメントを含んでいるのに、「それ」が何かを記述せずに「それ」が間違いだと言っています。

野村 うーん、それは面白いですが、これはそもそも「解決」しなければならない問題なのでしょうか？ゲーデルがこの問題を提案したとき、彼はブール代数の yes か no かのロジックには内在的な限界があることを示そうとしたのであって、パラドックスとして提示した訳ではないと思っていました。これは単にブール論理の特徴であって、ブール論理が完全ではあり得ないということなのです。

ガブリエル そうですね、それが一つの扱い方ですが、あるいは、例えば興味深い論理の見解である真矛盾主義（真なる矛盾が存在するという哲学的立場）を受け入れることもできます。それによれば、嘘つきの命題は真でもあり偽でもあるということができません。

村山 真であり、かつ偽である？

野村 つまり、ブール論理だけでは十分でないと言ってる訳です。それを拡張することが必要なのです。

ガブリエル 全くその通りで、それは可能です。

村山 すると、同じ筋道で考えるのですね。

ガブリエル ええ、それは可能です。矛盾許容論理の一形態です。

野村 いいでしょう。

ガブリエル それで問題ないのですが、私の解決法の方がもっと簡単です。私が「私は嘘をついている」と言い、しかしあなたに何も話していない



場合、私は嘘を言っていないと思います。従って、パラドックスは存在しない訳です。パラドックスを創り出すためには何か言うことが必要です。

村山 しかし、もしあなたが「私はいつも嘘をつく」と言ったら、それはパラドックスです。

ガブリエル そうか、それはパラドックスになりますね。なるほど、私はいつも嘘をつか。しかし、その場合、恐らくそれに対する答えは「ノー」ではないかと思います。誰かが「私はいつも嘘をつきます」と話しかけてきたとしたら、私は「いいえ、今あなたが言ったことは本当でもなく間違いでもないの、あなたはいつも嘘をつくわけではありません」と答えることができるでしょう。

私たちが基本的にこの問題を話し手から抽象化して定式化する理由がこれです。そうしないと単にこれが正当な話し方でないと言って否定してしまえるからです。「そういう風に話さないで下さい」と言って終わりにできますよね？だから私たちがそれを定式化するときには、通常命題 L のように言い、その内容は「L は間違いである」というようにするのです。すると正しく考えることができます。

野村 その通りで、従って負のフィー

ドバックは常にブール論理の範囲を超えているのです。

ガブリエル まったくです。従って、私たちはこれが実際に問題を起こすことを知っています。これは私が論理空間の中でさえ総体というものには存在しないと考える理由の一部であると思います。なぜなら、もし論理空間に総体が存在したとすると、その中には嘘つきも含まれるでしょう。ですから例えば嘘つきのような何かを除外しなければなりません。とにかく理論と言えるものにするには嘘つきのパラドックスやその他のパラドックスを除外することが正当化されなければなりません。

野村 面白いですね。私はこれが量子力学と関連している、なぜ量子力学が部分系だけに適用されるように定式化されているのかに関連していると考えています。私はこれがゲーデル（の不完全性定理）^{*12}に関係しているのではないかといつも感じていました。

ガブリエル ええ、私も同じ考えです。

村山 野村さん、そうですね、それでこの問題を持ち出したのですね。

野村 はい、私はいつもそういう風に

^{*12} 数学者クルト・ゲーデルにより定式化された2つの定理を併せてゲーデルの不完全性定理と呼びます。これらの定理によれば、自然数論を含む帰納的公理化が可能な理論は必然的にある種の本質的な限界を有します。つまり「不完全」です。

考えていました。

ガブリエル 私の理論は基本的レベルでは、ゲーデルの定理とその結果から私たちが知っていることの一種の一般化なのです。しかし、ゲーデル理論には残された問題があります。例えば、文章は意味を持つという事実を説明せずに文章にゲーデル数を割り当てると、(不完全性定理を証明するための)からくりを使わなかったことになります。ゲーデル理論では証明したいと思うものが証明できるようにするため、その前に意味論的意味の理論を必要とするのです。しかし、ゲーデルは意味の理論は与えず、記号列を印字する形式的なシステムしか与えませんでした。もしもそれらの記号を理解する者がいなければ証明は決して完成しません。

さて、もし私の議論が妥当なものであれば、一般化されたゲーデルのシナリオを与えてくれます。私は一般化された不完全性定理を考え出しました。どんな場合であろうとも、完全性を目指しても決してそれを得ることはできません。それが私の主張です。非常に強力かつ一般的な主張であり、従って量子力学にも当てはまるに違いありません。

野村 そうです、それが私が言っていることです。

ガブリエル 全くその通りです。

野村 あ、あと10分で終わらなければ。話はとても面白かったのですが、どうやって記事の形に取りまとめましょうか？できますかね？...

科学は哲学との出会いにより科学とは何かを知る

ガブリエル まとめられるでしょう。例えば、今最後に登場したこの話題に私たちが取り組むなら、つまり私が私の理論で原理的に反証可能、検証可能なものを明確に定式化するなら、それは明らかに私たちが量子力学を研究し理解する方法に影響を与えます。なぜなら、今やあなたは私が言っていることを選択しなければならず、従って反

証できるかもしれません。これは高い賞狙いのギャンブルみたいな主張です。もしあなたが量子力学は完全系であると示すことができたなら、私の言っていることを反証したことになるでしょう。

野村 少なくとも量子力学の世界で。

ガブリエル ええ、少なくとも。それはそれで一般的なものでしょう。

野村 なぜなら数学的にゲーデルがあなたの理論の例...

ガブリエル そうです、とにかく数学的には私の言っていることは正しいですよ。

野村 そうですね、哲学はもっと一般的なもので...

ガブリエル そう、従ってとにかく私は正しいのです。(全員爆笑)しかし、私にはもう一つ、さらに強い主張があります。それは、こういう仮説です。一般的な考え、一般化された安定な考え、私の一般化されたゲーデルの不完全性定理は量子力学の範囲内でも影響をもたらすに違いないということです。物理学者のカルロ・ロペリの著作にも見られるものです。私は以前マルセイユでの公開イベントで彼とこのことについて議論したことがあります。

野村 あなたの哲学は狭い意味では、あなたの原則が物理学の世界にも当てはまるという主張に見えます。

ガブリエル そうです、それは狭い意味での仮説です。

野村 それは少なくともある程度は真である可能性があると思います。

ガブリエル そう、それは驚くべきことですよね？これが物理学に対して実際に影響をもたらすと思うのですが。そうではないですか？

野村 そう思います。私たちが探し求めているもの、すなわち自然界全体の完全な論理的枠組みは存在しないものかもしれません。しかしそれを科学的に知る唯一の途は、繰り返しになりますが、そういった枠組みを探し続けて失敗し続けることによるのみだと思います。その意味では、私たちがやらなければならないことはいずれにせよ

同じです。しかし、深い哲学的な考えによってもたらされる別の可能性を考慮に入れておくのは良いことだと思います。つまり失敗は必ずしも私たちの力不足のせいではなく、むしろ何か基本的なこと—そのような完全な枠組みは単に存在しないということ—を示しているのかもしれないということです。これは文字通り哲学と科学が出会う場であって、面白いことです。

ガブリエル そうですね。これは実に面白い問題です。私たちは今、哲学者として私が言っていることの幾つかと物理学に実際に現れる事とを理解しました。なので、これらを完全に明確に表現する作業を続けることができると思います。もし私たちがそれを明確に表現したら、それこそ私がかつて見たことのない科学哲学であると思います。私たちが定式化した科学的な仮説—科学と知識と現実を理解するための波及効果と影響を伴うものですが—それは今まで誰も定式化したことはなかったと思います。

村山 すると、科学哲学は実験的にテストできる訳ですね。

ガブリエル そうです。それが主張です。科学は哲学者に話しかけることにより科学とは何かを知ることができるのです。私の考えでは、現在実践されている科学哲学は失敗です。私たちは協力し、本当の形而上学(あるいは、むしろ私が存在論と呼ぶもの)と物理学を融合させる必要があります。

村山 それは実に驚くべきことですね。

ガブリエル それで科学自身は思慮深くなり、私たちはハイデガーの有名な主張、「科学は思惟しない」を反証します。科学はそれ自身哲学の一形態なのです。

野村 その通り、私はその考えに大賛成です。

ガブリエル でしょう。

野村 哲学の一分野のようなものです。

ガブリエル 科学は哲学の一分野です。

村山 科学者は皆それに賛成すると思えます。

野村 ええ、でも完璧な表現とは言えませんね。多少ですが人によって違うところがあるので一細かい点ですが。恐らく基本となる考えはほとんどすべての科学者に共有されると思えますが、これを調べることも興味深いですね。

ガブリエル そうですね。これについての研究プロジェクトは今までにはないのでは？何を言っているかという...

村山 あなたはご存知と思いますが、科学者の中には哲学という言葉を経典的な意味合いで使う人もいます。

ガブリエル ええ、知っています。

村山 否定的な意味で。

ガブリエル スティーヴン・ホーキングとか、「哲学は死んだ」とか。しかし彼らはそう言いながら哲学を定義していません。ですからホーキングの主張、「哲学は死んだ」は最大限に非科学的ですよ？

野村 彼は定義しなかったから...

ガブリエル 「哲学」や、そういえば「科学」も。

村山 定義しなかったものを排除している。大したものですね。

ガブリエル ええ、大したものです。哲学は死んだと言うのは...実際は何を意味するのか知りませんが、もし彼らが哲学という言葉で「キリストは死んだ」を意味するのなら、それは真であり、実在したとしても彼は死んだのです。しかし、彼らが本当に哲学は死んだと言うのなら、物理学も死んだと言っていることになります。

野村 そう、物理学は哲学の一形態だから。それが私たちが話していることです。あらゆることが哲学です！

ガブリエル 全くその通り！だからこの素晴らしいフィードバック・ループが... 科学は科学の範囲内で科学を見通すことができます。

村山 ええ、素晴らしいことです。

科学に対する一般市民の誤解を正すために

ガブリエル あなたたちは科学者としてこのことを知っていますが、それはこれまで科学哲学に組み込まれたことはありませんでした。私の知っている科学哲学は全て二元論的で、こちらで科学、あちらで哲学を考えるというものです。ですから科学者は自分のことをするだけです。彼らは基本的に超スマートなエンジニアですよ？彼らは装置を作り、物事を理解するのですね。

野村 それから計算します。

村山 一般にそう認識されてますね。

ガブリエル そうですね、そう認識されていますが、ひどい認識ですね。ひどい誤解です。

村山 全くその通り！私はそういう認識に大反対です。

野村 ええ、それは科学とは違いますね。

ガブリエル とんでもない話です。

野村 しかし、一方で多くの科学者がまさにそういったことしかやっていないようにも見えます。だからこそ私たちがしているような交流が興味深く、もしかすると有益でもあるのです。科学は単なるエンジニアリングや計算ではないからです。

ガブリエル もちろんそれもしなくてはならないにせよ、それだけが科学ということはありません。そのように振る舞うかもしれませんが、それは必ずしも実際にそうしているということの意味しません。もし私たちがこの水準の内省をすれば、哲学と科学の両方に対する一般の認識は完全に変わるでしょう。現代民主主義などの現代性が論理的に技術と科学に頼っているから、それが何かということについては不十分な理解しかしていないことを考えれば、今私たちがしていることは単にある問題に答えるというよりはもっとずっと大きな影響をもたらすものです。もし、あなたたちがこのことを正しいやり方で明瞭に表現すれば... 私たちが本当の科学と本当の理論哲学を融合させたとしたら... どんな社会的な影

響が得られるか想像してご覧下さい！

村山 それは本当に重要です。実際、私が見た真実研究の新しい傾向があるのですが、それは一般市民がどのように科学を認識しているかについて示すものです。概して人々は科学を信用しています。それは調査でも分かるのですが、同時に人々は科学者が実際は何をしているのか、どのように考えているのか等々知らないため、科学から切り離されているように感じるとはっきり述べています。彼らは本当に科学が信頼できるものかどうか、よくは分かっていないのです。ですから、その断絶は実際に社会的問題を引き起こしています。

ガブリエル そうです。大きな社会的問題です。そして私たちがその社会的問題とは何かを把握すると、それは科学的な問題になります。ですから、私たちはこのループが再び重要な役割をもつようにするのです。

野村 二つコメントがあります。何はともあれ、今日と昨日私たちが示して見せたのは、少なくとも日本では一般の方々からの需要があるということです。今日のイベントをご覧下さい！特別とは言えない建物の13階の部屋で実施されたのに、聴衆で一杯でした。昨日の私たちの対談^{*2}でも多くの聴衆が集まりました。ですから、需要はあるのです。

ガブリエル ええ、確かにそうでした。

野村 二つ目のコメントは、これは村山さんのコメントを支持するものなのですが、一般の人たちは科学者が何をしているのか、どのように研究しているのか、恐らく実際には知りません。例えば、今日のイベントで誰かが科学における直感の役割を質問しましたよね。

ガブリエル ええ、そうでした。

野村 私は、科学の研究では確かに直感を使うが、どんな物理法則やその類であろうとも最終的に出来上がったものは直感に頼るものであってはならないと答えました。質問した人は、「そうか、それですっきりした。」といっ

た感じでした。私は当たり前のことを言っただけだと思ったのですが、それを聞いてびっくりするような人もいたわけです。ですから、私たちのイベントを聞きに来て良い質問をしたような知識人層の人たちでさえ、私たちがどのような哲学の下で何をしているのか、本当には知らないのかもしれませんが。従って、公開の場でこのような議論は非常に有益だと思います。

村山 それは非常に明らかです。

ガブリエル 需要はとても大きなものだと思います。つまり、様々な方向から来ているという事実を...科学者の側からの接触があって私はその需要の力に気づきました。

村山 ははあ

ガブリエル そうです、村山さん。あなた自身がその証拠です。私はここに招待されたのですよね？私の活動とあなたの活動が重なり合い、そしてある時点で私の電子メールボックスに電子メールを受け取りました。そして、私が招待されたという事実は、それが科学自身のシステムの中で起きたことを意味します。

これは科学の最先端で起きていることと関係があるに違いありません。科学自身がより内省的になり、それにつれて科学の

性質にも変化を生じさせています。現在、何か非常に革新的なことが起きつつあり、そして科学の社会的システムが現代技術、従って民主主義等と深く関わり合っていることを考えると、ここにさらなるフィードバック・ループが存在しています。ですから、多くのことが進行しており、ドイツでも明らかにその需要が起きています。

野村 3番目のコメントもありました。今日の対談はとても楽しかったです。

ガブリエル それが一番確かなようです。

野村 ええ、それは全く正しく、信頼度99.99...

ガブリエル 私も同じです。最高でした。

村山 科学的方法は、教えられ、強制されたようなもので、自分の内心から生じたものではないため、私は常に「自分は何をしているのだろうか?」という疑問を抱いていました。私自身、科学をし、それが自分の人生でもあるので、なぜ自分はこんなことをしているのか、なぜ重要なのか、そしてそれは何の意味があるのだろうかかと考えることがあります。私は、恐らくこういった疑問は次々に湧いてくるのだらうと思います。そして、この対談は、正直に言ってこういった疑問に答えてはくれませんでした。それでも私たちは考え続けました。

野村 ええ、それが私たちにできることです。哲学とは考えることなのです!

ガブリエル そうです、哲学は何も答えてくれません。(笑)

野村 必ずしも答えてくれるわけではないですね。たまには答えてくれますが...

ガブリエル 社会的な分業の中で、一般的哲学者としての私の役割は、科学的知識のポケットを色々調べることだと思います。そうすることでこういったフィードバック・ループ全てが動き始めています。今、私たちはこの変動するネットワーク全体の中で準備が整い、そして、もしここで何かを変えると、それが「場」であることを考慮すると—これが私の哲学で「場」という比喻、「意味の場」を用いる理由なのですが—この場の中で何かをすると、恐らく「意味の場」のいたる所でもつれ現象のようなものが起きることになるでしょう。

村山 なるほど。

野村 素晴らしい!今日は楽しかったです。

ガブリエル いや、良かったです。今後もよろしく。

村山 ガブリエルさん、ありがとうございました。

ガブリエル ありがとうございました。

初期宇宙観測のための超大型望遠鏡国際会議 @Kavli IPMU

アルヴィオ・レンツィーニ Alvio Renzini

Associate Scientist, INAF, パドヴァ天文台

ジョン・シルバーマン John Silverman

Kavli IPMU 准教授

直径20～40 mの超大型望遠鏡の出現により、次の10年間は地上の望遠鏡データに基づく可視・近赤外線天文学の大きな転換期となるでしょう。このような3つの大型望遠鏡、30メートル望遠鏡(TMT)、超大型望遠鏡(ELT)、および巨大なマゼラン望遠鏡(GMT)の建設は、既に開始されている、あるいは近々開始される予定です。日本の天文学研究者コミュニティは、これらの望遠鏡のうちTMTに参画しています。これら大型望遠鏡で可能になる最遠方宇宙のサイエンスを議論するために、3部構成の国際会議シリーズが企画されました。この1月にUCLAでのキックオフ会議で始まり、続いて3月25-29日にKavli IPMUで2回目の会議が行われ、9月にローマで第3回が開催されます。

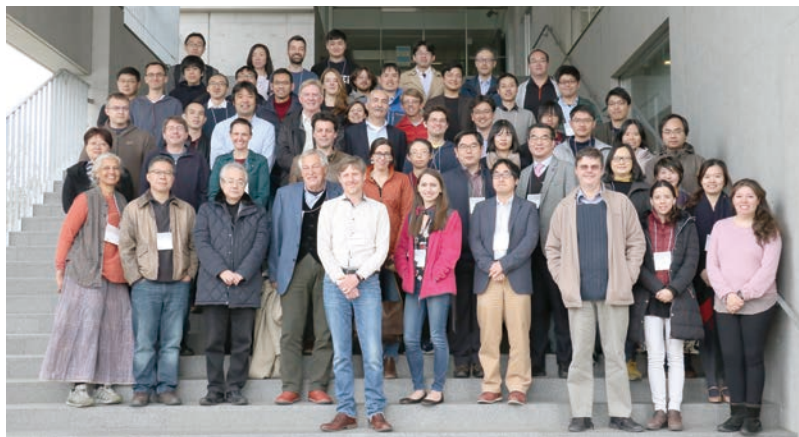
このワークショップにはアジア太平洋地域、米国、ヨーロッパから70人以上の研究者が参加し、各大型望遠鏡の現状と性能が報告されました。3つの大型望遠鏡(以下、ELTsと表記)は、(ハッブル宇宙望遠鏡の後継機である)次世代赤外線宇宙望遠鏡であるジェームズ・ウェブ宇宙望遠鏡(James Webb Space Telescope: JWST)の運用から数年遅れで運用を開始するものの、地上大型望遠鏡ELTsはJWSTと相補的であり、さらに様々な点で優れた性能を示すでしょう。

まず、先進的な補償光学の威力により、回折限界の空間分解能を達成し、ELTsはJWSTよりも約3～6倍高い空間分解能を持つでしょう。これは、赤方偏移7では20～40パーセクの距離に対応し、そのように高く赤方偏移し、かつ暗い銀河の微細空間構造を明らかにします。また、ELTsはJWSTに比較して光の短波長側をカバーし、同時により多数の銀河の分光を可能にし、さらにその運用の寿命も長いので、総合的により高い分光観測の威力を発揮すると期待されます。

これらの比類のないELTsの性能は、最初の銀河と宇宙の再電離、銀河と銀河中心の超大質量ブラックホールの共進化、銀河形成・進化に付随するバリオン物質の循環(星形成を引き起こすガスの降着、あるいは銀河から宇宙空間にまき散らされる金属量)、(観測的に明らかになっている)銀河の星形成を抑制する何らかの物理過程、などの研究分野に大きな進展を約束しています。研究会では50以上の最先端の研究結果が発表され、特に、多くの発表で、銀河の観測的研究は銀河を取り巻く大きな距離スケールの環境との関係に注意しながら進められるべきであると強調されました。この点において、すばる望遠鏡のハイパー・シュプリーム・カム(Hyper Suprime-Cam: HSC)で行われており、また近

い将来、超広視野分光器(Prime Focus Spectrograph: PFS)で行われる大規模サーベイは、ELTsのサイエンスのための突破口を切り開くでしょう。また、理論研究者は、これまでにない大規模かつ詳細な銀河の数値シミュレーションの最先端の成果を発表し、さらなる理論モデルの改良のためにもより多くの観測的制限の必要性を強調しました。

会議の期間中には、いくつかの重要な問題が認識され、議論されました。最も大きな問題は、独立な3つの大型望遠鏡を如何に最適化し、可能な限り幅広い性能をカバーし、これにより多様な天文学の分野、サイエンスを実現するかということです。実際問題(予算状況)として、個々の大型望遠鏡がその口径の威力を最大限発揮するために、全ての観測装置を保有することは不可能です。より現実的には、3つのELTsがそれぞれ異なる、あるいは相補的な性能を持つ観測装置を保有し、世界中の研究者が協力し合い、創造的、独創的なサイエンスを行うことが最善であり、理想的です。このように、現在の研究成果から将来を展望すること、および可視・近赤外天文学に提供されるエキサイティングな将来の機会に備えることがワークショップの最終的な目的でした。



表現論、ゲージ理論と可積分系

中島 啓 なかじま・ひらく

Kavli IPMU 主任研究員

2019年2月4日から8日にかけて、ワークショップ「表現論、ゲージ理論と可積分系」が中島 (Kavli IPMU)、Sala (Kavli IPMU)、立川 (Kavli IPMU)、吉田 (Kavli IPMU) を組織委員とし、科研費16H06335と国立大学改革強化促進補助金から支援を受けKavli IPMUで開催されました。

この研究集会は、表現論、ゲージ理論と可積分系間の接点に焦点をおいたものです。近年、これらの間にはたくさんのつながりが見つかっています。たとえば、ゲージ理論の分配関数を表現論や可積分系を用いて計算すること、量子代数の表現をゲージ理論に現れるモジュライ空間を用いて実現すること、ゲージ理論に基づき新たな量子代数の例を与えることなどがあります。この研究集会では、数学者と物理学者、また専門家と若い研究者を海外と日本から招へいし、新しい発展を議論し、また将来の研究につながる見込みのある方向性を探りました。

Nekrasov, Bershteinと山崎の講演では、4もしくは5次元の超対称性 (SUSY) ゲージ理論と、微分または差分方程式のモノドロミー保存変形、Painlevé 方程式の関係について議論されました。特に、Painlevé 方程式の解がゲージ理論の分配関数として実現され、広田型の方程式として知られる双線形関係式が SUSY ゲージ理論の性質から導かれます。

柳田とYangの講演では、代数多様体上の接続層の圏の Hall 代数について議論されました。柳田は、アーベル曲面上の接続層を用いて、Macdonald-Ruijsenaars 差分作用素の双スペクトル性の新たな証明を与えました。Yang の講演では \mathbb{C}^3 上の接続層で2次元の座標平面の和に台をもつものの定めるコホモロジカル Hall 代数が調べられ、 $\widehat{\mathfrak{gl}}(1)$ の Yangian や、最近 Gaiotto と Rapcak によって構成された頂点作用素代数との関係が説明されました。

Hosseini と奥田は、局所化の手法でなされる分配関数の計算について議論しました。Hosseini の講演では、5次元の SUSY ゲージ理論をトーリック曲面と円周の積の上で考えたものの、奥田の講演では 4次元のゲージ理論の直線作用素の計算が説明されました。菅野は、 $\widehat{\mathfrak{gl}}(1)$ の量子トロイダル代数の表現論、特にフォック表現の間の繋絡作用素を説明しました。これは、精密化された位相頂点関数と関係しています。(精密化された位相頂点関数は、3次元トーリック Calabi-Yau 多様体の位相的弦分配関数の精密化の基本構成因子です。)

Gukov と Pei の講演では、ある4次元の SUSY な場の量子論の族から生まれるモジュラー・テンソル圏の構成が紹介されました。頂点作用素の表現論と、Coulomb 枝の幾何学の間に関係が現れます。

McBreen と Hilburn は、3次元の SUSY ゲージ理論の Higgs 枝と Coulomb 枝の間の不思議な関係を紹介しました。McBreen は、圏論的な疋田予想として、Higgs 枝、Coulomb 枝に付随する圏の間に圏同値がある、と予想を定式化しました。一つの圏は、ループ空間の上の構成可能層の導来圏と考えられ、その厳密な定式化を与えることは、難しいが興味深い問題です。Hilburn は、シンプレクティック双対性と Langlands 双対性の関係について説明しました。Langlands 双対性は、Hausel の講演でも言及されました。ある群の Higgs 束のモジュライ空間と Langlands 双対群の Higgs 束のモジュライ空間を考え、それぞれに現れるブレインで、ミラー対称性の半古典極限として関係していると考えられているものの例が与えられました。

加藤と Su の講演では、同変量子 K 理論 / コホモロジーとアフライン・グラスマン多様体の同変 K 理論 / コホモロジーの関係について紹介されました。加藤は、第三の対象として半無限旗多様体の同変 K 理論を厳密に定義し、両者の間をつなげました。Su は Teleman のアイデアに基づき、後者が量子コホモロジーにシフト作用素として作用していることを示しました。ここで、アフライン・グラスマン多様体は、有限次元の複素簡約群に対して定義されるものですが、

アファイン Kac-Moody 群に対応するアファイン・グラスマン多様体の類似として考えられる二重アファイン・グラスマン多様体に対する関心が高まってきています。Muthiah は、類似の二重アファイン旗多様体と、その中のシューベルト多様体を定義するアプローチについて説明しました。特に、Hecke 環、Bruhat 順序等が、この設定の中で議論されました。

木村は、籠に付随する籠 W 代数の定義を説明しました。これは、4次元 SUSY 籠ゲージ理論により定義される qq -指標に基づいて構成されるものです。Appel の講演では、反射方程式とその解である K 行列について、小 K 行列の量子化を用いて構成される量子対称対の表現の圏を用いて研究することが説明されました。何人かの招待講演者が、最終段階

で来日をキャンセルしなければいけなかったことは残念でした。しかし、参加者からは、最先端の研究の講演を数多く聞くことができ、刺激があり有意義な研究集会であったという声が聞かれました。また、私個人としては、ゲージ理論の Coulomb 枝に関する議論をして、数人の参加者と新しい共同研究を始めることができたことをうれしく思っています。



Workshop

Interdisciplinary Approach to Cancer Therapy

ピエトロ・カラドンナ [Pietro Caradonna](#)

Kavli IPMU 博士研究員

武田 伸一郎 [たけだ・しんいちろう](#)

Kavli IPMU 助教

2019年3月27日、現代のがん研究における喫緊の課題を議論する新しい活動がスタートしました。”Interdisciplinary approach of applying cutting-edge technologies at the frontier of cancer research”と銘打ったこのワークショップには、8つの国から総勢70人もの研究者が集いました。がんの根治を妨げている要因を最新の研究成果に基づいて理解すること、それから、臨床応用を目指した最先端の技術開発について報告することが目的です。

ワークショップは、核医学、化学、物理、工学、薬学など、多様なサイエンスの分野から集まった研究者達に対して、ワークショップ組織委員の高橋忠幸カブリ IPMU 主任研究者が問いかけるところから始まりました。がん治療の現場で患者に向き合っている臨床医を手助けするために、我々はいかに結束することができるだろうか。がん患者の生存率や生活の質を改善する、より有効な治療法を見出すために。

2日間にわたるワークショップの中で、多彩な分野からの16人の世界トップレベルの研究者が、最新の研究成果と将来の展望について発表しました。講演者の中には、著名な医師 (MD, PhD) も含まれており、最新のがん治療・研究の動向について話を聞くことができました。例えば、日本では、がん患者の 30 % 以上が診断時にすでに

進行性のがんに罹患しており、ステージ4のがん患者の場合には、最新の技術と治療をもってしても、5年生存率はわずか14 % に過ぎません。^{*} 慶應大学医学部先端医学研究所遺伝子制御部門の佐谷秀行教授は、がんの破壊について細胞レベルの視点から解説しました。がん幹細胞の存在を示し、がん幹細胞とその子孫細胞を破壊する、新しい治療手法・技術の必要性について強調しました。

粒子加速器はがん治療と放射性薬剤の製造について重要な役割を果たしています。スイスの Paul Scherrer Institute (PSI) では、7000人以上の患者に対して陽子線治療を行い、治癒率は 98 % に達しています。一方、大阪大学の RCNP では、新しい α 線治療の実現を目的として、サイクロトロンを用いたアスタチン 211 の製造を始めています。カナダの TRIUMF では、希少な放射性同位体の利用を促進することを目的として、100億円規模の放射性薬剤研究施設が 2023 年までに建設される予定です。これらの最新動向は、必然的に、新しい測定技術を要求することになります。

ワークショップでは、高エネルギー物理学実験や宇宙物理学実験で培われてきた計測の手法と技術を、医療イメージングの分野へと持ち込み活用するための研究とその進め方が重要なテーマの一つでした。そのため、高速セン

サ技術やデジタルフォトカウンティング技術の進展と現状から、信号処理やデータ解析・収集アルゴリズムの最適化に対する機械学習の適用に至るまで、幅広く議論が展開されました。

カブリ IPMU では、高いエネルギー分解能と100マイクロメートルを超える空間分解能とを併せ持つ次世代のガンマ線検出器の開発が進行中です。これらは、複数の薬剤輸送システムやプローブを生体内で同時に高解像度で可視化する、革新的なイメージング装置実現のための基盤技術です。優れたエネルギー分解能は、新規 α 線治療核種アスタチン211のイメージングにも極めて有効です。実際に、カブリ IPMU は国立がんセンターと共同で、アスタチン211のイメージング実験に着手しています。

急速に進展する現代のがん研究で明らかになってきた、がん根治に向けた巨大な壁を乗り越えるためには、サイエンスの新しいアプローチが必要です。世界中から分野の垣根を超えて研究者が結束することが、強力な推進力となることは間違いありません。革新的な放射性薬剤のイメージ

^{*} T. Matsuda et al. Research Group of Population-Based Cancer Registries of Japan. Population-based survival of cancer patients diagnosed between 1993 and 1999 in Japan: a chronological and international comparative study. *Japanese Journal of Clinical Oncology* 2011; 41: 40-51.

ング技術を開発するとともに、我々が観測している物理量から生体現象を読み解くことが極めて重要なので

す。これらを念頭に、組織委員会は、“INTERdisciplinary Approach to Cancer Treatment (INTERACT)”を、

年1回の開催へと発展させることを発表しました。次回は2020年にフランスにて開催されます。



第1回目の “Interdisciplinary approach of applying cutting-edge technologies at the frontier of cancer research” ワークショップの参加者たち。核医学、化学、物理、工学、薬学など多彩なサイエンスの分野から総勢70人もの研究者が集いました。

村山 斉主任研究員、東京大学特別教授に

2019年3月27日、東京大学本部よりKavli IPMUの村山 斉主任研究員へ特別教授の称号を授与するとの発表がありました。特別教授は東京大学が2019年度より新たに設けた称号で、「卓越教授とともに、本学における研究力の維持・強化、本学研究の世界的プレゼンスの向上を目的として、国内外において現に極めて評価の高い研究を遂行しており、その継続・発展が期待され本学にとって極めて重要と考えられる者に「特別教授」の称号を付与し、最長75歳まで研究に専念するもの」とされています。村山さんは、特別教授として初めて称号付与された4名のうちの1名として選ばれました。4月1日付で特別教授としての辞令交付が行われました。



村山 斉さん

大内正己さん、第15回日本学術振興会賞及び日本学士院学術奨励賞受賞

東京大学宇宙線研究所准教授でKavli IPMU科学研究員を兼ねる大内正己さんが、「ライマン・アルファ放射体を用いた初期宇宙の観測研究」により第15回（平成30年度）日本学術振興会賞及び日本学士院学術奨励賞を受賞し、2019年2月7日に日本学士院



大内 正己さん

で行われた授賞式に臨みました。

日本学術振興会賞は創造性に富み優れた研究能力を有する若手研究者を顕彰するものであり、同賞の受賞者（今回は25名）の中から特に優れた業績を挙げたとされる研究者6名以内（今回は6名）が日本学士院学術奨励賞の受賞者に選ばれます。

大栗真宗さん、2018年度林忠四郎賞を受賞

東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター助教で、Kavli IPMU准科学研究員の大栗真宗（おおぐり・まさむね）さんが「重力レンズ天文学への基礎的貢献」により2018年度の林忠四郎賞を受賞しました。



大栗 真宗さん

林忠四郎賞は、天文学の研究で偉大な業績を挙げた理論天体物理学者の林忠四郎博士の京都賞受賞を記念して1996年度に設けられた賞で、惑星科学や天文学、宇宙物理学に関する分野において優れた研究業績をあげた研究者を表彰することを目的としています。

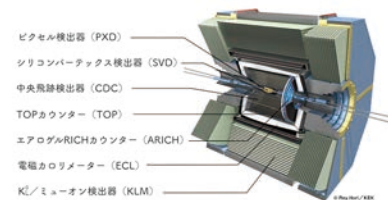
大栗さんは理論と観測の両面から重力レンズ現象を宇宙論と天文学の広範な問題に応用した研究に長年取り組み、宇宙のダークマター分布や遠方天体の研究などの幅広いテーマで多くの画期的な成果を上げてきたことが評価されました。

Belle II 実験、データ取得 開始

高エネルギー加速器研究機構（KEK）で行われ、Kavli IPMU も参加するBelle II（ベルツー）実験では、素粒子の標準理論を超える新しい物理の探索を目指していますが、2019年3月11日、ついに電子と陽電子の衝突データを本格的に取得・解析する「フェイズ3」運転が開始されました。

これまでの衝突型加速器 KEKB

（1999より2010年まで運転）が保持していた電子と陽電子の衝突頻度の世界最高記録を40倍に高めたSuperKEKB（スーパーケックビー）加速器と、衝突点に設置した最新のBelle II 測定器を擁する「SuperKEKB」プロジェクトは、2017年2月にSuperKEKB加速器試運転の「フェイズ1」を開始、2018年4月に中心部のピクセル検出器（PXD）とシリコンバレット検出器（SVD）（併せて崩壊点検出器（VXD）と呼ばれる）を除く全検出器を組み込んだBelle II 測定器で電子・陽電子衝突を行う「フェイズ2」を成功させました。その後2018年11月に、Belle II 測定器の中心部に搭載されたビームバックグラウンド測定装置（BEAST）をVXDと交換し、物理データの取得・解析を行う「フェイズ3」開始に向けた最終調整作業を行ってきました。



Belle II 測定器の概念図。(Credit: Rey.Hori / KEK)

VXDは、粒子と反粒子の性質の違いを精密に調べたり、暗黒物質のような未知の粒子の存在を突き止めたりする上で極めて重要な役割を果たす装置で、標準理論を超える新しい物理を調べるために不可欠です。Kavli IPMUでは、VXDのうちSVDの第4層ラダーの製作と調整を強力にすすめ、2018年5月に制作を完了（Kavli IPMU News No. 42、37ページ参照）、その後ラダーはKEKに送られ、「フェイズ3」に向けての組み上げ作業と、同年11月のBelle II 測定器への組み込み作業が行われてきました。

今後、Kavli IPMUでは、VXDを含めたすべての検出器を活用し、取得データから電子・陽電子衝突により引き起こされる素粒子物理事象を精密に調べることにより、新しい物理の解明を目

指します。

Kavli IPMU / ELSI / IRCN合同一般講演会「起源への問い」第4回開催

2019年1月20日に東京お台場にある日本科学未来館の未来館ホールにおいてKavli IPMUと東京工業大学地球生命研究所(ELSI)、東京大学ニューロインテリジェンス国際研究機構(IRCN)の合同一般講演会「起源への問い」第4回が開催されました。前回までこの講演会は、WPI(世界トップレベル研究拠点プログラム) 拠点のうち「宇宙の起源に迫る」ことを目的とするKavli IPMUと「地球と生命の起源に迫る」ことを目的とするELSIが、人類にとって根源的な「起源への問い」という共通テーマのもと、最新の研究内容を平易に紹介するとともに、他分野の専門家も交えた多様な視点を提供するイベントとして実施されてきました。しかし、今回は「人間知性の起源」に迫ることを目標として研究を行なっている2017年採択の新規WPI 拠点、IRCNも共催機関として参加しました。

講演会はWPIの宇川彰PD(プログラムディレクター)の挨拶で始まり、ELSI特任准教授の車 兪澈(くるま・ゆうてつ)さんが「細胞を創って理解する生命の起源」、東京大学大学院総合文化研究科教授を兼ねるIRCN主任研究員の酒井邦嘉(さかい・くによし)さんが「人間知性の起源」、Kavli IPMU主任研究員の中島 啓(なかじま・ひらく)さんが「幾何学で宇宙の起源に迫る」と題してそれぞれ講演しました。



Kavli IPMUの中島 啓主任研究員の講演風景

その後、心の哲学を専門とする東京大学大学院総合文化研究科教授の信原幸弘さんをモデレーターとして迎え、講師3名と計4名での座談会「起源を

問うとはどういうことか」、さらに参加者が講師を囲む懇談会があり、約230名が来場した講演会は、盛況のうちに閉会となりました。



座談会。左から信原幸弘さん、車 兪澈さん、酒井邦嘉さん、中島 啓さん

アメリカ科学振興協会(AAAS) 年次大会に参加

2019年2月14日から17日まで、ワシントンD.C.のマリオット・ウォードマン・パークで開催されたアメリカ科学振興協会(AAAS) 年次大会において、文部科学省と日本学術振興会およびKavli IPMUを含むWPI 拠点が2月15日から17日の3日間、WPI事業の国際的認知度及び研究者にWPI 拠点を自らの研究場所として認知してもらうための知名度向上を目指し、合同でブース展示を行いました。WPIブースには3日間で研究者、ジャーナリスト、大学院生等を含む約120名が訪れました。

Kavli IPMU Special Seminar

1. "科学を社会につなぎ宇宙を文化圏に～ALEの挑戦"
講師: 岡島礼奈(株式会社ALE CEO)
開催日: 2019年2月21日

人事異動

次の方々が転出しました。[括弧内はKavli IPMU 在任期間です。]

柳田 勉さん [IPMU/Kavli IPMU主任研究員として2007年10月1日-2017年3月31日、IPMU/Kavli IPMU教授として2009年4月1日-2019年3月31日]、Kavli IPMU教授から上海交通大学讲席教授へ。

Chengcheng Hanさん [2015年9月

16日-2019年3月31日]、Kavli IPMU博士研究員から南京師範大学の博士研究員へ。

池田 暁志さん [2015年4月1日-2019年3月31日]、Kavli IPMU博士研究員から大阪大学の特任講師(非常勤)へ。

井上 茂樹さん [2016年4月1日-2019年3月31日]、Kavli IPMU博士研究員から国立天文台特任研究員へ。

石垣(新田) 美歩さん [東京大学特別研究員(日本学術振興会特別研究員)として2013年4月1日-2015年8月31日、その後2019年1月31日まで現職]、Kavli IPMU博士研究員から東北大学学術研究員へ。

竹内 道久さん [2014年10月1日-2019年3月31日]、Kavli IPMU博士研究員から名古屋大学基礎理論研究センター准教授へ。

杉山 尚徳さん [Kavli IPMU博士研究員として2014年11月1日-2016年3月31日、その後2019年3月31日まで現職]、東京大学特別研究員(日本学術振興会特別研究員)から国立天文台特任助教へ。

編集後記

37ページのお知らせの通り、Kavli IPMU Newsは今号で刊行を終了します。これまでご愛読いただきました読者の皆様に感謝いたします。また、IPMU発足以来、IPMU News / Kavli IPMU Newsの刊行には多くの事務部門職員、特にある期間編集アシスタントを務めた田中里佳さんと小貫美幸さん、歴代広報担当の宮副英恵さん、土方智美さん、小森真里奈さん、角林元子さん、web掲載を担当した坪井あやさん、色々情報を提供していただいた榎本裕子さん、小澤みどりさん、藤田明子さん、田村利恵子さん、発送先リストを管理していただいた久保田佳代子さん、中田亜矢子さん、三浦みかさん、市川尚子さんに大変お世話になりましたことを記して感謝します。

編集担当: 中村健蔵



ブラックホールシャドウ

池田 思朗

情報・システム研究機構 統計数理研究所 教授、Kavli IPMU 客員上級科学研究員

2019年4月10日、Event Horizon Telescope (EHT) の記者会見が世界6か所で同時に行われ、初めてブラックホールシャドウの画像が示されました。6年以上プロジェクトに関わってきて、この結果を発表できたことをうれしく思います。

今回の観測は天文学だけでなくデータ科学にとってもチャレンジングでした。新たに電波干渉計イメージング手法を開発するため、複数のデータ科学の研究者も参加しています。私もそのひとりです。

EHTと同様に、今後の天文学や物理学ではデータ科学が今までよりも重要となるはずで、Kavli IPMUにおいても、データ科学の分野から貢献を行っていきたくと考えています。



The Event Horizon Telescope Collaboration