

KAVLI IPMU NEWS



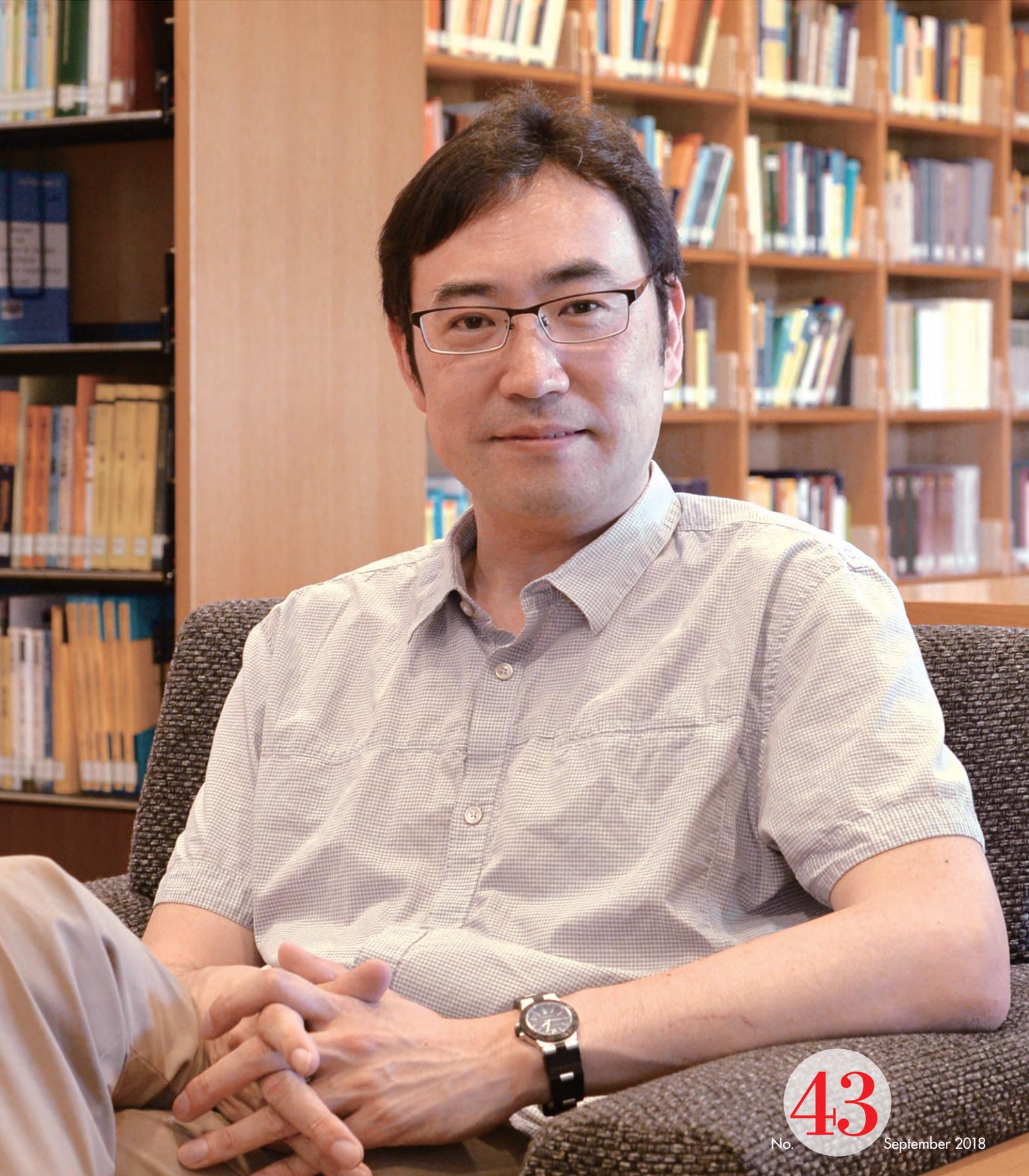
World Premier International Research Center Initiative
世界トップレベル研究拠点プログラム

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
Quantum Gravity and Quantum Information



43

No. September 2018

Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
Quantum Gravity and Quantum Information
Yasunori Nomura
- 10 **Research Report**
Its R&D Mission Completed, EGADS Evolves
Mark R. Vagins
- 14 **Our Team** Matthew Dodelson
Martin Fluder
Wentao Luo
Oscar Macias
Dinakar Muthiah
Youngsoo Park
Anna Puskás
Kenneth Wong
- 17 **Workshop Report**
Vertex Algebras, Factorization Algebras and
Applications
Mikhail Kapranov
Hiraku Nakajima
- 18 **Workshop Report**
IGM2018: Revealing Cosmology and Reionization
History with the Intergalactic Medium
Khee-Gan Lee
- 19 **News**
- 24 **Black Hole and Hawking Radiation**
Misao Sasaki

Japanese

- 25 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 26 **Feature**
量子重力と量子情報
野村 泰紀
- 32 **Research Report**
ミッションR&D完了、EGADS新たな未来へ
マーク・ヴェイギンズ
- 36 **Our Team** マシュー・ドデソン
マーティン・フルーダー
羅 文涛
オスカー・マシアス
ディナカル・ムタイア
ヨンスー・パク
アンナ・プシュカシュ
ケネス・ワン
- 39 **Workshop Report**
頂点代数、因子化代数とその応用
ミハイル・カプラノフ
中島 啓
- 40 **Workshop Report**
IGM2018: 銀河間物質で紐解く宇宙再電離史
キーガン・リー
- 41 **News**
- 44 **ブラックホールとホーキング輻射**
佐々木 節



Yasunori Nomura is a Professor of Physics and the Director of the Berkeley Center for Theoretical Physics at the University of California, Berkeley (UC Berkeley). He also serves as a Senior Faculty Scientist at the Lawrence Berkeley National Laboratory and a Principal Investigator at the Kavli IPMU. He is a theoretical physicist, mainly working on particle physics, cosmology, and quantum gravity. He received his Ph.D. from the University of Tokyo in 2000 and became a Miller Research Fellow at UC Berkeley. In 2002-03 he was an Associate Scientist at the Fermi National Accelerator Laboratory. In July 2003 he joined the Department of Physics at UC Berkeley. Awards and Honors include Miller Research Fellow (2000), DOE Outstanding Junior Investigator (2004), Alfred P. Sloan Research Fellow (2005), Hellman Fellow (2005), Simons Fellow in Theoretical Physics (2012), and American Physical Society Fellow (2017).

野村泰紀：カリフォルニア大学バークレー校（UCバークレー）物理学科教授および同校バークレー理論物理学センター長。ローレンス・バークレー国立研究所上席研究員および東京大学 Kavli IPMU 主任研究員を兼ねる。主として素粒子物理学、宇宙論、量子重力を研究する理論物理学者。2000年に東京大学から博士の学位を取得し、UCバークレーのミラー研究員となる。2002年から2003年までフェルミ国立加速器研究所で准研究員を務め、2003年7月にUCバークレー物理学科に教員として加わる。2000年にミラー Research Fellow、2004年にDOE（米国エネルギー省）優秀若手研究者賞、2005年にアルフレッド P. スローン研究フェロー、及びヘルマン・フェロー、2012年に理論物理学サイモンズフェロー、2017年にアメリカ物理学会フェロー等を受賞。

Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



July 11: WPI site visit team visited the Kavli IPMU's Kamioka Branch (see p.19).



July 12: WPI site visit team visited the Kavli IPMU's research building on the Kashiwa campus (see p. 19).



July 29: In 2018, Kavli IPMU again cohosted Collaborative Knowledge Creation Practical Learning Course "Learning and Creating Physics—From High School to the Forefront Research of the Universe" with the University of Tokyo CoREF unit. Director Murayama is discussing with high school students participated in this event.



August 1: Visit of the Kavli IPMU Steering Committee members to Super-Kamiokande (SK). To look at the inside of the SK detector, Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama (left) and Principal Investigator Mikhail Kapranov (center) were on an elevating gondola for work, guided by Director of the Kamioka Observatory, Masayuki Nakahata (right). (See p. 19.)



August 20: Chancellor George Blumenthal (the second from the left) of the University of California at Santa Cruz visited Kavli IPMU (see p.19).



September 20: Giving an introductory explanation at a press conference held to release the Subaru HSC's observation of the structures of the most distant part of the Universe in the weak gravitational lensing measurements conducted to date (see p. 20).

Quantum Gravity and Quantum Information

Understanding the nature of space and time has brought many revolutions to physics. In old days, the introduction of a coordinate system—which is often attributed to Descartes—led to Newtonian mechanics through contributions by many scientists, including Galileo. At the beginning of the 20th century, Albert Einstein proposed special relativity, which, in a sense, unifies space and time. According to this theory, space and time are closely related, causing phenomena such as a contraction of length and a delay of time when an object moves at a speed close to that of light. These effects are precisely measured in present-day experiments, leaving no room to doubt the theory. The resulting concept of *spacetime*, which treats space and time in a unified manner, has been playing a fundamental role in contemporary physics until today.

One of the most important properties of spacetime was revealed by Einstein himself about 10 years after the announcement of special relativity. According to this new theory called general relativity, spacetime is not a fixed entity, as one might imagine from the term “coordinate system”; rather, it is a dynamical object that can be bent or distorted. General relativity says that it is these bending and distortion of spacetime that we call gravity. For example, gravity between the Sun and the Earth arises because the existence of the Sun bends spacetime around it. The Earth moves around

the Sun because of this bending of spacetime.

This revolutionary theory of spacetime makes an important prediction: because spacetime is dynamical, its distortions can propagate independently of the existence of matter. For example, when heavy bodies such as black holes move violently, they disturb spacetime greatly. This effect can then propagate to places far away from the location of the original bodies as wave of spacetime distortions. This wave is called gravitational wave, and it was first detected directly in 2016, almost 100 years after the formulation of general relativity. This was an extremely important experimental discovery, and for this achievement the 2017 Nobel Prize in Physics was awarded.

Theory of Quantum Gravity

As we have seen, our understanding of spacetime has dramatically evolved over the last few hundred years. However, we know that this is not the end. The reason is that our world obeys quantum mechanics.

Quantum mechanics was discovered at the beginning of the 20th century in the process of studying microscopic objects such as atoms, but later it was found to be a more fundamental principle governing the world. Quantum mechanics makes a number of strange predictions. For

example, an object such as an electron cannot exist in one place; rather, its location spreads probabilistically. (Since this spread is usually so small that we cannot perceive it directly in our daily life.) It is also possible that two worlds exist parallelly in probability space, the state we call a superposition. While these phenomena sound extremely strange from the sense of everyday life, the correctness of the theory has been repeatedly demonstrated experimentally. In fact, the accuracy of these experiments has dramatically improved in recent years, so that predictions of quantum mechanics have now been confirmed precisely at a detailed level. Furthermore, scientists are advancing the development of a computer—quantum computer—which has capability completely different from the conventional one and which positively utilizes the principle of quantum mechanics.

Let us return the story to spacetime. General relativity explains all gravitational phenomena that have been observed until now. This includes minuscule deviations from the predictions of Newtonian gravity, the existence of gravitational wave, and the expansion of the universe. There is almost no doubt about the correctness of the theory at scales we can currently observe. General relativity, however, does not contain the effect of quantum mechanics, which is a basic principle of the world we live in. This is not an experimentally urgent problem. The scale at which the quantum effect of spacetime becomes important directly can be estimated theoretically, which is about 10^{-33} cm, the distance called the Planck length. This is about 16 orders of magnitude smaller than the smallest length probed so far by the world's most powerful accelerator. Does this mean that it is meaningless to investigate the quantum effect on spacetime?

There are a number of reasons, at least theoretically, why this is not the case. One is the problem of infinity. Quantum mechanics and general relativity do not get along very well. Assuming that the theory of gravity at our scales is general relativity, its simple extrapolation below the Planck

length—where quantum effects on spacetime and gravity become important—leads to an innumerable amount of infinities, destroying the predictivity of the theory. This means that in order to obtain a complete theory including quantum effects on spacetime and gravity, it is not enough to simply consider general relativity and quantum mechanics together. The currently most promising theory to solve this problem is string theory, whose structure and consequences are vigorously studied by many researchers.

Another reason to study quantum mechanical theory of spacetime and gravity—commonly referred to as *quantum gravity*—is that it brings about a revolutionary picture of spacetime. As we will see in this article, it is not true that the effect of quantum gravity becomes important only at the Planck length; on the contrary, it has increasingly become clear that it also plays a decisive role in physics at long distances such as the physics of black holes and multiverse cosmology. Moreover, this relatively recent progress is creating a new research area that unifies two fields of quantum gravity and quantum information sciences, which have been developed separately so far. Below I will give a brief overview of this new development.

Quantum Mechanics of Spacetime and the Holographic Principle

The beginning was the physics of black holes. In a theory with gravity, when the density of matter becomes larger than a certain limit, it produces a region around it from which nothing can escape due to its strong gravity. The boundary of this region is called a horizon, and the inside is a black hole.

Black holes had been known to have the following intriguing property: in general relativity, the total area of horizons does not decrease. For example, when a black hole swallows an object, its area increases. (Here and below, when we refer to the area of a black hole, it means the area of the horizon of the black hole.) Also, when two black

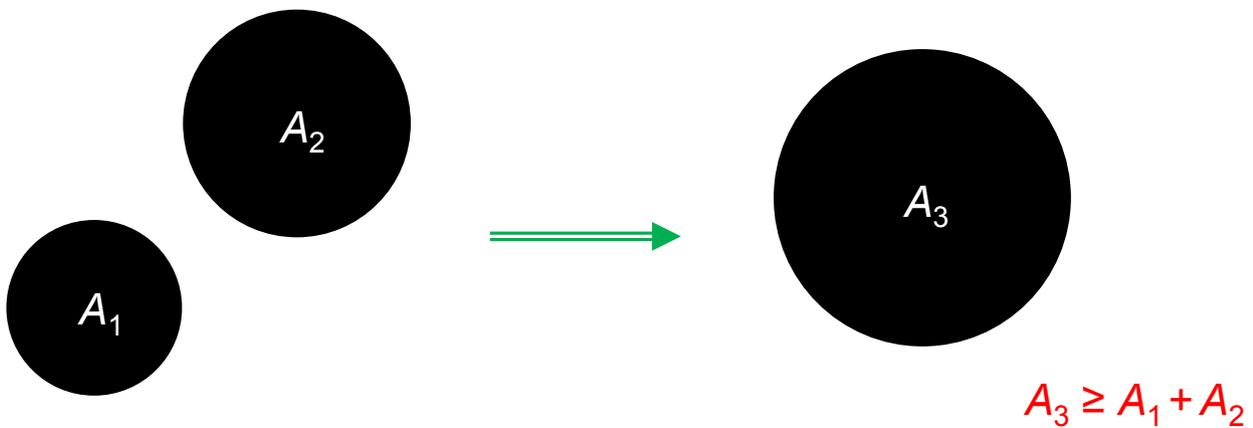


Figure 1: The area, A_3 , of the black hole formed after the merging of two black holes is equal to or larger than the sum of the areas, A_1 and A_2 , of the original black holes.

holes merge into one— this phenomenon was actually observed by the detection of gravity wave in 2016!—the area of the produced black hole is equal to or larger than the sum of the areas of the initial two black holes; see Figure 1.

The fundamental importance of this fact was realized by Jacob Bekenstein in his revolutionary paper in 1973. Bekenstein asked what happens to physical quantities when an object is thrown into a black hole. The answer is clear for energy. The energy of the thrown object becomes (a part of) the mass of the black hole, so that the total energy is conserved. But what about entropy? According to the second law of thermodynamics, entropy should not decrease. However, the entropy of the thrown object seems to simply disappear when it is absorbed into the black hole. Does this mean that the second law of thermodynamics is violated?

What Bekenstein suggested in his 1973 paper is that the entropy of the thrown object is converted into the entropy of the black hole. What is the entropy of the black hole? He proposed that the area of the horizon is the one. Recall that the total sum of horizon areas does not decrease in general relativity. This is exactly the property that entropy must have. Indeed, by defining the entropy of a black hole in this way, it can be shown that the entropy of the black hole after the object is

absorbed is always equal to or larger than the sum of the entropies of the initial black hole and the thrown object.

The idea that a black hole has entropy was initially received with skepticism. If a black hole has entropy, the first law of thermodynamics requires it to also have temperature. However, if it has temperature, then it must be radiating. Isn't it the case that nothing can come out of a black hole? This apparent contradiction, however, was resolved in 1974 when Stephen Hawking performed a calculation which included the effect of quantum mechanics into general relativity. While his calculation was not based on a complete theory of quantum gravity, he could still show that a black hole indeed emits radiation because of quantum effects. This established the thermodynamics of black holes.

A strange thing here is that the entropy of a black hole is given by its area. Since a black hole is the final state of the evolution of any initial state, the entropy of the black hole must be indicating “the largest possible entropy that the region can have.” In modern days, we know that entropy is given by the logarithm of the number of possible quantum states that the system can take. If space is composed of some simple constituents as in ordinary materials (e.g., if space can be approximated by a lattice with

a spacing of order the Planck length), then the largest entropy of a region must be proportional to its volume. However, the discovery of Bekenstein and Hawking says that it is proportional to the surface area.

This implies that in a quantum theory with gravity, the number of fundamental degrees of freedom is given by that of spacetime with one dimension less than that of the original, dynamical spacetime. For example, while spacetime we live in seems to have three spatial dimensions (ignoring possible small extra dimensions), the “true theory” describing it must be formulated in spacetime with two spatial dimensions and one time dimension. This is possible because if you try to fill matter at each point in space (e.g., at each site of the Planck-size lattice), black holes form long before it is completely filled, and putting further matter only increases the size of the black holes. Namely, it is merely a fiction that the space we live in has full three dimensional degrees of freedom.

The idea that the theory of quantum gravity is formulated in spacetime that has lower dimensions than the apparent, dynamical spacetime is called the *holographic principle*. The lower dimensional theory formulated in this way—called the holographic theory—does not have the discrepancy between the number of true and apparent degrees of freedom, so it does not have gravity: the dynamical spacetime in higher dimensions and its associated gravity are only emergent. The fact that the holographic theory does not contain gravity at the fundamental level means that it can be treated as a regular quantum system, and hence can give a rigorous definition of quantum gravity. This seems to be a pretty crazy conclusion. It would be natural if one cannot believe such a thing.

AdS/CFT Correspondence

However, it has been shown—though only in some special cases—that quantum gravity indeed satisfies the holographic principle! This discovery

was made by studying structures of string theory. In 1997, Juan Maldacena proposed, based on numerous evidences, that quantum gravity describing physics in spacetimes that asymptotically approach a certain space called Anti-de Sitter (AdS) space is equivalent to conformal field theory (CFT) formulated in non-gravitational spacetime that has dimensions one less than the gravitational asymptotically AdS space. This relationship is called the *AdS/CFT correspondence*.

The AdS/CFT correspondence is an extremely powerful mechanism despite the fact that it applies only to special spacetimes. First, CFT is a class of quantum field theory and is mathematically well defined. This implies that quantum gravity in spacetimes that are not so distant from the one we live in (asymptotically AdS space) is defined for the first time without relying on perturbation theory. Also, many theories describing the nature (e.g., QCD describing nuclear force and theories used in condensed matter physics) are well approximated by CFT at strong coupling. In general, it is extremely difficult to solve such a theory with strong coupling, but by the AdS/CFT correspondence we can solve it approximately using general relativity in one higher dimensions. And above all, this correspondence gives a concrete example of the holographic principle, showing how dynamical spacetime with gravity is generated from non-gravitational theory in lower dimensions.

The mechanism of generating dynamical spacetimes has been studied by many researchers, and in this process a very important discovery was made by Shinsei Ryu and Tadashi Takayanagi. What they found is the following relation between the geometry of AdS and quantum states in CFT; see Figure 2. Consider a quantum state on an equal time slice in CFT. Let us divide this slice into a subregion A and its complement \bar{A} . Then, the entanglement entropy* between A and \bar{A} is given by the area of the surface in AdS that is anchored to

*See, *Kavli IPMU News* No. 31, p. 28.

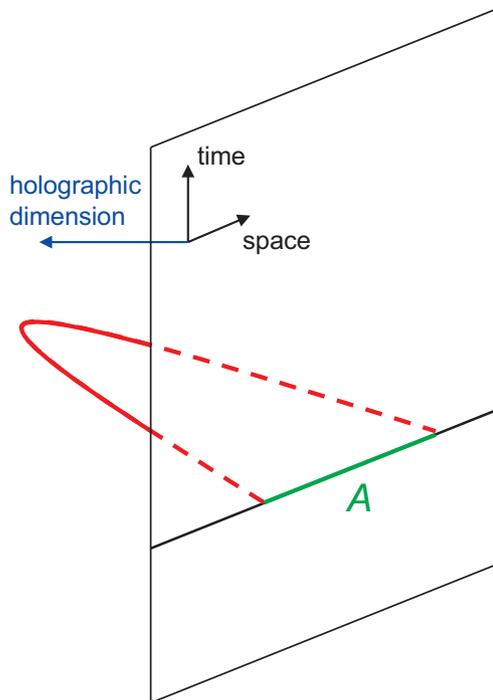


Figure 2: Entanglement entropy of a state in CFT between a spatial region A and its complement \bar{A} is given by the area of the surface in AdS which is anchored to the boundary of A and whose area takes an extremal value.

the boundary of A and has the minimal area (more generally the surface which extremizes the area in AdS). Here, the entanglement entropy between A and \bar{A} is a quantity representing the amount of quantum entanglement between the degrees of freedom in A and \bar{A} .

The importance of this relationship, called the Ryu-Takayanagi formula, is not just that it relates two quantities. First, the fact that a geometric object in the gravitational bulk—a minimal area surface in AdS—is related to a quantum information theoretic quantity in the holographic theory—an entanglement entropy—implies that the mechanism of generating dynamical spacetime is intrinsically quantum mechanical. Also, taking the view that the theory of quantum gravity is rigorously defined only holographically, we may say that what we perceive as gravitational spacetime is nothing other than quantum information theoretic properties of quantum states in a more fundamental, non-gravitational theory. In fact, by using the Ryu-Takayanagi formula, one can show that the Einstein

equation in higher dimensional AdS background is an automatic consequence of the relation between the geometry of emergent spacetime and quantum information in the holographic theory.

The AdS/CFT correspondence gives us a basic picture of how dynamical spacetime may be generated. We could draw the following analogy. Consider liquid water in place of spacetime. We want to know its microstructure such as water molecules and forces acting between them. For this purpose, it is barely useful to study phenomena that occur as perturbation in the limit that liquid water is regarded as continuum, e.g., water waves. These are described by the Navier-Stokes equation of fluid dynamics, which corresponds to the Einstein equation in our context, regarding spacetime as continuum. In contrast, AdS/CFT can tell us the identity of water molecules and forces between them, i.e., CFT. A big difference between water and spacetime, however, is that in the case of spacetime its constituents somehow live in one lower dimensions.

Beyond AdS/CFT

As we have seen above, AdS/CFT is extremely powerful, but the actual spacetime we live in is not an asymptotically AdS space. On the other hand, the holographic principle is expected to apply more generally in quantum gravity as can be seen from the consideration of black holes. How then does holography work in general spacetimes? This question has been investigated by several research groups. Below, I will briefly describe the work we have done.

The starting point is to identify which of the properties of AdS/CFT are specific to AdS space and which are more generally applicable in quantum gravity. For example, we expect that, from various considerations, the fact that the holographic theory is local quantum field theory like CFT is due to a special feature of asymptotically AdS space. Then, which of the properties of AdS/CFT are manifestations of the more general holographic principle?

Based on a number of suggestions, we have hypothesized that the relationship between quantum information in a lower dimensional holographic theory and the geometry of higher dimensional quantum gravity, as represented by the Ryu-Takayanagi formula, is general. Since the holographic theory for general spacetimes is not yet known, this requires us to extract essential elements of the theory using entropy bounds obtained by extending the result of Bekenstein and Hawking. I omit the details of this procedure due to the limitation of pages. In any case, the idea is to examine the validity of the hypothesis by analyzing what consequences it leads to.

In a sense, this strategy corresponds, e.g., to the one Max Planck took when he examined the consequences of his quantum hypothesis upon the creation of quantum mechanics. At that time, there was an experimental result—the black body spectrum—to which he compared the consequences. In the case of quantum

gravity, however, there is no corresponding direct experimental result to which we can compare theoretical results. Then how can we test the validity of the hypothesis?

Our idea is to use general relativity as “experiment.” Specifically, under the assumption that the holographic relationship between quantum information and generated geometries is valid in general spacetimes, we have derived the properties that the dynamical spacetimes must satisfy in order for the quantum information theoretic quantities to be consistently interpreted holographically. The result was a series of monotonicity properties and inequalities, which were not known before. If the original assumption is correct, then these properties must be satisfied for general spacetimes, and indeed we were able to prove them using general relativity.

An important point is that if general relativity did not possess features that are needed to prove the properties we found, then the original assumption could have been rejected. In other words, the hypothesis that quantum information theoretic properties of states in the holographic theory are the origin of dynamical spacetime in cases beyond AdS/CFT has passed a nontrivial test. This increases our confidence about the holographic principle and relation between quantum information and quantum gravity.

Summary

This article has described the relationship based on the holographic principle between quantum information and dynamical spacetime, including AdS/CFT. This has been investigated not only by our group but also by other researchers, and important discoveries have been made day-to-day. These discoveries are providing fundamentally new answers to the question of what spacetime really is. Hopefully, this new research area emerging at the intersection of quantum gravity and quantum information will reveal a deep and fundamental picture of spacetime.

Its R&D Mission Completed, EGADS Evolves

Mark R. Vagins

Kavli IPMU Principal Investigator

Fifteen years ago, theorist John Beacom and I first proposed introducing 100 tons of a water-soluble gadolinium [Gd] compound, gadolinium chloride, GdCl_3 , or the less reactive though also less soluble gadolinium sulfate, $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$, into the Super-Kamiokande (Super-K, SK) detector. Called GADZOOKS! (Gadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande, Super!), the basics of this load-SK-with-Gd idea have been detailed in a *Physical Review Letters* article [1], as well as in this very publication [2].

In a nutshell: neutron capture on gadolinium

produces an energetic gamma cascade, so the inverse beta decay (IBD) reaction, $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, in such a Gd-enriched Super-K will yield coincident positron and neutron capture signals. Looking for these coincidences (or the lack thereof) will allow a large reduction in backgrounds and greatly enhance the detector's response to both supernova neutrinos (galactic and diffuse) and reactor antineutrinos. It will also improve the detector's sensitivity to proton decays by cutting backgrounds; genuine nucleon decay events should usually not have free neutrons in the final state. In addition, solar neutrino studies



Figure 1: EGADS, the large-scale gadolinium test facility in the Kamioka mine.

Light @ 15 meters and Gd conc. in the 200-ton EGADS tank

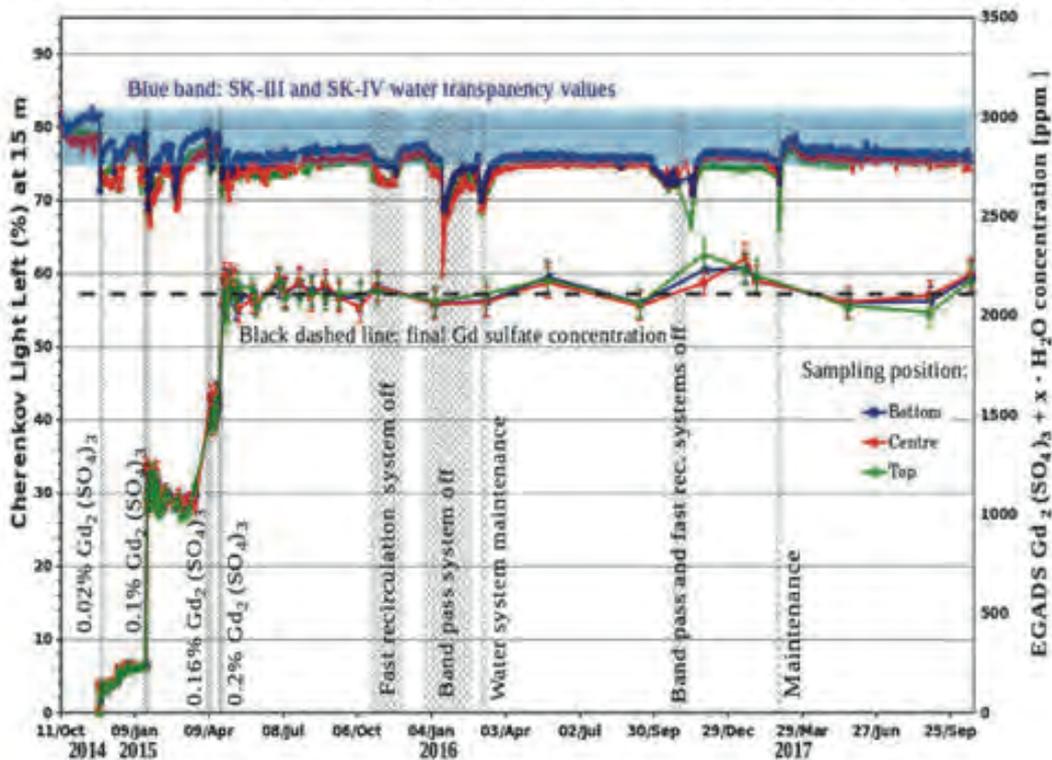


Figure 2: Primary EGADS results.

will benefit from reduced spallation backgrounds.

While the physics potential of the GADZOOKS! concept was readily apparent, there were technical issues to address if it were to become a reality. Naturally, the compatibility of gadolinium with detector materials needed to be demonstrated, but the primary challenge was that in detectors such as Super-Kamiokande the long mean free path of light (~100 meters) is maintained by constant recirculation of the water through a water purification system. The existing SK purification system would rapidly eliminate any added gadolinium along with all of the unwanted contaminants that are removed to maintain optical clarity.

To solve this crucial problem, I developed a fundamentally new type of filtration system: my “Molecular Band-pass Filter” was designed to selectively extract $Gd_2(SO_4)_3$ from the water and return it to the tank, while simultaneously allowing all other impurities to be removed.

Starting in September of 2009 a new

experimental chamber was excavated in the Kamioka mine, located close to Super-Kamiokande. There, a dedicated, large-scale gadolinium test facility and water Cherenkov detector (essentially a 200-ton scale model of Super-K, along with a few prototype Hyper-K phototubes) was built [3] as depicted in Figure 1. Known as EGADS (Evaluating Gadolinium’s Action on Detector Systems), it was designed to make absolutely sure that the introduction of Gd would not interact adversely with the detector materials and to certify the viability of the Gd-loading technique on a large scale, closely matched to the final Super-K requirements. Those studies have now been completed.

Figure 2 shows the main EGADS results: water transparency – characterized as the light remaining after 15 meters of travel through the water, the average distance traversed by light in Super-K – and the amount of gadolinium sulfate in the 200-ton tank are plotted as a function of time. They are both measured at three points in the tank: the bottom,

the middle, and the top. Transparency (percentage of light remaining, left hand scale) is indicated by the upper set of three lines, and concentration (parts per million, right hand scale) by the lower set of lines. The transparency range of the ultrapure water in Super-K, the most transparent large volume of water ever made, is shown as a blue band near the top of the figure.

Once full Gd-loading was achieved in April of 2015, the key EGADS findings were:

1) Whenever the Gd-capable water systems were allowed to operate normally (i.e., excluding the gray hashed areas), the transparency of the Gd-loaded water became comparable to that of SK's ultrapure water.

and

2) During 650 passes of the entire water volume through the Gd-capable water filtration systems there were no detectable losses of gadolinium sulfate whatsoever.

With these results in hand it was time to open the tank and look inside. Figure 3 shows us getting ready to open the big square hatch on the top of

the 200-ton EGADS tank. Figure 4 is a view through this hatch at the Gd-loaded water inside, and Figure 5 is an image taken in the bottom wall region looking up the side of the drained tank. Everything was shiny and beautiful: there were no changes after years of exposure to the 0.2% $Gd_2(SO_4)_3$.

The EGADS findings were sufficient for us to receive official approval from both the Super-Kamiokande and T2K Collaborations to move forward with plans to load gadolinium into Super-K.

Meanwhile, with its R&D role finished, EGADS has had its data acquisition hardware and online computing power significantly upgraded and now lives on as the world's most advanced water-based supernova neutrino detector. Refilled and building upon the confidence provided by Gd neutron tagging of IBD events, its ambitious goal is to make a fully automated, standalone announcement of a galactic supernova explosion within one second of the first neutrino's arrival in the detector [4]. This reborn EGADS is now associated with a Japanese network of optical, X-ray, gamma-ray, infrared, and gravitational wave observatories, for true multimessenger astronomy. Even the EGADS acronym has been repurposed: Emloying Gadolinium to Autonomously Detect Supernovas.



Figure 3: Getting ready to open the EGADS tank.



Figure 4: Looking down into the full EGADS tank following two years of exposure to Gd.



Figure 5: Looking up the side wall of the empty EGADS tank after 2.5 years of soaking in Gd.

References

- [1] J. F. Beacom and M. R. Vagins, "GADZOOKS! Anti-neutrino spectroscopy with large water Cherenkov detectors," *Phys. Rev. Lett.* **93**, 171101 (2004) [hep-ph/0309300].
- [2] M. R. Vagins, "Kavli IPMU's Neutrino Forecast: Mostly Sunny, with a Good Chance of Supernovas," *Kavli IPMU News*, No. 19, September 2012, pages 4-9.
- [3] M. R. Vagins, "EGADS Gets Going," *IPMU News*, No. 15, September 2011, page 15.
- [4] S. M. Adams, C. S. Kochanek, J. F. Beacom, M. R. Vagins, K. Z. Stanek, "Observing the Next Galactic Supernova," *Astrophys.J.* **778** (2013) 164 [arXiv:1306.0559 [astro-ph.HE]].

Our Team

Matthew Dodelson

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

My main interests are in black holes, holography, and string theory. In my PhD research at Stanford I focused on aspects of string theory near black holes. Specifically, if a string falls into a black hole, how much does the string stretch out near the horizon? We argued that such nonlocal string effects near the horizon lead to a possible resolution of Hawking's information paradox, where the information can be collected by a late observer



by detecting the spreading of the early infalling string.

Martin Fluder

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

The overarching theme of my research is the study of symmetries, dualities and correspondences in quantum field theory and string theory. Ultimately, my goal is to exploit these concepts to improve the understanding of non-perturbative quantum systems, as well as their (hidden) mathematical structures. I am working on a diverse set of topics, ranging from the study of various supersymmetric and superconformal field theories in different dimensions, to concepts in holography



and supergravity.

Wentao Luo

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

I am from Shandong Province, China and am now a post-doctoral researcher at the Kavli IPMU. My research interests include accurate galaxy shape measurements, galaxy-galaxy lensing signal measurements, and modeling of galaxy-galaxy lensing signals. I really enjoy the procedure of extracting the weak signal from very noisy data. Isn't it amazing to detect the distribution of dark matter from galaxy images and further constrain cosmology? It is like communicating with Mother Nature using multiple languages, computer



language and mathematical language. For me, there is nothing more interesting than studying language and communicating with people and with Mother Nature.

Oscar Macias

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

I'm a Postdoc at Kavli IPMU (Tokyo U.) and GRAPPA (Amsterdam U.). Previously I was a research associate in the Center for Neutrino Physics at Virginia Tech.

My research interests lie at the interface of particle physics and astrophysics. A central theme of my research program is the possibility that Dark Matter particles - which are invisible to optical telescopes - may produce gamma-ray photons as the result of collisions with each other. A clear-



cut detection of this signal in regions where Dark Matter is abundant and the background is well understood would have profound implications for our understanding of the Universe.

Dinakar Muthiah

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

I am working in algebro-geometric and combinatorial aspects of representation theory.

One topic I have been investigating is the p-adic theory of Kac-Moody groups. A special case of this is a notion of a double loop group. This is very closely related to the geometry of double affine Schubert varieties. Conjecturally, these double affine Schubert varieties should also be closely related to instanton spaces as well as Coulomb branches for quiver gauge theories.

A closely related topic is the geometric Satake equivalence and Mirković-Vilonen (MV) cycles.



In this area I have been studying both the MV basis as well as MV polytopes and their affine generalizations. Finally, I have been recently thinking about Chern-Mather classes and characteristic cycles for Schubert varieties.

Our Team

Youngsoo Park

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

The exact nature of cosmic acceleration is a key mystery of modern cosmology. Current and future wide-field surveys provide a number of important probes, such as weak gravitational lensing, the clustering of matter, and the abundance of galaxy clusters, that can shed light on this mystery.

My research interests involve combining these different probes in a unified analysis to maximize the cosmological information we gain from them, as well as to use them for tests of the current-standard



Λ CDM framework. In particular, I am interested in developing analysis techniques that can provide tighter constraints on the cosmological parameters of interest while mitigating critical systematic errors.

Anna Puskás

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

My research interests lie on the boundary of Number Theory and Combinatorial Representation Theory. For example, I am interested in questions related to the study of Whittaker functions on metaplectic covers of nonarchimedean groups. Recently with my collaborators we extended the study of Iwahori-Whittaker functions to metaplectic covers of Kac-Moody groups, and studied properties of related correction factors. The main tools of this study are Demazure and Demazure-Lusztig operators, highest weight crystals and other combinatorial devices associated with the representation theory of



finite and infinite-dimensional Lie algebras. Similar devices, related to symmetries and the Bruhat order of a Weyl group appear in the study of a wide range of interesting questions.

Kenneth Wong

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

I am primarily interested in studying cosmology and extragalactic astronomy using observational data, particularly at optical/NIR wavelengths. I am involved in a number of observational studies using Hyper Suprime-Cam on the Subaru Telescope, particularly in the field of strong gravitational lensing. I also perform mass modeling of strong lens galaxies using Hubble Space Telescope imaging and combine this information with measurements of the time delay between multiple images of



the background source to constrain cosmological parameters such as the Hubble constant, H_0 .

Vertex Algebras, Factorization Algebras, and Applications

Mikhail Kapranov

Kavli IPMU Principal Investigator

Hiraku Nakajima

Kavli IPMU Principal Investigator

From July 17 to July 21, 2018, Kavli IPMU hosted a workshop on “Vertex algebras, factorization algebras, and applications,” organized by B. Feigin (HSE Moscow and Kyoto University), M. Kapranov (Kavli IPMU), and H. Nakajima (Kavli IPMU).

Vertex algebras are fundamental algebraic structures underlying conformal field theories in two dimensions. With the impetus given by the AGT conjecture, the recent couple of years have seen intense activity relating field theories in 2 and 4 dimensions. In particular, there emerged deep relations between vertex algebras and the geometry of smooth 4-dimensional manifolds.

At the same time, vertex algebras are particular cases of factorization algebras, a concept that makes sense in any number of dimensions and provides a mathematical descriptions of quantum field theories. Factorization structures and factorization homology also serve as a mathematical language for a local-to-global “integration” formalism in pure mathematics. They have also served as crucial tools in representation theory of affine Lie algebras and quantum

groups. The emerging relation of factorization structures in 2 and 4 dimensions is an extremely promising area of development, of importance both in mathematics and physics. The conference brought together experts in these related areas as well as younger researchers from Japan and overseas. The talks of S. Gukov and B. Feigin were devoted to the exciting connections between vertex algebra and smooth 4-manifolds. In particular, classical constructions related to vertex algebras (such as coset models) obtained a new meaning from the 4-dimensional topology point of view (plumbing, Kirby moves, etc.).

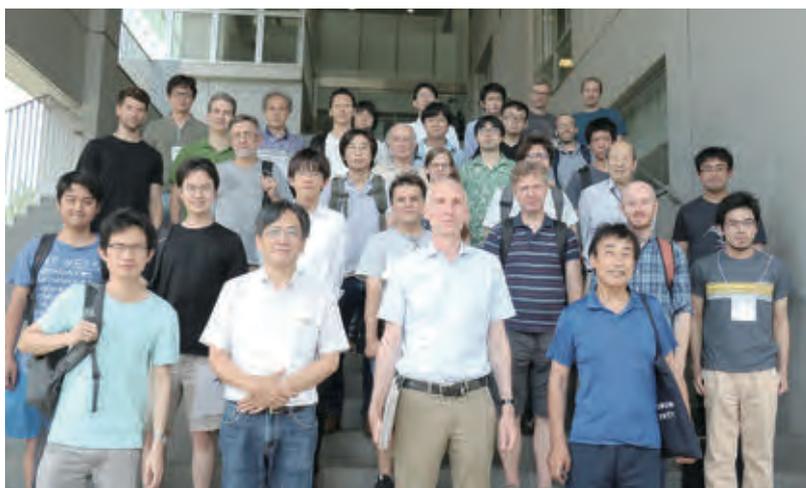
The talk of T. Arakawa was devoted to a new “geometrization” approach to vertex algebras based on the concept of associated varieties, which provide natural vertex Poisson algebras and ordinary Poisson manifolds. This approach also establishes a connection to the mathematical analysis of Coulomb branches of 4-dimensional field theories. A. Braverman, in his talk, explained a wider and more conceptual categorical framework for some of these questions. The talk of T.

Kuwabara, devoted to “chiralization” of hypertoric manifolds, made several steps in the opposite direction, going from certain Poisson manifolds to vertex algebras.

D. Gaitsgory presented a vertex algebra approach to the quantum Langlands correspondence, understood as equivalence of categories of twisted D-modules. In the talks of S. Raskin, L. Chen, and D. Yang, several aspects of the connection between vertex algebras, affine Lie algebras, and quantum groups were investigated, with applications to the Langlands correspondence playing an important role.

The talks of T. Creutzig, K. Kawasetsu and T. Nishinaka were devoted to various aspects of vertex algebras coming from affine Lie algebras at admissible level. A. Linshaw talked about realizing W-algebras as specializations of vertex algebras depending on parameters.

Various applications of factorization structures (including those in higher dimensions) were given in the talks of E. Cliff, J. Francis, B. Hennion, Q. Ho, Y. Kremnitzer, and V. Schechtman. Relations with Hall algebras (which play a role in some mathematical aspects of the AGT conjectures) were discussed by E. Vasserot.



IGM2018: Revealing Cosmology and Reionization History with the Intergalactic Medium

Khee-Gan Lee

Kavli IPMU Assistant Professor

On September 18–21, 2018, the 4-day workshop titled “IGM2018: Revealing Cosmology and Reionization History with the Intergalactic Medium” was held at the Kavli IPMU. The goal of this workshop was to bring theorists and observers working on the intergalactic medium (IGM) across a range of cosmic history and observational methods to discuss the interplay between cosmology and reionization history. Our invited speakers ranged from experts on the cosmic microwave background, high-redshift galaxy observations, quasar observations, Lyman-alpha forest cosmology, and 21cm studies. Over 100 participants showed up from both within Japan and also all over the world including Asia, Europe and North America.

An intriguing development in recent years is that the optical depth to electron scattering as measured through the cosmic microwave background has been creeping lower, implying that hydrogen reionization occurred later than previously assumed, with a midpoint around $z = 7.7$. This means that the most distant quasars, and the foreground IGM absorption seen in their spectra, are now directly probing the epoch of reionization! Indeed, Fred Davies (UCSB) demonstrated direct neutral fraction constraints from the hydrogen damping wing in the most distant ($z = 7.5$) quasar spectrum,

which bodes well for the exciting possibility of directly measuring the evolution of the neutral fraction across the epoch of reionization with future samples of high-redshift quasars. Xiaohui Fan (Arizona), in particular described ambitious efforts to find more high-redshift quasars at $z > 7$.

At slightly lower redshift, we heard about efforts to understand the nature of optically-thick Gunn-Peterson troughs at $z \sim 5.5$, when hydrogen reionization should have been completed. George Becker (UC Riverside) showed narrow-band imaging results from Subaru Hyper Suprime-Cam indicating a deficit of Lyman-alpha emitters near these dark troughs, which could be interpreted as being due to UV background fluctuations or even pockets of late reionization as advocated by Laura Keating (CITA).

The effects of reionization persist to lower redshifts especially in the temperature and pressure evolution of the IGM. Elisa Boera (UC Riverside) discussed constraints on the thermal properties of the IGM using the Lyman-alpha forest power spectrum

at $z \sim 4-5$, while Michael Walther (UCSB) showed impressive forest power spectrum constraints over 12 Gigayears of cosmic time from $z \sim 0-5$. We also had presentations on cosmological constraints using the IGM, first via a comprehensive review by Andreu Font-Ribera (UCL) on the use of Lyman-alpha forest baryon oscillation signal to early expansion history of the universe. Nathalie Palanque-Delabrouille (CEA Saclay) then presented 1D power-spectrum constraints on neutrino masses (from $z \sim 2-3$ data) as well as warm dark matter and sterile neutrino masses from $z \sim 4-5$ data. During the discussions it was clear that the understanding of reionization and thermal history of the IGM is becoming a high priority for mitigating this systematic in Lyman-alpha forest cosmology.

Overall it was a successful workshop, and the participants remarked on the multi-disciplinary nature which allowed for discussions between scientists who would not usually encounter each other at meetings.



News

FY2018 WPI Site Visit

The FY2018 WPI site visit team visited Kavli IPMU's Kamioka Branch on July 11. The next day, they visited Kavli IPMU's research building on the University of Tokyo's Kashiwa campus, and on July 13, the site visit continued at the Crest Hotel Kashiwa near JR Kashiwa station (see photos on p. 3).

The site visit team to the Kamioka Branch consisted of ten members: WPI Program Director (PD) Akira Ukawa, WPI Academy Director (AD) Toshio Kuroki, Program Officer (PO) in charge of the Kavli IPMU Ichiro Sanda, members of the Working Group in charge of the Kavli IPMU (Tetsuji Miwa, Kaoru Ono, Matthias Staudacher, and Anthony Tyson), POs in charge of other WPI institutes (Shoken Miyama and Akihiko Nakano), and Director, Office for the Promotion of Basic Research, Basic Research Promotion Division, Research Promotion Bureau of MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology) Tadatoshi Kaneko. Director of Kavli IPMU Hitoshi Murayama, Director of the Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research and Principal Investigator (PI) of Kavli IPMU Masayuki Nakahata, and other researchers reported research activities at the Kamioka

Branch and guided them to Super-Kamiokande and, in particular, the inside of its detector tank which was open for refurbishment work, the EGADS experiment (see pp. 10-13), and the XMASS experiment.

For the site visit to Kashiwa on July 12 and 13, five members joined (Deputy PD Minoru Yoshida, WPI Program Committee member Kiyoshi Kurokawa, JSPS (Japan Society for Promotion of Science) Executive Director Yasuhiro Iye, members of the Working Group in charge of the Kavli IPMU Akira Iso and Ian Shipsey), while PO Akihiko Nakano was absent, so the site visit team consisted of 14 members. They listened to Director Murayama's overview presentation and presentations by Kavli IPMU researchers on their research accomplishments. In the final session, the members of the site visit team gave their comments, and the site visit was concluded.



On July 12, the site visit team and Kavli IPMU researchers gathered for informal discussion at a poster session held in the Fujiwara Hall at the Kavli IPMU Building.

UC Santa Cruz Chancellor Visits Kavli IPMU

On August 20, 2018, Chancellor George Blumenthal of the University of California at Santa Cruz (UCSC) visited the Kavli IPMU, accompanied by Associate Chancellor Ashish Sahni and Assistant Vice Provost of Global Engagement Becky George (see photo on p. 3).

As UCSC is one of the premier institutions in the US in astronomy,

astrophysics, and physics, and Chancellor Blumenthal himself is an astrophysicist, they are interested in Director Murayama's presentation on research activities at the Kavli IPMU. There was also a discussion session between visitors and leading Kavli IPMU researchers, and agreement was reached on boosting exchanges of researchers at all levels, from undergraduate to faculty.

Kavli IPMU Researchers and Administrative Staff Members Visited Super-Kamiokande

The water tank of the Super-Kamiokande (SK) detector was opened in June 2018 for the first time in twelve years, in order to refurbish the detector by adding gadolinium to the pure water in the detector to improve neutron detection efficiency as a result of successful R&D through the EGADS experiment. On this occasion, the Institute for Cosmic Ray Research, which operates SK, kindly arranged opportunities for Kavli IPMU researchers and administrative staff to visit and look at the inside of the beautiful SK detector on an elevating gondola for work on July 20 and August 7, in addition to the WPI site visit team on July 11 and the Kavli IPMU Steering Committee on August 1 (see photo on p. 3).

An Encouraging Step Forward for the Hyper-Kamiokande Project

On September 9-13, 2018, the 7th Hyper-Kamiokande (HK) Proto-Collaboration Meeting was held at the Kavli IPMU.

The HK is an international project led by Japan to construct a huge water-Cherenkov detector with a fiducial mass 10 times larger than that of the highly successful Super-Kamiokande, aiming at further

developments in neutrino physics. At the University of Tokyo, the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), the Kavli IPMU and the School of Science partnered to launch the Next-Generation Neutrino Science Organization last year for the advancement of the HK project.

On September 12, the participants of the Meeting heard a very encouraging report from a guest speaker, Director-General of the Research Promotion Bureau of MEXT Keisuke Isogai, that MEXT allocated seed funding toward construction of the HK within its FY 2019 budget request to the Ministry of Finance. Subsequently, ICRR Director Takaaki Kajita introduced a statement from the President of the University of Tokyo, Makoto Gonokami, about the University of Tokyo's decision to start construction of the HK detector in April 2020. From past experience, it is expected that once the seed funding is approved, it will lead to approval of full funding the following year. Even before funding is confirmed, however, the statement indicates the University of Tokyo's firm determination.



Participants of the seventh Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration Meeting.

Beginning of HSC's Precision Cosmology Towards Elucidating Dark Components of Universe

Led by Kavli IPMU Assistant Professor Chiaki Hikage, a team of researchers from institutes including the University of Tokyo, the

National Astronomical Observatory of Japan, Nagoya University, Princeton University, and Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (ASIAA) has successfully observed the distortion of images of about 10 million galaxies caused by the "weak" gravitational lensing effect from the distribution of dark matter in the Universe, based on about 90 nights of HSC data covering about 140 square degrees of sky (the area of about 3000 full moons). As the Subaru Telescope and a wide angle camera HSC is the world's best combination to conduct a wide imaging survey of galaxies in the distant and dark Universe, these results imply observation of the structures of the most distant (therefore, earliest) Universe in the weak gravitational lensing measurements conducted to date.

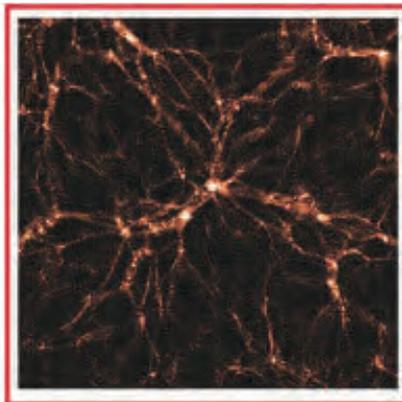
The researchers analyzed these results and deduced a physical parameter indicating the fluctuations or clumpiness of the matter distribution today. It is a key parameter that describes how the structures in the Universe grew after the Big Bang into the galaxies and

stars we see today. If the structure of the Universe is more evolved, there are more galaxies, for example. The results of the clumpiness of the matter distribution from HSC observations of the distant Universe using weak gravitational lensing are consistent with results from other similar observations (Dark Energy Survey (DES) and Kilo Degree Survey (KiDS)) of slightly nearby Universe.

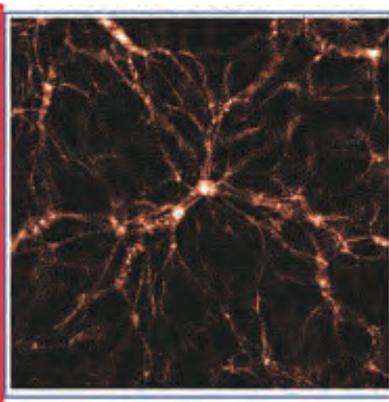
These results are also statistically consistent with the prediction from the observation of the cosmic microwave background in the very early Universe by the Planck satellite of the European Space Agency. Therefore, the HSC results are consistent with the simplest cosmological model, which is supported by the Planck observation, and predicts that the present Universe is dominated by dark matter and dark energy, and that dark energy behaves like Einstein's cosmological constant.

However, taken together the results from weak lensing surveys prefer a slightly smaller value of clumpiness of the matter distribution today than that predicted by the Planck satellite. The figure shows

HSC preferred universe



Planck preferred universe



The weak lensing surveys such as HSC prefer a slightly less clumpy Universe than that predicted by Planck. The pictures show the slight but noticeable difference as expected from large computer simulations. Is this difference a statistical fluctuation? Astronomers all around the world continue to collect more and more data to answer this question. (Image Credit: Kavli IPMU / Takahiro Nishimichi.)

simulation results of the formation of cosmological structures for two cosmological models. Although there are only slight differences, the Planck preferred universe seems clumpier than the HSC preferred universe.

This could just be a statistical fluctuation due to the limited amount of data available, or might be a signature of the breakdown of the standard model of the Universe, based on General Relativity and the cosmological constant. The HSC survey is ongoing, and these HSC results come from a mere one-tenth of the final survey. Upon completion, the survey will put considerably tighter constraints on cosmological parameters, deepening our understanding and further testing our understanding of both dark matter and dark energy.

The report of this research appeared in a preprint server on September 26 (<https://arxiv.org/abs/1809.09148>), and was submitted to *Publications of the Astronomical Society of Japan*. Also, the results of this research were released at a press conference held on September 20.

Science Café in English: Universe 2018

Every year, Kavli IPMU and the Tamarokuto Science Center co-host “Science Café Universe” at the Tamarokuto Science Center in Nishi-Tokyo City, and Science Café 2018 is the 10th of this series. Following Science Café Universe 2017, this year two Kavli IPMU postdoctoral fellows again delivered a lecture in English with no Japanese interpretation. Each time, there were about 30 attendees including junior high school and high school students.

On July 8, Matthias Weissenbacher gave the first lecture entitled

“Quantum Strings and the Vacuum Structure of the Universe.” He explained the development of superstring theory, starting from its prehistory up to the present. Further, he introduced some experiments at the CERN LHC in which searches have been made to find effects related to superstring theory.



Matthias Weissenbacher, giving a lecture.

The second lecture entitled “Supernova: The cradle of chemical elements in the universe” was given by Shing Chi Leung on September 29. After talking about how many of the elements that form our body have been produced in supernova explosions, he carefully explained different kinds of supernova explosions and their mechanisms, with demonstrations using a balloon and a tennis ball.



Shing Chi Leung, giving a lecture.

Booth at the 2018 Super Science High School Student Fair

On August 8 and 9, the 2018 Super Science High School Student Fair was held at the Kobe International Exhibition Hall in Kobe, Hyogo Prefecture. The Kavli IPMU and other

10 WPI centers jointly ran a booth exhibiting their research activities.

Kavli IPMU Seminars

1. “miniTimbeCube: Building The World’s Smallest Neutrino Detector”
Speaker: Viacheslav Li (Hawaii U)
Date: Apr 20, 2018
2. “A logarithmic McKay correspondence and derived invariance for parabolic sheaves”
Speaker: Mattia Talpo (Simon Fraser U)
Date: Apr 24, 2018
3. “Noether inequality for algebraic threefolds”
Speaker: Chen Jiang (Kavli IPMU)
Date: Apr 26, 2018
4. “Yang-Baxter equations and symmetric groups”
Speaker: Simon Wood (Cardiff U)
Date: May 01, 2018
5. “Cohomological field theories from matrix factorizations”
Speaker: Arkady Vaintrob (U Oregon)
Date: May 08, 2018
6. “Maximally Supersymmetric AdS Solutions and their Moduli Spaces”
Speaker: Severin Luest (Ecole Polytechnique)
Date: May 08, 2018
7. “The impact of EDGES 21-cm data on dark matter interactions”
Speaker: Yue-Lin Sming Tsai (Academia Sinica)
Date: May 09, 2018
8. “Understanding the chemical enrichment pattern in the hot haloes of massive ellipticals, groups, and clusters of galaxies”
Speaker: Francois Mernier (Eötvös-Loránd U)
Date: May 11, 2018
9. “Introduction to Deep Learning for Basic Science”
Speaker: Masato Taki (RIKEN)
Date: May 16, 2018

10. "The power of high resolution X-ray spectroscopy: legacy from the Hitomi observatory"
Speaker: Aurora Simionescu (JAXA)
Date: May 16, 2018
11. "The Cosmic Microwave Background"
Speaker: Mark Devlin (U Penn)
Date: May 17, 2018
12. "Hodge-Tate conditions for Landau-Ginzburg models"
Speaker: Yota Shamoto (Kavli IPMU)
Date: May 17, 2018
13. "Systoles, Special Lagrangians, and Bridgeland stability conditions"
Speaker: Yu-Wei Fan (Harvard U)
Date: May 22, 2018
14. "Current status of MSSM Higgs bosons and future"
Speaker: Biplob Bhattacharjee (Indian Inst of Science)
Date: May 23, 2018
15. "The Planck Legacy Archive"
Speaker: Marcos Lopez-Caniego (ESA)
Date: May 23, 2018
16. "938 MeV dark matter, neutron decay, and neutron stars"
Speaker: David McKeen (TRIUMF)
Date: May 28, 2018
17. "A study of the stability manifold on an abelian threefold"
Speaker: Dulip Piyaratne (U Arizona)
Date: May 29, 2018
18. "What do we know about HI Cosmic Reionization? New Constraints from the High-z Lyman-Forest"
Speaker: Jose Onorbe (U Edinburgh)
Date: May 31, 2018
19. "E-infinity geometry and symmetric spectra"
Speaker: Andrew Macpherson (Kavli IPMU)
Date: May 31, 2018
20. "Fast Radio Bursts"
Speaker: Vikram Ravi (Caltech)
Date: Jun 05, 2018
21. "Telling the Story of Life in the Universe: The LUVOIR Mission Concept"
Speaker: John O'Meara (St. Michael's College)
Date: Jun 07, 2018
22. "Theories of Class F and Their Anomalies"
Speaker: Craig Lawrie (U Heidelberg)
Date: Jun 12, 2018
23. "Gamma-Ray Imaging Instrumentation in Oncology: Current Status, Challenges and Opportunities"
Speaker: Lars Furenlid (U Arizona)
Date: Jun 12, 2018
24. "Li Abundances in Extremely Metal-Poor Stars"
Speaker: Tadafumi Matsuno (NAOJ)
Date: Jun 15, 2018
25. "From Phase Space to Integrable Representations and Level-Rank Duality"
Speaker: Arghya Chattopadhyay (IISER Bhopal)
Date: Jun 19, 2018
26. "New multiplets in four dimensional N=2 conformal supergravity"
Speaker: Subramanya Hegde (IISER Thiruvananthapuram)
Date: Jun 20, 2018
27. "M/N and 1/N Anomalous Dimensions in Chern-Simons theory"
Speaker: V. Guru Charan (Dayalbagh Educational Inst, Agra)
Date: Jun 21, 2018
28. "Brain PET imaging in awake mice and its application to human disease models"
Speaker: Hiroshi Mizuma (RIKEN-BDR)
Date: Jun 21, 2018
29. "A Flexible Halo Model for the Intrinsic Alignment of Galaxies"
Speaker: Duncan Campbell (Carnegie Melon U)
Date: Jun 21, 2018
30. "Structure of higher genus Gromov-Witten invariants of the quintic 3-fold"
Speaker: Yongbin Ruan (U Michigan)
Date: Jun 21, 2018
31. "Verlinde/Grassmanian Correspondence"
Speaker: Yongbin Ruan (U Michigan)
Date: Jun 22, 2018
32. "Tests of modified gravity using galaxy clusters and gravitational wave observations using GW170817"
Speaker: Shantanu Desai (IIT Hyderabad)
Date: Jun 26, 2018
33. "On generalized cohomology theories of regular nilpotent Hessenberg varieties of type A"
Speaker: Anatol Kirillov (RIMS)
Date: Jun 26, 2018
34. "Creating matter-antimatter asymmetry from dark matter annihilations in scotogenic scenarios"
Speaker: Debasish Borah (IIT Guwahati)
Date: Jun 28, 2018
35. "New applications of gravitational lensing to probe dark matter substructure"
Speaker: Liang Dai (IAS, Princeton)
Date: Jun 28, 2018
36. "Modularity, resurgence, and the 3d-3d correspondence"
Speaker: Sarah Harrison (McGill U)
Date: Jul 02, 2018
37. "Galaxies and Dark Matter Seen Through a Gravitational Lens"
Speaker: Mike Hudson (U Waterloo)
Date: Jul 03, 2018
38. "Computation of flat structures with irrelevant (negatively

- weighted) directions”
 Speaker: Konstantin Aleshkin (SISSA)
 Date: Jul 03, 2018
39. “Duality Interfaces and the 4-simplex”
 Speaker: Natalie Paquette (Caltech)
 Date: Jul 03, 2018
40. “Alternative production mechanism of sterile neutrino dark matter”
 Speaker: Takashi Toma (TUM)
 Date: Jul 04, 2018
41. “Supersymmetric Bolt solutions and their free energy via susy localization”
 Speaker: Chiara Toldo (KITP, UCSB)
 Date: Jul 05, 2018
42. “Heavy (dynamical) axions”
 Speaker: Pablo Quílez (UAM)
 Date: Jul 06, 2018
43. “Integrability, correlation functions, and stringy WZW models”
 Speaker: Alessandro Sfondrini (ITP, ETH Zurich)
 Date: Jul 09, 2018
44. “Spontaneous CP breaking in QCD and the axion potential”
 Speaker: Gabriele Veneziano (CERN/Collège de France)
 Date: Jul 09, 2018
45. “First star formation with streaming velocities and Lyman-Werner radiation”
 Speaker: Anna Schauer (U Heidelberg)
 Date: Jul 10, 2018
46. “Cheshire Cat Resurgence in QM and QFT”
 Speaker: Daniele Dorigoni (Durham U)
 Date: Jul 10, 2018
47. “Bosonization and other exact dualities in 2+1 dimensions”
 Speaker: Djordje Radicevic (Perimeter Inst)
 Date: Jul 10, 2018

48. “Hunt for low mass diphoton resonance at LHC and Kaon factory”
 Speaker: Kohsaku Tobioka (Stony Brook U)
 Date: Jul 11, 2018
49. “Parametric approach for Dark Energy”
 Speaker: Mariana Jaber (UNAM)
 Date: Jul 11, 2018

Personnel Changes

Appointment of a New PI

Kavli IPMU Professor Hiraku Nakajima was appointed to a Kavli IPMU Principal Investigator on August 1, 2018.

Promotion

Mark Hartz, who was Kavli IPMU Assistant Professor, became Kavli IPMU Associate Professor on August 1, 2018.



Mark Hartz

Moving Out

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

Kavli IPMU Associate Professor Surhud More [September 1, 2012 – February 28, 2014 as an IPMU postdoctoral fellow, then – February 28, 2018 as a Kavli IPMU Assistant Professor, and then – July 15, 2018 as a Kavli IPMU Associate Professor] moved to Inter-University Center for Astronomy and Astrophysics in India as an Associate Professor.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Jiaxin Han [July 1, 2016 – August 31, 2018] moved to Shanghai Jiao Tong University as an Assistant Professor.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Juliana Kwan [October 1, 2016 –

September 30, 2018] moved to Liverpool John Moores University as a postdoctoral fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Evangelos Routis [August 1, 2015 – September 30, 2018] moved to the Max Planck Institute for Mathematics as a postdoctoral fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Alessandro Sonnenfeld [September 1, 2015 – August 31, 2018] moved to the Leiden Observatory in The Netherlands as a postdoctoral fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Alexey Tolstov [April 1, 2014 – September 30, 2018] moved to The Open University of Japan as a researcher.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Benda Xu [April 1, 2015 – August 19, 2018] moved to Tsinghua University as an Assistant Professor.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Itamar Yaakov [September 1, 2015 – August 31, 2018] moved to the University of Parma as a postdoctoral fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Louis Yang [October 1, 2017 – September 5, 2018] moved to Tubular Labs, Inc. as a Data Scientist II.

JSPS overseas postdoctoral researcher Mathew Murdoch [November 8, 2016 – July 26, 2018] moved to the University of Liverpool as a Royal Society of Edinburgh Enterprise Fellow.

Erratum to *Kavli IPMU News* No. 39 (September 2017)

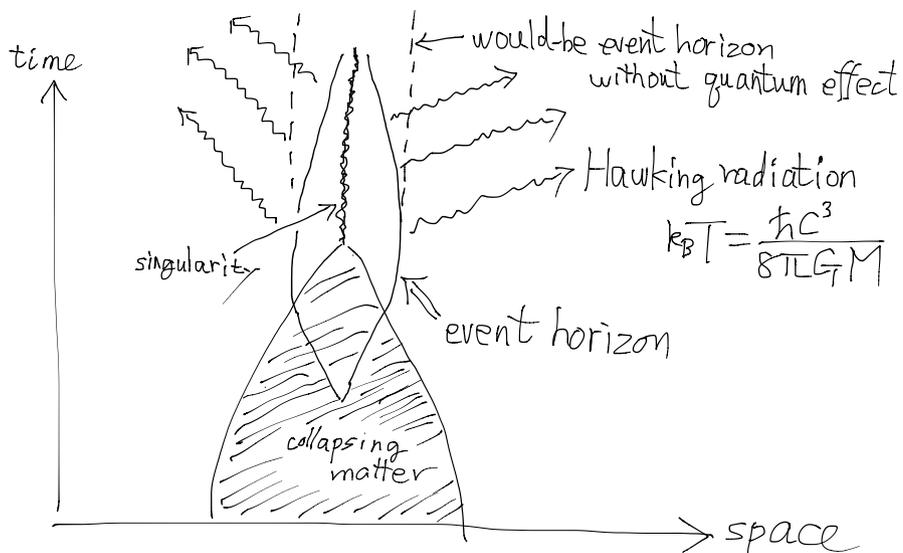
On page 12 of *Kavli IPMU News* No. 39, Hillary Child’s title “Postdoc” should read “JSPS Overseas Researcher.” Her “Moving Out” information [*Kavli IPMU News* No. 41 (March 2018), page 29, right column] refers to her correct title.

Black Hole and Hawking Radiation

Misao Sasaki

Kavli IPMU Deputy Director

A black hole is a space-time region where gravity is so strong that not even light can escape from it. The boundary of the space-time region is called the event horizon. This seems to imply that a black hole can only become heavier by absorbing nearby matter. However, Hawking showed that a black hole behaves as a thermal source if quantum effects are taken into account. The thermal radiation emitted quantum mechanically by a black hole is called Hawking radiation. The figure illustrates the formation of a black hole and its subsequent stage when it becomes thinner due to Hawking radiation.



近況

Kavli IPMU 機構長
村山 斉 むらやま・ひとし



7月11日：WPIの神岡分室現地視察（p. 41参照）。



7月12日：WPIの柏キャンパス研究棟現地視察（p. 41参照）。



7月29日：昨年度に続き東京大学 CoREFとKavli IPMU 共催の「平成30年度知の協創実践学講座『物理を学ぶ、物理を作る～高校物理から宇宙研究の最先端へ～』」で講義し、参加した高校生と交流。



8月1日：Kavli IPMU 運営委員会委員が改修工事中のスーパーカミオカンデを見学（p. 41参照）。 Gondolaに搭乗中の村山機構長（左）、ミハイル・カブラノフ Kavli IPMU 主任研究員（中）と案内する中畑雅行東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設長兼Kavli IPMU主任研究員（右）。



8月20日：カリフォルニア大学サンタクルーズ校のジョージ・ブルーメンソール学長（左から2人目）一行がKavli IPMUを訪問（p. 41参照）。



9月20日：HSCの成果についての記者発表で（p. 42参照）。

量子重力と量子情報

空間や時間の性質を理解することは物理学に多くの革命をもたらしてきた。古くは、デカルトに帰される事の多い座標系の導入、それはガリレオ等の貢献を経てニュートン力学の完成につながった。そして20世紀初頭には、アルベルト・アインシュタインが空間と時間がある意味で統一する特殊相対性理論を提唱した。この理論によれば空間と時間は密接に関係しており、例えば光速に近い速さで動く物体の長さが縮んだり、時間が遅れたりという現象を引き起こす。現在ではこれらの効果は実験で精密に測られており、疑う余地はない。この時間と空間を統一的に扱う「時空」という概念は、現代物理学において今日に至るまで基本的な役割を果たしている。

時空の極めて重要な性質の一つは、特殊相対性理論の成立から約10年後、アインシュタイン自身によって明らかにされた。この一般相対性理論と呼ばれる理論によれば、時空とは通常座標系と言ったときに想起されるような固定的なものではなく、曲がったり歪んだりできる動的なものだとされる。そしてこの時空の曲がりや歪みこそが、我々が重力と呼ぶものの正体であることが示される。例えば太陽と地球の間の重力は、太陽の存在がその周りの時空を歪めることによって生

じる。地球はその歪んだ空間を進むために、太陽の周りを回る運動をすることになるのである。

この時空に関する画期的な理論は一つの重要な予言をする。それは、時空が動的であるためにその歪みが物質の存在と独立に伝搬し得るということである。例えば、ブラックホールなどの重い天体が激しく動いた時には、時空は大きく攪乱される。そしてその効果は、時空の歪みの波となって元々の天体から遠く離れた所へと伝搬して行くことができるのである。この時空の歪みの波は重力波と呼ばれ、一般相対性理論の成立からほぼ100年後の2016年に初めて直接検出された。これは実験的に極めて重要な発見であり、その業績に対して2017年のノーベル物理学賞が与えられた。

量子重力理論

ここまで見てきたように、我々の空間や時間に対する認識はここ数百年の間に大きく変わってきた。しかし、実はこれで終わりでないことははっきりしているのである。それは、我々の住む世界が量子力学に従っていることによる。

量子力学とは、20世紀初頭に原子などのミクロな

世界を調べる過程で発見され、後に我々の世界を支配する基本的な原理であることが明らかになった法則である。量子力学は数々の奇妙な予言をする。例えば、電子などの物質は一般に一つの場所に存在することはできず、その存在場所は確率的に広がっている（この広がり通常とても小さいので、日常生活で我々がそれを直接知覚することはできない）。また、二つの世界を確率的に重ね合わせたりすることも可能である。これらは我々の感覚からするととてつもなく変な現象であるが、この理論の正しさは実験で繰り返し確かめられてきた。それらの実験の精度は近年飛躍的に向上し、現在では量子力学の予言はその詳細にいたるまで極めて精密に確認されている。さらには、量子力学の原理を積極的に利用した従来とは全く違う能力を持つコンピューター（量子コンピューター）の開発も進められている。

話を時空に戻そう。一般相対性理論はニュートンの重力理論からの微細なずれ、重力波の存在、果ては宇宙膨張の予言に至るまで、現在までの観測を全て矛盾なく説明する。この理論の我々が現在観測し得るスケールでの正しさは、ほぼ疑いようがない。しかし、一般相対性理論には我々の住む世界の基本原則であるはずの量子力学の効果が入っていないのである。これは実験的に喫緊の問題というわけではない。時空の量子効果が直接重要になってくるスケールは理論的に評価でき、それはプランク長と呼ばれる長さ、約 10^{-33} cmである。これは現在最先端の加速器で探索された最小の長さよりも約16桁も小さい。では、時空の量子効果を考えるのは意味のない事なのであろうか？

理論的にはそうでないと言える数々の理由が存在する。その一つは無量大の問題である。量子力学と一般相対性理論は折り合いがあまりよくない。我々のスケールでの重力理論が一般相対性理論であるとする、時空や重力に対する量子効果が重要になってくるプランク長以下では、理論に無数の無量大が現れ予言可能性が失われてしまう。これは、時空や重力の量子効果を含む完全な理論を手に入れるためには、ただ単

に一般相対性理論と量子力学を一緒に考えればよいわけではないことを意味している。この問題を解決するための現在最も有望な理論は超弦理論と呼ばれ、その構造や帰結は多くの研究者によって精力的に調べられている。

時空や重力の量子力学的理論（一般に量子重力理論と呼ばれる）を研究するもう一つの理由は、それが時空に関して革命的な知見をもたらすからである。以下本稿でも紹介するように、量子重力の効果はプランク長のみで重要になるわけではない。それどころか、ブラックホールの物理やマルチバース宇宙論といった長距離での物理にも決定的になることが分かってきたのである。しかもこの比較的最近の進展は、個別に発展してきた量子重力理論と量子情報理論という二つの分野を統一した新たな研究領域を作り出そうとしている。以下では、それを大まかに概観してみようと思う。

時空の量子力学とホログラフィー原理

始まりはブラックホールの物理であった。一般に重力理論では、物質の密度がある限界を超えて大きくなるとそれによって引き起こされる強い引力のため、そのまわりの領域から何ものも逃れられなくなるという現象が起きる。この領域の境界を事象の地平面と呼び、その内側がブラックホールである。

ブラックホールに関しては、以下のような不思議な性質が知られていた。一般相対性理論では、ブラックホールの事象の地平面の総面積は減少しないという事実である。例えば、ブラックホールが物体を飲み込んだときには、その表面積は増大する（以後、ブラックホールの表面積といった場合には事象の地平面の表面積を意味する事とする）。また、二つのブラックホールが合体して一つになったような場合には（この現象は2016年の重力波の検出で実際に観測された!）、最終状態のブラックホールの表面積は必ず始状態の二つのブラックホールの表面積の和と同じかそれより大きい（図1参照）。

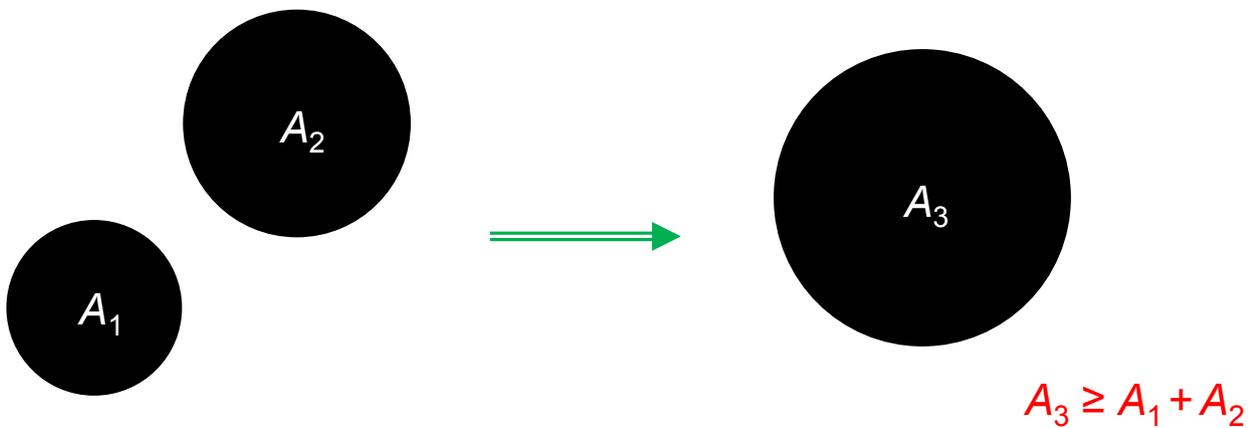


図1 2つのブラックホールが合体してできた終状態のブラックホールの表面積 (A_3) は、元々のブラックホールの表面積 (A_1 と A_2) の和と同じかそれより大きい。

このことの決定的な重要性は、1973年のヤコブ・ベッケンシュタインの革命的な論文で明らかにされた。ベッケンシュタインは、ブラックホールに物を投げ込んだ時に物理量にどんな事が起こるかを考えた。エネルギーに関しては明らかである。投げ込んだ物質が持っていたエネルギーはブラックホールの質量になり、エネルギー保存則は保たれる。しかし、エントロピーに関してはどうだろうか？熱力学の第二法則によれば、エントロピーは減少しないはずである。しかし、投げ込んだ物が持っていたエントロピーは、物がブラックホールに吸収されることによって、一見なくなってしまったように見える。これは、熱力学の第二法則が破れたことを意味するのだろうか？

ベッケンシュタインが1973年の論文で唱えたのは、物の持っていたエントロピーはブラックホールのエントロピーに変換されたのだということである。では、ブラックホールのエントロピーとは何であろうか？彼は、事象の地平面の面積がそれであると提唱した。事象の地平面の面積の総和は減少しないという性質を思い出してほしい。これはまさにエントロピーが満たすべき性質である。実際にブラックホールのエントロピーをこのように定義すると、物をブラックホールに投げ込んだ時の終状態のブラックホールのエントロ

ピーは、元々のブラックホールと物体のエントロピーの和と同じかそれより大きいことを示すことができる。

この、ブラックホールがエントロピーを持つというアイデアは、当初、懐疑的に受け取られた。もしブラックホールがエントロピーを持つなら、熱力学の第一法則から温度も持たなければならない。しかし、温度を持っているならば輻射を放っているはずである。ブラックホールからは何も出られないのではなかったのか？しかしこの一見した矛盾は、1974年にスティーヴン・ホーキングが一般相対性理論に量子力学の効果を入れた計算をすることにより解決された。ホーキングが使ったのは完全な量子重力の理論ではなかったが、それでもブラックホールが量子効果によって実際に輻射を放出することを示すことができた。これによってブラックホールの熱力学は確立した。

ここで奇妙なのは、ブラックホールのエントロピーがその表面積で決まっているという事である。ブラックホールというのはあらゆる物質の最終状態であるから、ブラックホールのエントロピーは「その領域が取り得る最大のエントロピー」を示しているはずである。現代の我々は、エントロピーというものはシステムが取り得る可能な量子状態の対数で与えられることを知っている。もし空間というものが通常の物体のよ

うに単純なつづつで構成されているならば（例えば空間を一边がプランク長の格子で近似できたりするならば）、ある領域の最大のエントロピーはその体積に比例するはずである。しかしベッケンシュタインとホーキングの発見は、それが領域の表面積に比例すると言っているのである。

これは重力を含む量子理論においては、基本的な自由度の数は一見した空間の次元よりも一つ少ない次元の分しか存在しないということを意味する。例えば、我々の住む空間は三次元だが（ここでは小さな余剰次元は無視する）、これを記述する「真の理論」は空間二次元プラス時間一次元の世界で定式化されるということである。こんなことが可能なのは、もし空間の各点（例えばプランク長の格子の交点）に物質を詰めていこうとすると、それが埋まるはるか前にブラックホールができてしまい、さらに物質を足すことはブラックホールを大きくすることにしかならないからである。つまり我々の空間に三次元分の自由度があるというのはフィクションに過ぎないのである。

この、量子重力理論は一見した時空よりも低次元で定式化されるという概念は、ホログラフィー原理と呼ばれる。そして、そうやって定式化された理論では、見かけの自由度と真の自由度の数の乖離はないため重力は存在しない。つまり、その理論は通常の量子系として扱うことができるため、量子重力理論の厳密な定義を与えることができる。これはかなり突拍子もない結論である。こんな事はとても信じられないというのが普通の感覚ではないだろうか。

AdS/CFT対応

ところが、実際に量子重力理論はこのホログラフィー原理を満たすことが、ある特別な場合に関してではあるが、示されてしまったのである！この発見は超弦理論の性質を調べることによりなされた。1997年、ファン・マルダセナは数々の証拠に基づき、無限遠で漸近的に反ド・ジッター（AdS）空間という特別

な空間に近づく時空上の物理を記述する量子重力理論は、一つ次元の低い、重力を含まない時空の上で定義された共形場の理論（CFT）と等価であると提唱した。この関係は、AdS/CFT 対応と呼ばれる。

AdS/CFT 対応は、それが特殊な時空にのみ当てはまるのにもかかわらず、極めて強力な機構である。まず、共形場の理論は我々のよく知っている量子的場の理論の一種であり、数学的に厳密に定義されている。このことは、我々の実際に住む時空とそう遠くない時空（漸近的 AdS 空間）の量子重力理論が初めて摂動論によらずに定義されたことを意味する。また自然界を記述する際に使われる数々の理論（核力を記述する QCD や固体物理で使われる理論）は、強い結合を持つ共形場の理論でよく近似される。こういった強い結合を持つ理論は一般に解くのが極めて難しいのだが、AdS/CFT 対応を使えばそれを一つ高い次元の重力理論として、一般相対性理論を使って近似的に解くことができる。そして何にもまして、この対応は重力を含む時空が次元の低い非重力理論からどのようにして生成されるのかについて、ホログラフィー原理の具体例を与えてくれる。

この動的時空の生成メカニズムは多くの研究者たちによって調べられたが、その過程で極めて重要な発見が日本の笠 真生（りゅう・しんせい）と高柳 匡（たかやなぎ・ただし）によってなされた。彼らが見つけたのは、AdS 空間の幾何学と CFT の量子状態の間の次のような関係である（図2参照）。共形場の理論で、ある時間における空間上の量子状態を考えたとして。いまその空間を領域 A とそれ以外の領域 \bar{A} に分けたとすると、 A と \bar{A} の間のエンタングルメントエントロピー*は、領域の境界に固定された AdS 空間中の面のうち最も面積が小さいもの（より一般には面積が極値を取るもの）の面積で与えられる。ここで、 A と \bar{A} の間のエンタングルメントエントロピーとは、 A の領域と \bar{A} の領域の自由度の間の量子エンタングルメント（量子もつれ）の度合いを表す量である。

*Kavli IPMU News No. 31の裏表紙参照。

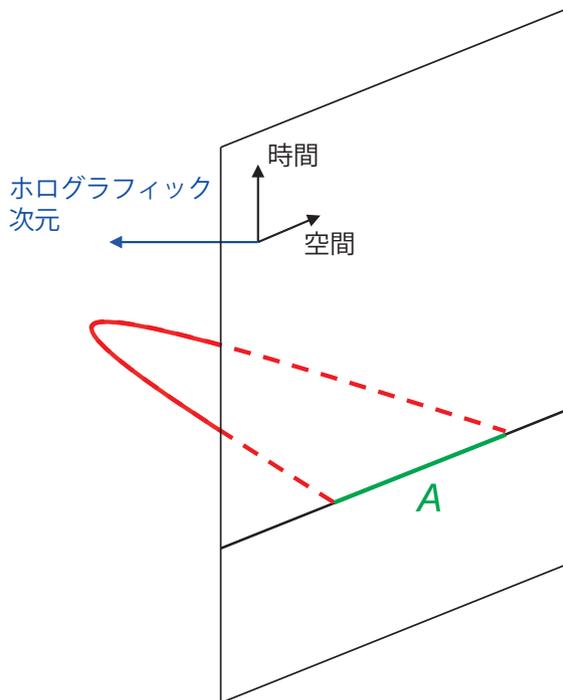


図2 共形場の理論に現れる量子状態の、空間領域 A とそれ以外の領域 \bar{A} の間のエンタングルメントエントロピーは、領域の境界に固定されたAdS空間中の面のうち面積が極値を取るものの面積で与えられる。

この笠-高柳公式と呼ばれる関係の重要性は、ただ単に二つの量を結びつけたというだけではない。まず、AdS 空間内の面という幾何学的な量が CFT における純粋に量子情報的な量と結びついたことは、動的時空の生成メカニズムが極めて量子力学的であることを意味する。また、量子重力の理論はホログラフィー原理により低次元でのみ定義されるという見方をとれば、これは我々が時空や重力と認識しているものは、根本的には基本理論の量子状態の量子情報的な性質にすぎないということの意味する。実際に、笠-高柳公式を使うことにより、低次元の理論の量子状態の量子情報の性質から高次元の AdS 空間まわりのアインシュタイン方程式が自動的に生成されることも示すことができる。

このように、AdS/CFT 対応は我々の時空がどのよ

うに生成されるかについて基本的な描像を与えてくれる。一つの比喩としては、以下のように言うことができるだろう。いま、動的時空を液体の水に見立てたとする。我々の知りたいのはそのミクロな成り立ち、つまり水分子やその間にどのような力が働くかである。そのためには、水を連続体とみなしたときにその上の摂動として起こる現象、例えば水の波を調べてもあまり役には立たない。これらは流体力学のナビエ-ストークス方程式で記述され、ここでそれに対応するのは時空を連続体とみなすアインシュタイン方程式である。これに対して AdS/CFT は水分子やその間に働く力の正体 (CFT) を示してくれる。ただし、水の例と時空の場合の大きな違いは、時空の場合にはその構成物がなぜか一つ低い次元に住んでいるということである。

AdS/CFTを超えて

ここまで見てきたように AdS/CFT は非常に強力であるが、我々の実際に住んでいる時空は漸近的 AdS 空間ではない。一方でホログラフィー原理の方はブラックホールの考察からも分かるように、より一般の時空において成り立つと考えられる。では、一般の時空でのホログラフィー原理はどのようにして実現されているのだろうか？ この問いはいくつかの研究グループにより調べられているが、以下では私たちのグループの行った仕事について簡単に紹介したいと思う。

出発点は、AdS/CFT に内在する性質のうちのどれが AdS 空間に特有のものであり、どれがより一般に当てはまるものかを識別することである。例えば、様々な考察から低次元の理論が CFT のような局所的な場の理論であるというのは、漸近的 AdS 空間の特別な性質によるものだと考えられる。では、AdS/CFT の性質のうちのどれがより一般のホログラフィー原理の現れなのだろうか？

私たちは数々の示唆に基づいて、笠-高柳公式に代表される低次元理論の量子情報と高次元量子重力の幾何学の関係が一般的だとの仮説を置いてみた。一般の時空に対する低次元理論はまだ知られていないので、これにはベッケンシュタインとホーキングの結果を拡張したエントロピー境界などを使って理論の本質的要素を抜き出したりする必要があるのだが、その詳細は字数の都合で割愛する。いずれにしても、アイデアはこの仮定のもとでどのような帰結が得られるかを調べることで、仮定の妥当性を検証しようということである。

ある意味でこの方法論は、例えばマックス・プランクが量子力学の創設時にエネルギー量子仮説を置いてその帰結を調べてみたことに対応する。しかし、プランクの時には黒体輻射のスペクトルという、理論的帰結と比べるべき実験が存在した。一方、量子重力の場合は相当する直接の実験結果は存在しない。では、どのようにして仮説の妥当性を検証すればよいのだろう

か？

私たちのアイデアは、一般相対性理論を「実験」として使うというものである。具体的には、私たちは一般の時空においても低次元理論の量子情報と生成される時空の幾何学とが対応するという仮定の下で、量子情報理論的に正しいとして要求される性質が幾何学的にどのような性質に対応するのかを調べてみた。結果は今までに知られていなかった、時空の満たすべき数々の奇妙な不等式や単調性であった。もし元々の仮定が正しければ、これらの性質は一般の時空で満たされなければならない。そして実際に、私たちは一般相対性理論を使ってこれらの性質を証明することができたのである。

重要なのは、もし一般相対性理論が私たちの見つけた奇妙な性質を満たさなかったならば、元々の仮定は棄却され得たということである。つまり、一般の時空においても低次元理論の量子情報が動的時空の起源であるという仮説は、一つの非自明なテストを通過したことになる。これは、我々のホログラフィー原理および量子情報と量子重力の関係に対する信頼をより確かにするものである。

まとめ

以上本稿で述べてきた AdS/CFT を含む量子情報と動的時空との間のホログラフィー原理に基づく関係は、私たちのグループに限らず多くの研究者たちによって調べられており、日々重要な発見がなされている。そしてこれらは時空とは何かという問いについて、根本的に新しい回答を提示しつつある。願わくば、この量子重力理論と量子情報理論の交差するところに生じた新たな研究領域が、我々の時空に対する一般的でより深い描像を明らかにすることを期待したい。

ミッションR&D完了、EGADS新たな未来へ

マーク・ヴェイギンズ Mark Vagins

Kavli IPMU 主任研究員

15年前、理論家のジョン・ビーコムと私は、スーパーカミオカンデ (Super-K, SK) 測定器に水溶性のガドリニウム [Gd] 化合物である塩化ガドリニウム、 $GdCl_3$ 、またはそれより反応性が低い水溶性に劣る硫酸ガドリニウム、 $Gd_2(SO_4)_3$ を100トン添加することを初めて提案しました。GADZOOKS! (Gadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande, Super!)*と名づけられた、このSKにGdを混ぜるアイデアの基本原理は、*Physical Review Letters*に発表した論文 [1] と、*Kavli IPMU News* に書いた解説 [2] に詳しく述べられています。

*「ガズークス」と読む。「ウワーッ!」という驚きを表現する英語であると共に1694年に遡る捨て台詞のような古語であるが、ここではGadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande, Super!の略語で「旧いカミオカンデよりも、スーパーカミオカンデよりも、とんでもなく優れた素晴らしいガドリニウム反ニュートリノ検出器」という意味をもつ。

要約するとこういうことです。中性子がガドリニウムに捕獲されるとエネルギーの高いガンマ線のカスケード的放射が起こるため、Gdを添加したSuper-Kの中で逆ベータ崩壊 (IBD) 反応からは陽電子による信号と中性子捕獲による信号が同時に発生します。この同時計数 (あるいは同時計数の欠如) を利用すると、バックグラウンドを大幅に減らすことができ、その結果超新星ニュートリノ (天の川銀河内で発生した超新星からのニュートリノと過去の超新星からの背景ニュートリノの両方) および原子炉からの反ニュートリノに対する検出効率が大幅に上がります。また、陽子崩壊の探索に関して、真の核子崩壊では終状態に自由な中性子は通常存在しないため、バックグラウンドをカットすることによりSuper-Kの陽子崩壊に対する感度を改

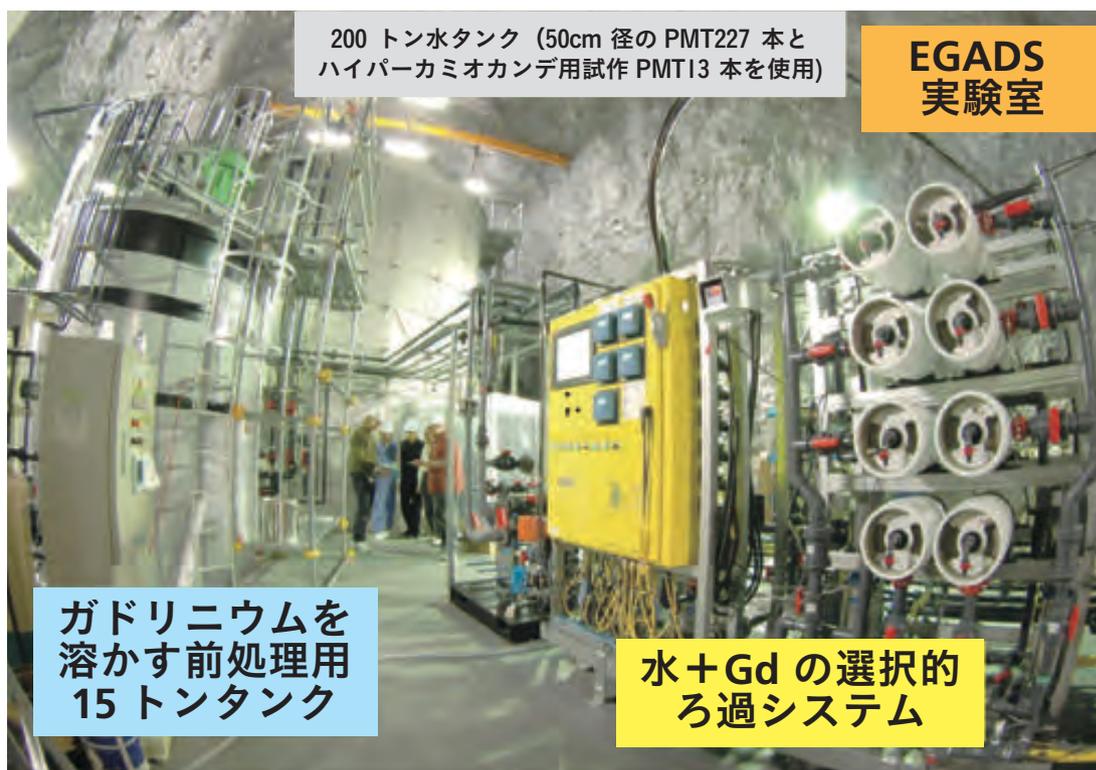


図1 神岡鉱山に設置された大規模ガドリニウム試験設備、EGADS。

EGADS の 200 トンタンク内の光の透過率と硫酸ガドリニウムの濃度

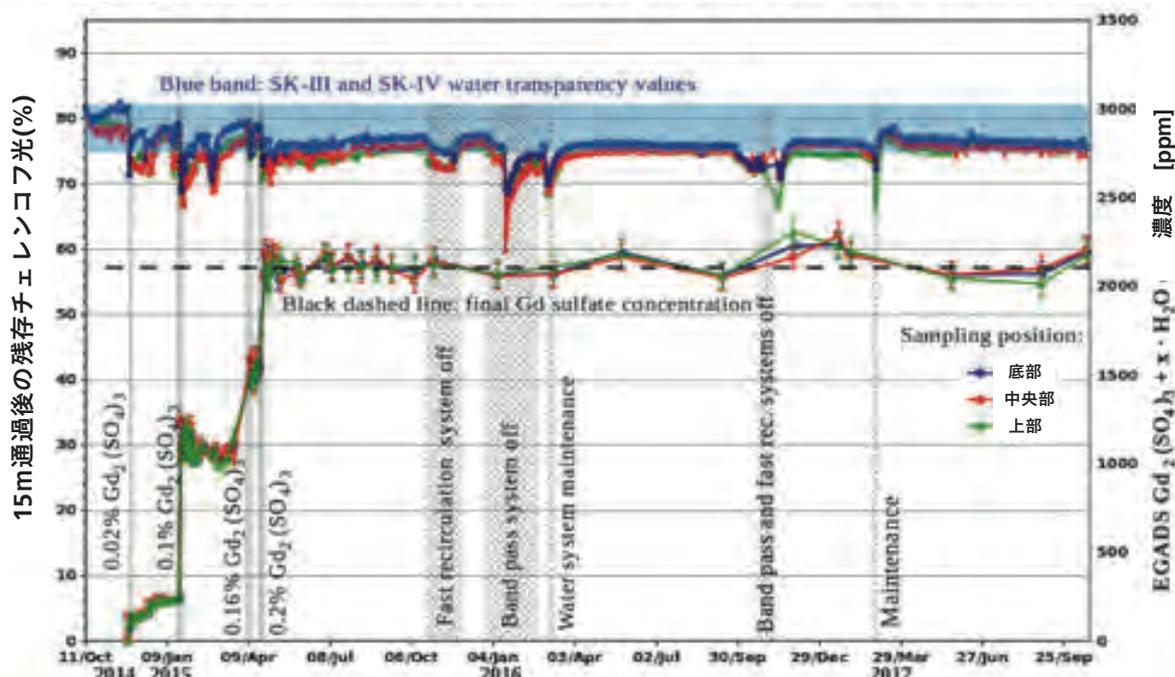


図2 EGADSの主要結果。

善します。さらに、太陽ニュートリノの研究もスペレーション（宇宙線 μ 粒子による核破砕反応）からのバックグラウンドの低減により恩恵を受けます。

結果。

GADZOOKS! の概念の物理的可能性は容易に理解できるものでしたが、実現しようと思うと取り組まなければならない複数の技術的問題がありました。当然、ガドリニウムと測定器に用いられている物質である水との相溶性（混合した場合、分離せずに混ざり合う性質）を示す必要がありましたが、一番の難題は、スーパーカミオカンデのような測定器では水中の光の平均自由行程が約100メートルと長いことが必要で、これを保つため常に水を精製装置を通して循環させることです。既存のスーパーカミオカンデの精製装置は、ガドリニウムをいくら添加したとしても、光学的な透明度を保つために除去する他の全ての不純物と共に速やかに排出してしまいます。

この重大な問題を解決するため、私は本質的に新しいタイプのろ過システムを開発しました。私の「分子バンドパスフィルター」は水から選択的に硫酸ガドリ

ニウムを抜き出してタンクに戻し、同時に他の全ての不純物を除去することができるように設計されたものです。

2009年9月から神岡鉱山内のスーパーカミオカンデの近くに新しい実験室の開削が始まり、そこには図1に示す専用の大規模ガドリニウム試験設備と水チェレンコフ検出器（本質的には200トンのスーパーカミオカンデ縮小モデルで、取り付けられた光電子増倍管のうちの十数本はハイパーカミオカンデ用に試作されたもの）が建設されました [3]。EGADS（イーガズと読む。Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems の略称で、「ガドリニウムが検出器システムに及ぼす作用の評価」の意味）として知られるこの装置は、添加されたガドリニウムが測定器中の物質に悪影響を及ぼすことは絶対ないと確認することと、最終的にスーパーカミオカンデに適用するために必要な条件に近い規模でガドリニウム添加技術の実行可能性を証明するために設計されました。これらの準備研究は既に完了しました。

EGADSの主な結果を図2に示します。スーパーカミオカンデ中をチェレンコフ光が通過する平均距離であ

る15メートルを通過した後に残存する光量で表した水の透明度と、200タンク中の硫酸ガドリニウムの濃度を時間の関数としてプロットしてあります。両方ともタンクの底部、中央部、上部の3点で測定されたものです。図の上の方の3本の線が透明度（残存光量（%単位）、左側のスケール）を、図の下の方の3本の線が濃度（ppm単位、右側のスケール）を示しています。スーパーカミオカンデの超純水はこれまでに作られたこれ程大容量の水としては最も透明度が高いのですが、その透明度は図の上部の青い帯で示される領域にありました。

2015年4月にガドリニウムが予定の濃度に達すると、次の重要な知見が得られました。

- 1) ガドリニウム対応の水循環精製システムが正常に運転している時（図2で灰色の網線で示された箇所以外）は、ガドリニウムを添加した水の透明度はスーパーカミオカンデの超純水の透明度と同等になる。
- 2) 200トンタンク中のガドリニウムを添加した水の総量を、650回に渡りガドリニウム対応の水ろ過システムを通過させたが、その間検出可能な硫酸ガドリニウムの損失は全くなかった。

これらの結果を得て、タンクを開き内部を点検する時が来ました。図3に示す写真はEGADSの200トンタンクの頂上にある大きな正方形のハッチを開く準備ができたところです。図4の写真では、このハッチを通し

てタンク内部を見下ろしたところです。ガドリニウムを添加した水が見えます。図5は水が抜かれたタンクの底部で側壁を見上げた写真です。全てピカピカで美しく、何年も0.2%の $Gd_2(SO_4)_3$ が溶けた水にさらされていたのに何も変わっていません。

EGADSによって得られた知見は、スーパーカミオカンデにガドリニウムを添加する計画を進めるため、スーパーカミオカンデ共同実験グループおよびT2K共同実験グループの両方から正式な承認を得るに十分なものでした。

一方、R&Dの役割を終えたEGADSはデータ取得用のハードウェアおよびオンライン計算機の計算能力を著しく増強し、今や世界で最先端の水を用いた超新星ニュートリノ測定器として稼働を続けています。その野心的な目標は、再びガドリニウムを添加した水を満たし、逆ベータ崩壊（IBD）反応からの中性子にガドリニウムでタグする（標識を付ける）ことによる信頼性に基づき、天の川銀河系内で発生した超新星爆発を、最初のニュートリノが測定器に到着してから1秒以内に、完全に自動的に人手を介さずアナウンスすることです [4]。この生まれ変わったEGADSは今や真のマルチメッセンジャー天文学を目指し、日本の可視光、X線、ガンマ線、赤外線、重力波を用いる観測のネットワークに加わっています。再利用されたEGADSという略語さえ、その意味は Employing Gadolinium to Autonomously Detect Supernovas（自律的超新星検出のためのガドリニウム利用）と変更されました。



図3 これからEGADSタンクを開けるところ。



図4 2年間満水状態でガドリニウムを添加した水にさらされたEGADSタンク内を見下ろす。



図5 タンク内の水を抜いた後、2年半に渡りガドリニウムを添加した水につかっていたEGADSの側壁を見上げる。

文献

- [1] J. F. Beacom and M. R. Vagins, "GADZOOKS! Anti-neutrino spectroscopy with large water Cherenkov detectors," *Phys. Rev. Lett.* **93**, 171101 (2004) [hep-ph/0309300].
- [2] M. R. Vagins, "Kavli IPMUのニュートリノ予報：概ね晴れ、超新星の可能性大," *Kavli IPMU News*, No. 19, September 2012, pages 32-37.
- [3] M. R. Vagins, "EGADS実験始まる," *IPMU News*, No. 15, September 2011, page 39.
- [4] S. M. Adams, C. S. Kochanek, J. F. Beacom, M. R. Vagins, K. Z. Stanek, "Observing the Next Galactic Supernova," *Astrophys.J.* **778** (2013) 164 [arXiv:1306.0559 [astro-ph.HE]].

Our Team

マシュー・ドデソン

Matthew Dodelson 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私は主としてブラックホール、ホログラフィー、および弦理論に興味を持っています。スタンフォード大学の博士課程では、ブラックホール近傍での弦理論の様相に焦点を絞り、特に、弦がブラックホールに落ち込むと地平面近傍でどのくらい伸びるかを研究しました。私たちはまた、このような地平面近傍での弦の非局所的な効果により、ホーキングの情報パラドックスを解決する可能性があるかと論じました。すなわち、ブ



ブラックホールに落ち込む弦の伸びを後から観測者が検出することにより、情報を収集できるかもしれないからです。

マーティン・フルーダー

Martin Fluder 専門分野: 理論物理学

博士研究員

場の量子論と弦理論における対称性、双対性、および様々な対応が私の研究の包括的なテーマです。究極的には、こういった概念を非摂動的量子系とその（隠れた）数学的構造の理解を進めるために利用することが私の目標です。色々な次元における種々の超対称な場の理論と超共形場理論からホログラフィーと超重力の概念まで、多岐にわたる課題を研究しています。



罗文涛 Wentao Luo 専門分野: 天文学

博士研究員

私は中国の山東省出身で、博士研究員として Kavli IPMU に着任しました。銀河の形状の精密測定、手前の銀河による背景銀河の形状への重力レンズ効果、またその重力レンズ効果の理論モデルを作ることなどを研究しています。ノイズが非常に多いデータから微弱な信号を取り出す手順は楽しいものです。銀河の画像からダークマターの分布を検出し、さらに宇宙論に制限を与えることができるのは面白いと思いませんか？まるで母なる自然とコンピューターの言葉、数学の言葉を



含む複数の言語で会話しているようなものです。私にとって何にも増して興味があるのは言語を学ぶこと、人々や母なる自然とのコミュニケーションです。

オスカー・マシアス Oscar Macias 専門分野: 天文学

博士研究員

今、私は東京大学の Kavli IPMUとアムステルダム大学のGRAPPA の併任の博士研究員に着任しました。以前はバージニア工科大学のニュートリノ物理学センターのリサーチアソシエイトでした。

素粒子物理学と天体物理学の境界領域で研究を進めています。今の主な興味は、光学望遠鏡では見えないダークマター粒子が対消滅してガンマ線を発生させる可能性です。ダークマターが大量に存在し、バックグラウンドが良く理解されている領域からこの信号を明



確に検出できれば、宇宙についての私たちの理解に重大な影響を与えるでしょう。

ディナカル・ムタイア Dinakar Muthiah 専門分野: 数学

博士研究員

私は表現論の代数幾何学および組み合わせ論的側面を研究しています。

研究課題の一つはカツ・ムーディ群の p 進理論です。2重ループ群はこの特別の場合で、2重アフィン・シューベルト多様体と密接な関係があります。また、これらの2重アフィン・シューベルト多様体は、インスタントン空間と籠（えびら）ゲージ理論に対するクローン枝とも密接な関係があると予想されています。

密接に関係した研究課題として幾何学的佐武同値お



よび Mirković-Vilonen (MV) サイクルがあります。私はこの分野で MV基底とMVポリトープおよびそれらのアフィン一般化を研究しています。最後に、最近私は Chern-Mather 類およびシューベルト多様体に対する特性サイクルについて考察を行っています。

Our Team

ヨンスー・パク Youngsoo Park 専門分野: 理論物理学

博士研究員

宇宙の加速膨張の起源は、現代宇宙論の鍵となる謎です。現在および将来の広天域サーベイは、弱い重力レンズ、物質のクラスタリング、銀河団の数密度分布のような、この謎を解明するための多くの重要な観測量を提供します。

このような異なる観測量を組み合わせることで統一的な解析を行い、得られる宇宙論的情報を最大化することと、現在の標準である Λ CDMモデルの枠組みのテストに用いることなどが私の研究テーマです。特に、問題になる



系統的誤差の影響を軽減させることができ、同時に宇宙論パラメータにより強い制限を与えることができる解析手法の開発に興味があります。

アンナ・プシュカシュ Anna Puskás 専門分野: 数学

博士研究員

私は数論と組合せ論的表現論の境界を研究しています。例えば、非アルキメデス群のメタプレクティック被覆上のホイタッカー関数の研究に関連した問題に興味を持っています。最近私は共同研究者と共に岩堀-ホイタッカー関数の研究をカツ・ムーディ群のメタプレクティック被覆に拡張し、関連した補正係数の性質を調べました。この研究に用いた主なツールは、Demazure および Demazure-Lusztig 作用素と、有限および無限次元リー代数の表現論に関連した最高ウェ



イトクリスタルおよびその他の組み合わせ論的な道具です。広い範囲に渡る興味深い問題の研究に、ワイル群の対称性と Bruhat 順序に関連した同様の道具が現れます。

ケネス・ワン Kenneth Wong 専門分野: 天文学

博士研究員

主として興味を持っているのは、特に可視/近赤外波長域での観測データを用いて可能になる宇宙論と銀河系外天文学の研究です。私はすばる望遠鏡に搭載されたハイパー・シュプリーム・カムを用いる数多くの観測的研究、とりわけ強い重力レンズの分野での研究プロジェクトに参加しています。また私はハッブル宇宙望遠鏡の撮像データを用いて強い重力レンズ効果を示す銀河の質量モデルを構築し、この情報と背景光源の多重イメージ間の時間遅れの測定とを組み合わせ、



ハッブル定数 H_0 のような宇宙論的パラメータを制限する研究を行っています。

頂点代数、因子化代数とその応用

ミハイル・カプラーノフ Mikhail Kapranov

Kavli IPMU 主任研究員

中島 啓 なかじま・ひらく

Kavli IPMU 主任研究員

2018年7月17日から21日にかけて、ワークショップ「頂点代数、因子化代数とその応用」が、B. Feigin（モスクワHSE、京都大学）、M. Kapranov（Kavli IPMU）、中島（Kavli IPMU）を組織委員として、Kavli IPMUで開催されました。

頂点代数は、2次元の共形場理論を理解するための、基本的な代数的な構造です。AGT 予想によって弾みをつけられ、近年では2次元と4次元の場の理論をつなげる研究が盛んに行われています。特に、頂点代数と4次元の微分可能多様体の幾何とのあいだをつなぐ深い関係が見えつつあります。

同時に、頂点代数は因子化代数の特別な場合であり、後者は何次元でも意味をもち、場の量子論の数学的な記述を与えます。また、因子化構造と因子化ホモロジーは、純粋数学において局所から大域への橋渡しをする「積分」の定式

化をする数学的な言語となります。さらに、アフィン・リー代数や量子群の表現論を研究するための重要なツールにもなっています。2次元と4次元の因子化構造のあいだに見えつつある関係は、発展が期待される将来有望な分野であり、数学と物理の両者にとって重要です。この研究集会は、これらの分野の専門家と若い研究者を、日本と海外から集めて行われました。S. GukovとB. Feiginの講演は、頂点代数と微分可能4次元多様体のあいだの興味深い関係について、行われました。特に、コセット構成といった頂点代数における古典的な構成に、4次元トポロジーのplumbingや、カービー移動といった視点から、新しい意味付けが与えられました。

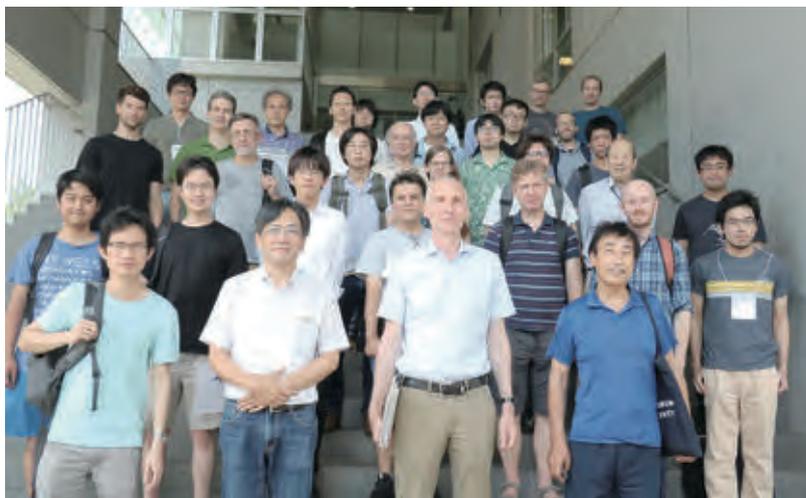
荒川の講演は、随伴多様体の概念に基づいた、頂点代数の新しい「幾何学化」に関するもので、自然な頂点ポアソ

ン代数と通常のポアソン多様体が現れます。また、このアプローチでは、4次元の場の理論におけるクーロン枝の数学的な解析とも関係づけられます。A. Bravermanは、この問題のうちのいくつかにおいて、より広く、概念的で圏論的な枠組みについて説明しました。桑原の講演は、トリーク超ケーラー多様体のカイラル化に関するもので、あるポアソン多様体から頂点代数を作るという逆方向について、試みるものです。

D. Gaitsgoryは、捻れD加群の圏のあいだの圏同値として理解される、量子化されたLanglands対応への、頂点代数を用いたアプローチについて講演しました。S. Raskin, L. ChenとD. Yangの講演では、Langlands対応への応用に重要な役割を持たせつつ、頂点代数、アフィン・リー代数、量子群の関係のいくつかの側面についての講演がなされました。

T. Creutzig、川節、西中の講演では、許容レベルのアフィン・リー代数から来る頂点代数のさまざまな側面について、議論されました。A. Linshawは、W代数のパラメータ付き頂点代数の特殊化としての実現について講演しました。

高次元も含めた因子化構造の様々な応用については、E. Cliff, J. Francis, B. Hennion, Q. Ho, Y. Kremnitzer, V. Schechtmanの講演の中で紹介されました。AGT予想への数学的な側面で活躍するHall代数との関係については、E. Vasserotにより議論されました。



IGM2018: 銀河間物質で紐解く宇宙再電離史

キーガン・リー Khee-Gan Lee

Kavli IPMU 講師

2018年9月18日から4日間、“IGM2018: 銀河間物質で紐解く宇宙再電離史” (Revealing Cosmology and Reionization History with the Intergalactic Medium) が、Kavli IPMU で開催された。本研究会の目的は、銀河間物質の研究に携わる理論家と観測家を一同に集め、宇宙論と再電離の相互関係を議論することである。招待講演者の専門分野は、マイクロ波背景放射 (CMB)、高赤方偏移銀河観測、quasar とその吸収線、21 cm線等、多岐にわたっている。日本を含め、アジア、欧州、北米から100名を超える参加者があった。

近年の進展の中で、興味深いのはCMBによる電子散乱の観測に基づく中性水素の再電離時期の推定が、従来考えられてきた時期よりも低い赤方偏移 ($z = 7.7$) で起きているらしいと最新の結果で見えてきたことである。この結果は、最遠方の quasar を背景とする銀河間物質が直接再電離の時期を探索することを意味しており、実際 Fred Davies (UCSB) は、再電離時期に期待される中性水素の吸収線の形状が最遠方の quasar で見えていることを観測により示した。この観測結果は、再電離時期の中性水素の進化過程を直接検出できる可能性を示しており、Xiaohui Fan (Arizona) は、遠方 quasar ($z > 7$) の野心的な探索計画を発表した。

再電離が完了したと考えられる $z = 5.5$ 付近では、Gunn-Peterson Troughと呼ばれる銀河間物質の状態を詳しく研究する試みも発表された。George Becker (UC

Riverside) はすばる望遠鏡、Hyper-Suprime Cam の狭帯フィルターを使い、銀河間物質で完全に吸収された領域の探索を行った結果、Lyman-alpha 輝線天体が他の領域よりも少なく、Laura Keating (CITA) が指摘していたように、紫外背景放射が一律でなく、再電離後期で取り残された領域があることが示された。

再電離の影響は、さらに低い赤方偏移帯でも温度と圧力の関係においてその痕跡が見つけられる。Elisa Boera (UC Riverside) は、銀河間物質の温度の特徴を Lyman-alpha forest の power spectrum ($z \sim 4-5$) から測定し、Michael Walther (UCSB) は、120億年に渡る power spectrumの進化 ($z \sim 0-5$) を示した。銀河間物質を使った、宇宙論パラメータの制限の発表もあった。まず、Andreu Font-Ribera (UCL) による、

銀河間物質によるバリオン音響振動と宇宙初期の膨張史の review があり、Nathalie Palanque-Delabrouille (CEA Saclay) は、銀河間物質による 1D power spectrum によるニュートリノ質量の制限 ($z \sim 2-3$ data) と warm dark matter、sterile ニュートリノの制限 ($z \sim 4-5$ data) を発表した。本会議の議論の場において、銀河間物質を使って宇宙論を語るには、銀河間物質の再電離と再加熱の歴史を正確に理解することが最優先であることが明確になった。

参加者の中から、普段はめぐり会うことのない多方面の専門研究領域の scientist による垣根を越えての議論がとて有意義であったという声が聞かれた。全体として、本会議は大成功であった。



平成30年度WPI現地視察

Kavli IPMU に対する今年度のWPI（世界トップレベル研究拠点プログラム）現地視察は、7月11日に神岡分室、続いて12日に柏キャンパスの研究棟、13日に柏駅近くのザ・クレストホテル柏で実施されました（本誌25ページの写真参照）。

神岡分室には宇川 彰 WPIプログラム・ディレクター（PD）、黒木登志夫 WPIアカデミー・ディレクター（AD）、Kavli IPMU担当作業部会の三田一郎プログラム・オフィサー（PO）、三輪哲二、小野 薫、Matthias Staudacher、Anthony Tyson 各委員、WPI他拠点の観山正見POおよび中野明彦PO、文部科学省研究振興局基礎研究振興課の金子忠利基礎研究推進室長の計10名の視察者が訪れ、村山 斉 Kavli IPMU 機構長、中畑雅行東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設長兼 Kavli IPMU 主任研究員らの説明および案内により神岡鉱山内の実験施設で改修工事中のスーパーカミオカンデ、特にその測定器タンク内、EGADS 実験（本誌32ページ参照）、およびXMASS 実験を視察しました。

柏での現地視察は、神岡分室の視察者に加えて吉田 稔PD代理、黒川清WPIプログラム委員会委員、家 泰弘日本学術振興会理事、Kavli IPMU 担当作業部会の磯 暁委員およびIan Shipsey 委員が出席する一方、中野POは欠席し、計14名の視察団によって行われ、村山機構長の概要説明、

Kavli IPMU 研究者からの研究成果発表を聞いた後、視察者それぞれが講評を述べて終了しました。



7月12日にKavli IPMU研究棟の藤原ホールでポスターセッションが行われ、視察団と研究者が懇談。

UC サンタクルーズ校学長、Kavli IPMU を訪問

2018年8月20日にカリフォルニア大学サンタクルーズ校（UCSC）のジョージ・ブルーメンソール学長が随行のアシシュ・サーニ副学長およびベッキー・ジョージ国際交流担当副学長補佐と共に Kavli IPMU を訪問されました（本誌25ページの写真参照）。

UCSC はアメリカにおける天文学、天体物理学、および物理学の一流校の一つであり、また自身が天体物理学の研究者でもあることから、ブルーメンソール学長は村山機構長の説明による Kavli IPMU の研究活動に強い関心を示しました。その後、Kavli IPMU の主要研究者との議論の場が設けられ、今後の共同研究等について意見交換を行うとともに、学部学生から教員まで全てのレベルの研究者の交流を推進していくことを合意しました。

Kavli IPMU の教職員、スーパーカミオカンデを見学

EGADS 実験による開発研究の成功（本誌32ページ参照）を受けて、スーパーカミオカンデ（SK）は、純水にガドリニウムを添加して中性子検出能力を向上させる目的で、今年6月から12年ぶりにタンク内の水を抜き、必要な改修工事を行うため内部に立ち入れるようになりました。宇宙線研究所のご厚意により、7月11日のWPIの神岡分室現地視察に加えて、7月20日と8月7日の2回に分けて Kavli IPMU 教職

員の希望者、さらに8月1日には Kavli IPMU 運営委員会委員（本誌25ページの写真参照）がゴンドラに乗って美しいSKタンク内を見学する機会を設けていただきました。

ハイパーカミオカンデ計画の進展

2018年9月9日から13日まで、Kavli IPMU 研究棟で第7回Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration Meeting（ハイパーカミオカンデ原型国際共同研究グループの第7回会合）が行われました。

ハイパーカミオカンデ計画（Kavli IPMU News No. 39, 36-39ページ参照）は、大きな成果を挙げてきたスーパーカミオカンデの10倍の有効体積を持つ超大型水チェレンコフ検出装置を建設し、ニュートリノ研究を更に発展させようという日本の主導する国際共同研究計画であり、東京大学では宇宙線研究所、Kavli IPMU および大学院理学系研究科が協力してこれを進めるため、2017年10月に「次世代ニュートリノ科学連携研究機構」を発足させました（Kavli IPMU News No. 40, 70ページ参照）。

この会合の席上、9月12日に、計画を進める上での大きな進展が報告されました。文部科学省の磯谷桂介研究振興局長から、財務省への2019年度概算要求として調査費を計上したとの説明があり、続いて梶田隆章宇宙線研究所長兼 Kavli IPMU 主任研究員から、五神 真東京大学総長の「東京大学は2020年4月から建設を開始する」との声明が紹介されました。国の予算とし



第7回Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration Meeting

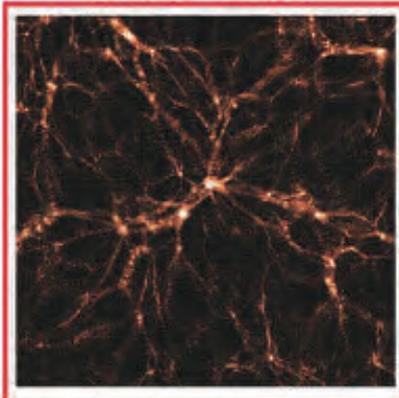
て調査費が認められた場合、その翌年には本予算が認められることが期待されますが、それを待たずに東京大学としての決意を表明したものです。

HSCによる精密宇宙論の幕開け：宇宙の暗黒成分解明を目指す

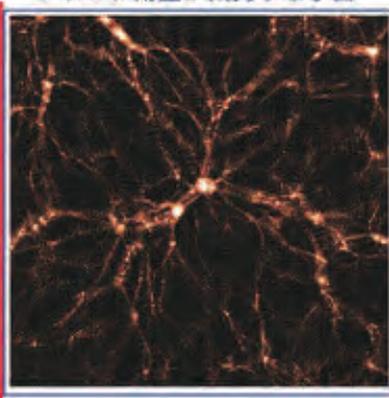
日影千秋 Kavli IPMU 助教を中心とする、東京大学、国立天文台、名古屋大学、米国プリンストン大学、米国カーネギーメロン大学、台湾中央研究院天文及天文物理研究所 (ASIAA) の研究者らからなる国際研究チームは、すばる望遠鏡に搭載したHSC (ハイパー・シュプリーム・カム) による約140平方度の天域 (約3000個分の満月に相当する視野の広さ) にわたる約90夜の観測データに基づき、約1000万個の銀河の形状に対してダークマターの重力によって光の軌道が曲げられるために起きる重力レンズによる歪みの効果 (弱い重力レンズ効果と呼ばれる) を観測することに成功しました。すばる HSCは広い天域にわたり遠くて暗い宇宙の銀河をイメージング観測するには他の追随を許さない世界最高の観測装置であり、この結果は、これまでの弱い重力レンズ測定の中では最も遠い宇宙 (すなわち過去の宇宙) の構造を観測できたことを示しています。

研究チームはこの結果を解析して、

HSCデータが支持する宇宙 (シミュレーション)



プランク衛星が支持する宇宙



左図は HSC などの重力レンズ観測が支持する宇宙模型の構造のシミュレーションの結果、右図は Planck 衛星の観測が支持する宇宙模型の構造のシミュレーションの結果を示しています。2つの図の違いはわずかではあるが、Planck の支持する宇宙では HSC の宇宙に比べより構造が進化していることがわかります。果たして、この違いは単なる統計的な誤差によるものなのでしょうか？ 世界中の天文学者は、この疑問に答えるため、さらに多くの観測データを集めています。(Credit: Kavli IPMU / Takahiro Nishimichi.)

銀河などの宇宙の構造の形成がどのくらい進行しているかを表す物理量を精密に測定しました。宇宙の構造がより進化しているとは、例えばより多くの銀河が存在することを意味します。本研究の測定結果は、より近傍の宇宙にある銀河を用いた米国中心の Dark Energy Survey (DES) と欧州中心の the Kilo-Degree Survey (KiDS) の弱い重力レンズによる測定結果とも良い一致を示しています。

また、本研究の測定結果を、欧州宇宙機関の Planck 衛星による宇宙誕生時の名残を伝える「宇宙マイクロ波背景放射」の観測からの予言と比較すると、統計的に矛盾はなく、従って Planck 衛星の支持する宇宙模型、すなわちダークマターとダークエネルギーが宇宙の全エネルギーのほとんどを占め、ダークエネルギーはアインシュタインが導入した「宇宙定数」のように振る舞う、最も単純な宇宙模型とも矛盾しません。

しかし、本研究を含むこれまでの重力レンズの観測によって測定された宇宙の構造の成長度合いは、Planck 衛星の予想よりわずかに小さい値を示しています。図は宇宙模型の構造形成のシミュレーション結果を示し、2つの図の違いはわずかですが、Planck の支持する宇宙では HSC の支持する宇宙に比

べ、より構造が進化していることがわかります。

これは、ただ単にデータ量が限られていることによる統計的な不定性によるものかもしれませんが、あるいは一般相対性理論と宇宙定数に基づく宇宙の標準模型の綻びを示唆しているのかもしれませんが。今回の HSC の結果は、計画全体の約10%のデータを用いたものです。今後、より多くの HSC のデータにより標準的な宇宙模型への理解をさらに深め、ダークエネルギーの正体を解明できる可能性が十分にあります。

本研究成果は、9月26日にプレプリントサーバー (<https://arxiv.org/abs/1809.09148>) で公開され、日本天文学会欧文研究報告 (*Publications of the Astronomical Society of Japan; PASJ*) に投稿中です。また、9月20日に記者発表を行いました。

英語でサイエンスカフェ「宇宙」2018

Kavli IPMU と多摩六都科学館の共催で毎年実施される「サイエンスカフェ宇宙」は今年で10年目になりますが、昨年に引き続き、今回も2人の Kavli IPMU 博士研究員により通訳なしの英語で行われました。中高生を含む参加者はそれぞれ約30名でした。

第1回は7月8日に Matthias Weissenbacher (マティアス・ヴァイゼンバッハー) さんが「量子ストリングで読み解く宇宙の真空構造」と題して講義し、超弦理論発達までの歴史から現在の超弦理論の最先端までを幅広く紹介し、さらには CERN (欧州原子核研究機構) の LHC 加速器での実験でも超弦理論との繋がりを見ようと試みられていることも紹介しました。



講義中のマティアス・ヴァイゼンバッハーさん

第2回は9月29日に Shing Chi Leung (シンチー・レオン) さんが「超新星－化学元素のゆりかご」と題して講義し、私たちの体を形作る元素の多くが超新星爆発によってもたらされていることを紹介した後、様々な種類の超新星の違いや爆発のメカニズムについて、風船やテニスボールを使った実演も交えて丁寧に解説しました。



講義中のシンチー・レオンさん

SSH全国大会でブース展示

2018年8月8日と9日の2日間、神戸国際展示場（兵庫県神戸市）において平成30年度スーパーサイエンスハイスクール（SSH）生徒研究発表会が行われ、Kavli IPMUを含むWPI（世界トップレベル研究拠点プログラム）の全11拠点が合同でブース展示を行いました。

人事異動

PI（主任研究員）の異動

2018年8月1日付けで中島 啓 Kavli IPMU教授がPIに就任しました。

昇任

Kavli IPMU助教の Mark Hartz さんが2018年8月1日付けで Kavli IPMU 准教授に昇任されました。



Mark Hartz さん

転出

次の方々が転出しました。[括弧内は Kavli iPMU 在任期間です。]

Surhud More さん [博士研究員として2012年9月1日 - 2014年2月28日、

Kavli IPMU 助教として2014年3月1日 - 2018年2月28日、その後2018年7月15日まで現職]、Kavli IPMU 准教授からインドの Inter-University Center for Astronomy and Astrophysics の准教授へ。

Han, Jiaxin (韓 家信) さん [2016年7月1日 - 2018年8月31日]、Kavli IPMU 博士研究員から Shanghai Jiao Tong University (上海交通大学) 助教授へ。

Juliana Kwan さん [2016年10月1日 - 2018年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員からイギリスの Liverpool John Moores University 博士研究員へ。

Evangelos Routis さん [2015年8月1日 - 2018年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員からマックス・プランク数学研究所博士研究員へ。

Alessandro Sonnenfeld さん [2015年9月1日 - 2018年8月31日]、Kavli IPMU 博士研究員からオランダのライデン天文台博士研究員へ。

Alexey Tolstov さん [2014年4月1日 - 2018年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員から放送大学研究員へ。

Xu, Benda (続本 達) さん [2015年4月1日 - 2018年8月19日]、Kavli IPMU 博士研究員から中国の清華大学助教授へ。

Itamar Yaakov さん [2015年9月1日 - 2018年8月31日]、Kavli IPMU 博士研究員からイタリアのパルマ大学博士研究員へ。

Louis Yang さん [2017年10月1日 - 2018年9月5日]、Kavli IPMU 博士研究員から Tubular Labs, Inc. の Data Scientist II へ。

Matthew Murdoch さん [2016年11月8日 - 2018年7月26日]、東京大学特別研究員（日本学術振興会外国人特別研究員）からイギリスのリバプール大学物理学科 Royal Society of Edinburgh Enterprise Fellow へ。

Kavli IPMU News No. 39に訂正

Kavli IPMU News No. 39の34ページでヒラリー・チャイルドさんの身分

を「博士研究員」から「東京大学特別研究員（日本学術振興会外国人特別研究員）」に訂正します。なお、ヒラリー・チャイルドさんの転出情報（Kavli IPMU News No. 41の55ページ右端「転出」欄）には正しい身分が掲載されています。



ブラックホールとホーキング輻射

佐々木 節

Kavli IPMU 副機構長

ブラックホールとは、その重力が非常に強く、一旦その中に入ると光でさえも外に出られなくなる領域のことを言います。その境界面が「時空の地平面」です。するとブラックホールは、周りの物質をどんどん取り込んでより重くなるしかなくとも思われます。ところがホーキングは、量子的効果を考えるとブラックホールはある温度を持った熱源として振舞うことを示しました。量子的効果によってブラックホールが発する熱的輻射のことをホーキング輻射と言います。図はブラックホールの形成と、形成後にホーキング輻射によってブラックホールが次第に痩せ細っていく様子です。

