

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



Todai Institutes for Advanced Study



The University of Tokyo

東京大学国際高等研究所

Feature From "Local" to "Global"
Beyond the Riemannian Geometry

Interview with Lisa Randall



25

No.

March 2014

Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
From "Local" to "Global"
Beyond the Riemannian Geometry
Toshiyuki Kobayashi
- 12 **Interview** with Lisa Randall
- 17 **Our Team** Teppei Okumura
Wiphu Rujopakarn
- 18 **Workshop Report**
International Workshop on Next Generation
Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN13)
Masashi Yokoyama
- 19 **Workshop Report**
SUSY: Model-Building and Phenomenology
Shigeki Matsumoto
- 20 **Workshop Report**
Workshop on "Primitive Forms and Related Subjects"
Kyoji Saito
- 22 **News**
- 28 **Gravitational Wave** Seiji Kawamura

Japanese

- 29 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 30 **Feature**
局所から大域へ
リーマン幾何を超えた世界で
小林 俊行
- 36 **Interview** リサ・ランドール教授に聞く
- 41 **Our Team** 奥村 哲平
ウィプー・ルジョーパカーン
- 42 **Workshop Report**
International Workshop on Next Generation
Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN13)
横山 将志
- 43 **Workshop Report**
SUSY: Model-Building and Phenomenology
松本 重貴
- 44 **Workshop Report**
研究会「原始形式とそれに関連する諸課題」
斎藤 恭司
- 46 **News**
- 48 **重力波** 川村 静児



Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



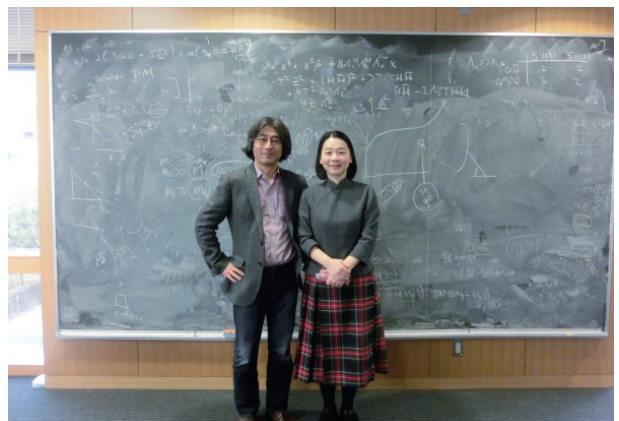
January: Public Lecture by Lisa Randall



March: Visit of Ministry of Finance Budget Examiner Mr. Ito



March 31: With administrative officers who are leaving Kavli IPMU



From “ Local ” to “ Global ” Beyond the Riemannian Geometry

From “ Local ” to “ Global ”

“ Cannot see the forest for the trees. ” This is a proverb that we will miss the whole picture if focusing only on details. But, is that true? If we observe trees (local properties) in a very clever way (like a detective!) then we might be able to see “ something ” about the forest (global properties).

In classical mathematics, mainly people studied local phenomena or those objects that are described by local coordinates. In modern mathematics, people’s interests have expanded to global objects, and to understand such objects, various ideas and methods have been introduced. Nevertheless, it is in general difficult to understand global properties.

In the study of geometry, the question, “ How does local geometric structure affect the global shape? ” is a prototype of the following motif:

local structure \rightsquigarrow global nature.

This motif has been a main stream especially in Riemannian geometry since the twentieth century. On the other hand, surprisingly, very little was known about the local-global theory in geometry beyond the Riemannian setting.

Although we just say “ local to global, ” approaches may dramatically change to the

types of the local properties. For example, “ locally homogeneous ” properties are closely related to the theory of Lie groups and number theory. In the case discrete algebraic structure called **discontinuous groups** plays a primary role to control the global structure. In Riemannian geometry, by epoch-making works of Selberg, Weil, Borel, Mostow, Margulis,¹ among others, the study of discrete groups, which ranges from the theory of Lie groups and number theory to differential geometry and topology, developed extensively.

From around the mid-1980s, I began to envisage the possibility of creating the theory of discontinuous groups in the world of pseudo-Riemannian manifolds. Since there is no “ natural distance ” in such geometries, one has to invent new methods themselves. Although the starting point was solitary, whatever I did was a new development. Since 1990s, a number of mathematicians with different backgrounds have gotten into this theme, and this has brought us to unexpected interactions to other fields of mathematics, such as the (non-commutative) ergodic theory, theory of unitary representations, and differential geometry. In the World Mathematical Year 2000, there was an

¹ A. Selberg was awarded the Fields Medal in 1950, A. Weil was awarded the Kyoto Prize in 1994, A. Borel was awarded the Balzan Prize in 1992, G. Mostow was awarded the Wolf Prize in 2013, and G. Margulis was awarded the Fields Medal and the Wolf Prize in 1978 and 2005, respectively.

occasion that the theme “locally homogeneous spaces (for non-Riemannian geometry)” was highlighted as one of the new challenging problems in mathematics for the twenty-first century ([1]). The study keeps on flourishing even further.

In this article, I would like to deliver the “flavor” of the study of global geometry of locally homogeneous spaces beyond the Riemannian setting and the study of the spectral analysis (global analysis) that we have recently initiated. To do so I try to minimize mathematical terminologies as much as possible; the price to pay is that I may lose certain accuracy of statements.

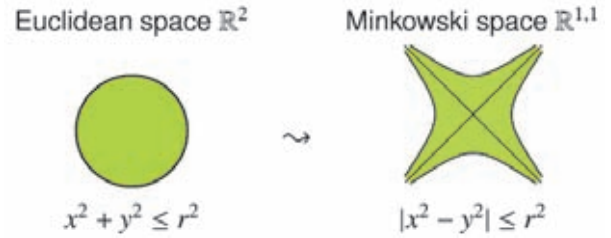
Differential Geometry with Indefinite Signature

Pseudo-Riemannian geometry is a generalization of Riemannian geometry and Lorentzian geometry, which describes the spacetime of the theory of general relativity. On the $p+q$ dimensional Euclidean space, the region defined by the inequality

$$|x_1^2 + \dots + x_p^2 - x_{p+1}^2 - \dots - x_{p+q}^2| \leq r^2$$

is called a **pseudosphere**. The figures on the top of the right column illustrate a sphere $((p,q) = (2,0))$ of the Euclidean space and a pseudosphere $((p,q) = (1,1))$ of the Minkowski space for the two-dimensional case. For more general situations, by using a non-degenerate quadratic form $Q(x)$ with signature (p,q) , we call the region defined by the inequality $|Q(x)| \leq r^2$ a pseudosphere.

In pseudo-Riemannian geometry we deal with the spaces (**pseudo-Riemannian manifolds**),



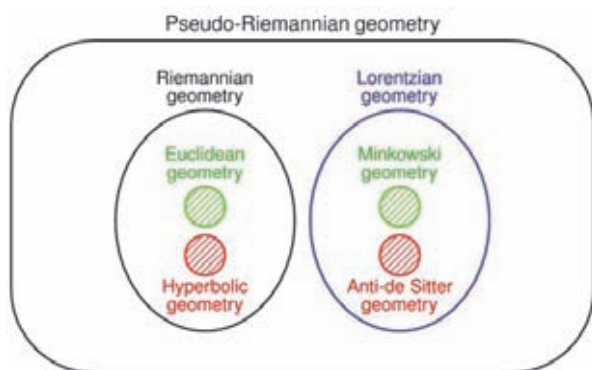
which take pseudospheres as scales at local coordinates (more precisely, at infinitesimal level for each point). When $q = 0$ and $q = 1$, these spaces are called **Riemannian manifolds** and **Lorentzian manifolds**, respectively.

To general pseudo-Riemannian manifolds, one can define certain concepts such as the gradient (**grad**), divergence (**div**), Laplacian ($\Delta = \text{div} \circ \text{grad}$), and curvature. Moreover, in the case of Riemannian manifolds, that is when $q = 0$, since the quadratic form $Q(x)$ is positive-definite, one can also define the distance between two points by integrating (infinitesimal) scales. On the other hand, in the case of pseudo-Riemannian manifolds with indefinite signature $p,q \geq 1$, there is no reasonable way to define the distance: the “intrinsic distance” does not exist.

Is a Wayfarer Coming Back?

The Earth is round. A wayfarer traveling towards the west would eventually come back from the east. By the way, if the wayfarer does not know any global facts on the Earth, such as the shape or size, then is there any way for them to know whether they will come back to the starting point?

In mathematics we describe by the quantity



called **curvature** how spaces are curved at the infinitesimal level. The concept of curvature traces back to Carl Friedrich Gauss in the nineteenth century, who also contributed to geodesy during his long profession as the director of Göttingen Observatory. For two-dimensional curved surfaces there are the following visible relationship between the curvature and local shapes:

positive curvature

⇔ locally concave up or concave down,

negative curvature

⇔ locally saddle-shaped.

In higher dimensional spaces there are three kinds of curvature, namely, sectional curvature, Ricci curvature, and scalar curvature, where sectional (resp. scalar) curvature contains the most (resp. least) information.

How does curvature (local geometric structure) affect the **global shape**? The classical Myers theorem states: "If the Ricci curvature is greater than 1 then the distance between any two points is less than π (for any dimension)." This is a local-global theory. So, from the curvature of the surface of the

Earth (local information), one can obtain global information, namely, the diameter of the Earth. The claim of the theorem, "If a surface is locally convex everywhere then as a whole space it is closed like a sphere," agrees with our experience in our daily life. However, when the curvature is negative or in pseudo-Riemannian geometry, can a wayfarer who is going forward in a uniformly curved space come back to the starting point? From the next section we shall enter some strange world that cannot be understood by our "daily life."

Uniformly Curved Geometry

Pseudo-Riemannian manifolds of constant curvature are called **space forms**, and play an important role in differential geometry. The constant-curvature property is one of the special examples of local homogeneity. Due to their high symmetry, space forms are interacted with various fields of mathematics.

In Riemannian geometry, the sphere, Euclidean space, and hyperbolic space are the space forms of positive, zero, and negative curvature, respectively. The hyperbolic space is also known as to have played a historical role in the early nineteenth century on a discovery of geometry that does not hold the parallel postulate on Euclidean geometry. In the three-dimensional case the theory of hyperbolic manifolds, which are Riemannian manifolds of sectional curvature -1 , is in fact equivalent to that of the Kleinian group. Hyperbolic geometry is an active research field.

In Lorentzian geometry, which is the simplest

geometry beyond the Riemannian setting, the **de Sitter manifold**, Minkowski space, and **anti-de Sitter manifold** are space forms of positive, zero, and negative curvature, respectively.

Is the “ Universe ” Closed?

Does there exist any space that curves locally the same everywhere and also that is closed globally?² In space forms of positive curvature, which generalizes the concept of “ being concave up, ” the following theorem holds.

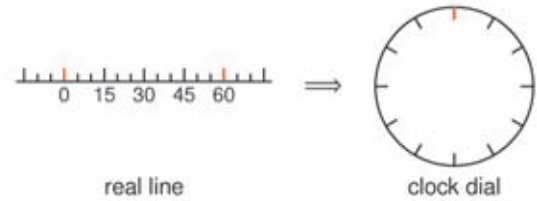
Theorem 1. Space forms of positive curvature are
(1) *always* closed (Riemannian geometry).
(2) *never* closed (Lorentzian geometry).

Theorem 1 (2) is called the **Calabi–Markus phenomenon**, named after the two mathematicians E. Calabi and L. Markus, who discovered this surprising fact ([2]).

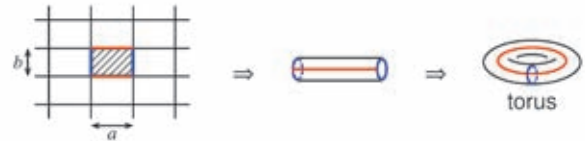
On the other hand, the standard model of space forms of negative curvature expands infinitely and so it is never closed. For next, in order to find a “closed” universe “having the same local geometric structure, I would like to illustrate an idea to “fold” the open “universe” by one-dimensional and two-dimensional Euclidean spaces as elementary as possible.

The real line is obviously not closed, while a clock dial, on which the long hand goes around in every sixty minute (period), is closed. No matter which

ones we use, we record the same time locally. As in this example, it is possible that two spaces are locally the same but different globally.



Let us observe a similar process for the two-dimensional Euclidean space \mathbb{R}^2 . If there is a period both in the vertical direction and in the horizontal direction then one can tile the plane by rectangles, which represent the period. Moreover, if identifying the edges of the rectangles with one period then, by gluing the edges, one can obtain a closed shape called a torus (a surface of a doughnut).



The important principles behind these elementary examples may be formalised as

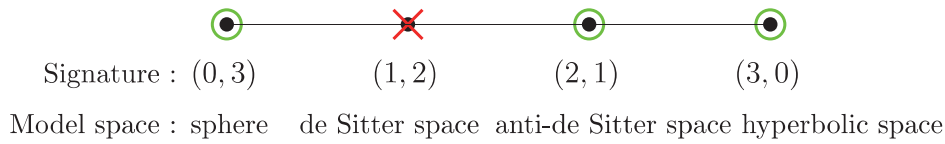
- A. the algebraic structure that represent the period (**discontinuous group \mathbb{Z}^2**)
- B. tiling (by rectangles).

Once finding the principles like A or B, with keeping local structures, one may expect to produce spaces of different global shapes; nonetheless, it is in general far more difficult than the above examples,

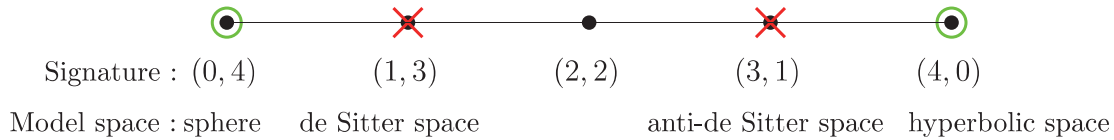
² In mathematics, it is stated as, “ Does there exist a compact pseudo-Riemannian manifold of constant curvature? ”

Does there exist a space form with signature (p, q) and of sectional curvature $\equiv -1$?

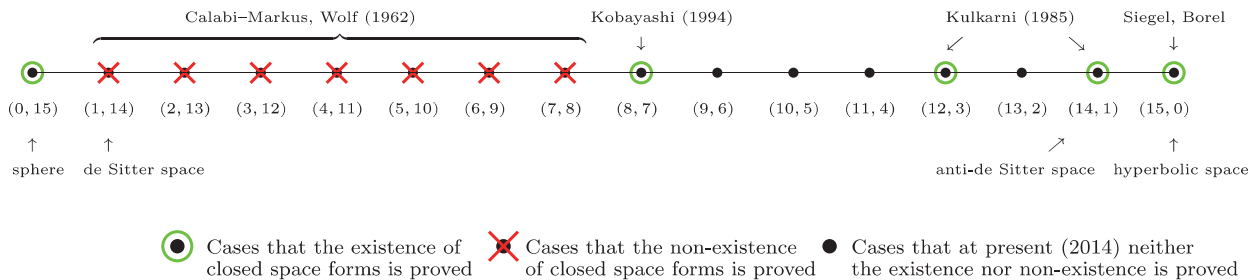
Case of dimension 3



Case of dimension 4



Case of dimension 15



as some non-commutative structure emerges.

On the existence problem of closed space forms of negative curvature, it is known that the following theorem holds.

Theorem 2. Closed space forms of negative curvature exist

- (1) *for all* dimensions (Riemannian geometry).
- (2) *only for odd* dimensions (Lorentzian geometry).

A proof for Theorem 2 is in fact given by the algebraic idea of A to use matrices with integral entries (arithmetic lattice). Moreover, in the case of Theorem 2 (1), Mostow, Vinberg, Gromov,

and Piatetski-Shapiro gave another construction method by a use of the geometric idea of B (non-arithmetic lattice) for space forms of negative curvature (hyperbolic manifolds). On the other hand, in Lorentzian geometry, as Theorem 2 (2) exhibits, there is a difference between the odd dimensional case and even dimensional case. This difference can be explained by a topological method, with which one can give a mathematical proof for the theorem, “There always exists the whorl of hair on our head.”

Theorems 1 and 2 both claim that there exists a significant difference between Riemannian geometry and Lorentzian geometry on the motif, “local structure \nrightarrow global nature.” What about pseudo-Riemannian geometry with more general signature (p, q) ($p \geq q \geq 2$)? In the case of positive

curvature it is known that closed space forms do not exist (a generalization of the Calabi–Markus phenomenon). On the other hand, in the case of negative curvature, the existence problem, namely, for which integers p, q closed space forms exist, has not been completely solved. As partial results, it has been proved that there exists a closed space form of negative curvature in the case of dimension 7 with signature (4,3) and dimension 15 with signature (8,7), for instance.

The table in the previous page illustrates the current states of the arts on the existence problem of closed space forms, by taking dimensions to be 3, 4, and 15 as examples ([4]).

Rigidity and Deformation

A **rigidity theorem** represents a property that the same type of local geometric structure can be equipped uniquely in a given global geometric structure. Conversely, if there is some freedom for the local structure to be equipped then the freedom itself will become a subject of study (**deformation theory**).

In Riemannian geometry rigidity theorem has been found in various formulations. As an exceptional example, it is known that there are continuously many distinct hyperbolic structures (Riemannian structures of curvature -1) on a closed two-dimensional surface. The parameter space (up to certain equivalence) is called the **Teichmüller space**, which is connected with different disciplines of mathematics from complex analysis and hyperbolic geometry to string theory in theoretical

physics. In the two-dimensional hyperbolic geometry since the discontinuous groups that control the global shapes are discrete subgroups of $SL(2, \mathbb{R})$ (Fuchsian groups), the Teichmüller space can be thought of as the deformation space of the Fuchsian groups.

In pseudo-Riemannian geometry with indefinite signature, we find that the geometric structure tends to be less rigid and more “flexible.” I believe that the deformation theory of discontinuous groups in the pseudo-Riemannian setting has a good potential to yield fruitful theories in future ([1]).

Shorter Strings Produce a Higher Pitch than Longer Strings Spectral Geometry

One of outstanding perspectives in modern mathematics is that the study of geometry (“shapes”) is equivalent to studying the functions (“residents”) on the geometry. This point of view has brought us a great success in algebraic geometry and some other fields of mathematics.

As we mentioned above, there are some strange geometries, which are locally the same but which may be globally different. Now let us apply the above perspective to the strange geometries and consider the “residents” on them in the pseudo-Riemannian setting.

For a string with constant tension, the longer the string becomes, the lower the pitch the string makes is. As an elementary model, we consider the eigenfunctions for the Laplacian with period L on the real line. We then see that the larger the

period becomes, the smaller the eigenvalues are. For example, trigonometric function $f(x) = \sin(2\pi x/L)$ has period L and satisfies the differential equation

$$-\frac{d^2}{dx^2} f(x) = \frac{4\pi^2}{L^2} f(x).$$

Therefore, if the period L is getting larger then the eigenvalue $4\pi^2/L^2$ is becoming smaller.

In Riemannian geometry a similar phenomenon holds. Suppose that we list all the eigenvalues for the Laplacian on a two-dimensional closed hyperbolic surface in increasing order:

$$0 = \lambda_0 < \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots$$

In this case it is known that if we continuously deform the Riemannian metric with keeping the hyperbolic structure, then all the eigenvalues λ_k ($k = 1, 2, \dots$) will vary ([5]). In other words, when eigenvalues are regarded as functions on the Teichmüller space, they cannot be constant.

Functions on the closed hyperbolic surface are identified with periodic functions on the upper-half plane, where the period is given by the Fuchsian group (disconnected group). Therefore the above example illustrates how eigenvalues vary according to the deformation of the Fuchsian group.

Universal Sounds Exist for “Music Instruments” in the Anti-de Sitter Universe

Beyond Riemannian geometry, the global analysis on locally homogeneous spaces is still veiled in mystery and is an unexplored area. It is the study

of “residents” on geometries. As a first step of its exploration, we have discovered the following a bit surprising phenomenon.

Theorem 3. On any three-dimensional closed anti-de Sitter manifold, there exist infinitely many stable eigenvalues for the Laplacian.

This theorem captures the phenomenon which contradicts our “common sense” for music instruments: “The longer the string becomes, the lower the pitch the string makes is.” On the other hand, as in the two-dimensional closed hyperbolic surface described in the previous section, there still exist infinitely many eigenvalues of the Laplacian which vary according to the period in the “standard” three-dimensional closed anti-de Sitter manifold.

If we consider anti-de Sitter manifolds as music instruments then they will be such instruments which have infinitely many “universal sounds”; no matter how long or short the strings become, their pitch do not vary. At the same time the music instruments also have infinitely many sounds that DO vary (as usual)!

The new phenomenon that was discovered by Theorem 3 occurs in higher dimensional cases and also in some locally symmetric spaces with indefinite Kähler metric. The proof of the general theory is given in our recent article of 140 pages ([6]). The main tools are

- partial differential equations,
- integral geometry,
- non-commutative harmonic analysis, and

- quantitative estimates of proper actions.

In a subsequent paper we plan to make a bridge between infinite-dimensional representation theory and the global analysis of locally homogeneous spaces, by applying to

- the theory of **branching laws** for breaking symmetries of infinite dimensional spaces.

Over the half-century the global analysis on the locally homogeneous space $\Gamma \backslash G / H$ has been deeply developed as an important branch of mathematics in the following special cases.

- The case that H is compact (G / H is a Riemannian symmetric space): the theory of **automorphic forms** in number theory (Γ is an arithmetic subgroup.)
- The case that Γ is a finite group consisting only of the identity element: **non-commutative harmonic analysis**, developed by I.M. Gelfand, Harish-Chandra, and T. Oshima, among others.

In contrast to the cases given above, the geometry of pseudo-Riemannian locally homogeneous spaces that we have discussed in this article is more general, *i.e.* the local geometric structure is no more Riemannian (that is, H is not compact) and global geometric structure is given by an infinite discontinuous group Γ . This generalization has opened the door of a new area of geometry beyond

the Riemannian setting. What mysteries are in the spectral analysis for such a geometry, which studies the “residents” in the strange universe? I believe that there is an interesting future of the study, which we seem to start glimpsing in distance.

References:

- [1] G. Margulis, Problems and conjectures in rigidity theory, “Frontiers and Perspectives,” AMS (2000); T. Kobayashi, Discontinuous groups for non-Riemannian homogeneous spaces, “Mathematics Unlimited-2001 and Beyond,” Springer-Verlag (2001).
- [2] E. Calabi and L. Markus, Relativistic space forms, Ann. of Math. (1962).
- [3] T. Kobayashi, Proper action on a homogeneous space, Math. Ann. (1989).
- [4] T. Kobayashi and T. Yoshino, Compact Clifford-Klein forms –revisited, PAMQ (2005).
- [5] S. Wolpert, Disappearance of cusp forms in special families, Ann. of Math. (1994).
- [6] F. Kassel and T. Kobayashi, Poincaré series for non-Riemannian locally symmetric spaces, 141 pp. arXiv: 1209.4075.



Interview

with Lisa Randall

Interviewer: Shinji Mukohyama

Writing a Book Hoping People Change Their Way of Thinking about Science

Mukohyama: Thank you very much for making time for us. Let me start by congratulating you on the publication of the Japanese translation of your second book.¹ I really enjoyed helping in the translation of your book.

Randall: Thank you for doing that, it's really important, because, as you know, it's a difficult thing. They try very hard, and so it's really good to have a physicist look at it.

Mukohyama: Yeah. I noticed that translating this book took a long time and lot of work. Writing the book really took much more effort.

Randall: Yeah, that's true.

Mukohyama: So how did you end time to do this?

Randall: It is really quite a lot of time. It means giving up other things. I think I don't do all other things as much as I'd like to do. I am often writing when I am traveling certainly at every available opportunity. Even I remember, I was sitting at the National Academy of Science's meeting, which is a big deal, and Bruno Zumino looked at me and said, "Are you writing your book?" I guess I was just shocked that I was. Basically I try to do whenever I can, but still it ends up taking quite a bit of time, and then I have this chunk of time and you have to do this. Some of it is very enjoyable, but some of it is like a big purpose. To write a book with one idea is not so hard. I think for me it is not that interesting, so I try to put many ideas into the book, and then integrating them into a way that it all makes sense. That becomes challenging. Each chapter was quite a bit, and then figuring out how to

Lisa Randall is Frank B. Baird, Jr. Professor of Science at Harvard University. She received her Ph.D. from Harvard University in 1987. She became Assistant Professor in 1991 and Associate Professor in 1995 at MIT. She held professorships at MIT (1998-2001) and Princeton University (1998-2000) before returning to Harvard University in 2001. She is a member of the National Academy of Sciences (since 2008), European Academy of Sciences and Arts (since 2012), and many other renowned institutes and societies. She was on the list of Time Magazine's "100 Most Influential People" of 2007.

¹ *Knocking on Heaven's Door: How Physics and Scientific Thinking Illuminate the Universe and the Modern World*, ECCO Press at HarperCollins, September 2011; Random House, September 2011. Japanese translation: 宇宙の扉をノックする, NHK Publishing, Inc., November 2013.

put all the stories together. So, yes, it took quite some time.

Mukohyama: Did you start writing the second book soon after finishing the first one?²

Randall: No. In fact, I didn't think I would write a book for a while. I think the original motivation was more about sort of the frustration with the way science was presented, more than just about the physics, which of course I was excited about too; the Large Hadron Collider, Higgs Boson, and all of that. After reading the newspaper, and following the debates, and traveling a bit, it wasn't always clear that even people interested in science understood really how science worked. And I was asked a lot of questions after my first book. So, I realized this could be a very nice book, and then I started writing. But, it was some years later—it was few years at least.

Mukohyama: So do you think the second book changed the way people think about science?

² *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*, Allen Lane at Penguin, June 2005; ECCO Press at Harper Collins, September 2005. Japanese translation: *ワープする宇宙 5次元時空の謎を解く*, NHK Publishing, Inc., June 2007.

Randall: I think some people get it. I think a lot of people are very stubborn, and so they have their way of thinking. If you don't say what you are thinking, they don't pay attention or they think they know it all. I tried very hard to speak to the middle, so people could talk to each other. Some people appreciate that. But, I think we have a long way to go. I think just in the terms the way things have come out, people in America just like that argument much more, they don't like to find this middle ground as much. But, I pursued it anyway, because I think it's important. I think it will be a little while before things change. But, maybe, it's changing a little bit. I think there was a little bit more attention to thinking scientifically in recent years than there had been before. Maybe it's helping.

Mukohyama: Yeah. We need patience.

Randall: Yeah, I don't know,

Shinji Mukohyama is Associate Professor at the Kavli IPMU. He studies theoretical physics and cosmology. He stayed at Harvard University from 2001 to 2004. He supervised the translation of Lisa Randall's first book² and the second book¹ into Japanese.





we don't have time. There are too many things that have to be done properly.

Mukohyama: Right. But I hope that the Japanese version of your book and your TV program and so on will change the way people think about science and get more people interested in science. That's what I hope.

Randall: Oh, that would be nice. Thank you. I hope so too.

Excited with the Idea of the Warped Extra Dimension

Mukohyama: Now, let us talk about science. Your theory of the brane world scenario and warped extra dimension³ is now very famous and is considered as one of the most promising scenarios beyond the standard model. But, I wonder what you thought when you first proposed this model with Raman Sundrum. Were you confident that this model would get a lot of attention?

Randall: I am never confident about that. I thought it was a good idea. We wanted to

make sure, because in some sense we were really like, "Why didn't anyone see this before?" But, I think we were pretty excited. I don't know what we thought in terms of who pays attention. In fact, in the beginning I don't think people paid as much attention.

Mukohyama: Oh really?

Randall: People made it seem like it was just another extra dimension modeling. We really had to make that clear. Raman gave a bunch of talks in the beginning. Then I started to give talks, and then I think people started learning. Also, I think right then Mark Wise called it "Randall-Sundrum" in his paper. It was very good for us, because it made it clear it was a different kind of model. Yeah, I think people didn't always appreciate right away that it was some people did, but I am not sure it was immediately known.

Mukohyama: I see.

Randall: But I think we knew that it was different, and we were quite excited.

Mukohyama: I see. But for other people it was too new probably?

Randall: Yeah, I'm not sure. I don't know. I think maybe also because of duality, people thought maybe it's just something that's already known. I think it took a little while before people appreciated that we had really done something different. I could be wrong, but that was maybe the sense I had. But, we were certainly enthusiastic. It was also a funny thing though, because we were finishing up our paper on anomaly mediation and sequestering.⁴

Mukohyama: Right.

Randall: So, we actually delayed these papers until we were done with that.

Mukohyama: Oh, really?

Randall: We were excited, but we wanted to finish the other things. We also wanted to make sure we understood all aspects, and we also had the infinite extra dimension. So we had three papers that we were thinking about at the same time. They were all very interesting.

Mukohyama: I agree. So, you actually have three different models based on the similar setup. How did you come up with different ideas from the similar setup at almost the same time? It's amazing.

Randall: Well, in some sense the math came up with the ideas, because we were working out the model for the sequestered scenario and for this metric; because

there are subtleties, as you know, about how it gets communicated and "Does the modulus⁵ carry information?" in the anomaly mediation scenario; because we really wanted to have a scenario where it really worked, where you didn't have the leading order terms. It was a tricky thing. We realized you had to have supersymmetry working on the other brane. But in the process we were working out the geometry, we saw this exponential, which is remarkable for people like us who have thought about the hierarchy problem for years. Of course you think about that. But then, I was starting at the metric and I was confused, because it looked like you could remove one of the branes, which was a very surprising thing.

Mukohyama: Yeah, it's very surprising.

Randall: Certainly, when I told people this, they thought it has to be wrong, because we are not allowed to have an infinite extra dimension and because of theoretical

³ Brane world is a physical setup in which matter and forces are confined to a surface called brane. Warped spacetime geometry is a spacetime that would be flat except for an overall scaling that varies with the position in a direction. Warped extra dimension is an extra dimension along which the higher-dimensional spacetime geometry is warped.

⁴ Anomaly mediation is communication of supersymmetry breaking by quantum effects. Sequestering is the physical separation of different elementary particle types in extra dimensions.

⁵ A modulus is a scalar field whose potential energy function has continuous families of minima.

reasons, which it avoids in a very subtle way.

Mukohyama: Right. It was almost like a theorem before your work.

Randall: Exactly. People thought it was a theorem, in fact. You're right. It's very subtle the way it avoids it, and so there were a lot of subtleties there that we wanted to make sure we weren't missing something.

Mukohyama: Yeah.

Randall: But it really worked because the equations gave us the hierarchy, and then equations also pointed out that you could remove a brane. But then it became subtle to figure out what it meant. It wasn't like we set out to do this, but because we were thinking about these big problems, it became clear after a while.

Mukohyama: I see.

Randall: As you know, when you solve for M_{Planck} it's independent of the position of the second brane, roughly speaking. This is an incredibly surprising thing if you've thought about an extra dimension. So, understanding that was what took us to the third paper.

Mukohyama: Yeah, I see. Now people think that your scenario, the Randall-Sundrum scenario can be realized in string theory. I think that the KKLT⁶ is kind of the string theory realization of this warped extra dimension. But at some point it was not clear whether this kind of warped extra dimension could

be realized in string theory. Actually, I think if I remember correctly, there was a kind of no-go theorem. At that time what was your feeling?

Randall: Well, I think I have said this for a while. Although, there is a lot of interesting work that comes out of string theory, I think there is the tendency to think that you are going to be able to figure it all out from first principles. One of the reasons I think model building is important in addition to matching experiment is because it forces people to really think harder.

Mukohyama: Right.

Randall: Is it really true that they've figured everything out already, or could it be that there are some interesting things they're missing? I wasn't very worried, because I thought the likelihood that they had figured out everything that's possible in string theory was kind of low. Also it wasn't the point to derive in string theory. It was a model and we wanted to see. But, I guess I do think that there were many things that could happen en-route from the Planck scale to the TeV scale, and it was unlikely that everyone had worked out all of them.

Mukohyama: I see.

Randall: I mean they would also say that a positive cosmological constant is impossible in string theory before.

Mukohyama: Oh, yes.

Randall: There are many



things that I've said to people, but then you have to think harder to see if they can work. In some sense, models are an incentive to push a little harder and see "Are there different ways?" I used to draw this picture with people working from the bottom, doing model building, and people working from the top, and you're trying to find a common ground.

What's Next?

Mukohyama: I see. That's great. After having proposed a possible solution to the hierarchy problem, which is really one of the biggest problems in theoretical physics, what is your next aim in your research? What do you want to solve?

Randall: Right. We don't know if that's right and there were many aspects that we worked out, as you know. But, right now, I am thinking about dark matter, because I think that the combination of cosmological,

astrophysical, and particle physics measurements you certainly need to think about all of them to really pin down what dark matter is. As I'll talk about today, we have a new model of dark matter. I think there were just a lot of ideas in dark matter that have yet to be explored and can make a difference for how people study it. That's one of the things. I also think whether we have one solution to the hierarchy problem. I don't know if it's right. So there are still issues to think about there.

What do you think about these days?

Mukohyama: I am still interested in the cosmological constant problem.

Randall: Yeah.

Mukohyama: We worked together on the cosmological constant problem. We have some model and it addresses some important aspects, but...

Randall: It's not a perfect...

⁶ S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde, and P. Trivedi, *Physical Review D* 68 (2003) 046005

Mukohyama: It's not the real solution.

Randall: Right.

Mukohyama: I want to pursue this direction, but at the same time...

Randall: What other directions do you have?

Mukohyama: I am not sure at this moment; it's kind of a longstanding purpose of my research to attack the problem of the cosmological constant. At this moment I am now interested in dark energy.

Randall: Which is similar, yeah.

Mukohyama: Right. They are related to each other. In the end, we have to solve the cosmological constant problem, and then attack the dark energy problem.

Randall: Maybe.

Mukohyama: That's my gut feeling, but it's still too difficult to attack the cosmological constant problem at this moment. My attitude now is to think about dark energy for a while.

Randall: Okay.

Mukohyama: Now, back to the LHC—it found the Higgs Boson, so people are looking for new physics beyond the Standard Model. What is the most exciting scenario from your point of view?

Randall: Well, of course I would love them to find this kind of gravitons. I do worry that the machine might have too low energy and eventually we want to have much higher energy machine, because just statistically it's not that likely that the new physics would be in the next machine,

because we don't have that much room. We've already gone to 8 TeV and now we're only going to 13 or 14.

Mukohyama: Right.

Randall: It's a concern. But, of course it would be very exciting if something is in this machine and tells us what's going on, whatever it is. I mean, of course we hope that they'll find something.

Message to Young People in Japan

Mukohyama: Okay. I think this is your third or fourth visit to Japan, and your first visit to Kavli IPMU.

Randall: Yes.

Mukohyama: What is your impression about science in Japan?

Randall: There are some quite good people here. There are some quite good people who come to the States, even temporarily like you did. I hope to see it stays strong. In terms of my books, it's very nice that people were really interested at least in my first book, with the second one, not yet in the stores, just coming out; it was one of the most scientifically interested audiences, so I think that's very good.

Mukohyama: Scientifically I'm enjoying being here, especially at the Kavli IPMU. Here, people in different fields can communicate.

Randall: Is this the only Kavli IPMU building?

Mukohyama: Actually, we have the second building, a building shared with other

institutes.

Randall: What are these other institutes?

Mukohyama: The next building is for the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), and the other building is for the Institute for Solid State Physics (ISSP).

Randall: Do you have any interactions with them?

Mukohyama: Sometimes some members attend seminars over there, and people also come here from there. Some people at ICRR are affiliated with Kavli IPMU. Also, we have some interactions with Physics Department which is located on the downtown campus of the University of Tokyo.

Randall: Is it a bit far?

Mukohyama: Yes, a bit far, but I usually attend a seminar there on every Monday. Sometimes people come here, and sometimes we also have joint seminars among different institutes in the greater Tokyo area. I think there was something similar in Boston.

Randall: Yeah, there was. Not much any more. I think they are busy. There are so many seminars here. Do you hear seminars from Japanese people or foreigners?

Mukohyama: I think half and half. Maybe more people from abroad. And all seminars are given in English.

Randall: OK, very good.

Mukohyama: I remember at Harvard the every-day atmosphere was very stimulating, and we had a lot

of seminars and so on.

Randall: Yeah, it's still lively. And here is it very interactive?

Mukohyama: Yeah.

Randall: Very good.

Mukohyama: Do you have any message for young people in Japan?

Randall: Just to be excited about science, to be happy about thinking for themselves, and of course not to the exclusion of understanding what other people are doing, but to get inspired by the amazing things that are happening. Also I hope things go well in Japan in the future.

Mukohyama: Thank you very much.

Randall: Okay, great. Thank you.

Our Team

Teppei Okumura

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

My focus is on large-scale structures of the Universe to understand the properties of dark energy, which occupies approximately 70% of the total energy of the Universe and drives the cosmic acceleration. Recently, I have been working on developing a theoretical model to extract the information of dark energy precisely from the observed gravitational clustering of galaxies. Here at Kavli IPMU, I intend to work on the analysis of the galaxy data from the Baryon Oscillation

Spectroscopic Survey (BOSS), which is currently the largest three-dimensional survey of galaxies, considering its possible extensions to the SuMIRe survey at the Subaru Telescope, which involves Kavli IPMU.



Wiphu Rujopakarn

Research Area: **Astronomy**

Postdoc

My research focused on the evolution of galaxies: How galaxies formed stars and were assembled. The progress towards a coherent picture of this evolution is being driven rapidly by the emergence of new radio and millimeter-wave facilities that can peer through the thick dust prevalent in young galaxies at the peak of their assembly, redshifts 1 to 4, to reveal the interplay of star formation and supermassive black hole accretion. I look forward to join force

with Kavli IPMU researchers to synergize these wavelengths with ongoing Projects at the Kavli IPMU.



Our Team

International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN13)

Masashi Yokoyama

Associate Professor of Graduate School of Science, The University of Tokyo
and Kavli IPMU Scientist

Neutrino oscillation, discovered by the Super-Kamiokande collaboration in 1998, is the first evidence of the physics beyond the standard model of particle physics. Over more than a decade since then, the studies of neutrino oscillations have grown to be one of the central topics in particle physics. As yet, we have not reached full understanding of what neutrinos are telling us.

During 2011 - 2012, the discoveries of the electron neutrino appearance by the T2K experiment, to which the Kavli IPMU participates, and anti-neutrino disappearance by the three reactor experiments opened the door to the next stage. The determination of the last mixing angle θ_{13} with those experiments made it possible to approach the major goals of neutrino physics, search for CP asymmetry in neutrino sector, and determination of the mass hierarchy, in the near future.

Because of the tiny interaction probability, the instruments to detect and study neutrinos tend to be huge, like the Super-Kamiokande detector that uses 50,000 tons of pure water. In order to further advance the study of neutrino properties, next generation detectors with larger target mass

and better performance have been intensively studied all over the world. In Japan, the Hyper-Kamiokande, a 1 megaton water Cherenkov detector, is proposed as the successor of Super-Kamiokande. Such detectors, if realized, will also have sensitivity to nucleon decays that are predicted in the Grand Unified Theories. In addition, they will give opportunities for research in broader field of science such as neutrino astrophysics and geophysics.

The workshop series, "International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN)," started back in 1999, has been providing a forum for researchers to discuss next generation nucleon decay and neutrino detectors towards their realization. The 14th

NNN was held from November 11 to 13, 2013 at the Kavli IPMU with about 120 participants from 14 countries. There were 35 oral and more than 30 poster presentations covering all aspects of related research, from theoretical development to the results and prospects with current and future experiments, and R&D on detector technology, accelerator, and neutrino beams. Through intense and exciting discussion during three days of workshop, neutrino physicists exchanged ideas to develop the new generation of experiments.

We would like to thank the administrative staff members of the Kavli IPMU for their service. We are especially grateful to Ms. Rie Ujita for her support, which was indispensable to make this workshop possible.



SUSY: Model-Building and Phenomenology

Shigeki Matsumoto

Kavli IPMU Associate Professor

The workshop “SUSY: Model-Building and Phenomenology” was successfully conducted at the Kavli IPMU during December 2 - 4, 2013. Having a workshop dedicated to current situations and future prospects of supersymmetry (SUSY) model-buildings and their phenomenological studies was the most important and timely idea because of the following reasons. First, the recent discovery of a new boson and subsequent measurements of its properties at the CERN Large Hadron Collider experiment (LHC) indicates that the boson seems strongly to be the Higgs boson predicted by the standard model (SM). Next, no new physics signals, on the other hand, have been discovered at LHC, which provide very stringent constraints on SUSY models. Finally, no robust new physics signals have been detected at dark

matter detection and flavor-related experiments, either. Because of the reasons, many SUSY models proposed before LHC were ruled out and people were required to build new SUSY models which are consistent with the new experimental results with taking care of the naturalness problem concerning the electroweak scale.

All of these issues were covered in great depth in the workshop, which included twelve plenary talks and seven contributed (short) talks. The workshop was launched by an opening talk by Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama, where he gave a broad overview of the physics concerning new physics (SUSY) models. This was followed up with subsequent thorough talks by Graham Ross on several known SUSY models with focusing carefully on

the fine-tuning problem, by Norimi Yokozaki on the focus-point scenario, by Philipp Kant on three-loop Higgs mass calculation in MSSM, by Joshua Ruderman on high-scale SUSY model, by Tomer Volansky on R-parity violating scenario, by Fuminobu Takahashi on SUSY cosmology, and by Masahiro Ibe on the pure gravity mediation model. There were also two experimental (ATLAS) talks by Shimpei Yamamoto and Naoko Kanaya discussing the current status and future prospects on SUSY searches at LHC. In addition, attractive non-SUSY scenarios were presented by Pyungwon Ko and Mikhail Shaposhnikov. Through the talks, participants could clearly understand the situation of SUSY (and non-SUSY) model-buildings and obtain a clue of promising future directions on this subject.

This workshop was originally planned to be a small one, but the number of participants was actually much more than we expected. This fact means that the topic of the workshop is now regarded as the most important one by almost all researchers in particle phenomenology, and having a similar workshop at the Kavli IPMU in the near future will be very important.



Workshop on “Primitive Forms and Related Subjects”

Kyoji Saito

Kavli IPMU Principal Investigator

A workshop on Primitive Forms and Related Subjects was held at the Kavli IPMU from February 10 to 14, 2014 (organized by K. Hori, C. Li, S. Li, and K. Saito).

Let us give a brief historical overview on the subjects.

Modeled on the classical theory of elliptic integrals on a family of elliptic curves, the theory of period integrals of primitive forms over vanishing cycles of a function with isolated critical points was introduced in a work of K. Saito 1983. Here, a primitive form is defined to be a class of relative top degree differential forms on an open complex manifolds equipped with a deformation family of a function F having only isolated critical points, where the relative de Rham cohomology class of the primitive form should satisfy some infinite system of bilinear equations of higher residue pairings defined on a semi-infinite Hodge structure.

Primitive forms have been one of the subjects of the Math-String seminar and Topological Strings seminar at Kavli IPMU for the reason that the theory of primitive forms is relevant for the complex geometric aspect (“B-model”) of the Landau-Ginzburg model

whose superpotential is given by the function F . According to a postulate, called mirror symmetry in topological string theory, the theory should correspond to the symplectic geometric aspect (“A-model”) of another theory, such as the Gromov-Witten theory of a compact Kähler manifold or the Fan-Jarvis-Ruan-Witten theory (2007, 2013) of a Landau-Ginzburg orbifold.

As a consequence of the theory, a primitive form induces the flat structure on the deformation parameter space (i.e., a flat metric together with a ring structure on the tangent bundle of the parameter space satisfying some integrability conditions. The structure was later axiomatized as the Frobenius manifold structure by B. Dubrovin 1990). Then that structure defines a potential function called the prepotential on the parameter space. One mathematically rigorous formulation of the mirror symmetry conjecture asks that **the prepotential function obtained from a primitive form should coincides with that of the mirror side** (i.e., of Gromov-Witten theory or of FJRW theory) **after a suitable identification called the mirror map, of parameter**

spaces equipped with the flat coordinates.

However, the verification of this mirror symmetry conjecture was not achieved until recently, since even though primitive forms are theoretically known to exist, their explicit expression was not known except for two cases: universal unfoldings of simple singularities and simple elliptic singularities (1983 K. Saito). Mirror symmetry for these two cases has been confirmed rather recently (simple singularity case, Fan-Jarvis-Ruan 2007, simple elliptic singularity case, Krawitz-Shen 2011, Milanov-Shen 2012).

In the last year, there has been new progresses:

- 1) Towards a construction of primitive forms over Novikov rings for toric cases (Fukaya-Oh-Ohta-Ono),
 - 2) Unified approach to primitive forms and to BCOV-theory via polyvector fields (Li-Li-Saito),
 - 3) Perturbative construction of primitive forms (Li-Li-Saito).
- In particular, as an application of 3), we obtain
- 4) Verification of mirror symmetry for wide classes of singularities including cases with central charge being larger than 1, using

the perturbative formula of prepotentials (Li-Li-Saito-Shen).

The workshop was inspired by these recent developments, and consisted of

(A) three basic courses

- Lecture I (given by K. Ono, H. Ohta, and K. Fukaya) : Frobenius manifold structure and Lagrangean Foer theory for toric manifolds
- Lecture II (given by T. Jarvis) : Introduction to FJRW-theory and a mathematical approach to the Gauged Linear Sigma Model
- Lecture III (given by Si Li) : LG-model via Kodaira-Spencer gauge theory

(B) 10 research talks

- S. Barannikov: On the noncommutative Batalin-Vilkovisky formalism and EA matrix integrals
- A. Takahashi: From Calabi-Yau dg categories to Frobenius manifolds via primitive forms

- K. Hori, M. Romo: The parameter delta
- H. Fan: Analytic construction of quantum invariant of singularity
- Y. Zhang: On the genus two free energies for semi simple Frobenius manifolds
- A. Losev: K. Saito theory of primitive form, generalized harmonic theory and mirror symmetry
- H. Iritani: Gamma Conjecture for Fano manifolds
- Y. Shen: Mirror symmetry for exceptional unimodular singularities
- T. Milanov: The phase form in singularity theory
- D. Pomerleano: Deformation theory of affine symplectic manifolds

(C) 7 short communications

- Y. Shiraishi: On Weyl group and Artin group associated to orbifold projective lines
- N. Priddis: A Landau-Ginzburg/ Calabi-Yau correspondence for the mirror quintic

- M.R. Rahmati: Hodge theory of isolated hypersurface singularities
- B. Bychkov: On the number of coverings of the sphere ramified over given points
- M. van Garrel: Integrality of relative BPS state counts of toric Del Pezzo surfaces
- S. Sugiyama: On the Fukaya-Seidel categories of surface Lefschetz fibrations
- A. Bondal and I. Zhdanovskiy: Critical points of a functional and orthogonal pairs of Cartan subalgebras.

There were over 80 participants from all over the world, including Asia, Russia, Europe and America, and the workshop was quite active and successful by showing the current status of the research and inspiring further study of primitive forms including 1) geometric understanding of mirror symmetry and 2) towards a categorical construction primitive forms.



Workshop

News

Yukinobu TODA Wins the 2014 MSJ Spring Prize

Kavli IPMU

Associate Professor Yukinobu Toda has won the 2014 MSJ (The Mathematical Society of Japan) Spring Prize for his outstanding contributions to the study of derived categories of algebraic varieties. The MSJ Spring Prize was established in 1988 as the successor of the Iyanaga Prize which had been established in 1973. It is awarded to its members under the age of 40 to recognize outstanding mathematical achievement. The awards ceremony was held on March 16, 2014 at the MSJ Spring Meeting 2014 at Gakushuin University.



Yukinobu Toda

J-PARC Neutrino Beam Group Awarded the 2013 Suwa Prize

The J-PARC Neutrino Beam Group (Professor Takashi Kobayashi of KEK as a representative) has been awarded the 2013 Suwa Prize by the FAS (Foundation for High Energy Accelerator Science) for their contribution to the discovery of electron neutrino appearance in



Mark Hartz

the T2K Experiment by creating and operating the highest intensity neutrino beam facility. Kavli IPMU Assistant Professor Mark Hartz is among the prize winners. The Suwa Prize was established by the FAS and is given to researchers, engineers, and research groups recognizing exceptional performance, such as long-term contributions, for the development of high-energy accelerators and their application in science. The awards ceremony was held on February 17, 2014 at Arcadia Ichigaya in Tokyo.

Lisa Randall Gave a Public Lecture "Knocking on Heaven's Door"

On January 25, 2014, Kavli IPMU hosted a public lecture, "Knocking on Heaven's Door," delivered by a theoretical physicist Lisa Randall, Professor at Harvard University, at the Koshiba Hall on the University of Tokyo's Hongo campus. She talked about the experiments at the CERN's Large Hadron Collider (LHC) and the Higgs boson discovery in these experiments, from the viewpoint of a theoretical physicist. She also discussed from the vast Universe to its building blocks, the elementary particles, and their relations taking note of their very different scales. Professor Randall's talk was interpreted by Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama in Japanese at short intervals with explication. This style of lecture was well received by the audience as easy to understand. As Professor Randall is popular for her books for general audiences, which are translated into Japanese, the venue was near capacity and there were a number of people who listened to the lecture while taking notes.

You can also find an interview with

Professor Randall on pages 12-16 in this issue of the *Kavli IPMU News*, by Kavli IPMU Associate Professor Shinji Mukohyama.



After the lecture, Professor Randall is answering questions. The person on the right is Kavli IPMU Director Murayama.

WPI Institutes Jointly Participated in AAAS 2014 in Chicago

The 2014 AAAS (American Association for the Advancement of Science) Annual Meeting was held for five days, February 13 – 17, 2014, at Hyatt Regency Chicago as a main venue with a theme of "Meeting Global Challenges: Discovery and Innovation." The 9 WPI institutes jointly participated following the AAAS 2013 in Boston and AAAS 2012 in Vancouver (in 2012 and 2013, 6 WPI institutes participated).

The AAAS Annual Meeting has been held since 1848 when the AAAS, a non-profit professional society dedicated to the advancement of scientific and technological excellence across all disciplines, and to the public's understanding of science and technology, was founded. The AAAS is also known as the publisher of the famous science journal, *Science*. The AAAS Annual Meeting is a widely recognized global science gathering, bringing thousands of scientists, engineers, policymakers, educators, science journalists, and general public together to discuss the most recent developments in science and technology in a variety of programs.

The 9 WPI institutes jointly hosted the WPI booth for three days, February 14-16, as part of the Japan pavilion organized by the Japan Science and Technology Agency (JST), and held a one-hour workshop entitled “Build a Career in Japan!” jointly with RIKEN. In this workshop, a MEXT officer Hideki Iwabuchi (Director, WPI/Office for the Promotion of Basic Research, Basic Research Promotion Division, Research Promotion Bureau) introduced the WPI program, and Petros Sofroni, Director of the International Institute for Carbon-Neutral Energy Research (I²CNER) explained advanced and global research activities at the WPI institutes.



WPI booth at the Japan Pavilion.

Murayama Project “SuMIRe” Participated in FIRST EXPO 2014

On February 28 and March 1, 2014, FIRST EXPO 2014 was held at Bellesalle Shinjuku Grand in Tokyo to present the outcomes of the FIRST (Funding Program for World-Leading Innovative R&D on Science and Technology) to the general public at the end of the last year of the program. Led by the Council for Science and Technology Policy (CSTP) in the Cabinet Office, Government of Japan, the FIRST program was inaugurated in FY2009 to advance world-leading research that will strengthen Japan’s international competitiveness while contributing to society and public welfare through the application of its results. The

CSTP selected the top 30 researchers with highest potential from various fields. The total budget for the FIRST Program was ¥100 billion over a period of five years. Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama’s SuMIRe (Subaru Measurement of Images and Redshifts) project is one of the 30 selected projects. It aims at revealing the nature of Dark Matter and Dark Energy and uncovering the Origin and Future of the Universe through the most advanced astronomical observations with ultra-wide field of view imaging as well as spectroscopy using the Subaru Telescope.

At FIRST EXPO 2014, the outline and the results of the selected 30 projects were presented by researchers of the respective projects. There were also exhibition booths and many other events. From the SuMIRe project, a full-scale replica of an aspherical lens used for Hyper Suprime-Cam (HSC), an ultra-wide field digital camera, was displayed. The SuMIRe project has been involved with production of the HSC’s aspherical lenses. Mounted on the Subaru Telescope, HSC has been made available for observations this year. In addition, Kavli IPMU Professor Masahiro Takada, who is one of the core members of the project, talked on the present status and the expected outcomes of the SuMIRe project on February 28.



Professor Takada, giving a lecture.

A Program to Encourage Female Students to Study Science “Come Over to Learn the Universe!”

On March 15, 2014, a Program to Encourage Female Students to Study Science, “Come Over to Learn the Universe!” was held at Kavli IPMU, jointly hosted by Kavli IPMU and the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), the University of Tokyo, and 35 high school and junior high school female students participated. This is part of an attempt which the University of Tokyo has planned, supported by the Japan Science and Technology Agency (JST), to encourage female students in studying science as their future path by inspiring their interests in the fields of science. The students listened to lectures given by two female researchers, Miho Ishigaki (JSPS postdoctoral fellow at Kavli IPMU) and Rieko Momose (project researcher at ICRR), about their respective researches, and practiced, under the guidance of graduate-student teaching assistants, laser interferometry which is applied to a gravitational wave telescope. Then, the students had friendly talks with postdocs and graduate students at the Kavli IPMU’s Interaction Area. The participating students expressed their impressions such as, “It was nice to hear the life of university students,” and, “I got interested in the Universe much more than before.”



Friendly conversations at the Kavli IPMU’s Interaction Area.

Kavli IPMU Seminars

1. "Naturalness, Conformal Symmetry and Duality"
Speaker: Yoshiharu Kawamura (Shinshu U)
Date: Nov 06, 2013
2. "Triple Intersection Formulas for Isotropic Grassmannians"
Speaker: Vijay Ravikumar (TIFR)
Date: Nov 06, 2013
3. "Linear canonical relations and their quantization"
Speaker: Alan Weinstein (UC Berkeley)
Date: Nov 06, 2013
4. "Minicourse on the Madsen-Weiss Theorem [Part 3]"
Speaker: Charles Siegel (Kavli IPMU)
Date: Nov 07, 2013
5. "Some foundations of extended quantization"
Speaker: James Michael Wallbridge (Kavli IPMU)
Date: Nov 07, 2013
6. "Minicourse on the Madsen-Weiss Theorem [Part 4]"
Speaker: Charles Siegel (Kavli IPMU)
Date: Nov 08, 2013
7. "The Moduli and Gravitino (non)-Problems in Models with Strongly Stabilized Moduli"
Speaker: Jason Evans (U Minnesota)
Date: Nov 08, 2013
8. "Higher derived categories of relative exact categories and non-connective K-theory"
Speaker: Satoshi Mochizuki (Chuo U)
Date: Nov 12, 2013
9. "Entanglement Renormalization and Black Holes in AdS/CFT"
Speaker: Tadashi Takayanagi (YITP)
Date: Nov 12, 2013
10. "Conformal Blocks and the Ising Model"
Speaker: Simon Wood (Kavli IPMU)
Date: Nov 12, 2013
11. "The Search for sub-GeV Dark Matter"
Speaker: Rouven Essig (Stony Brook U)
Date: Nov 15, 2013
12. "Spherical DG-functors"
Speaker: Timothy Logvinenko (Cardiff U)
Date: Nov 18, 2013
13. "DW theory using cohomology with coefficients in Picard groupoids"
Speaker: Alexander Voronov (U Minnesota)
Date: Nov 19, 2013
14. "Exact results for boundaries and domain walls in 2d supersymmetric theories"
Speaker: Takuya Okuda (U Tokyo)
Date: Nov 19, 2013
15. "Loop Groups and Conformal Blocks"
Speaker: Jesse Wolfson (Northwestern U)
Date: Nov 19, 2013
16. "Challenges and accomplishments of the ATLAS experiment at the Large Hadron Collider"
Speaker: Fabiola Gianotti (CERN)
Date: Nov 20, 2013
17. "The bounded denominator conjecture for vector-valued modular forms"
Speaker: Christopher Marks (U. Alberta)
Date: Nov 21, 2013
18. "WISH: Wide-field Imaging Surveyor for High-redshift"
Speaker: Toru Yamada (Tohoku U)
Date: Nov 21, 2013
19. "The chemical abundance patterns of the most metal-poor stars"
Speaker: Norbert Christlieb (Heidelberg U)
Date: Nov 22, 2013
20. "Finding the most metal-poor stars with SkyMapper and first results, including a $[\text{Fe}/\text{H}] < -7$ star"
Speaker: Anna Frebel (MIT)
Date: Nov 22, 2013
21. "Non-existence of semi-orthogonal decompositions and sections of the canonical bundle"
Speaker: Shinnosuke Okawa (Osaka U)
Date: Nov 25, 2013
22. "Deformed supersymmetric gauge theories from string- and M-theory (Part I): Introduction to the flux background"
Speaker: Susanne Reffert (CERN)
Date: Nov 26, 2013
23. "Deformed supersymmetric gauge theories from string- and M-theory (Part II): Applications"
Speaker: Domenico Orlando (École Normale Supérieure)
Date: Nov 26, 2013
24. "Future high-energy gamma-ray observatory: Cherenkov Telescope Array (CTA)"
Speaker: Masaaki Hayashida (ICRR)
Date: Nov 27, 2013
25. "New Insights into the Formation and Evolution of the Most Massive Galaxies"
Speaker: Danilo Marchesini (Tufts U)
Date: Nov 27, 2013
26. "Primitive forms via polyvector fields"
Speaker: Changzheng Li (Kavli IPMU)
Date: Nov 28, 2013
27. "Re-interpreting kinematic variables in the LHC searches"
Speaker: Myeonghun Park (Kavli IPMU)
Date: Nov 29, 2013
28. "Exact Partition Functions on RP^2 and Orientifolds"
Speaker: Heeyeon Kim (KIAS)
Date: Dec 03, 2013
29. "Asymptotic safety of the

- Standard Model and the Higgs boson mass ”
Speaker: Mikhail Shaposhnikov (EPFL)
Date: Dec 04, 2013
30. “ Reflection relations and fermionic basis ”
Speaker: Fedor Smirnov (LP THE)
Date: Dec 05, 2013
31. “ The Dark Past and Bright Future of Radio Detection of UHECRs ”
Speaker: Konstantin Belov (UCLA)
Date: Dec 05, 2013
32. “ Etale cohomology, l-adic sheaves and Deligne-Lusztig theory ”
Speaker: Tanmay Deshpande (Kavli IPMU)
Date: Dec 05, 2013
33. “ An Algorithmic Approach to Heterotic String Phenomenology ”
Speaker: Seung-Joo Lee (KIAS)
Date: Dec 06, 2013
34. “ Equilibrating the Quark-Gluon Plasma: Flow, Fluctuations and Thermalization ”
Speaker: Berndt Mueller (Duke U)
Date: Dec 09, 2013
35. “ Phase transitions in high density Yang-Mills matter ”
Speaker: Giorgio Torrieri (Columbia U)
Date: Dec 09, 2013
36. “ Cosmology with the South Pole Telescope ”
Speaker: Nils Halverson (U Colorado)
Date: Dec 11, 2013
37. “ Searching for Dark Matter through Radio Observations: Present and Future ”
Speaker: Aravind Natarajan (U of Pittsburgh)
Date: Dec 12, 2013
38. “ Some uses of entropy in birational geometry ”
Speaker: Ilya Karzhemanov (Kavli IPMU)
Date: Dec 12, 2013
39. “ Holographic topological insulators and superconductors ”
Speaker: Moshe Rozali (U. British Columbia)
Date: Dec 12, 2013
40. “ The Little Bang Standard Model ”
Speaker: Ulrich Heinz (Ohio State U)
Date: Dec 13, 2013
41. “ Testing Strong Gravity with X-Ray Spectroscopy of AGN ”
Speaker: Sachiko Tsuruta (Montana State U)
Date: Dec 13, 2013
42. “ Why is the generalized second law true? ”
Speaker: Aron Wall (UCSB)
Date: Dec 17, 2013
43. “ Representations on the cohomology of hypersurfaces and mirror symmetry ”
Speaker: Alan Stapledon (U of Sydney)
Date: Dec 18, 2013
44. “ WH expansion applied for the Non-linear Dark Matter Power Spectrum and its Applications ”
Speaker: Toshifumi Futamase (Tohoku U)
Date: Dec 19, 2013
45. “ Scale Invariant Extension of the Standard Model with QCD-like hidden sector and composite Dark Matter ”
Speaker: Jisuke Kubo (Kanazawa U)
Date: Dec 20, 2013
46. “ Classification of 6D SCFTs ”
Speaker: David Morrison (UCSB)
Date: Jan 14, 2014
47. “ Modular family of 3D higher-spin theory ”
Speaker: Wei Li (AEI)
Date: Jan 14, 2014
48. “ Quantum Liouville’s Theory and Modular Double of $Uq(\mathfrak{sl}(2, \mathbb{R}))$ ”
Speaker: Ivan Ip (Kavli IPMU)
Date: Jan 14, 2014
49. “ Formation of First Stars ”
Speaker: Takashi Hosokawa (U Tokyo)
Date: Jan 15, 2014
50. “ The weak lensing and clustering of SDSS III galaxies: from astrophysics to cosmology ”
Speaker: Surhud More (Kavli IPMU)
Date: Jan 16, 2014
51. “ Crystalline companion of l-adic sheaves ”
Speaker: Tomoyuki Abe (Kavli IPMU)
Date: Jan 16, 2014
52. “ Stabilization of Linear Higher Derivative Gravity with Constraints ”
Speaker: Tai-jun Chen (Cambridge)
Date: Jan 17, 2014
53. “ Dirac graphs ”
Speaker: Corneliu Sochichiu (GIST)
Date: Jan 21, 2014
54. “ Recurrence (and resummation) of conformal blocks ”
Speaker: Cornelius Schmidt (Kavli IPMU)
Date: Jan 21, 2014
55. “ Double Disk Dark Matter ”
Speaker: Lisa Randall (Harvard U)
Date: Jan 24, 2014
56. “ Local quantum cohomology and mixed Frobenius Structure ”
Speaker: Yukiko Konishi (Kyoto U)
Date: Jan 27, 2014
57. “ Mirror symmetry for minuscule Schubert complete intersections ”
Speaker: Makoto Miura (U Tokyo)
Date: Jan 28, 2014
58. “ Observations of Star Forming Galaxies in the Heart of the Reionization Era ”
Speaker: Richard Ellis (Caltech)
Date: Jan 28, 2014
59. “ CohFT and conformal blocks, or, how I learned to stop worrying and compute all the Chern classes ”
Speaker: Charles Siegel (Kavli IPMU)
Date: Jan 28, 2014
60. “ SUSY, Seesaw, CMB ”
Speaker: Shinsuke Kawai (Sungkyunkwan U)

- Date: Jan 29, 2014
61. "Non-Hydrogen Supernovae within Extended Envelopes: Light Curve Modeling and Parameter Dependences "
- Speaker: Elena Sorokina (Lomonosov Moscow State U)
- Date: Jan 30, 2014
62. "Flops and S-duality conjecture "
- Speaker: Yukinobu Toda (Kavli IPMU)
- Date: Jan 30, 2014
63. "Stringy Differential Geometry and N=2 D=10 Supersymmetric Double Field Theory "
- Speaker: Jeong-Hyuck Park (Sogang U)
- Date: Feb 04, 2014
64. "Naturally in ating on steep potentials through electromagnetic dissipation "
- Speaker: Lorenzo Sorbo (U Massachusetts, Amherst)
- Date: Feb 05, 2014
65. "How many is different? Answer from the ideal Bose gas "
- Speaker: Jeong-Hyuck Park (Sogang U)
- Date: Feb 06, 2014
66. "Subaru Telescope Adaptive Optics Observations of the SDSS Gravitationally Lensed Quasars "
- Speaker: Rusu Cristian Eduard (U Tokyo / NAOJ)
- Date: Feb 06, 2014
67. "Review of Dark Matter Search with Liquid Xe Detector and Recent Results from XMASS "
- Speaker: Hiroyuki Sekiya (ICRR)
- Date: Feb 07, 2014
68. "Stuckelberg Portal into Dark Sectors "
- Speaker: Gary Shiu (UW Madison/ HKUST)
- Date: Feb 12, 2014
69. "Nonlinear velocity statistics and redshift-space distortions in peculiar velocity surveys "
- Speaker: Teppei Okumura (Kavli IPMU)
- Date: Feb 13, 2014
70. "Interplay between Randers metrics and the causal geometry of stationary spacetimes. Almost isometries. "
- Speaker: Miguel Angel Javaloyes (U Murcia, Spain)
- Date: Feb 14, 2014
71. "New physics searches with boosted tops "
- Speaker: Takeuchi Michihisa (King's College London)
- Date: Feb 19, 2014
72. "Supernova SN 2012dn: A spectroscopic clone to SN 2006gz "
- Speaker: Devendra Sahu (Indian Institute of Astrophysics, Bangalore)
- Date: Feb 19, 2014
73. "High-Energy Neutrinos as New Cosmic Messengers "
- Speaker: Kohta Murase (IAS)
- Date: Feb 21, 2014
74. "How Large is a Neutron Star? "
- Speaker: Jim Lattimer (Stony Brook U)
- Date: Feb 24, 2014
75. "Higgs branch localization of 3d N=2 theories "
- Speaker: Masazumi Honda (Harish-Chandra Research Institute)
- Date: Feb 25, 2014
76. "Planck cosmology, Galaxy Clusters, and Neutrino Masses: the View from the Optical "
- Speaker: Eduardo Roza (SLAC)
- Date: Feb 25, 2014
77. "Justice for supersymmetric hybrid in ation "
- Speaker: Valerie Domcke (SISSA)
- Date: Feb 26, 2014
78. "Young diagrams and intersection numbers for toric manifolds associated with Weyl chambers "
- Speaker: Hiraku Abe (Waseda U)
- Date: Feb 27, 2014
79. "Evolution of the star formation and gas content in galaxies through cosmic time "
- Speaker: Emanuele Daddi (CEA-Saclay)
- Date: Feb 27, 2014
80. "The Gauged Linear Sigma Model and GIT "
- Speaker: Richard Driessnack Eager (Kavli IPMU)
- Date: Feb 27, 2014
81. "Hypercharged dark matter and a new approach to halo-independent direct detection analysis "
- Speaker: Brian Feldstein (Oxford)
- Date: Feb 28, 2014
82. "Lagrangian embedding of cubic 4-folds containing a plane "
- Speaker: Genki Oouchi (Kavli IPMU)
- Date: Mar 03, 2014
83. "A Landscape in Boundary String Field Theory "
- Speaker: Koji Hashimoto (Osaka U / Riken)
- Date: Mar 04, 2014
84. "Cosmology with new gravitational degrees of freedom "
- Speaker: Baojiu Li (Durham U)
- Date: Mar 05, 2014
85. "Derived categories, noncommutative motives and commutative theorems "
- Speaker: Marcello Bernardara (Institut de Mathématiques de Toulouse)
- Date: Mar 10, 2014
86. "The Fluid Gravity Correspondence "
- Speaker: Shiraz Minwalla (Tata Institute)
- Date: Mar 10, 2014
87. "Scattering in Large N Matter Chern Simons theories "
- Speaker: Shiraz Minwalla (Tata Institute)
- Date: Mar 11, 2014
88. "The latest results from the T2K experiment "

- Speaker: Yoshinari Hayato (ICRR)
Date: Mar 11, 2014
89. "Predictions for the Dirac CP Violation in the Lepton Sector"
Speaker: Serguey Petcov (SISSA/INFN, Kavli IPMU)
Date: Mar 12, 2014
90. "A large number of fast cosmological simulations for the revised WiggleZ BAO measurement"
Speaker: Jun Koda (Swinburne U of Technology)
Date: Mar 14, 2014
91. "A Holographic Model of the Kondo Effect"
Speaker: Jackson Wu (NCTS Hsinchu, Taiwan)
Date: Mar 18, 2014
92. "Implications of 98 GeV and 125 GeV Higgs scenario in non-decoupling SUSY"
Speaker: Dilip Kumar Ghosh (Indian Association for the Cultivation of Science)
Date: Mar 19, 2014
93. "Inflation driven by the SM Higgs field after BICEP result"
Speaker: Kohei Kamada (EPFL)
Date: Mar 24, 2014
94. "Pfaffian sum formula for the symplectic Grassmannians"
Speaker: Takeshi Ikeda (Okayama U of Science)
Date: Mar 24, 2014
95. "The Leptonic CP Phase from $T_2(H)K$ and oscillations from μ^+ Decay at Rest"
Speaker: Jarah Evslin (IHEP/Beijing, IMP/Lanzhou)
Date: Mar 25, 2014
96. "FQH/CFT and q-CFT"
Speaker: Taro Kimura (CEA Saclay/RIKEN)
Date: Mar 25, 2014
97. "Supersymmetric Renyi Entropy"
Speaker: Tatsuma Nishioka (IAS Princeton)

- Date: Mar 26, 2014
98. "The Type Ia supernovae rate with Subaru/XMM-Newton Deep Survey"
Speaker: Jun Okumura (Kyoto U)
Date: Mar 27, 2014
99. "Q&A Session with Professor Peter Goddard"
Speaker: Peter Goddard (IAS, Princeton)
Date: Mar 27, 2014

Kavli IPMU Komaba Seminars

1. "Exact Results In Two-Dimensional (2,2) Supersymmetric Gauge Theories with Boundary"
Speaker: Mauricio Romo (Kavli IPMU)
Date: Nov 18, 2013
2. "Characteristic classes from 2d renormalized sigma-models"
Speaker: Hans Jockers (U Bonn)
Date: Jan 30, 2014

Personnel Changes

Promotion

Surhud More, previously Kavli IPMU postdoctoral fellow, was appointed as a Kavli IPMU Assistant Professor on March 1, 2014.



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 Professor Shigeki Sugimoto [April 1, 2008 – March 31, 2014] moved to the Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University as a Professor.

Kavli IPMU Professor Hiroshi Karoji

[April 1, 2010 - May 31, 2010 as a Project Researcher, and June 1, 2014 - March 31, 2014 as a Project Professor] moved to the National Institutes of Natural Sciences (NINS) as a specially appointed Professor.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Katsuyuki Naoi [April 1, 2012 - February 28, 2014] moved to Division of Mathematical Science, the Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology as a Lecturer.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Takaya Nozawa [September 1, 2008 - March 31, 2014] moved to the National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) as a specially appointed Assistant Professor.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Tomoki Saito [May 1, 2010 - March 31, 2014] moved to the Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo as a postdoctoral researcher.

JSPS postdoctoral fellow Mitsutoshi Fujita [April 1, 2013 - March 31, 2014] moved to the Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University as a JSPS postdoctoral fellow, accompanying his host researcher, Professor Shigeki Sugimoto.

JSPS postdoctoral fellow Kunio Kaneta [April 1, 2013 - March 31, 2014] moved to the Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo as a project researcher.

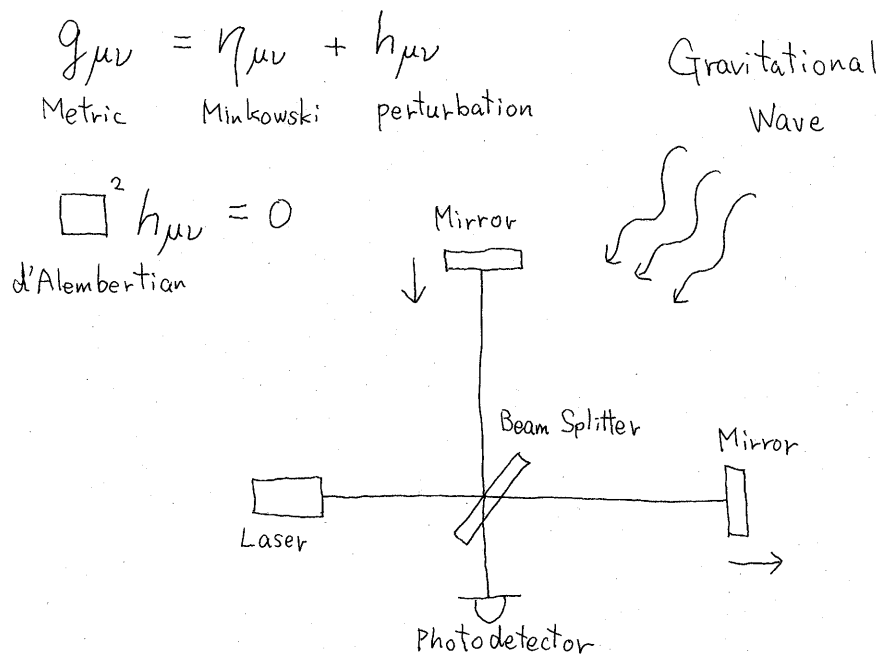
JSPS postdoctoral fellow Shunsuke Tsuchioka [April 1, 2011 - March 31, 2014] moved to the "Leading Graduate Course for Frontiers of Mathematical Sciences and Physics" (FMSP), the Graduate School of Mathematical Sciences, the University of Tokyo as a Project Assistant Professor.

Gravitational Wave

Seiji Kawamura

Professor, Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo,
and Kavli IPMU Senior Scientist

Gravitational wave, which was derived from general theory of relativity, is ripple in spacetime propagating at a speed of light. Gravitational waves are emitted from accelerating objects, and have not yet been directly detected, since the distortion of spacetime caused by gravitational waves is extremely small. If gravitational waves are detected, we could reveal a new aspect of the Universe such as coalescences of black holes and the beginning of the Universe, which we have not been able to observe so far. Currently large-scale laser interferometric gravitational wave detectors, such as LIGO (US), Virgo (Europe), and KAGRA (Japan) are being constructed. We expect that in several years gravitational waves will be detected for the first time, and gravitational wave astronomy will be established.



近況

Kavli IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし



1月: リサ・ランドール博士の一般講演会



3月: 財務省より井藤主計官来訪



3月末日: 異動する事務職員と記念撮影



局所から大域へ リーマン幾何を超えた世界で

局所から大域へ

「木を見て森を見ず」とは局所的な所だけにとらわれていると全体が見えないことを戒める諺です。でも、本当にそうでしょうか? ひょっとすると、名探偵のような視点で木(局所)を観察すれば、森の形(大域)の“何か”は読み取れるかもしれません。

古典的な数学の時代では、小さなスケールで起こることや局所的な座標を用いて説明できることが主に研究されていました。現代の数学では、大きなスケールで起こることに関心の対象が拡がり、それに向けてさまざまな数学概念や手法が開発されてきています。しかし、一般には大域的な現象を理解するのは大変難しいことです。

幾何学において局所的な構造を指定したとき、「大域的な形としてはどの程度の自由度があり、どのような制約を受けるか?」という問いは

局所 \rightsquigarrow 大域的な形

というモチーフの典型的なものです。このモチーフは、とりわけリーマン幾何学の範疇で、20世紀の幾何学の大きな潮流となり発展を遂げてきました。一方、リーマン幾何学の枠組を超えた場合には、局所から大域への研究は、この大きな潮流に乗り遅れた感がありました。

「局所から大域」といっても、どのような局所的性

質に着目するかによって、それに関わる数学の分野が大きく異なります。

局所性として“均質”という性質に着目すると、リー群論や整数論との結びつきが強くなり、不連続群とよばれる離散的な代数構造が大域的な形を統制する主役になります。

リーマン幾何の範疇での不連続群の研究においては、1950年代以降、セルバーグ(Selberg)、ヴェイユ(Weil)、ボレル(Borel)、モストウ(Mostow)、マルグリシ(Margulis)等の華やかな活躍があり、¹ 対称空間・リー群論・整数論から微分幾何学・トポロジーにまたがる不連続群の研究が大きく発展しました。

1980年代の半ばごろより、私はリーマン幾何学の枠組を超えた空間に対する不連続群の一般理論を作ろうという試みを始めました。リーマン幾何とは対照的に、“自然な距離”が存在しない世界では、研究手法そのものも開発する必要があります。当時は興味を示す研究者は殆どおらず、孤独ではありましたが何をやっても新しい発見になりました。1990年代以降には、いろいろな分野の数学者もこの新しいテーマに参入し、(非可換)エルゴード理論・ユニタリ表現論・微分幾何学など数学の異分野と思いがけない繋がりも生まれてきています。国際数学会の2000年には、「(非リーマン幾何における)局所均質空間」というテーマが21世紀の新しい数学の挑戦課題の一つとして紹介

¹ A. Selbergは1950年にフィールズ賞、A. Weilは1994年に京都賞、A. Borelは1992年にBalzan賞、G. Mostowは2013年にWolf賞、G. Margulisは1978年にフィールズ賞、1995年にフンボルト賞をそれぞれ受賞しました。

され(文献[1])、その後もこのモチーフは深化し続けています。

本稿では、厳密さは多少犠牲にして数学の専門用語をできるだけ持ち込まず、リーマン幾何の枠組を超えた局所均質空間の大域幾何と、最近手がけ始めたスペクトルの研究(大域解析)の雰囲気伝えてみたいと思います。

不定符号の微分幾何学

擬リーマン幾何は、リーマン幾何や相対性理論の時空を記述するローレンツ幾何を特別な場合として含む概念です。その入り口を紹介しましょう。 $p+q$ 次元のユークリッド空間において、不等式

$$|x_1^2 + \dots + x_p^2 - x_{p+1}^2 - \dots - x_{p+q}^2| \leq r^2$$

で表される領域を擬球と言います。下図はユークリッド空間の球($(p,q)=(2,0)$)とミンコフスキー空間の擬球($(p,q)=(1,1)$)を2次元の場合に表示したものです。より一般に、符号 (p,q) の非退化な2次形式 $Q(x)$ を用いて $|Q(x)| \leq r^2$ と表される領域も擬球と呼ぶことにしましょう。

ユークリッド空間 \mathbb{R}^2



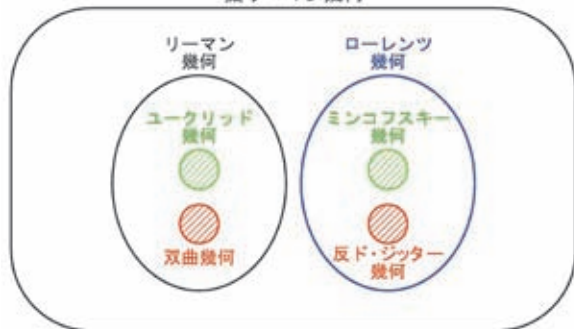
ミンコフスキー空間 $\mathbb{R}^{1,1}$



擬リーマン幾何では、局所座標で(正確には各点ごとに無限小のレベルで)このような擬球を尺度とする空間(擬リーマン多様体)を扱います。 $q=0$ の場合の空間がリーマン多様体、 $q=1$ の場合がローレンツ多様体です。

一般の擬リーマン多様体においても、勾配(grad)、発散(div)、ラプラシアン($\Delta = \text{div} \circ \text{grad}$)、曲率などの概念を定義することができます。

擬リーマン幾何



さらに、リーマン多様体、すなわち $q=0$ の場合には $Q(x)$ が正定値なので(無限小の)尺度から積算することによって2点間の距離を定めることができます。これとは対照的に、 $p,q \geq 1$ の不定符号の擬リーマン多様体においては、“自然な距離”は存在しません。

旅人は戻ってくるか?

地球は丸い。西方へひたすら進み続けた旅人はやがて東から戻ってくることでしょ。ところで、もし、旅人が地球の形や大きさという大域的なことを知らないとする、自分が元の地点の辺りまで再び戻れるかどうか知るすべはあるのでしょうか?

数学では空間の無限小レベルの曲がり方を曲率という量で表します。歴史を遡ると、曲率は19世紀にゲッチンゲン天文台長として測地学にも多大な貢献をした数学者ガウスが導入したものです。2次元の曲面に対しては、曲率と局所的な形には以下のような明瞭な関係があります。

曲率が正 \Leftrightarrow 局所的に凸または凹、

曲率が負 \Leftrightarrow 局所的に馬の鞍のような形。

高次元の空間の曲率には3種類あり、情報量の多い方から並べると、断面曲率、リッチ曲率、スカラー曲率となります。

曲率は大域的な形にどのような影響を及ぼすのでしょうか? リーマン幾何において「局所から大域へ」の理論の嚆矢となったマイヤー(Myers)の古典的な定理(1941)は(どんな次元であっても)「リッチ曲

率が1以上ならば、どの2点をとってもその距離は π 以下になる」と主張しています。地表の曲がり方(局所的な情報)から、地球の直径という大域的な量に関する情報が得られるというわけです。「局所的に凸に曲がっていれば、全体としても球のように閉じている」という定理は日常的な感覚とも合致しています。

一方、曲率が負の場合、あるいは、ローレンツ幾何において、一様に曲がった空間の中をひたすら進む旅人は元の場所に戻ってこられるのでしょうか? 次節から、“日常の感覚”では簡単に捉えられない不思議な世界のお話がはじまります。

曲がり方が均一な幾何

断面曲率が一定の擬リーマン多様体は、微分幾何のモデルとして重要な役割を果たすことから空間形と呼ばれます。曲率が一定という性質は局所均質性の特別な一つの例であり、また、空間形はその高い対称性から数学のさまざまな分野と結びついています。

リーマン幾何では、球面、ユークリッド空間、双曲空間が、それぞれ、曲率が正、零、負の空間形です。双曲空間はユークリッド幾何における平行線の公準が成り立たない非ユークリッド幾何の最初の例として、19世紀前半に歴史的な役割を果たしたことで知られています。断面曲率 -1 のリーマン多様体である双曲多様体の理論は、3次元の場合はクライン群の理論と等価であり、現在も活発に研究されています。

リーマン幾何の枠組を超えたもっとも簡単な場合であるローレンツ幾何では、ド・ジッター多様体、ミンコフスキー空間、反ド・ジッター多様体が、それぞれ、曲率が正、零、負の空間形です。

閉じた“宇宙”は存在するか?

局所的にはどの点においても一様な曲がり方をしている、しかも大域には閉じている空間は存在するのでしょうか?²

“凸に曲がっている”という概念を一般化した正の曲率の空間形では、次の定理が成り立ちます。

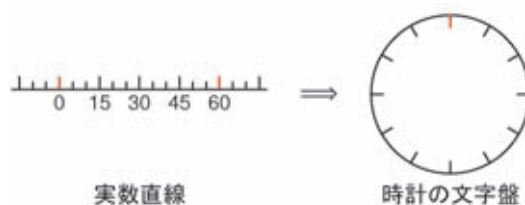
定理1 (1) (リーマン幾何) 必ず閉じている。

(2) (ローレンツ幾何) 決して閉じない。

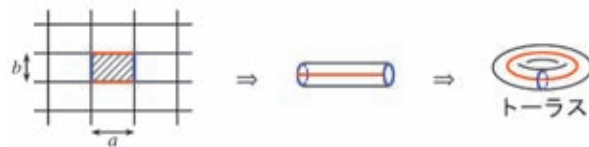
定理1(2)は、第一発見者の名前を取って、カラビ=マルクス現象と呼ばれています(文献[2])。

一方、負の曲率の空間形を普通に構成すると、無限に広がり、閉じていない形になってしまいます。これを“折り畳んで”閉じた形を作るためのアイディアについて、1次元と2次元のユークリッド空間で初等的に説明してみましょう。

実数直線は閉じていない図形ですが、60分で一周する時計の文字盤は閉じた図形になっています。実数直線で時刻を表しても、時計の文字盤で時刻を表しても局所的には同じ時を刻みます。このように、局所的には同じでも、大域的には異なる図形があり得るのです。



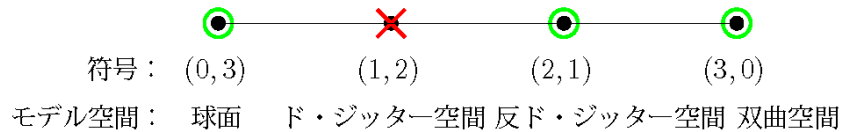
次に、同じことを2次元のユークリッド空間 \mathbb{R}^2 で考えてみます。水平方向にも上下の方向にも周期があるとなると、周期を表す長方形で平面を埋め尽くすようなタイル貼りをすることができます。この長方形の両端の点も一周で同一視すると、長方形の両端を貼り合わせて、トーラス(ドーナツの表面)という閉じた空間が得られます。



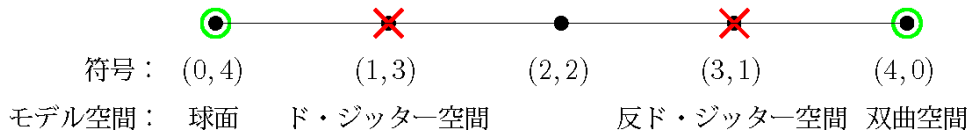
² 数学用語で厳密に言えば、「コンパクトかつ断面曲率が一定の擬リーマン多様体は存在するか?」と定式化できる

符号 (p, q) の不定計量, 断面曲率 $\equiv -1$ の閉じた空間形は存在するか?

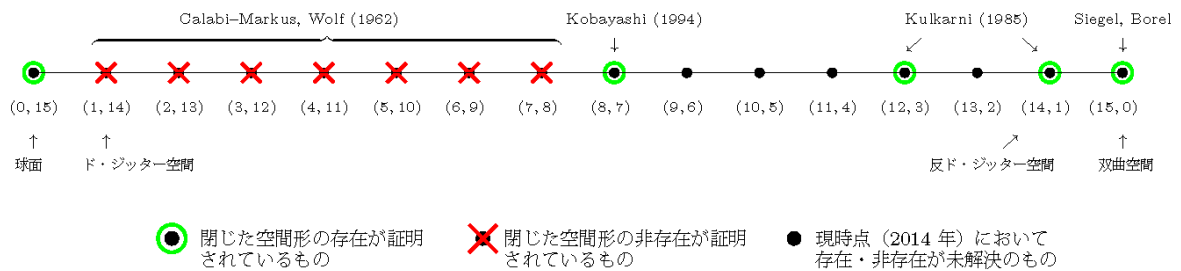
3次元の場合



4次元の場合



15次元の場合



これらの初等的な例の背後にある重要な原理は

A. 周期を表す代数構造 (不連続群 \mathbb{Z}^2)

B. (長方形による) タイル張り

です。一般の状況では非可換の構造が入ってくるので、はるかに難しくなりますが、AあるいはBに相当する構造をみつければ、「局所性を保ったまま、異なる大域的な形を生み出すことができる」と期待できます。

負の曲率の、閉じた空間形の存在問題については、次の定理が成り立つことが知られています。

定理2 (1) (リーマン幾何) どの次元でも存在する。

(2) (ローレンツ幾何) 奇数次元に限って存在する。

実際、定理2における存在証明は、Aの考え方で行列の中に整数点を見出す方法 (算術的部分群) によって与えられます。また、定理2(1)の場合には、モストウ、ヴィンバーグ (Vinberg)、グロモフ (Gromov) = ピヤテスキー・シャピロ (Piatetski-Shapiro) がBの考え方で負の定曲率の閉じた空間形 (双曲多様体) の別の構成法を与えています (非算術的部分群)。一方、ローレンツ計量の場合に、次元が奇数か偶数かの差異ができることは、「頭には必ずつむじが存在する」という定理の証明と同様にトポロジーの手法で論証されます。

定理1と定理2のいずれにおいても、「局所 \rightsquigarrow 大域」に関して、リーマン幾何とローレンツ幾何には著しい

違いがあることを主張しています。もっと一般の符号 (p, q) ($p \geq q \geq 2$) に対する擬リーマン幾何についてはどうでしょうか？カラビ=マルクス現象を一般化することにより、正の曲率の場合は閉じた空間形が存在しないことが証明されます。一方、負曲率の場合にはどのような整数 p, q に対して閉じた空間形が存在するかという問題は、まだ完全には解決していない難問です。部分的に解決した場合として、符号が $(4, 3)$ の7次元の場合や符号が $(8, 7)$ の15次元などの場合には閉じた負曲率空間が存在することが証明されています。

前頁の表では閉じた空間形の存在問題に関して何が現在知られていて何が未解決かを3次元、4次元、15次元の場合にまとめてみました(文献[4])。

剛性と変形

一つの領域構造の中に同種の局所幾何構造が唯一つしか入らないとき剛性定理が成り立つといえます。逆に、同種の幾何構造の入れ方に自由度があるときは、その自由度そのものを研究対象にすることができます(変形理論)。

リーマン幾何の範疇では、剛性定理が成り立つ状況が多いのですが、その例外として、閉じた曲面上には曲率が -1 のリーマン構造(双曲構造)で相異なるものが連続無限あることが知られています。これを記述するパラメータ空間はタイヒミュラー空間と呼ばれ、関数論・双曲幾何から弦理論などさまざまな分野に現れる重要な概念です。この場合には大域的な形を統制する不連続群は $SL(2, \mathbb{R})$ の離散部分群(フックス群)なので、タイヒミュラー空間はフックス群の変形をパラメータ付けしているという捉え方もあります。

不定符号の擬リーマン幾何では、リーマン幾何の範疇とは異なり、もう少し“やわらかく”なります。この発見を掘り下げた擬リーマン局所均質空間の不連続群の変形理論は、今後の発展のポテンシャルが高いと期待しています(文献[1])。

低い音は大きな楽器で スペクトル幾何

「物の形」を対象とする幾何学と、「その上の住人」(例えば、関数)は等価であるという壮大な視点があります。今では常識と言えるほど現代数学に溶け込んだこの視点は、代数幾何学をはじめ多くの分野で姿・形を変えて現れます。

そこで、同じ局所性をもつが、大域的には異なる幾何に対して、「その上の住人」はどのような差異があるか? という問を考えてみましょう。

張力が一定の弦では、弦を少しずつ長くすると音が段々と低くなります。これは、実数直線上で L を周期とするラプラシアン固有関数を考えたとき、周期が大きくなると固有値が小さくなるということに対応しています。例えば、三角関数 $f(x) = \sin(2\pi x/L)$ は周期 L をもち、

$$-\frac{d^2}{dx^2}f(x) = \frac{4\pi^2}{L^2}f(x)$$

を満たします。従って、周期 L が大きくなっていくと固有値 $4\pi^2/L^2$ は小さくなっていきます。

リーマン幾何でも同じ現象が成り立ちます。2次元の閉じた双曲多様体のラプラシアンの固有値を

$$0 = \lambda_0 < \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots$$

と小さいほうから並べてみます。このとき、双曲構造という局所的な構造を保ったままリーマン計量を連続的に変形すると、すべての固有値 λ_k ($k = 1, 2, \dots$) が動くことが知られています(文献[5])。すなわち、固有値はタイヒミュラー空間上の関数とみたとき、それは定数でありえないのです。

閉じた双曲多様体上の関数はポアンカレ上半平面上の関数でフックス群(不連続群)を周期とするものと同一視できるので、双曲多様体(リーマン幾何)ではこの例は、固有値が周期という大域構造に依存して変動する、ということがわかります。

形を変えても音が変わらない楽器

リーマン幾何学の枠組を超えた世界では、局所均質空間の“住人”たる大域解析は謎に包まれた未踏の地です。そこへ踏み入る第一歩としての研究の中で、次のような面白い現象を発見しました。

定理3 三次元の閉じた反ド・ジッター多様体では、ラプラシアン固有値で不動なものが無限個存在する。

この定理は“周期(大域的な量)が変わればすべての固有値が動く”という「常識」が成り立たないという現象をとらえています。なお、前節で述べた2次元の閉じた双曲多様体のように、標準的な閉じた反ド・ジッター多様体では、“動く固有値”も無限個存在します。

三次元の反ド・ジッター多様体を楽器に譬えれば、弦を長くしたり細くしたりしても、音程が変化しないで響き続ける“普遍的な音”が無限個あり、それと同時に、(常識通りに)変化する音も無限個あるような楽器なのです!

定理3で見出した新しい現象は、高次元の場合にも、また不定値ケーラー計量をもつ局所対称空間でも起こります。その一般理論は140ページに亘る大部の第一論文[6]で

- ・ 偏微分方程式・積分幾何学・非可換調和解析
- ・ 大域的な対称性を統制する不連続群の定量化

などを主な手法として証明しました。さらに

- ・ 無限次元の対称性の破れに関する分岐則の理論

を援用し、無限次元の表現論と局所均質空間の大域幾

何を橋渡しする第二論文を執筆中です。

さて、局所均質空間 $\Gamma \backslash G/H$ を舞台とした大域解析は、半世紀以上にわたって以下のような特別な場合には、数学の重要な分野として大きく発展してきました。

- ・ H がコンパクト(リーマン幾何)の場合 整数論における保型関数の理論(Γ は算術的部分群)
- ・ Γ が無限群ではなく、単位元のみ自明な場合
ゲルファント (Gelfand), ハリッシュ・チャンドラ (Harish-Chandra), 大島利雄...と系譜が続く非可換調和解析学

一方、本稿で扱ってきた不思議な幾何は、局所的にはリーマン幾何学の枠組を超え(H はコンパクトではない) 大域的には不連続群 Γ が無限群であるということももっと広い設定を舞台にしています。この不思議な幾何の“住人”を対象にした、スペクトル解析はどのような謎を秘めているのでしょうか? この未踏の地の面白い将来を示唆するような遠い彼方のきらめきが、ちらっと見え始めたように感じています。

文献

- [1] 数学の最先端・21世紀への挑戦, 「非リーマン等質空間における不連続群論」(T. Kobayashi 第1巻) 「剛性理論における問題と予想」(G. Margulis 第6巻) 原著: Springer-Verlag, Amer. Math. Soc. (2000), 邦訳: 丸善出版.
- [2] E. Calabi and L. Markus, Relativistic space forms, Ann. of Math. (1962).
- [3] T. Kobayashi, Proper action on a homogeneous space, Math. Ann. (1989).
- [4] T. Kobayashi and T. Yoshino, Compact Clifford-Klein forms –revisited, PAMQ (2005).
- [5] S. Wolpert, Disappearance of cusp forms in special families, Ann. of Math. (1994).
- [6] F. Kassel and T. Kobayashi, Poincaré series for non-Riemannian locally symmetric spaces, 141 pp. arXiv: 1209.4075.



Interview

リサ・ランドール教授 に聞く

聞き手: 向山 信治

科学に対する考え方を改めてほしくって一般向けに本を書く

向山 インタビューの時間を取っていただき、ありがとうございます。まず、2冊目の本¹の日本語版が出版されたことをお喜びします。翻訳のお手伝いをしましたが、とても楽しめました。

ランドール とても重要な仕事をしていただいて、感謝しています。翻訳者は実に一生懸命やってくれましたが、勿論難しい内容なので、監修してくれる物理学者を得たことは本当に幸いでした。

向山 そうですね。この本の翻訳は長い時間かかった大変な仕事だったことを知っています。書くには、当然もっと大変な努力が必要だったに違いありませんね。

ランドール その通りです。

向山 どうやってその時間を捻出したのですか？

ランドール 実際、執筆にはものすごく時間がかかりました。

リサ・ランドールさんは、ハーバード大学の Frank B. Baird, Jr. 教授を務めています。1987年にハーバード大学から Ph.D. の学位を取得、1991年にマサチューセッツ工科大学 (MIT) 助教授、1995年、同准教授。1998年から MIT 教授 (2001年まで) とプリンストン大学教授 (2000年まで) を兼務。2001年から現職。2008年より米国科学アカデミー会員、2012年よりヨーロッパ科学・芸術アカデミー会員、その他多くの著名な学協会の会員を務めています。2007年にはタイム誌の「世界で最も影響力のある100人」に選ばれました。

ですから、あきらめざるを得なかったこともあって、やりたいことを何でもするという訳にはいきませんでした。旅行中も書く機会があれば大抵書いていました。米国科学アカデミーの会合は重要なのですが、その席で、私を見たブルーノ・ズミノから「本を書いているの?」と言われたことがあったとさえ記憶しています。実際そうだったので、その時はショックでした。基本的に、書ける時はいつでも書こうとしています。そうしたところで、やはりすごく時間がかかります。それで、ちょっとでも時間があれば書かなければならないわけです。書くことがとても楽しいときもありますが、一方、書くこと自体が大きな目標のようなときもあります。何か一つのアイディアについて本を書くのは余り大変なことではありませんが、私にはそれほど興味はありません。それで、多くのアイディアを著書に盛り込んで全体として統一的な意味があるようにしようと思います。そうすると大変ですが、やりがいがあるものになります。一章一章がかなり大変な上に、全体のストーリーをどうやって統一的にまとめるか考えなければなりません。そういったわけで、本当にすごく時間がかかりました。

向山 最初の本を書き終えてか

¹ 宇宙の扉をノックする : NHK 出版、2013年11月

らすぐに2冊目²に取りかかったのですか？

ランドール いいえ、実のところしばらくは本を書こうなんて思いませんでした。初めは、単に物理だけの問題に限らず勿論、私もLHCとかヒッグス粒子とか、そういったこと全てにわくわくしますが もっと広いサイエンスの紹介の仕方にある種のフラストレーションを感じたことが動機だったと思います。新聞を読み、論争をたどり、少し旅行した後で、サイエンスに興味をもつ人たちでさえサイエンスがどのようなものか本当に理解しているのかどうか、はっきりしないことがありました。それに、最初の本を書いた後、私はいろいろなことを質問されました。それでこの2冊目の本がとても良い本になるだろうというアイデアを得て、書き始めたわけです。しかし、実際書き始めたのは、少なくとも数年経ってからでした。

向山 では、2冊の本が一般の人たちのサイエンスに対する考え方を変えたと思いますか？

ランドール 理解してくれた人たちもいると思います。でも多くの人たちはとても頑迷で、独自の考え方をもっています。私たちが考えていることを口に出して言わなければ、彼らは注意を払おうとはしないか、そんな

ことは全て知っていると思っています。私は中立的な意見の人たちに語りかけるように、そうすることによって人々が互いに話し合えるように、随分努力しました。それを分かってくれた人たちもいます。でも、まだまだ道は遠いと思います。物事の決まり方で見た場合、アメリカ人は極端な考え方ははるかに好み、中庸な考え方はそれほど好みません。しかし、私はとにかくそれを追究しました。それが重要だと考えるからです。物事が変わるにはまだ時間がかかると思います。でも、多分少しは変わっているのかもしれませんが。この数年、以前より少しは科学的に考えることに注意が払われるようになったと思います。多分、役に立っているでしょう。

向山 ええ、忍耐が必要ですね。

ランドール ええ、でもいつまでも待っているわけにはいかないかもかもしれません。適切に実施しなければならないことが山ほどあるのですから。

向山 その通りですね。でも、あなたの日本語版の本とテレビ出演、その他が（日本の）一般の人たちのサイエンスに対する

向山信治さんはKavli IPMU准教授で、専門は理論物理学および宇宙論です。2001年から2004年にハーバード大学に滞在し、その縁でランドールさんから著書²の日本語訳監修を依頼されました。

² ワープする宇宙 5次元時空の謎を解く : NHK出版、2007年6月





考え方を換え、サイエンスに興味をもつ人をもっと増やすことを期待しています。

ランドール そうなれば良いですね。ありがとう。私も期待しています。

ワープした余剰次元のアイデアを得て興奮

向山 では、サイエンスに話題を換えましょう。あなたのブレーンワールド・シナリオとワープした余剰次元³の理論は今や非常に有名で、標準型を超える物理のシナリオとして最も有望なものの一つと考えられています。しかし、最初あなたがラマン・サンドラムとこの模型を提案した時に考えたことを伺いたいのですが、この模型が大きな注目を集めるという確信がありましたか？

ランドール 今までそういう確信をもったことはありません。良いアイデアだとは思いました。ただ、私たちは、ある意味で「どうして今までだれもこれに気がつかなかったのだろう？」といったように感じていたので、それを確認したいと思いました。でも、結構興奮したとは思いますが、関心を集めるかどうかといったような意味で何か考えたかどうかは覚えがありません。実

際、最初は余り関心を集めなかったと思います。

向山 本当ですか？

ランドール 「単に別の余剰次元の模型だ」くらいに思われました。そうではないのだ、ということ私たちは明確にしなければなりませんでした。最初ラマンがあちこちで講演し、それから私も講演を開始しました。そうしてやっと他の研究者達がこの模型の研究を始めるようになったと思います。その直後にマーク・ワイズが彼の論文でこの模型を「ランドール-サンドラム」と呼んでくれました。これが私たちにとってとても良かったことは、私たちの模型は違う種類の模型であるということをはっきりさせてくれたことです。実のところ、必ずしも誰もがすぐにそうだと認めたわけではなかったと思います。そう認めてくれた人たちはいましたが、すぐに知られるようになったかどうかは分かりません。

向山 そうですか。

ランドール しかし、私たちはそれが違う模型だということをも最初から分かっていたのでとても興奮したのだと思います。

向山 分かりました。多分他の人たちには新しすぎたのではないのでしょうか？

ランドール そうですね、よく分かりませんが。それに、多分、双対性のために既に知られているものに過ぎないのではないかと受け取られたのかもしれませんが。私たちが本当に新しいことをしたのだと他の研究者に認められるまでには少し時間がかかったと思います。ひょっとすると違うかもしれませんが、多分私はそう感じていました。兎に角、私たちが熱中したことは確かです。ただ、ちょっと変わっていたのは、私たちは「アノマリー・メディエーション」と「隔離」⁴に関する論文を仕上げようとしているところでした。

向山 そうですね。

ランドール それで、その論文が片づくまで新しい模型について論文を書くのを遅らせたのです。

向山 本当ですか？

ランドール 私たちはとても興奮していたのですが、他のことも完成させたいと思っていました。また全ての側面を理解していることも確認したかったし、また無限大の余剰次元も研究していました。ですから、同時に3つの論文を考えていました。全部非常に興味深いものでした。

向山 その通りですね。実際、あなたは似通った設定に基づく3つの異なった模型を作った訳です。似通った設定からほとんど同時に異なるアイデアを得たわけですが、どうやって考えついたのですか？すごいことですね。

ランドール そうですね、ある意味で数学からアイデアが浮かびました。その理由というのは、「隔離」のシナリオとこのメトリックで模型を作ろうと一生懸命やっていたこと、アノマリー・メディエーションのシナリ

オでは超対称性の破れの伝達⁵のどのように起こるのか、また「モジュラス」⁵が情報を運ぶのか、ご存知のように微妙な点があること、それから摂動の最低次の項が存在しない場合に成り立つシナリオを作りたいと思っていたことです。やっかいな仕事でした。私たちは超対称性が成り立つのは別のブレーンでなければならぬことに気がつきました。しかし、幾何学に取り組んでいる途中で指数関数に気がついたのですが、階層性問題を長年考えてきた私たちのような人間にとっては、注目すべきことでした。勿論お分かりですよ。でも、そのメトリックで調べ始めたら、非常に驚いたことに2つのブレーンの一方は無くても良いかのように見えて、私は混乱してしまいました。

向山 ええ、とても驚くべきことですから。

ランドール 実際、私からこれを聞いた人たちは、無限大の余剰次元は許されないこと、また、それを回避する理論的理由が非常に微妙であるため、間違っているに違いないと思ったようです。

向山 そうです。あなた達の仕事以前は、ほとんど定理のよう

³ ブレーンワールドとは物質と力が「ブレーン」と呼ばれる膜の表面に閉じ込められている物理的設定。ワープ（歪曲）した時空の幾何とは、一つの方向（次元）ではその位置により全体的なスケールが変わるが、それ以外の方向（次元）では平坦であるような時空。余剰次元とは人間が感知できる4次元時空以外の感知できない次元であり、余剰次元方向で高次元時空の幾何がワープしている場合、ワープした余剰次元と呼ぶ。

⁴ 「アノマリー・メディエーション（仲介）」は、量子効果による超対称性の破れの伝達、「隔離」は異なる種類の素粒子が余剰次元の中で物理的に分離していることを意味する。

⁵ 「モジュラス」とは超弦理論に存在するスカラー場であり、超弦理論特有の自由度。

に思われていました。

ランドール 全くその通りです。あなたの言うように、実際、定理だと思われていました。それを回避する方法は非常に微妙で、そういう微妙なことが沢山ありましたから、私たちは何か見落としていないか確認したかったのです。

向山 そうでしょうね。

ランドール しかし、実際はうまくいきました。その式から階層性が得られ、また一つのブレーンを除去できることが示されました。しかし、次にそれが何を意味しているのか理解の難しい所がありました。それを積極的に考えようとしたと言うよりは、私たちはこういった大きな問題を日頃考えていたからなのですが、しばらくしてその意味がはっきりしました。

向山 なるほど。

ランドール ご存知のように、プランク質量 M_{Planck} について解いてみると、大雑把に言えば2番目のブレーンの位置には無関係です。余剰次元について考えてみたらこれは信じ難いほど驚くべきことです。それを理解したことで第3の論文となりました。

向山 分かりました。現在、あなた達のシナリオ、つまりランドール-サンドラム・シナリオは超弦理論で実現され得ると考えられています。私はKKLT⁶がワープした余剰次元の超弦理論によるある種の実現であると思っています。しかし、ある時点ではこの種のワープした余剰次元が超弦理論によって実現され得るのか、不明でした。実際、もし私の記憶が正しければ、ある種のno-go定理(否定的証明)

がありました。その時、どんなことを感じましたか？

ランドール 一時私はこう言っていたと思います。超弦理論から多くの興味深い成果が得られていますが、全てを第一原理から理解できるようになると考える傾向があると思います。私が模型作りが重要だと考える理由(実験との一致を調べることに加えて)の一つは、それが面白ければ、皆が一生懸命考えるようになるということです。

向山 正にそうですね。

ランドール 超弦理論で既に全て分かってしまったというのが本当なのか、あるいはまだ面白いことを見逃していることがあるかも知れないのか？ 私は超弦理論でできることは全て理解してしまったという可能性は、まあ低いだろうと思っていたので、余り心配しませんでした。また、ワープした余剰次元は、超弦理論で導くということが重要なものではありません。重要なのは模型そのものであって、私たちはそれを調べてみたいと思ったのです。私は、プランクスケールからTeVスケールに至る途中では多くのことが起こり得るし、既に全部を理解してしまったなどということはあるはずがないと考えています。

向山 分かりました。

ランドール 以前、超弦理論では正の宇宙定数は不可能だとも言われていたと思います。

向山 そうですね。

ランドール 私が提唱したことは色々ありますが、それがうまくいくかどうか見極めるには、もっと一生懸命考えなければなりません。ある意味、模型というものは、「何か別の方法はないのか」と少し力を入れて調べる意欲を刺激するものです。私はボトムアップで模型作りをし



ている人たちとも、トップダウンで研究している人たちとも、この考え方を共有したものです。共通の立場を見出そうとしました。

今後の課題は？

向山 なるほど、それは素晴らしいですね。さて、理論物理学で正に最重要問題の一つである階層性問題に対して、考え得る一つの解答を提案された訳ですが、次の研究の目標を教えてください。どんな問題を解きたいと思っているのですか？

ランドール そうですね、本当に正しいかどうかは分かりませんが、それに、ご存知の通り私たちが解いた問題には色々な側面がありました。しかし、今現在はダークマターについて考えています。なぜなら、宇宙論的、天体物理学的、素粒子物理的観測の組み合わせでダークマターの正体を突き止めるためには、その全てを考えることが必要だからです。今日、セミナーで話しますが、私たちはダークマターの新しい模型をつくりました。ダークマターについては、未だ調べなければならないアイディアが実に沢山あって、検出方法が違ってくる可能性があり

ます。それが一つです。また、私たちのシナリオが、本当に階層性問題に一つの答えを与えたのかどうか考えて直しています。まだ本当に正しい答えかどうかは分かりません。ですから、ここでもまだ考えるべき問題があります。

あなたは最近何を考えていますか？

向山 まだ宇宙定数の問題に興味をもっています。

ランドール そうですか。

向山 宇宙定数問題については、以前一緒に研究しましたね。ある重要な側面に取り組む模型を構築しましたが...

ランドール 完全なものではなかった...

向山 本当の答えではありませんでした。

ランドール そうでしたね。

向山 その方向を追究したいのですが、しかし同時に...

ランドール 別の方向では何を？

向山 まだはっきりしているわけではないのですが、宇宙定数問題に対する挑戦は私の研究の長期的目標のようなものです。今現在はダークエネルギーに興味があります。

ランドール 似通った問題ですね。

向山 その通り、互いに関連し

⁶ S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde, and P. Trivedi, *Physical Review D* 68 (2003) 046005

ています。結局は宇宙定数問題を解決することが必要で、それからダークエネルギー問題に取り組まなければなりません。

ランドール 恐らくそうですね。

向山 それが私の直感ですが、今すぐ宇宙定数問題に取り組むのはまだ難しすぎます。それで今しばらくはダークエネルギーを考えようというのが私の姿勢です。

ランドール 分かりました。

向山 さて、LHCに戻って、ヒッグス粒子が発見されたので、次は標準模型を超える新しい物理の発見が期待されています。あなたの視点では、何が最もエキサイティングなシナリオですか？

ランドール そうですね、勿論グラビトン（重力子）が見つかれば嬉しいですね。しかし、加速器のエネルギーが低すぎるかも知れず、いずれずっと高いエネルギーの加速器がほしくなることが本当に心配です。というのは、統計的に言えば次の加速器で新しい物理に届く可能性は余り高くなさそうだからです。既に 8 TeV に達しているのに、現在目指しているのはたった 13 から 14 TeV なので、それほど余裕がありません。

向山 そうですね。

ランドール それが懸念されます。勿論、この加速器が何かを発見し、私たちに何が起きているかを語ってくれるなら、それが何であれとてもエキサイティングなことでしょう。当然、新しい発見を期待しています。

日本の若者へのメッセージ

向山 分かりました。今回で日本訪問は3回目か4回目と思いますが、Kavli IPMU には初

めてですね。

ランドール そうです。

向山 日本のサイエンスにどんな印象をお持ちですか？

ランドール 非常に優れた人たちがいます。そういう中から、あなたのように一時的であったとしてもアメリカに来る人たちがいます。それはしっかり続いてほしいと思います。私の著書について言えば、2冊目は出版されたばかりで、まだ店頭に並んでいませんが、少なくとも最初の本には大変興味をもってもらえて、とても良かったと思います。日本の読者は世界でも一番科学に興味をもっている部類に属する人たちで、非常に結構なことです。

向山 サイエンスの面では、私は特にKavli IPMUにいることを楽しんでます。ここでは違う分野の研究者の間でのコミュニケーションが可能です。

ランドール Kavli IPMUの研究棟はここだけですか？

向山 他の研究所との共有ですが、第2研究棟があります。

ランドール 他の研究所とは？

向山 隣の建物が宇宙線研究所で、反対側には物性研究所があります。

ランドール 他の研究所とは何か交流がありますか？

向山 時々向こうのセミナーに参加する人がいますし、向こうからもこちらに来ます。宇宙線研究所にはKavli IPMUに併任している人たちがいます。また、東京大学の本郷キャンパスにある物理学教室とも交流しています。

ランドール 大分遠いのではないですか？

向山 ええ、大分遠いのですが、通常私は毎週月曜日のセミナーに出ています。時々は向こうからこちらに来ますし、また、時々

東京圏の他の大学との合同セミナーも行います。ボストンでも似たようなことをしていたと思いますけれど...

ランドール 以前はそうでしたが、最近は余りしていません。忙しいためだと思います。ここでは随分セミナーがありますが、講師は日本人ですか？ それとも外国人？

向山 半々だと思いますが、外国からの方が多いかもしれません。セミナーは英語で行われます。

ランドール それは結構なことですね。

向山 ハーバードでは日常の雰囲気がとても刺激的で、多くのセミナー等があったと記憶しています。

ランドール ええ、今でも活発にやっています。ここでも研究上の交流は盛んですか？

向山 はい。

ランドール それは素晴らしい。

向山 最後に日本の若者達に何かメッセージを頂けますか？

ランドール サイエンスに本当にわくわくしてほしいし、自ら考えることに夢中になってほしい。勿論、そのために他の人たちがしていることを理解しないということにはならないように、驚くような素晴らしいことがあればそれから良い影響を受けて学んでほしい。また、将来も日本が順調であることを期待しています。

向山 どうもありがとうございました

ランドール どういたしまして。

Our Team

奥村 哲平

おくむら・てっぺい 専門分野:理論物理学(宇宙論)

博士研究員

宇宙のエネルギー組成の約70パーセントを占め、宇宙の膨張を加速させている暗黒エネルギーの性質を理解するために、宇宙の大規模構造を研究してきました。最近、銀河サーベイから観測される銀河の重力クラスティングの情報から暗黒エネルギーの情報を正しく引き出すための理論モデルの構築を行っています。今後はKavli IPMU が加わっているSuMIRe プロジェクトという、すばる望遠鏡を用いた大規模な銀河サーベイ



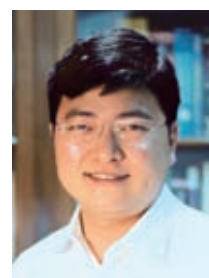
を念頭に置いて、現在最大の3次元銀河宇宙地図であるバリオン振動分光サーベイ(BOSS)の観測データを用いた研究を行う予定です。

ウィプー・ルジヨーパカーン

Wiphu Rujopakarn 専門分野:理論物理学

博士研究員

私は銀河の進化について、すなわち、銀河がどのように星を形成したのか、また銀河がどのように集まってきたのか、について研究してきました。新たな電波望遠鏡やミリ波望遠鏡の登場によって、この進化に関する統一的描像に向けての進展の速度が上がっています。それは若い銀河の集積のピーク、赤方偏移1 ~ 4で一般的な厚いダストを通して、星形成とガスの降着による超巨大ブラックホール形成の相互関係を明らかにするための観測が可能となったためです。私は、Kavli



IPMUの研究者チームに参加し、進行中のプロジェクトと協力してこの波長領域を研究することを楽しみにしています。

Our Team

International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN13)

横山将志 よこやま まさし

東京大学大学院理学系研究科准教授、Kavli IPMU 科学研究員

1998年にスーパーカミオカンデ実験によって発見されたニュートリノ振動は、素粒子標準模型を超える物理現象としてこれまでに確立した唯一の実験結果です。過去10年以上の間に、ニュートリノ振動の研究は素粒子物理の中心的課題の一つとしてめざましい進展を遂げてきましたが、ニュートリノの性質にはまだまだわからないことが多く残っています。

2011年から2012年にかけて、Kavli IPMUも参加しているT2K実験による電子ニュートリノ出現の発見や、複数の原子炉実験による電子型反ニュートリノ消失の発見が報告され、最後まで測られていなかった混合角 θ_{13} の値がついに決定されました。この画期的な成果により、ニュートリノ振動の研究は次の大目標である、CP非対称性や質量階層構造の解明を目指す新たな時代に入りました。

非常に反応しにくいニュートリノの研究には巨大な検出器が必要となりますが、上記の成果を受けて、ニュートリノの性質のより詳細な研究を行うために、さらに大きく高性能な次世代の測定装置を建設するための議論が世界中で活発になっています。日本で計画が進んでいる100万トンの水チェレンコフ検出器、ハイパーカミオカンデもそのひとつです。そのような大型の

検出器が実現されれば、大統一理論で予言されている核子崩壊の探索にも優れた感度を持つほか、ニュートリノを使った宇宙物理など、幅広いサイエンスが可能となります。

“International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors”(略称NNN)は、核子崩壊探索およびニュートリノ研究のための次世代の大型測定器計画の実現に向け、世界中の研究者が集まって議論することを目的として、1999年からほぼ毎年開かれている国際研究会のシリーズです。14回目となる今年のNNNは、14ヶ国から約120人の研究者が参加して、2013年11月11日から13日までKavli IPMUで開催されました。

35件の講演と30を超えるポスター発表があり、次世代実験で目指すべき物理の理論的背景から、現行実験の結果や今後の展望、計画中の次世代実験により期待される感度の見積もり、測定器技術、強力なニュートリノビームを作るための加速器やビームラインの開発状況にいたるまで、様々なトピックに関し発表がありました。3日間にわたり白熱した議論が続き、次世代の実験に向けアイデアが交換されました。

開催にあたっては、Kavli IPMUのスタッフの皆様にはたいへんお世話になりました。特に、宇治田理恵さんには準備・運営のあらゆる場面で助けていただきました。この場をお借りして感謝の意を表します。



SUSY: Model-Building and Phenomenology

松本重貴 まつもと・しげき

Kavli IPMU准教授

2013年12月2日から4日にカブリ数物連携宇宙研究機構で開催された研究会“SUSY: Model-Building and Phenomenology”は大成功を収めたと言えます。この研究会は超対称模型の構築とその現象論研究を議論することを主眼に据えたもので、以下の理由によりその開催が渴望されるものでした。まず始めに大型ハドロン衝突型加速器実験LHCにおいて発見された新粒子とそれに続く性質の解明により、この粒子が素粒子標準模型におけるヒッグス粒子であることが強く示唆されたこと。二つ目がLHCにおける新物理探索においてシグナルが発見されず超対称模型に非常に強い制限が得られたこと。最後に暗黒物質検出実験やフレーバー物理に関わる実験においてもシグナルが発見されなかったこと。以上の実験事実によりLHC以前に提唱された

数多くの超対称模型が排除され、これから新しい実験事実と無矛盾でかつ電弱スケールに関わる“自然さ”の問題にも言及する新しい超対称模型の提唱が必要となりました。

これらの問題は12の招待講演と7の依頼講演において当然言及され深く考察されました。研究会自身はカブリ数物連携宇宙研究機構の村山機構長の講演で始まり、まず新物理模型（超対称模型）の構築に関し重要なトピックが広くそして分かり易く概観されました。そしてこれらのトピックは続く講演で更に深く掘り下げられ、議論されました。具体的には、既存の模型を微調整の問題から深く議論したGraham Ross氏の講演、フォーカス・ポイントシナリオについて議論した横崎氏の講演、最小超対称模型におけるヒッグス粒子の質量を3ループで計算した結

果を報告したPhilipp Kant氏の講演、高い超対称スケールの模型について言及したJoshua Ruderman氏の講演、Rパリティの破れを伴う超対称模型に関するTomer Volansky氏の講演、超対称模型の予言する初期宇宙像について議論した高橋氏の講演、そしてPure Gravity Mediation Model（2012年のカブリ数物連携宇宙研究機構年次報告書参照）について議論した伊部氏の講演などが挙げられます。またLHCのアトラスグループより山本氏と金谷氏に来ていただき、超対称模型のシグナル探索に関する現状と将来における見積みについて講演していただきました。さらにPyungwon Ko氏とMikhail Shaposhnikov氏は超対称模型に代わる他の模型について講演し多くの注目を集めました。これらの講演を通じ、研究会の参加者は超対称模型（及びその他の模型）の現状について理解を深め、さらに将来においてこの分野の研究をどのように進めるべきかの手がかりを得ることが可能となりました。

本研究会はもともと規模の小さいものを予定していましたが、蓋を開けると参加者の人数は当初の予定を大幅に超える事態となりました。この事実は本研究会のトピックが非常の多くの素粒子現象論の研究者から最も大事なものであると捉えられており、近い将来に再度カブリ数物連携宇宙研究機構で同様な研究会を開催することが非常に重要になると思われます。



研究会「原始形式とそれに関連する諸課題」

齋藤 恭司 さいとう きょうじ

Kavli IPMU 主任研究員

表記の研究集会（組織委員：堀健太郎、Changzheng Li、Si Li、齋藤恭司）が2月10日－14日にKavli IPMUにおいて開催されました。研究会は数学と物理学にまたがるテーマであるミラー（鏡像）対称性予想の、ある現状を反映するもので、広範な参加者を得て活発な討論が行われました。以下に、その歴史的背景を含む研究会の概要を述べます。

古典的な楕円積分論をモデルとしながら、原始形式とその周期積分の理論が導入されました（K. Saito 1983）。ここで原始形式とは、ある開多様体上に高々有限個の臨界点をもつような関数 f が与えられたときに、その f の普遍変形族 F を考えて、その F の定まる全空間上で定義される相対次数が最高の微分形式の、あるクラスのことです。すると、 F の等高面へ原始形式の剰余類である微分形式を取り、それを F の消滅サイクル上で積分することにより高次元の周期積分の理論（楕円積分論の一般化）が構成されるのです。より詳しくは、原始形式は高次剰余理論から定まる、無限個の双線形方程式系を満たすことを要請します。

原始形式はKavli IPMUにおけるMath-StringセミナーやTopological Stringセミナーにおける研究テーマとなっています。それは以下に述べるように、元来は数学の理論であった原始形式の理論が、物理の量子場の理論においては関数 F をスーパーポテンシャル関数としてもつLandau-Ginzburg

理論の複素幾何学的側面（B-モデル）を記述するものだからです。即ち、位相的な場の理論におけるミラー対称性の立場から見ると、原始形式の理論はシンプレクティック幾何的側面（A-モデル）におけるコンパクトケーラー多様体上に定まるGromov-Witten理論（1990）やLandau-Ginzburg軌道上に定まるFan-Jarvis-Ruan-Witten理論（2007）などの他の理論にミラー対称なB-モデル的対応物であると考えられるからです。

このことは厳密には次の様に定式化できます。まず、原始形式はその定義より関数 F の変形のパラメータ空間に平坦構造と呼ばれる微分幾何的構造（ある種の可積分条件を満たすような平坦計量と接空間上の環構造の組のこと、それは後にフロベニウス多様体構造と公理化される：Dubrovin 1990）を定め、その結果、その構造の母関数となるプレポテンシャル関数がパラメータ空間上に定義されます。するとミラー対称予想の一つの数学的に厳密な定式化は、「**原始形式から得られたプレポテンシャル関数はそのミラー側（即ち、Gromov-Witten理論やFJRW理論）から得られたプレポテンシャル関数と一致する。ここで、パラメータ空間の同一視はミラー写像と呼ばれ、平坦座標系を用いることにより達成される**」ということを問うものです。

しかし、このようなミラー対称予想の検証は近年に至るまで達成されていませんでした。それは、原始形式

は理論的に存在することは知られていましたが、その具体形は単純特異点と単純楕円特異点の二つの場合（K. Saito 1983）以外に知られていなかったからです。それらの古典的な場合について、ミラー対称性予想は近年（単純特異点の場合 Fan-Jarvis-Ruan 2007, 単純楕円特異点の場合 Krawitz-Shen 2011, Milanov-Shen 2012）検証されました。特に、楕円特異点の原始形式の理論については、パラメータ空間の点の取り方に依りて、その近傍ではGromov-Witten理論にもFJRW理論にもミラー対応することが観察されています。

昨年には原始形式とそのミラー対称性を巡って次のような進展が見られました。

- 1) トーリックな場合におけるノビコフ環上（即ちシンプレクティック側）の原始形式の構成に向けて（Fukaya-Oh-Ohta-Ono）
- 2) 多重ベクトル場を用いて原始形式とBCOV理論との統一的な扱い（Li-Li-Saito）
- 3) 原始形式の摂動論的構成（Li-Li-Saito）
特に3) の応用として
- 4) セントラルチャージが1より大なる場合を含む広いクラスの特異点に対する摂動的なプレ・ポテンシャルの決定が可能となり、広範なミラー対称性の検証が行われたこと（Li-Li-Saito-Shen）。

これ等の最近の進展を踏まえて、

本研究会が開催されました。研究会は

A. 3つの基本講義

- Lecture I (given by K. Ono, H. Ohta, and K. Fukaya): Frobenius manifold structure and Lagrangean Floer theory for toric manifolds
- Lecture II (given by T. Jarvis): Introduction to FJRW-theory and a mathematical approach to the Gauged Linear Sigma Model
- Lecture III (given by S. Li): LG-model via Kodaira-Spencer gauge theory

B. 10の研究講演

- S. Barannikov: On the non-commutative Batalin-Vilkovisky formalism and EA matrix integrals
- A. Takahashi: From Calabi-Yau dg categories to Frobenius manifolds via primitive forms
- K. Hori and M. Romo: The parameter delta
- H. Fan: Analytic construction of

quantum invariant of singularity

- Y. Zhang: On the genus two free energies for semisimple Frobenius manifolds
- A. Losev: K. Saito theory of primitive form, generalized harmonic theory and mirror symmetry
- H. Iritani: Gamma Conjecture for Fano manifolds
- Y. Shen: Mirror symmetry for exceptional unimodular singularities
- T. Milanov: The phase form in singularity theory
- D. Pomerleano: Deformation theory of affine symplectic manifolds

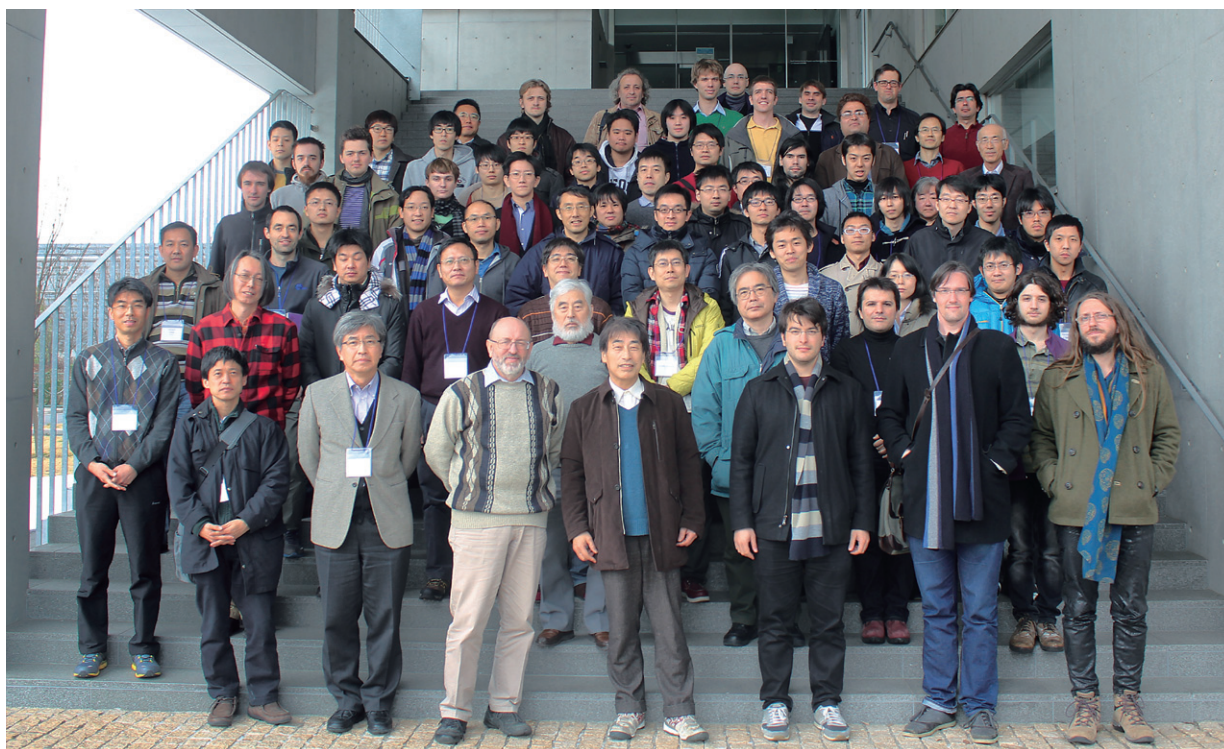
C. 7のショートコミュニケーション

- Y. Shiraishi: On Weyl group and Artin group associated to orbifold projective lines
- N. Priddis: A Landau-Ginzburg/Calabi-Yau correspondence for the mirror quintic
- M.R. Rahmati: Hodge theory of

isolated hypersurface singularities

- B. Bychkov: On the number of coverings of the sphere ramified over given points
- M. van Garrel: Integrality of relative BPS state counts of toric Del Pezzo surfaces
- S. Sugiyama: On the Fukaya-Seidel categories of surface Lefschetz fibrations
- A. Bondal and I. Zhdanovskiy: Critical points of a functional and orthogonal pairs of Cartan subalgebras
により構成されました。

本研究会の参加者はアジア、ロシア、ヨーロッパおよびアメリカを含む世界各地から80名を超え、極めて活発な議論が行われました。研究会は理論の現状を示す一方、理論の更なる発展方向、例えば 1) ミラー対称性の幾何学的理解に向けてや、2) 原始形式の圏論的構成に向けて、などを示唆する非常に有益なものでした。



戸田幸伸特任准教授、2014年度日本数学会賞春季賞受賞

Kavli IPMU 特任准教授の戸田幸伸さんが「代数多様体の導来圏の研究」の業績により2014年度日本数学会賞春季賞を受賞しました。日本数学会賞春季賞は1973年に創設された彌永賞を前身として1988年に創設された賞で、優れた業績を上げた40歳未満の日本数学会会員を表彰するものです。学習院大学で開催された日本数学会2014年度年会中の3月16日に授賞式が行われました。



戸田幸伸さん

J-PARC ニュートリノビームグループ、2013年度諏訪賞受賞

J-PARC ニュートリノビームグループ（代表：小林隆 高エネルギー加速器研究機構教授）がT2K実験での「世界最高強度ニュートリノビーム施設の実現による電子ニュートリノ出現現象発見への貢献」により平成25年度諏訪賞を受賞しました。受賞グループには Kavli IPMU 特任助教のマーク・ハーツさんも加わっています。諏訪賞は、公益財団法人高エネルギー加速器科学奨励会により、高エネルギー加速器科学の発展において長期にわたる貢献など特に顕著な業績があっ



マーク・ハーツさん

たと認められる研究者・技術者・研究グループに授与されるもので、2014年2月17日に東京のアルカディア市谷で表彰式が行われました。

リサ・ランドール博士の講演会「宇宙の扉をノックする」開催

2014年1月25日に東京大学本郷キャンパスの小柴ホールにおいて、ハーバード大学教授の素粒子理論研究者、リサ・ランドール博士の「宇宙の扉をノックする」と題する一般講演会がKavli IPMU主催により開催されました。ランドール博士は理論物理学者の立場から欧州合同原子核研究機関（CERN）のLHC実験と、そこで発見されたヒッグス粒子について、また、広大な宇宙と宇宙を形作る最小単位である素粒子の「スケール」の違いとその関係について解説しました。英語で行われた講演は、Kavli IPMUの村山斉機構長が解説を加えながら逐次通訳し、理解しやすいと好評を博しました。ランドール博士は和訳されている一般向け科学書でも人気があり、会場は満席でメモを取りながら熱心に聞き入る参加者の姿が多く見られました。

なお、Kavli IPMUの向山信治特任准教授によるランドール博士のインタビュー（本誌36 - 40ページ）も併せてご覧下さい。



質問に答えるランドール博士。右は通訳する村山機構長。

シカゴにおけるAAAS年次大会にWPI拠点が合同参加

アメリカ科学振興協会（AAAS: American Association for the

Advancement of Science）の年次大会が2014年2月13日から17日の5日間、米国イリノイ州のハイアット・リージェンシー・シカゴを主会場として『Meeting Global Challenges: Discovery and Innovation（地球規模の課題に対処する：発見と技術革新）』をテーマに開催され、バンクーバーで開催された一昨年、ボストンで開催された昨年（共に6拠点参加）に続き文部科学省世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）の9拠点が合同で参加しました。

この年次大会は科学誌「サイエンス」を刊行するAAASが1848年の創設以来毎年開催しているものです。現在は米国内のみならず世界中から科学者、技術者、行政官、教育者、科学ジャーナリスト、一般市民等数千人が参加する大イベントで、科学・技術の最近の発展を議論する多彩なプログラムが用意されています。

WPIの9拠点は、科学技術振興機構（JST）が主催する日本バピリオンの一員として2月14日から16日までの3日間にわたりブースを出展するとともに、理化学研究所との共催により2月14日に『Build a Career in Japan!（日本でキャリアを積もう!）』と題した1時間のワークショップを行いました。ワークショップでは岩渕秀樹文部科学省研究振興局基礎研究振興課基礎研究推進室長がWPIプログラムについて、九州大学I²CNER（カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所）のペトロス・ソフロニス所長がWPI拠点における先進的な研究活動や国際的研究活動について説明を行いました。



WPI拠点のブース風景。

FIRST EXPO 2014に村山プロジェクト SuMiReが参加

2014年2月28日と3月1日の2日間、東京のベルサール新宿グラウンドにおいて、『最先端研究開発支援プログラム (Funding Program for World-Leading Innovative R&D on Science and Technology、略称FIRST)』の最終年度を締めくくるFIRST EXPO 2014が開催されました。FIRSTは、先端的研究を促進して我が国の国際競争力を強化するとともに、研究開発成果を国民及び社会へ還元することを目的として内閣府の総合科学技術会議の主導によって2009年度に始まり、日本全国からトップレベルの研究者30人が中心研究者を務める30プロジェクトが選定され、5年度に渡って総額1,000億円が助成されました。Kavli IPMUの村山斉機構長が中心研究者を務めるSuMiRe (Subaru Measurement of Images and Redshifts) プロジェクトもその一つで、すばる望遠鏡を用いて、超広視野イメージングと超広視野分光という最先端の宇宙観測を通してダークマター・ダークエネルギーの正体を究明し、宇宙の起源と未来を解き明かそうというものです。

FIRST EXPO 2014では30プロジェクトの各研究者による研究概要および成果のプレゼンテーション、ブース展示をはじめ、さまざまなイベントが実施されました。SuMiReプロジェクトは、同プロジェクトが製作に関わり、この2014年からすばる望遠鏡での運用が開始された超広視野デジタルカメラ、



講演する高田教授。

ハイパー・シュブリーム・カム(HSC)に使用されている非球面レンズの実物大レプリカを展示するとともに、2月28日に中心メンバーの高田昌広Kavli IPMU教授がSuMiReプロジェクトの現状と今後期待される研究成果について講演を行いました。

女子中高生進路選択支援イベント「宇宙を知りたい人集まれ!」を開催

2014年3月15日にKavli IPMUと東京大学宇宙線研究所の共催によりKavli IPMU 研究棟を会場として女子中高生進路選択支援イベント「宇宙をのぞいてみよう!」が開催され、35人の女子中高生が参加しました。このイベントは、女子中高生の理系分野に対する興味や関心を喚起し、理系進学を支援するために科学技術振興機構(JST)の支援を受けて東京大学が企画した取り組みの一環として行われたものです。2人の女性研究者、Kavli IPMUの石垣美歩さん(日本学術振興会特別研究員)と宇宙線研究所の百瀬莉恵子さん(特任研究員)からそれぞれが取り組む研究について講義を聞き、また大学院生のティーチングアシスタントの指導により重力波望遠鏡に利用されるレーザー干渉を用いた実習を行い、その後交流スペースで先輩研究者との懇談会が和やかに行われました。参加した女子中高生からは「大学での学生生活のことが聞けて良かった」、「宇宙について、もっと詳しく知りたくなった」などの声が聞かれました。



交流スペースでの懇談会の様子。

人事異動

昇任

Kavli IPMU 博士研究員のスルド・モレさんが2014年3月1日付けでKavli IPMU 助教に昇進されました。



転出

次の方々が転出しました。[括弧内はKavli IPMU 在任期間です。]

杉本茂樹さん[2008年4月1日 - 2014年3月31日]Kavli IPMU教授から京都大学基礎物理学研究所教授へ。

唐牛 宏さん[2010年4月1日 - 2014年3月31日、但し2010年4月1日 - 2010年5月31日は特任研究員として]Kavli IPMU 教授から自然科学研究機構特任教授へ。

直井克之さん[2012年4月1日 - 2014年2月28日]Kavli IPMU 博士研究員から東京農工大学工学院数理科学部門講師へ。

野沢貴也さん[2008年9月1日 - 2014年3月31日]Kavli IPMU 博士研究員から国立天文台特任助教へ。

斎藤智樹さん[2010年5月1日 - 2014年3月31日]Kavli IPMU 博士研究員から東京大学宇宙線研究所協力研究員へ。

藤田充俊さん[2013年4月1日 - 2014年3月31日]日本学術振興会特別研究員の身分のまま杉本茂樹教授の異動に伴い京都大学基礎物理学研究所に機関変更。

金田邦雄さん[2013年4月1日 - 2014年3月31日]日本学術振興会特別研究員から東京大学宇宙線研究所特任研究員へ。

土岡俊介さん[2011年4月1日 - 2014年3月31日]日本学術振興会特別研究員から東京大学大学院数理科学研究科・リーディング大学院特任助教へ。

重力波

川村静児 東京大学宇宙線研究所教授、Kavli IPMU上級科学研員

重力波は、一般相対性理論から導出された、光速で伝わる時空のひずみです。重力波は加速度運動をする物体から放射されますが、重力波の引き起こす空間のひずみは極めて小さいため、未だ直接検出はされていません。もし重力波が検出されれば、ブラックホールの合体や宇宙誕生の瞬間など、これまで見えなかった新しい宇宙の姿が明らかにされる可能性があります。現在、アメリカのLIGO、ヨーロッパのVirgo、日本のKAGRAなどの大型レーザー干渉計型重力波検出器が建設中で、数年後には重力波の初検出、そして重力波天文学の創成が期待されています。

