

KAVLI IPMU NEWS



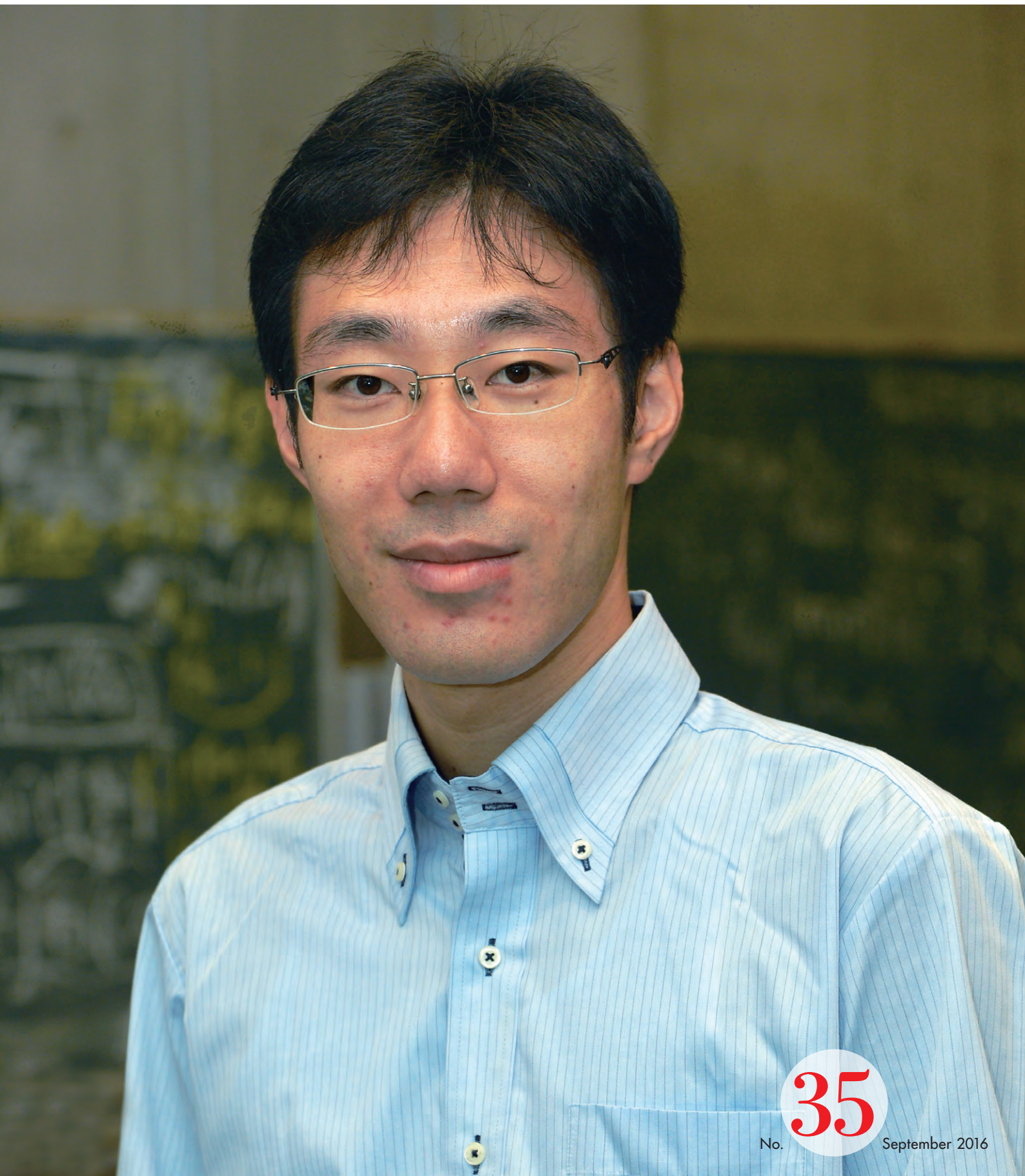
World Premier International Research Center Initiative
世界トップレベル研究拠点プログラム

Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe
カブリ数物連携宇宙研究機構



The University of Tokyo Institutes for Advanced Study
東京大学国際高等研究所

Feature Analogy and Mathematics
Round Table Conversation with Robert Williams



35

No.

September 2016

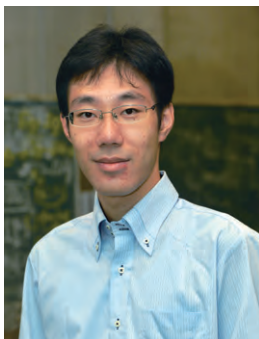
Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
Analogy and Mathematics
Tomoyuki Abe
- 10 **Our Team** Marco Bertolini
Yalong Cao
Peter Cox
Jiaxin Han
Daisuke Kaneko
Ting-Wen Lan
Kallol Sen
Po-Yen Tseng
- 13 **Special Contribution**
A Dialogue between a Scientist and Philosophers
Yasunori Nomura
- 16 **Round Table Talk**
Conversation with Robert Williams
Robert Williams
Sadanori Okamura
Nao Suzuki
- 28 **Workshop Report**
Lectures on Cosmology with Planck at IPMU
Daisuke Kaneko
- 29 **Workshop Report**
Matrix Factorization and Related Topics, 2016
Dulip Piyaratne
- 30 **News**
- 34 **Phillips Relation** Naoki Yasuda

Japanese

- 35 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 36 **Feature**
類似と数学
阿部 知行
- 42 **Our Team** マルコ・ベルトリニー
曹 亚龙
ピーター・コックス
韩 家信
金子 大輔
藍 鼎文
カロール・セン
曾 柏彦
- 45 **Special Contribution**
科学者と哲学者のある交流
野村 泰紀
- 48 **Round Table Talk**
ロバート・ウィリアムズ博士に聞く
ロバート・ウィリアムズ
岡村 定矩
鈴木 尚孝
- 60 **Workshop Report**
Lectures on Cosmology with Planck at IPMU
金子 大輔
- 61 **Workshop Report**
行列因子化および関連する話題、2016
ドゥリッパ・ピヤラトナ
- 62 **News**
- 64 **フィリップス関係** 安田 直樹



Tomoyuki Abe is an Associate Professor at the Kavli IPMU. He graduated from the University of Tokyo. He received his Ph.D. in Mathematical Sciences in 2010 from the Graduate School of Mathematical Sciences of the University of Tokyo. He was awarded JSPS (Japan Society for the Promotion of Science) Research Fellowship for Young Scientists (DC1) from 2008 through 2010, and Postdoctoral Fellowship (PD) from 2010. In April 2011, he was appointed as a Kavli IPMU Assistant Professor. From January 2016, he has been a Kavli IPMU Associate Professor. He studies arithmetic geometry, especially, p -adic cohomology theory. He received the MSJ (Mathematical Society of Japan) Takebe Katahiro Prize in 2011 and the Commendation for Science and Technology by the Minister of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Young Scientists' Prize in 2013.

阿部知行：Kavli IPMU准教授。東京大学卒業後、2010年に同大学大学院数理科学研究科より数理科学の博士号を取得。2008年より2010年まで日本学術振興会特別研究員DC1、2010年より日本学術振興会特別研究員PD、2011年よりIPMU助教、2016年より現職。数論幾何、特に p 進コホモロジーの研究を行う。日本数学会建部賞(2011年)、文部科学大臣表彰若手科学者賞(2013年)を受賞。

Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



July 15: Hitoshi Murayama explaining a "world map: where all our international researchers are from" to Ms. Yayoi Komatsu (Director-General, Research Promotion Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology).



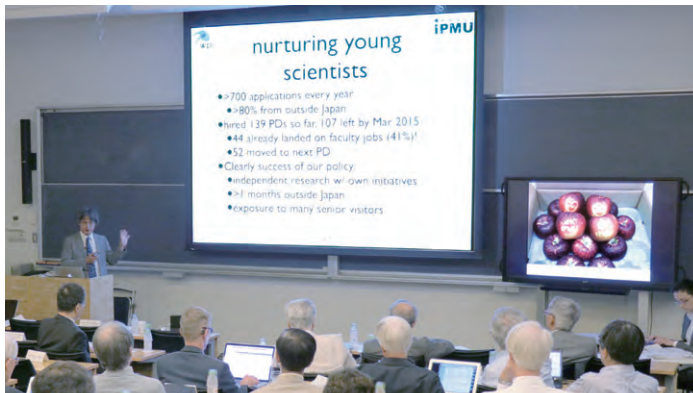
August 20: Hitoshi Murayama and an invited speaker Young-Kee Kim during the Q&A session at the "Woman in Science" event (see p. 31).



August 22 : Director Murayama's presentation to the External Advisory Committee members (see p. 30).



September 28 : Hitoshi Murayama interviewed for a TV science program.



September 29: Explaining the Kavli IPMU overview report during the WPI site visit (see p. 30).

Analogy and Mathematics

In March, 1940, in the midst of war's chaos, a mathematician, arrested for refusing military service, wrote a 14-page letter to his sister, a philosopher, from Bonne-Nouvelle prison at Rouen in France. He wrote, "On the one hand the analogy (of function fields over finite fields) with number fields is so strict and obvious... while, on the other hand, the one between the function fields (over finite fields) and the "Riemannian" fields... is to profit in the study of the first from knowledge acquired about the second, and of the extremely powerful means offered to us..."^{*1} The mathematician is André Weil, who later proposed a surprising conjecture on zeta functions for varieties over finite fields following an analogue with the Riemann hypothesis,^{*2} and has made a strong impact on mathematics up until now.

§1 Weil's Philosophy

1, 2, 3,... Integers are one of the most fundamental and classical mathematical concepts that people are familiar with. It is an extremely difficult object to study, and modern mathematics is not powerful enough to answer many simple questions it poses. However, when we find a piece of truth in number theory, people tend to have a superb outcome.

From ancient times, solving equations has attracted the attention of lots of mathematicians. Solution to quadratic equations $x^2 + ax + b = 0$ was known already by ancient Babylonians, presumably

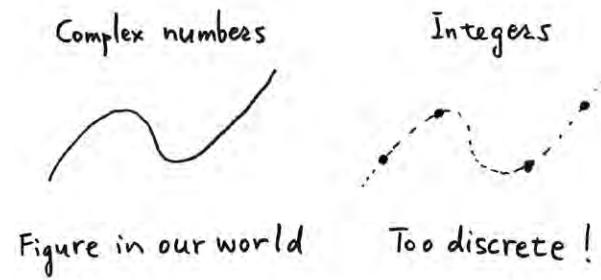


Figure 1. Realization of an algebraic variety in two different worlds.

discovered by practical needs. Attention changed to more complicated equations as time went by. When we study equations, one way is to think of them graphically. For example, consider the equation $y = x^2$. We learn that this equation represents a parabola, which enables us to study the equation geometrically. Generalizing this approach, algebraic geometry is a branch of mathematics that tries to consider systems of multi-variable equations geometrically. Algebraic geometry has already been discussed several times in the *IPMU News* (e.g. Toda^{*3} and Bondal^{*4}). Figures defined by systems of equations are called algebraic varieties in algebraic geometry. Algebraic geometry is situated at the intersection of various fields of mathematics. Given

^{*1} Refer to Column 1 for some explanation of fields which appear in this sentence and rings which appear in § 2. Finite fields are discussed in detail in § 2. Riemannian fields are fields related to complex geometry, and often called function field over the field of complex numbers.

^{*2} For the Riemann hypothesis, see § 3.

^{*3} Yukinobu Toda, *Kavli IPMU News* No. 20 (2012) p. 4.

^{*4} Alexey Bondal, *IPMU News* No. 14 (2011) p. 4.

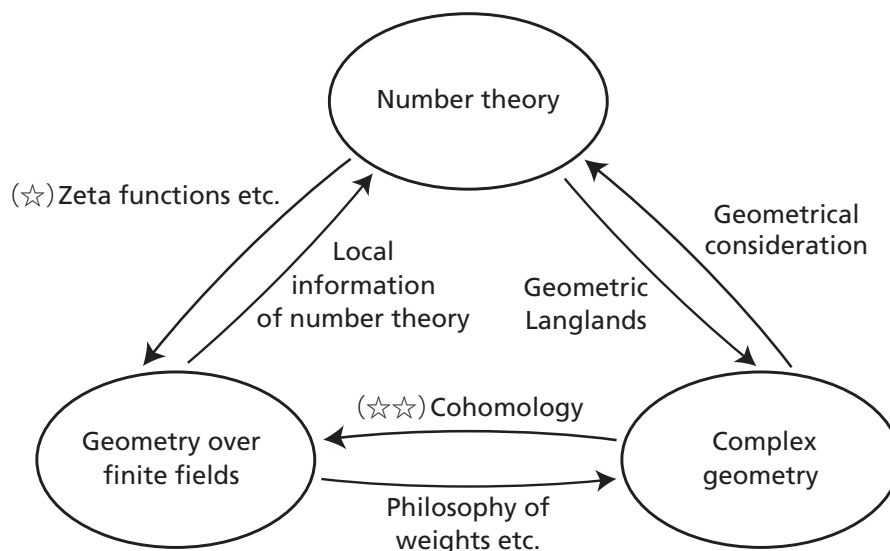


Figure 2. Weil's Trinity.

algebraic varieties, we may consider figures defined by integral solutions. Studying such solutions could be seen as a part of number theory. We may also consider figures defined by complex solutions of algebraic varieties. Now, this is a realm of complex geometry.

When we consider solutions in different places, their landscapes are totally different. For example, in complex geometry, algebraic varieties can be considered as figures in higher-dimensional complex space, so that geometric thinking is possible. But, if we wish to study integral solutions, the figure defined by such solution is too discrete to use geometric intuition (see Figure 1).

These are different worlds defined by the same language, algebraic geometry. Surprisingly, Weil's philosophy (which he himself admits was not the first to assert) tells us that these seemingly unrelated worlds have relations beyond our perception, called *analogy*, and we can attain the truth of mathematics when we think of them as the Trinity shown in Figure 2.

§2 Zeta Functions

The Riemann zeta function is the function defined by a simple series

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s}$$

In the mid-19th century Riemann found out that information on the distribution of prime numbers is encrypted in this function, and he proposed an ultimate form of this expected information. He formulated it into a celebrated conjecture, which we now call the *Riemann hypothesis*. This conjecture is still a central problem in mathematics, but it seems that we are far from its resolution.

To compare with integers, polynomial rings over finite fields have often been considered. To introduce these objects, let us define finite fields first. Let p be a prime number. Consider the set $\{\overline{0}, \overline{1}, \dots, \overline{p-1}\}$ denoted by \mathbf{F}_p . In fact, we may define four elementary operations (addition, subtraction, multiplication, and division) for the elements of this

set just as we define them for the elements of the set of rational numbers (a rational number is a real number that can be written as a simple fraction).

This is nothing difficult, and for addition and multiplication, all we need to do is to consider the remainder after division by p . For example, when $p = 7$, we have

$$\bar{4} \times \bar{5} = \bar{20} = \bar{6}.$$

Since $\bar{20}$ is not defined, the meaning of the equation is a bit ambiguous, but we leave the interpretation of it to the readers. Division is slightly more problematic, but when we want to compute

$$\bar{4} \div \bar{5} = ?,$$

all we need to do is to find $?$ so that

$$\bar{5} \times ? = \bar{4}.$$

The interested reader can check that the answer is $\bar{5}$.

If we consider p which is not a prime number, we can define multiplication and addition in the same way, but we cannot define division. For example, for $p = 12$ (the world of a clock!) it is easily understood that $?$ does not exist such that

$$\bar{4} \times ? = \bar{1}.$$

The polynomial ring $\mathbf{F}_p[x]$ in question is the set

of polynomials whose coefficients are elements of \mathbf{F}_p . For example, in $\mathbf{F}_3[x]$, we have the following 9 polynomials with degree less than or equal to 1:

$$\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, x, x + \bar{1}, x + \bar{2}, \bar{2}x, \bar{2}x + \bar{1}, \bar{2}x + \bar{2}.$$

Likewise, we have polynomials with degree bigger than 1, so that $\mathbf{F}_3[x]$ contains infinitely many polynomials. Similar to the additions and multiplications of the usual polynomials, additions and multiplications are defined for elements of $\mathbf{F}_p[x]$. Moreover, we have the notion of irreducible polynomials, which are polynomials which cannot be divided by polynomial with lower degrees.

Irreducible polynomials in $\mathbf{F}_p[x]$ can be regarded as the notion corresponding to prime numbers in the set of integers.

Now, if the Riemann zeta function for the integer ring is too challenging to deal with, we may try to consider an analogous zeta function for its cousin ring $\mathbf{F}_p[x]$ and study it. To define the analogous function, an important discovery is the Euler's product representation

$$\zeta(s) = \prod_{p:\text{prime number}} \frac{1}{1 - p^{-s}}.$$

This representation enables us to interpret the zeta function "algebra-geometrically." Let f be an element of $\mathbf{F}_p[x]$. We denote the degree of f by $\deg(f)$. By analogy, then, we may define

$$\zeta_{\mathbf{F}_p[x]}(s) = \prod_{f:\text{irreducible}} \frac{1}{1 - p^{-\deg(f) \cdot s}}.$$

Here, the factor p^{-s} in the definition of the Riemann zeta function is replaced by $p^{-\deg(f) \cdot s}$. This is because, when we interpret p in the definition of $\zeta(s)$ as the "size" of the prime number p , it is reasonable to measure the size of f as $p^{\deg(f)}$. Algebra-geometrically, $\mathbf{F}_p[x]$ is understood to be a line (over a finite field). With this interpretation, all the factors appearing in the definition of $\zeta_{\mathbf{F}_p[x]}(s)$ have algebra-geometric meanings. Pursuing this, it is not hard to define the

Column 1: Fields and rings

A ring is a set such that addition and multiplication rules are defined. For example, the set of integers $(\dots, -2, -1, 0, 1, \dots)$ is closed under taking addition and multiplication in the usual sense, so we may say that the set forms a ring. The set of polynomials has similar property, so it is also an example of a ring. Fields are a special kind of ring. More precisely, a ring is said to be a field if any element but 0 has an invertible element. Finite fields are examples of fields as well as the set of rational numbers and the set of real numbers.

zeta function $\zeta_X(s)$ for algebraic variety X over a finite field. This is the zeta function defined by Weil, and nothing but (\star) of the trinity shown in Figure 2.

§3 Weil Conjecture

Weil computed $\zeta_{\mathbb{F}_p[x]}(s)$, or more generally $\zeta_C(s)$ for general curves C . It showed that, contrary to Riemann's original zeta function, the zeta functions $\zeta_{\mathbb{F}_p[x]}(s)$ and $\zeta_C(s)$ are rational functions (namely fractions of polynomials). More precisely, we may write

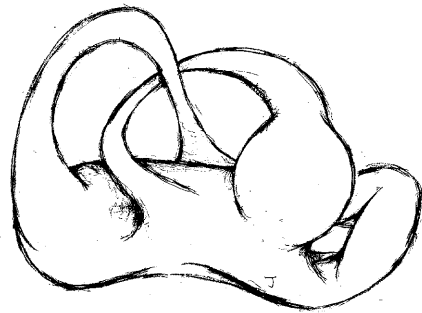
$$\zeta_C(s) = \frac{f_1(p^{-s})}{f_0(p^{-s}) \cdot f_2(p^{-s})}$$

where f_n are polynomials. Even more surprisingly, the roots of the equation $f_n(t) = 0$ have their absolute value equal to $p^{n/2}$. The absolute value could be anything, but transcendental power forces us to pick extremely specific rational numbers $n/2$! Weil

thought he knew what these numbers were. The Riemann hypothesis conjectures that the Riemann zeta function has non-trivial zeros only on the line $\text{Re}(s) = 1/2$, and the half integers could be seen as a perfect analogue of this. The original Riemann conjecture is too hard to tackle, but an analogue for curves over finite fields was formulated and proven by Weil.

Moreover, he found out that $f_n(t)$ has geometric information. Namely, for him, computing $f_n(t)$ seemed as if to compute the cohomology $H^n(X)$.

Cohomologies express "topological information" of figures. In research, it is extremely important to describe characteristics of things. How do we extract characteristics of figures such as the one shown below?



Mathematical objects that characterize figures are called "invariants." For example, volume and surface area are typical invariants. These invariants readily change if we deform the figure. Of course, these invariants are important, but sometimes we need to express the characteristics of figures more roughly. In that case, we sometimes count the number of holes in the figure. This number doesn't change even if we stretch the figure. On the other hand, no matter how we stretch a sphere, we can't transform it into a torus. This implies that an invariant like the number of holes may be used to classify figures. Geometry, which aims to extract figures' characteristics which are invariant under continuous deformation (e.g. number of holes), is called "topology." and

Column 2: Invariants

Invariants means quantities invariant under certain operations. Why can we consider surface area as an invariant? There is a philosophy that geometry can be classified by invariance under transformations. This was first claimed by Klein in his famous Erlangen program, which is so to say a guideline of geometry. For example, Euclidean geometry is a geometry which is invariant under parallel translation or rotation, and topology is a geometry which is invariant under continuous deformation, which has more freedom than Euclidean geometry. Surface area is an invariant in Euclidean geometry, and we have so-called cohomologies as topological invariants. Of course, cohomologies can be seen as invariants for Euclidean geometry as well. The word "invariants" makes sense once we specify geometry.

Feature

cohomology is an invariant generalizing and abstracting the hole number. Cohomology is very important and frequently appears in geometry which deals with continuous objects, such as complex geometry. Geometry over a finite field stands on the other extreme. As finite fields have only finitely many elements, it doesn't make sense, a priori, to take continuous invariants. Nevertheless, Weil claimed that topological information is hidden in the zeta function. This is (☆☆) of the trinity (see, Fig. 2).

After these observations, Weil proposed conjectures on properties of the the zeta functions for more general varieties. Concretely, for any algebraic variety, $\zeta_X(s)$ is a rational function, and the absolute value of the root of each polynomial is equal to $p^{n/2}$ for some integer n . In addition to these conjectures, Weil predicted the existence of cohomology theories, which have the ability to extract topological information, for varieties over finite fields: he predicted it in 1949, shortly after the war.

Why are the zeta functions important? This is rather a philosophical question. People studying number theory "believe" that the zeta functions contain important information. However, this belief is not just fantasy. For example, the BSD (Birch and Swinnerton-Dyer) conjecture, which, as well as the Riemann hypothesis, has been offered a prize money of \$1 million^{*5} for the solution to it, predicts that the zeta functions have information on the number of solutions of the defining equation of certain algebraic varieties. The numbers of solutions of systems of equations are the ultimate information that number theorists look for. Other than this, many difficult and central questions are related to the zeta functions, and we still believe that we may reach the truth by studying the zeta functions.

§4 Grothendieck and ℓ -adic Cohomology

In the late 50s, a genius, Alexander Grothendieck appeared to solve the Weil conjecture. He started

to construct the cohomology theory that Weil had predicted. With the aid of M. Artin and others, after 10 years of concentration he succeeded in constructing topological cohomology theory for varieties over finite fields. It was called the ℓ -adic cohomology. The theory was far more general and abstract than Weil had imagined. Their results were collected in the seminar notes called SGA,^{*6} with the total number of pages more than 5000. He named the new geometry "arithmetic geometry."

Even though most of the Weil conjecture had been solved due to their efforts, the analogy with the Riemann hypothesis seemed to remain unsolved. However, Grothendieck's student, another genius, Pierre Deligne successfully solved the last piece of the Weil conjecture fully using the framework that Grothendieck had established. More than 30 years had passed since the letter of Weil in 1940.

What is intuitive in complex geometry could frequently be extremely hard in arithmetic geometry when following analogies with complex geometry. For this purpose, the utmost understanding of concepts of complex geometry was needed. Due to this fact, an enormous amount of mathematical notions and philosophy was yielded while arithmetic geometry was being constructed, and the influence of the geometry over a finite field to complex geometry cannot be overestimated. Hodge theory could be seen as an analogue of complex geometry (cf. Deligne's Hodge I^{*7}), and the theory of weights coming from Hodge theory is indispensable in geometric representation theory. The geometric Langlands program is a theory considered by following an analogy between number theory and complex geometry via arithmetic geometry, and some experts point out relations with physics.

^{*5} In 2000, the Clay Mathematics Institute in the U.S. offered a \$1 million prize for solving each of the seven mathematical problems including the Riemann hypothesis. Up to the present time, only the 'Poincaré conjecture' has been solved by Grigori Perelman.

^{*6} *Séminaire de Géométrie Algébrique*, <http://library.msri.org/books/sga/>.

^{*7} P. Deligne. "Théorie de Hodge. I." *Actes du Congrès International des Mathématiciens 1*, (1970) 425.

The notion of derived categories, which is being extensively investigated in algebraic geometry and which some of the Kavli IPMU researchers are interested in, is one of the numerous notions that were yielded in the process mentioned above. The return has turned out to be huge.

§5 ℓ -adic, p -adic, and the Future

Once again, let us come back to the analogy between complex geometry and geometry over finite fields. In complex geometry we have topological cohomology theory, but we also have analytic cohomology theory. These two cohomology theories have been known to coincide. Since Grothendieck constructed the ℓ -adic cohomology theory as an analogy with topological cohomology theory, it is also natural to expect an analogy over a finite field with analytic cohomology. In fact, Dwork had already considered such cohomology theory prior to ℓ -adic theory, and he had shown the rationality of the zeta function in the Weil conjecture. However, construction of a general theory like ℓ -adic theory was hard, and the theory fell behind ℓ -adic theory which was theoretically complete. There are several theories which should be mentioned such as Grothendieck's crystalline cohomology and Monsky-Washnitzer's cohomology, but finally, in the 80s, Pierre Berthelot constructed analytic cohomology theory for varieties over finite fields, called the rigid cohomology. This cohomology theory is sometimes called p -adic cohomology theory. Even though it was defined, many expected fundamental properties were left as conjectures. However, recent development of p -adic differential equation theory as well as the discovery of the weak desingularization theorem by de Jong finally allowed Kiran Kedlaya to establish p -adic cohomology theory. Using these results, I proved a Langlands-type theorem, which shows that, at least in the curve case, p -adic and ℓ -adic cohomology have essentially

Column 3: ℓ -adic and p -adic theories

In arithmetic, when a prime number p is fixed we often distinguish other prime numbers different from p , and they are often denoted by ℓ . For example, consider a quadratic equation $ax^2 + bx + c = 0$. It is well-known that the roots are

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

Note that we have $2a$ as the denominator. Consider the equation in \mathbf{F}_2 . Since $2 = 0$ here, the denominator doesn't make sense. On the other hand, it makes sense if we consider the equation in \mathbf{F}_ℓ ($\ell \neq 2$).

This shows that we have different behaviors as we vary prime numbers. Similar things often happen, which is the reason to distinguish prime numbers, and ℓ -adic and p -adic cohomologies are defined by very different methods.

the same information. It realizes the philosophy of Grothendieck, which states: "All cohomologies stem from motives."

I mentioned analysis over finite fields, but it is mysterious that imitation of analytic theory works over such discrete fields. I always have the impression that there is no reason the theory over finite fields should behave as if it were the real world. It seems as if some invisible power gave rise to the analogy. However, I don't want to cease the exploration just by worshiping the mysterious power, but want to make it a part of human knowledge by understanding it via the same language: analytic theory in complex geometry. When a new analogy between analysis for complex varieties and arithmetic geometry is realized, it should lead us to a deeper understanding of mathematics as an incarnation of the classical trinity.

Our Team

Marco Bertolini

Research Field: **Theoretical Physics (Particle Theory)**

Postdoc

My research interests focus on the interplay between geometry and the physics of string theory and quantum field theory. One of the areas of my research is the study of conformal field theories in two dimensions with (0,2) supersymmetry. I am interested in the stringy geometric structures emerging in the corresponding moduli space. More recently, I became interested in the connection



between F-theory, a non-perturbative description of a certain class of string theory vacua, and a class of (1,0) superconformal field theories in six dimensions.

Yalong Cao

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

My research lies in the intersection between algebraic geometry, differential geometry and string theory. More specifically, I have been studying Donaldson-Thomas type theory on Calabi-Yau 4-folds, which is a way to count 'instantons' or coherent sheaves on CY4.

DT4 theory could be viewed as a complexification of Donaldson's theory on oriented 4-manifolds. Formally, DT4 theory should fit into a topological quantum field theory relating instanton countings on Spin(7), G2 and CY3 manifolds. Nevertheless, I prefer restricting to the algebraic subcase for CY4 and CY3.



Basically, for a simple degeneration X_t of CY4 into two 4-folds glued along their anti-canonical divisor Y , we expect a gluing formula relating DT4 invariant of the generic fiber of X_t and relative DT4 invariants of those two 4-folds (which are elements in the DT3 cohomology of Y).

Peter Cox

Research Field: **Theoretical Physics (Particle Theory)**

Postdoc

My research focuses on physics beyond the Standard Model and in particular on models that seek to address the naturalness of the electroweak scale. An interesting possibility is that the Higgs may arise as a bound state of some new strong dynamics. I have studied this possibility through the use of warped models in 5D, which can provide a weakly-coupled dual description. More generally, I am interested in



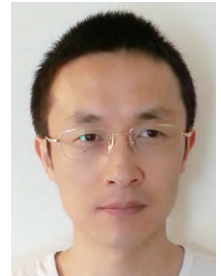
BSM phenomenology and looking at how current experiments, such as the LHC and dark matter searches, can be used to explore these models.

Jiixin Han

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

My research interests lie broadly in cosmology and galaxy formation, with a strong interest in understanding the nature of dark matter. My past research has been mostly devoted to the hunt for dark matter, both theoretically and observationally, with experiences in cosmological numerical simulation, gravitational lensing, dynamical modelling and gamma-ray dark matter detection. I always enjoy



exploring new fields and innovating new approaches. Advanced statistics and efficient computation are extensively used throughout my works.

Daisuke Kaneko

Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc

Our group is performing an experiment called POLARBEAR, which is aiming at the discovery of the B-mode polarization of cosmic microwave background (CMB). From the CMB, we can obtain information about the inflation of the early universe, mass of the neutrino, etc.

Currently the experiment is being conducted at Atacama in Chile, and an upgrade project to the



POLARBEAR-2 is underway. I would like to contribute to the development of the upgraded receiver with my experience in experimental particle physics.

Our Team

Ting-Wen Lan

Research Field: **Astronomy**

Postdoc

My research focuses on extragalactic and data-intensive astronomy. More specifically, I have made use of large survey datasets with statistical techniques to investigate the interplay between various components of the Universe, including dark matter halos, stars, and gas. At Kavli IPMU, I will explore novel datasets provided by the SuMIRe



project; this will open a whole new window towards our understanding of how galaxies form and evolve through cosmic time.

Kallol Sen

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

Conformal field theories have been in use for quite some time as a tool towards understanding the strongly coupled field theories when a conventional Lagrangian description is not available. This tool has gained more mileage after the revival of the conformal bootstrap program in the recent years where using the symmetries, it is possible to retrieve nontrivial information about the field theories at strong coupling. Currently my research is focused on a more detailed understanding of the Bootstrap formalism and its applications to various field theories. Using the numerical and analytical aspects



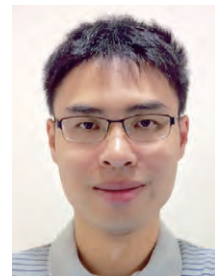
of the formalism it is possible to explore field theories at both weak and strong coupling. A knowledge of the operator content of the theory and various interactions might actually pave the way for building up the Lagrangian description where it is not available.

Po-Yen Tseng

Research Field: **Theoretical Physics (Particle Theory)**

Postdoc

I mostly study the fundamental Higgs particle and dark matter. These two particles were forged from hundreds of years of human scientific history and represent our understanding between the micro and cosmic worlds. Higgs, according to our understanding, gives mass to other fundamental



particles. As for dark matter, which composes a quarter of our universe, we don't know what it is.

A Dialogue between a Scientist and Philosophers

Yasunori Nomura

Professor, Department of Physics, University of California, Berkeley
and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

On June 18 this year, I was given an opportunity by the Kavli IPMU to meet with philosophers at an event hosted by UTCP (The University of Tokyo Center for Philosophy).^{*} I am here reporting what were discussed and what I thought there. The event was held to celebrate the publication of the Japanese translation of “After Finitude: An Essay on the Necessity of Contingency” by Quentin Meillassoux. The panelists included Prof. Masaya Chiba (Ritsumeikan University), Prof. Kantaro Ohashi (Kobe University), Prof. Futoshi Hoshino (Kanazawa College of Art), and Prof. Takahiro Nakajima (UTCP). I myself joined the second part of the event, “Headlands of Physics and Philosophy,” where I presented the latest cosmological theories, including multiverse cosmology, and participated in a discussion with these philosophers.

My first impression of the discussion was that science and philosophy have a great deal in common in terms of the themes they deal with. In fact, many of the questions discussed (e.g. what is “time”?) are almost precisely those studied in modern theoretical physics. Of course, the roots of science and philosophy are the same, so this may not be very surprising. However, the similarity of the questions asked in the two disciplines was sufficiently remarkable for me to take note of it.

^{*} This event was held on the University of Tokyo's Komaba Campus on June 18, 2016.



Photo: Courtesy of UTCP

On the other hand, as for the approaches to the problems, there are noticeable differences. An example of this can already be found in Quentin Meillassoux, the main topic of the event. As far as my limited understanding can tell, the questions asked (in the language of physics) include “Why can we be sure that any law that has worked before will keep working in the future?” and “Is it possible to imagine a world in which there is no fundamental law even though there may be some rules that are stable enough to apply to limited time or circumstances?” (This summary most likely does not capture the philosophy of Meillassoux very well, but at least those are the questions discussed at the event.)

What science says to these questions is, at least in my opinion, very simple. The answer to the first question is “We can’t be sure.” The answer to the second question is “It may be possible to do so, but



From left to right: Takahiro Nakajima, Futoshi Hoshino, Yasunori Nomura, Kantaro Ohashi, and Masaya Chiba. (Photo: Courtesy of UTCP)

we do not.” These answers clearly show that science is a methodology. Science is a methodology in which we go forward by assuming that laws obtained by observation and theoretical consideration apply beyond the systems in which the laws were originally found. Of course, it is possible that predictions of such laws disagree with phenomena actually observed in (future) experiments, in which case we try to find new laws that explain the new phenomena and reduce to the old ones when applied to the original systems. However, there is no guarantee that such attempts always work—it is only an assumption (or hope) that they will. The reason science does things in this way is simply because it has been successful. In this sense, science is always empirical.

On the other hand, this methodology called science is (or at least has been) extremely powerful. In a sense, we might say that a reason for the explosive progress in science in the 20th century came from the decision to not pursue the kind of questions Meillassoux is asking. (In the past, such questions must have been studied as “science” questions.) Of course, this does not mean that asking these questions is meaningless. It simply says that science has explicitly put them outside its own applicability.

In this sense, multiverse cosmology, which I presented at this event, might have disappointed philosophers. This theory predicts that our universe can change (decay) into another universe which is ruled by laws different from those in our own universe. This, however, does not mean that the rules disappear, as Meillassoux imagines. It simply says that the rules which we once thought fundamental may not be as fundamental as we thought, so they can change. And importantly, we believe it is still possible to predict or calculate what kind of universes appear with which laws using deeper (more fundamental) laws, at least in principle. The approach of multiverse cosmology is exactly that of science.

What does the advancement of science really mean? Ultimately, it is to find a set of rules that explain the observed phenomena with a smaller number of assumptions. In particular, an “answer” to a question which does not reduce the number of assumptions does not have much scientific value. (If we answer the question “why is A, B” with “because C is D,” then it merely immediately leads to another question, “why is C, D?”) Putting the historical perspective aside, this is precisely the reason that the heliocentric model is superior to the geocentric model. As far as the solar system is concerned, the Ptolemaic system could predict the motion of

planets reasonably precisely, but it requires many more assumptions than Kepler's three laws. An important point here is that history has repeatedly shown that a theory composed of simpler—or with a fewer number of—assumptions has a wider range of applicability. For example, Kepler's laws—or its more advanced version, Newton's laws—have a form that does not depend on the specifics of the solar system despite the fact that they were originally found by studying it, and hence can be used beyond the solar system to study the universe. What science is doing is performing repeated applications of this logic. The cutting-edge inflationary or multiverse theory is no exception.

Another question discussed at this event was “What is reality?” Science also provides, in my opinion, a clear answer to this question, which is “We don't care.” Are quarks “real”? Of course, quarks cannot be isolated as asymptotic states. On the other hand, using the concept of quarks tremendously simplifies the description of the theory. By this, we say that quarks exist. If you don't like the words “exist” or “real,” you might not use these words. It does not, however, change the fact that the concept is useful, and this is enough. The same applies to many other things—in fact most of the modern concepts in physics—such as spatial dimensions in gauge/gravity duality.

As we have seen, in considering what science is, determining what we do not ask plays an important role. In this sense, science is crucially different from (and complementary to) philosophy, which contemplates everything. On the other hand, we need to be careful in determining the questions we do not pursue. It is often stated that the definition of science includes testability in experiments or falsifiability. In my opinion, the application of these criteria must be done very carefully. Did many people think that inflationary cosmology could be observationally probed when it was proposed? Note that there were no discussions on density perturbation in most of the very early papers. If

scientists at that time had regarded inflationary cosmology as falling outside the realm of science and had not advanced it, then there would not be precision science in this area, represented by, for example, satellite experiments.

I think something similar applies to string theory and multiverse cosmology today. It is dangerous to conclude—as some people do—that these theories are not scientific because they do not lead to predictions that can be checked immediately by experimentation (although these theories do have implications that can in principle be tested by observation, for example, the sign of the spatial curvature of our own universe). It is also dangerous to undermine the scientific value of these theories because their predictions and implications are only indirect (not one-to-one). In fact, if applied strictly, such a criterion would undermine virtually all modern theories, such as grand unified theories. For example, even if proton decay were discovered, it would be easy to construct theories other than grand unified theories which lead to decay. We must be careful not to restrict excessively the definition of science. (To be clear, I am not objecting to the use of these criteria to choose one's own research theme. I am referring to the danger of evaluating all research based on these criteria.)

In any case, things like those discussed here have probably been considered by any scientist, but it was useful (at least to me) to recall them explicitly through discussion with philosophers, who are gurus when it comes to thinking. It may be true that the relation between science and philosophy is not as close as it was centuries ago. However, it would also be true that interactions between these two disciplines can still lead to intellectual excitement. This event made me think that such is indeed the case.

Round Table Talk: Conversation with Robert Williams

Robert Williams

Astronomer, Emeritus, Space Telescope Science Institute (STScI)

Sadanori Okamura

Professor, Department of Advanced Sciences, Hosei University

Nao Suzuki

Kavli IPMU Assistant Professor

Okamura: Bob, as you remember, we had a similar talk event in Kyoto 20 years ago at the time of the IAU (International Astronomical Union) General Assembly in 1997, and it is my great pleasure to have another event today.

Williams: I agree, Sadanori. Let's do our best to make it interesting.

Okamura: Yes. You are an influential person in the astronomical community, and you have initiated many important projects, both as a world-leading astronomer and the director of very strong astronomical institutes.

Today, we would like to hear the stories and episodes of such projects from you in a way that only you can talk about it. This kind of talk would be very useful for both young people and old people, like me, who are interested in the details of your projects and their influence on your career.

Williams: I hope to take this opportunity, especially with Nao with us, to comment on several aspects of large projects that I have been associated with but have not previously discussed publicly,



Sadanori Okamura

Robert Williams

Nao Suzuki

specifically, why and how two independent teams became involved in the discovery of Dark Energy, and how it was that two giants of astrophysics were opposed to the Hubble Deep Field project and tried to talk us out of undertaking that observation.

Okamura: Shall we start with the supernova in 1987, when you were the director of Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO)?

SN1987A, the First Visible Supernova since 1604

Williams: Fine. I remember SN 1987A very well.

Okamura: To my knowledge, it was the first visible supernova after the period of 400 years ever since the Kepler's Supernova in 1604. So there must have been great scientific fever and also turmoil in the observatory in

the southern hemisphere.

Williams: I remember the morning that I went to my office in late February 1987. I lived on the AURA (Association of Universities for Research in Astronomy) compound in La Serena and our house was only a 3-minute walk from my office.

Okamura: Three minutes?

Williams: Yes, it was ideal. No commute, and I could walk home for lunch. I loved it and since I'm a workaholic I spent most evenings there also. In any event, I received a surprise visit from Bill Kunkel who was a staff member of Carnegie Observatories at Las Campanas. He came in the front door of the Tololo building and I was one of the early people there in the office. Bill put his head in my door and said, "Bob, I want to talk to you about something very important, and I want you to sit

down.” “Why should I sit down?” I asked, to which Bill insisted, “Well, when I tell you what I’m about to tell you I think you’d better be seated.” Bill informed me, “We found a supernova and it is not in a distant galaxy. We believe that we have a naked eye supernova that Ian Shelton found last night.”

That got my attention. It turns out that the Las Campanas observer Shelton and night assistant Oscar Duhalde independently discovered the supernova. Shelton was taking photographic plates of the Large Magellanic Cloud on consecutive nights. The plate taken on 23 February did not turn out well so he took another plate the night of 24 February. While comparing the two plates he noticed that a new object, bright enough to be seen with the naked eye, appeared on the second night that had not been there on the plate of the previous night. On that night, both Shelton and Duhalde had walked outside to observe the object and noticed the new supernova. Bill was telling me the very morning of the night that it had been discovered. It was the first supernova in the Local Group of galaxies in 400 years.

It was obvious we had to study the supernova immediately. As soon as other staff members arrived at work I got them together and thought of two things. First, we needed to undertake a scientific investigation and get the light curve, i.e., do photometry, and get spectra. It was obviously bright, so a small telescope would do because it was visible to the naked eye. I also thought that there would be tremendous public attention paid to it and so we all agreed that we had to do something that would satisfy the desire of the press to have information about the

object. We needed to take some nice photos of it.

Later that day a team of us went up to the observatory to set up for the night to actually get images of it and we obtained one of the first colored photographs of the supernova. In the nights that followed local public officials and reporters from major U.S. magazines and papers came up to observe the object. I especially remember the Intendente (regional governor), a personal appointee of Gen. Pinochet. **Okamura:** Military President Pinochet? He is known as a dictator. **Williams:** Yes, the supernova occurred during the oppressive Pinochet regime, so all of the regional governors and officials were military personnel. I met with them often in order to maintain cordial diplomatic relations, and the Intendente came up on one of the very first nights to look through the telescope to see the bright star with his own eyes. I also recall the visit of Malcolm Browne, the science reporter from the New York Times, who spent several days with us in Chile and wrote a series of articles in the NY Times on 1987A. Time magazine also covered the story. There were a lot of outreach efforts during this time, as we undertook a photometric and spectroscopic study of the supernova.

Okamura: Which telescope did you use for photometry and spectroscopy?

Williams: Spectroscopy was done with one of the intermediate telescopes which was not heavily over-subscribed, so it was easy to schedule. We had an instrument that Steve Heathcote had developed, and it was not on the large 4-meter telescope at that time, so we began obtaining regular spectra. We also

did photometry to get an accurate light curve. 1987A was so bright that even with a 0.4-meter telescope, we had to put a mask on it with holes because the brightness of the supernova would saturate even with the shortest exposure. Eventually, when the supernova got fainter we removed the aperture mask and continued doing light curve photometry for many months, and also acquired regular spectra which we interpreted.

Okamura: Right. So how many clear nights followed consecutively after the discovery day?

Williams: February and March were good summer months that were largely clear so that we were not bothered by bad weather early on.

Okamura: I see.

Found the s-Process Elements in the SN1987A Spectrum

Williams: What was really interesting was trying to interpret the supernova spectrum because it showed some unusual lines. I remember devoting much of my research effort to trying to understand the spectrum. I consulted all the atomic physics reference manuals trying to identify three or four lines that did not appear in other supernovae. I’ll never forget making the identification of elements from what we call the “s-process,” i.e., slow neutron capture process, elements of barium and strontium. I spent hours and hours looking for alternative identifications.

I recall having a spectrum in the infrared described to me that really helped the identifications. My colleague Jay Elias reported to me that there were some features out just beyond one micron in wavelength, where ionized strontium (Sr II) was one of the possible IDs.

I had already made a tentative identification of Sr II for two of the optical lines but because that element had not previously been observed in supernovae I had some doubts about it. However, one of the other spectral lines I found seemed to be due to barium, which is another s-process element, and this gave me more confidence that the s-process had unexpectedly been a part of the evolution of 1987A. I distinctly remember working alone on the weekend—it was a Saturday, 4 April, the day that Pope Juan Pablo II flew into La Serena on a well-advertised trip to South America. On that Saturday I was in my office, but everyone else in La Serena, including my wife, was out at the small La Serena airport to welcome the Pope as he arrived.

I remember vividly hearing the Pope's jet fly low over the CTIO offices because we were only several miles from the airport, and hearing this loud noise from Pope Juan Pablo II's jet flying over my office just within a few minutes of the time that I finally concluded that those spectral lines I had been trying to identify were the s-process elements strontium and barium! I'll not forget that moment.

Okamura: It is really a drama that the identification came with Pope. Was it the first evidence that s-process took place in a massive star that later became a core collapse supernova? So, even to you, a specialist of line identification, it was very difficult to identify the lines of strontium and barium, wasn't it?

Williams: Most of the lines I was able to identify fairly straightforwardly but there were these few that had not been observed before in supernovae. The strontium and

barium identifications were the most consistent IDs. Our spectra provided clear evidence that slow neutron capture occurred in this core collapse supernova prior to the outburst, establishing this paradigm for a massive evolved SN progenitor for the first time.

Supernova Research at the CTIO

Okamura: By the way, at that time CTIO hosted a strong group of supernova researchers?

Williams: SN 1987A provided the impetus. Historically there had been interest in supernova research carried out at CTIO and Cerro Calán, which is the Chilean...

Okamura: Cerro Calán—Calán is the name of the place? The Calán/Tololo supernova survey is well known.

Williams: Correct. Cerro Calán, the observatory of the University of Chile, has been the national observatory of Chile. They had several researchers, primarily José Maza, who were interested in following supernovae. Even before I arrived in Chile in 1985 the Chilean 'El Roble' supernova survey had been successful in discovering supernovae. There were not a large number of people involved in it at that time, but after 1987A with the increased interest in supernovae, more people became interested. In particular, some Tololo staff members, Mark Phillips, Nick Suntzeff, and Mario Hamuy, began devoting much of their research time to 1987A and to other supernovae.

We hired Mario Hamuy at CTIO as a data reduction assistant just before the 1987A outburst. Mario had obtained an undergraduate degree in astronomy in Chile but he was not interested in continuing on with graduate studies at that time.

Someone called his availability to my attention as a possible staff member so we interviewed him. I thought Mario would be an excellent hire because as the national observatory of the United States CTIO had the obligation to help all observers obtain and reduce their data. We needed someone like Mario who had data reduction experience. He was one of those people who was a great go-to person. By the way, I am pleased to say that Mario has just this year been awarded the Chile National Science Prize by President Bachelet.

After SN 1987A Mario, Mark Phillips, and Nick Suntzeff got together with José Maza and others to initiate a more intensive supernova program that would use CTIO telescopes to follow up study of SNe (supernovae) discovered. In 1989 the three of them began the new Calán/Tololo Survey to discover supernovae to understand the physics of the outbursts. Another of their motivations was to use them as standard candles for the determination of the Hubble Constant, and the results of this survey were important as lead-ins to the eventual campaign that led to the discovery of Dark Energy.

Okamura: I still remember very clearly the time when I read the paper by Phillips which reports the discovery of the linear relationship between the peak magnitude (M_{\max}) of the Type Ia supernova and decline rate (Δm_{15}), later known as the "Phillips relation."^{*1}

A brighter supernova declines more slowly. It became the key for the Type Ia Cosmology to calibrate the absolute peak magnitude of the Type Ia supernovae and greatly reduce its

^{*1} See page 34.

dispersion.

Williams: Exactly. He did that in 1993 just at the time that I was about to leave Tololo to go up to Space Telescope Science Institute (STScI). I consider Mark's paper to be a seminal contribution to the cosmological distance scale.

Okamura: Yes, I would say that the paper laid the foundation of the future trend of using type Ia supernovae as a precise standard candle, although use of other methods was also investigated.

Williams: Without it, we would not have cosmic acceleration.

Okamura: Exactly. Supernovae research at CTIO led to cosmic acceleration.

Williams: Without it, we would still have a much less certain Hubble constant and possibly not yet evidence for cosmic acceleration. I agree that was a really fundamental work that Mark undertook and the origins of it were trying to understand 1987A, which was a different type of supernova, i.e., core collapse. But that was what got Mark really interested in supernovae, trying to understand exactly what the luminosities of the different kinds of supernovae were at maximum light.

Okamura: Okay. Let's move on to the Hubble Space Telescope.

Suzuki: Can I just have one question before? A different team, Berkeley team also collected supernovae data. At CTIO you collected data on various types of supernovae.

Williams: I'm not sure to what extent that is correct. It is certainly true that both Saul Perlmutter and Bob Kirshner used CTIO telescopes to gather data on supernovae. But it was Kirshner who was largely interested in the type II supernovae, trying to understand the physics

of the outburst. I recall Saul at that time had a broader interest in using supernovae for distance measurements, so I believe he did have an early interest in SNe Ia. That said, the Supernova Cosmology Project which Saul eventually formed and led had not yet been formed at the time of 1987A.

So, yes, there were people at Berkeley who were interested in studying the supernova, but that was before the general interest in trying to determine the deceleration parameter, which came later. I would say that 1987A created an interest in discovering more supernovae and an appreciation that many of those would be type Ia's. That's when people started focusing more on the type Ia's and their use as standard candles, i.e., as distance indicators.

Suzuki: So, was 1987A the inspiration to collect light curves?

SN1987A Gave a Chance to Advance Nova Spectroscopy

Williams: It did motivate obtaining light curves. There is a chain of events here and 1987A did move this theme along. In fact, it was 1987A that started my own long-term interest in novae spectroscopy.

Suzuki: Oh, this is an interesting connection.

Williams: Following the 1987A outburst I spent much of my time trying to interpret its spectrum. Because we could only observe 1987A for ~5 hours each night I questioned what were we going to do with the telescopes those few hours in the night when 1987A wasn't in an ideal position in the sky for observations. Why not obtain data on novae? Several others of the CTIO science staff agreed and that started the program that led to our defining

paper in 1990 on the classification of novae spectra.

Amateur astronomers discover most of the brighter novae visible and after discoveries were announced we would get spectra, which change quite rapidly. I became fascinated with the nova process and also the fact that everyone else was studying supernovae. I thought significant contributions could be made if a few people looked at novae, so we had all of these data that few other people were interested in. We ended up with a great collection of novae spectra which we made full use of.

I loved having all of these novae spectra to work with. In some way, when spectra are involved I admit to being a control freak. I worked a lot with Mario Hamuy, Steve Heathcote, and Mark Phillips on the data interpretation. We succeeded in putting out the major paper in 1990 that defined the novae classification system. Over a period of several years time we took data for about 15 novae and proposed an evolutionary paradigm. This never would have happened without 1987A because the novae program was ancillary to CTIO's extensive work on observing that supernova.

Okamura: Novae! Diversity and time evolution of novae spectra must have fascinated a competent spectroscopist. Another world came to you with 1987A. You are very fortunate. Okay. Let's move on to the Hubble Space Telescope (HST) because Nao Suzuki is with us. You do know that he is a member of the SCP (Supernova Cosmology Project) team, and so he would like to ask you some things about observations with HST on supernovae as a team member.

Williams: I can imagine. I am aware



that there are strong feelings about the fact that two teams pursued work on type Ia supernovae as distance indicators.

Suzuki: I think so.

Supernova Observations with the Hubble Space Telescope

Williams: Okay, let's talk about that. I would like to bring some facts to light about how and why that came about.

Suzuki: On the SCP side, it was reported by Gerson Goldhaber at the group meeting, on September 27, 1997, that the favored universe from our data is $\Omega_m = 0.3$ and $\Omega_\Lambda = 0.7$.

Williams: This was at a meeting of the SCP team? It demonstrates that one must publish to receive credit.

Suzuki: A month before, there was an IAU General Assembly Meeting in Kyoto. One of the highlights of that meeting was the result of the HST Key Project led by Wendy Freedman. She reported the latest measurement of the Hubble Constant which was inconsistent with the age of the universe for an Einstein-de Sitter Universe, namely, the matter dominated flat universe.

Williams: This is interesting in that

Wendy was not a member of either supernovae team.

Suzuki: Right. The concordance model favored the lambda universe. The SCP team concluded that it must be an accelerating universe that we live in. They reported this at the AAS (American Astronomical Society) meeting in January 1998.

Okamura: I followed the SCP team from the published papers only. I remember having been a bit confused by the apparently sudden change of the conclusion in their papers.

Suzuki: Bob, when did you begin to believe in the lambda universe or accelerating universe?

Williams: It was later than that because I was concerned about the uncertain effects of dust on the brightness of the supernovae.

So, let me tell you my thinking and how it came about that two teams became involved in using SNe Ia for distances and deceleration. This was long before acceleration was suspected. Two teams had formed that wanted to extend the work of the Freedman/Mould HST Key Project on the Hubble constant, focusing particularly on the deceleration parameter. Following the first

Hubble Telescope servicing mission in 1993 that corrected the telescope's spherical aberration, it was possible to get luminosities of distant supernovae more accurately because you could perform the subtraction of the background light of the galaxy much better. It was also in 1993 that Mark Phillips published his important work on refining the peak luminosities of SNe Ia. It was several years after this time that the Hi-z and SCP teams were formed, involving Brian Schmidt, Nick Suntzeff, Mark Phillips, Bob Kirshner, and Adam Riess for Hi-z, and Saul Perlmutter, Nino Panagia, and colleagues primarily on the West Coast and at Lawrence Berkeley Lab for the SCP. They began systematic programs on ground telescopes and with HST to study supernovae.

Suzuki: That's an early stage.

Okamura: Very early.

Williams: Yes, you can go back to the STScI Newsletter which is put out each quarter, and you will find listed all of the TAC (Telescope Allocation Committee) approved programs for that year. I have this information on my computer because several years ago someone called my attention to the book titled, what is it? A Four

Suzuki: *The 4 Percent Universe*.^{*2}

Williams: Yes, *The 4 Percent Universe*. A colleague mentioned to me they thought some of the facts in the book were not accurate, and they asked me for my recollection of details recounted in the book. As a result, I wrote down my recollection of my involvement in what turned out to be the discovery of Dark

^{*2} Richard Panek, *The 4 Percent Universe: Dark Matter, Dark Energy, and Race to Discover the Rest of Reality* (Houghton Mifflin Harcourt, Boston, New York, 2011).

Energy, and what I will tell you now is information that should be part of the historical record. Much of it, although not all, is publicly available information.

In HST Cycles 4 & 5 (1994-96) there were several programs devoted to supernovae research. Jeremy Mould and Wendy Freedman were leading the Hubble constant Key Project and Bob Kirshner was leading the SINS (Supernovae INTensive Studies) survey, whose interests at that time were focused more on Type II SNe and understanding the nature of SNe outbursts than on their use as distance indicators. I maintained a keen interest in these programs because the Director of Space Telescope Science Institute has the responsibility to give final approval to those programs recommended by the TAC process. Separate from this process I was also responsible for up to 10% of the observing time on HST to schedule Director's Discretionary Time (DD time) based upon my judgment of what important science results could come out of observations that were not necessarily considered as part of the TAC process.

In January 1996 Saul Perlmutter approached me at the San Antonio AAS meeting to discuss a proposal he wished to submit for DD time related to his work using distant SNe Ia to determine the distance scale and the deceleration parameter. I invited him to submit his proposal, realizing from our conversation that it was similar in goals and method to the proposal that Saul + co-Investigators had submitted to the cycle 6 TAC and which had not been approved by them for execution in the proposal competition. Saul did submit his DD proposal in early February, which I

acknowledged.

Following each annual TAC meeting there are a large fraction of the observing proposals that are rejected because of the huge oversubscription of HST time. It became normal procedure for a number of these unapproved proposals to be immediately submitted to the Director for consideration for DD time. Saul's was one such proposal. During this period, I had established my own precedent of normally not approving TAC-rejected proposals for DD time. Rather, I preferred to save DD time for new initiatives, new discoveries, and time-critical observations. After reading the Perlmutter+ DD proposal, which I did think interesting, together with the TAC review comments in their evaluation I decided to not approve his proposal immediately, and I put the matter on the back burner in my thinking.

The situation changed several months later in May 1996 when the annual STScI May Symposium took place and caused me, and others, to become more excited about more extensive observations of SNe with HST. The symposium was devoted to the topic "The Extragalactic Distance Scale," and there were talks given by Wendy Freedman, Gustav Tamman, Bob Kirshner, Abi Saha, Marc Postman, and others on improved values of H_0 and the likelihood that HST observations could reveal the deceleration parameter, providing a determination of the mean density of the universe. A great deal of enthusiasm was generated for HST as a unique tool to be used for cosmological studies. I must admit to having been too short-sighted to not appreciate Saul's enthusiasm when he had talked to me in San Antonio.

By the end of the symposium I became convinced that HST should devote a significant effort to determining not just H_0 better, but also q_0 , which is what Saul already had been advocating in his rejected cycle 6 and DD proposals. The Cycle 6 HST TAC had already met in November 1995 to recommend Hubble observations for the period July 96 - June 97, and only one program devoted to the cosmological distance scale was approved by the TAC for observations—a program headed by Mould to calibrate Cepheid variable stars in various nearby galaxies. The lack of additional programs was a disappointment in view of the excitement at the symposium.

I should say that Bob Kirshner and the SINS team also had an SNe proposal approved for Cycle 6 by the HST TAC. However, it was focused primarily on obtaining spectra of a few SNe especially in the UV as a means of understanding the physics of the different types of supernovae outbursts. Do realize, this occurred shortly after the large Hubble Deep Field (HDF) observational program, undertaken with a significant amount of DD time, had just been completed and made public, and had been very successful. So, my initial instinct was that the cosmological distance scale and its evolution in time was a similar important topic that could be attacked with HST, and DD time needed to be used to make progress immediately.

At this time, I made the decision to grant DD time to not just Perlmutter's SNe team, even though they had already approached me three months previously with a request for observing time, but also another significant team that was interested

in this problem, the Hi-z team comprised of Brian Schmidt, Adam Riess, Nick Suntzeff, Mark Phillips, Bob Kirshner, and colleagues. This decision to not grant primacy to the first team, that of Saul and the SCP, to request DD time for the purpose of refining the galaxies velocity-distance relation caused much consternation and displeasure in northern California that remains to this day. They believe they deserved the right to explore the distance scale problem using SNe Ia without competition from another team. I understand and respect their concerns, but I can say that for me the rejection of Saul's proposal by the cycle 6 TAC together with their critical remarks about the proposal played an important role in my thinking that the involvement of an additional team in addressing more exact values of H_0 and q_0 was appropriate.

Suzuki: So, you are the man who initiated the controversial competition.

Offering DD Time to the Two Teams to Look at Distant SNe Ia

Williams: Yes, and I was encouraged to do this by my close colleague at the Institute, Nino Panagia, who was a member of Saul Perlmutter's SCP team and with whom I had spoken during the May symposium. HST was not planned from the Cycle 6 TAC process (which I had already approved!) to be looking at distant galaxies to determine the distance scale and its evolution for at least a year and a half. As Director, I was motivated to use DD time to get going on this problem, and its importance led me to involve several groups that had experience in addressing this topic. I unilaterally made the decision to offer DD time

to two independent groups, which I would not have done had the Cycle 6 TAC recommended HST time for only one particular group.

Suzuki: Did you ask them to propose for HST time?

Williams: I did ask them after offering them DD time. The way in which this happened is as follows. At the May symposium, Saul Perlmutter, Allan Sandage, Brian Schmidt, and Adam Riess were not present. But Mark Phillips and Nick Suntzeff (members of the Hi-z team) and Nino Panagia (member of the SCP team) were there, and I'm very close with all of them from our having been colleagues together—with Mark and Nick at CTIO, and with Nino at STScl. At the end of the May symposium I arranged for a meeting with the three of them and Bob Kirshner (Hi-z team member) in my office, so we could discuss how to use HST to make progress on the distance scale and its evolution. During our discussion I suggested tentatively that I would be willing to consider the assignment of a moderate amount of DD time to both the SCP and Hi-z teams, of order 25 - 30 orbits. In this sense, Panek's assertion in *The Four Percent Universe*^{*2} that only members of the Hi-z team were present at this meeting that initiated the search for the time dependence of H_0 is not correct. In fact, at that meeting SCP member Panagia strongly supported the idea of giving DD time to both groups.

Suzuki: Relatively small compared to today's standard.

Williams: Relatively small, absolutely. This was to initiate a cosmological supernova program. Amazingly to me, Kirshner was not very interested in using HST time for the problem! He felt that their ground-based

observations would be adequate for good subtraction of the background galaxy light.

Suzuki: Really?!

Williams: Yes, in my office Bob insisted, "We do not need Hubble Space Telescope to do the galaxy subtraction. We have good enough data." I disagreed, "Look, this is the premier instrument available. If this is important science, use it." Well, after a few days discussion among themselves they changed their minds and agreed on the value of accepting an offer of HST DD time to try to determine q_0 , separate from their previously approved Cycle 6 TAC SINS program. Soon after our meeting, I made the same offer of DD time to Saul's SCP team inasmuch as it was Saul who pioneered the important search technique for discovering new SNe with ground-based telescopes. As did the Hi-z team, Saul was happy to accept the DD time of 28 orbits that I offered to both teams, and both teams eventually submitted formal proposals for my approval.

Okamura: That's a story I have never heard so far.

Williams: It's the first time I have reported this information.

Suzuki and Okamura: Nobody knows.

Williams: That's correct. I know there are some hard feelings in Northern California about the fact that their efforts on the distance scale were joined by another group, but I don't look at it that way. Even SCP member Nino Panagia agreed that it would be wise to have two independent teams working on this problem. Had there been an approved Cycle 6 TAC evaluated program awarded to a team with that goal I would not have given DD time to another team during that Cycle. I may well have

encouraged another group to get interested in the problem for a future Cycle, but that situation did not present itself.

Suzuki: I'm impressed by your foresight because the Nobel Prize Committee chair told us that it was because of the two teams that they believed in the accelerating universe. In the past, the Nobel Committee members conducted analysis by themselves to confirm reported results and they checked if the experiment was legitimate. But for the accelerating universe, they didn't need to do so because the two independent teams got the same results.

Williams: It is an interesting story about how the two independent Dark Energy teams got going with Hubble Telescope observations, and it is appropriate for this to be public knowledge. Although there was competition between the SCP and Hi-z teams they did have a good professional relationship throughout the time they were working on the distance scale.

Okamura: Oh, that's your spirit, quite the same spirit as that shown when you decided the Hubble Deep Field.

Williams: Correct. The same philosophy, and involving public data.

Okamura: Okay. The Hubble Deep Field. Now, no one disagrees that it's a monumental work. However, I learned from the slides of your talk last week that this was not the case in the beginning. That story would also be very interesting.

Suzuki: Let me conclude dark energy first. When did you begin to believe the universe is accelerating? Myself, even after the SCP and Hi-z papers were published, I didn't believe it.

Williams: Yes, when WMAP produced the CMB peaks. That's when I really



believed it.

Suzuki: I see.

Williams: The BOOMERanG results were significant in starting to make me a believer, but just by themselves I worried about dust.

Okamura: I also started to believe it in 2003 after reading the paper of the WMAP First Year Observations.

Suzuki: For others, it was not a single moment but a long "AaaaaHaaa." But before I leave can I ask you one quick thing? We are commissioning Hyper Suprime-Cam supernova this November. We are beginning to find nice supernovae from Hyper Suprime-Cam on Subaru. What would you do with Hyper Suprime-Cam or Subaru?

Williams: I would search for more target galaxies in the $z=1-2^{*3}$ redshift range, which presents the greatest difference between the various cosmological models. Also, understanding how the physics of those objects differ based on their spectra should be studied. That's what I would focus on.

Okamura: I see. A spectroscopist can't stop looking at spectra! The Hyper Suprime-Cam should be quite useful to find suitable high-z targets for you.

Suzuki: We will need Keck, Gemini, VLT, Subaru and JWST to follow them.

The Hubble Deep Field

Okamura: Let me now turn to another subject. Observational cosmology and galaxies are not your main research field. How did the idea of the HDF come to you?

Williams: I've been interested in astronomy since I was a boy. The first job I had was delivering newspapers on my bicycle. When I got my first \$25 from the newspaper route I bought a small refracting telescope. One of the first things I did was I took it out on a dark night to see what faint objects I could see, if I could see galaxies through it. Of course I could not see much in the Los Angeles suburbs with the small 2-inch telescope. But the fact is when an astronomer uses a telescope one of the things you want to try is to determine what distant objects you can detect. Fifty years later I had a larger telescope. One of the first things I thought should be done

^{*3} z is the redshift, which is a measure of distance.

with Hubble Space Telescope is to try to see how far out in space we could see. Of course, given the breakthroughs that were occurring in cosmological studies there were genuinely more substantive reasons than that!

Okamura: I see. You became interested in astronomy so early. A \$25 2-inch telescope was the mother of the HDF.

Williams: Even though that was not my primary research interest at the time, it seemed to me that since we had the premier instrument in the field we had to try to determine how successful HST would be in detecting high redshift galaxies. In the month of HST launch, April 1990, John Bahcall and his colleagues Raja Guhathakurta and Don Schneider wrote a comprehensive article in *Science*^{*4} magazine on what discoveries could be expected from Hubble Space Telescope. In that article one of the predictions they made was that HST was “not likely to reveal a new population of galaxies.” Their reasoning was solid; it was based on calculations and it made sense because of the cosmological effect that the surface brightness of distant objects decreases more rapidly than $1/(\text{distance})^2$, rather as $1/(1+z)^4$. Two of the powers of distance are the usual $1/(\text{distance})^2$. In addition, there is a stretching of the wavelength and time bands, so you have a one-over-distance-to-the-fourth relation that drops galaxy surface brightness extremely rapidly. Thus, Bahcall and colleagues understandably predicted that it would be difficult for the Hubble to make grand discoveries at

large redshifts.

Okamura: This may have been a feeling shared by quite a few people in the community at that time. In their paper^{*5} in 1995 which appeared just before the HDF, Chuck Steidel wrote, “Searches for galaxies at $z > 3$ have been spectacularly unsuccessful up to now, given the efforts devoted to the quest.”

Williams: This all changed when Mark Dickinson, a postdoc colleague at STScI who had just gotten his Ph.D. and didn't yet have a permanent job, submitted a successful HST Cycle 3 proposal to study a rich cluster of galaxies, 3C 324, at redshift $z=1.2$. He was awarded 32 orbits in 1994, which at that time was by far the longest observation that had been performed on HST. The 3C 324 cluster has at its center a very strong radio source that ground-based photos had barely resolved. By contrast, Mark's HST image obtained in one passband was spectacular. It revealed in clear detail dozens of galaxies, almost all of which had very irregular morphology. It demonstrated in one powerful image HST's ability to image distant galaxies.

Each morning we had science coffee at the Institute and we talked science. Mark's image took center stage in our conversations for several weeks after he first showed it to us. It was very exciting to me and convinced me that we should undertake serious investigations of distant galaxies with HST. Using Director's Discretionary time was clearly the simplest way to move ahead immediately and also to ensure that the Institute could play a role in facilitating observations and data archiving.

Initially I thought the thing to do was to issue a call for proposals to

the community and see how the experts would respond. I convened an advisory committee of experienced researchers in extragalactic work, including Sandy Faber, Alan Dressler, Simon Lilly, Ken Kellerman, Richard Ellis, Len Cowie, Frazer Owen, and others, to ask them what they would do if they received Director's Discretionary Time. I was prepared to give most of my Director's Discretionary Time to the study of distant galaxies. I asked each committee member to speak for 15 minutes to suggest to me how they thought one could best use HST to study distant galaxies.

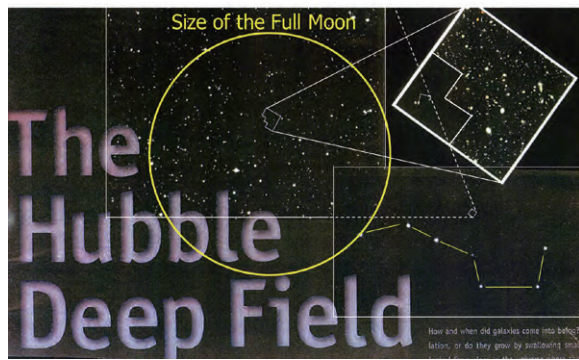
The questions the committee addressed were: What filters should be used? Should we go for a targeted or an untargeted field? That is, should we guarantee that we would detect galaxies in the image by looking at a known cluster of galaxies, or should we look at a blank field that would be more typical of the universe, but perhaps mostly empty? How many orbits should we use? What about the data; should it be made public? As Director's Discretionary Time I had the authority to waive the normal 1-year proprietary period that limits access only by the PI and co-Investigators.

I was hoping for a committee consensus to emerge for all the above questions, but that did not happen. After debating the topic for a day there was no agreement on most of the major issues discussed. Half the committee thought we should go for a targeted field because at least we knew we would get something. The other half said, “No, that's a special case. Let's go for a blank field, i.e., no selection effects.” The end result was there was no clear path that was laid out.

The next day I met with the

^{*4} J.N. Bahcall, P. Guhathakurta, and D.P. Schneider, *Science* **248** (1990) 178.

^{*5} C.C. Steidel, M. Pettini, and D. Hamilton, *Astronomical Journal* **110** (1995) 2519.



The Hubble Deep Field (HDF). The image at the upper central part shows about 30 arc minutes on the sky near the Big Dipper (Palomar Sky Survey). Superimposed on this image are the size of the full Moon and the location of the HDF. The upper right image is obtained from the HDF project. All these are shown against the background, which is a part of a poster produced by NASA. (Courtesy of Sadanori Okamura)

young Institute scientists who were interested in distant galaxy research—Harry Ferguson, Mark Dickinson, Andy Fruchter, Mauro Giavalisco, and Marc Postman—and we discussed what to do. We debated the situation for several hours and jointly came to the realization that we could craft and conduct a program as well as anyone on behalf of the broader community. Plus, we understood the HST data better than most anyone and we could reduce it and make it available to the public. I therefore made the decision that we would undertake a large HST program ourselves. We would image one field and it would be a blank field. We would use several passbands because it could provide basic information about the mass distribution of stars, even though it meant a small loss of sensitivity. This had the added advantage of producing a colored photo for outreach purposes—not a small matter for an expensive telescope like HST with its troubled past. And, we would make the data public, but also provide a fully reduced dataset.

To determine the number of orbits for the program, which we named the Hubble Deep Field, we did some calculations that indicated that the

signal-to-noise ratio of imaged faint objects would go from the linear regime to the square root of exposure time regime after 150 orbits, i.e., 10 days of continuous exposures. We therefore decided to image one deep area of sky with the primary HST camera for 10 consecutive days.

Early on we realized that it was important to have spectroscopic data to determine the redshifts, i.e., distances, of any galaxies imaged. We therefore took a two-orbit exposure of that particular field to give to Keck telescope, which had just begun operation as the only really large telescope in the world, and we asked Keck astronomers to start taking spectra of the brightest galaxies in the field that appeared in our 2-orbit image. Fortunately, astronomers from the three members of organizations that have access to Keck, University of California, University of Hawaii, and Caltech, agreed that they would start taking spectra of the brightest objects. This was 9 months before we actually began the HDF imaging

with HST. By the time of the 10-day December 1995 HDF campaign they had already obtained 50 spectra, and eventually after 2 more years they had obtained 130 spectra of the HDF galaxies, which they posted on their own website.

Okamura: It's interesting. The agreement on taking the spectra with Keck telescope was made before the HDF campaign.

Williams: Chuck Steidel, Judy Cohen, Garth Illingworth, Len Cowie, David Sanders all contributed to getting the Keck spectra of the brightest HDF galaxies, and they made them public immediately, to their great credit. They had every right to keep the spectroscopic information proprietary for themselves, but they did not. These spectra gave huge value to what would otherwise have simply been a pretty picture.

Okamura: I see. Great!

Williams: The Keck spectra were used as a basis set to determine the photometric redshifts of all 2700 galaxies in the HDF, and I believe



125 galaxies in the HDF image are given their respective values of redshift z measured by the Keck Telescope. (Image credit: M. Dickinson & Z. Levay)

this is the single most important scientific result to come out of the Hubble Deep Field. The photometric redshift of any galaxy can now be determined with images, not spectra, taken with 5-6 passbands, which enables the distance to any galaxy to be determined. It is especially useful to have one passband in the infrared to help break the degeneracy of redshift values caused by hydrogen continuum emission. Currently, an image obtained in 6 or 7 passbands will yield a galaxy redshift having a dispersion of ~ 0.06 , which is impressively small. Photometric redshifts have opened up the entire universe for study and interpretation.

Okamura: Yes, I agree with you. The photometric redshift was initially proposed in 1960s and a few practical applications appeared in 1980s. However, it is the HDF that made the technique, sometimes called 'poor-man's spectroscopy', a critical method indispensable to the study of distant galaxies. By the way, this amount of exposure time, 150 orbits, was unprecedentedly large for the HST. Probably the people who criticized the idea didn't imagine this long exposure.

Leading Astronomers Criticized the HDF Idea

Williams: They did not. If you look at the article in *SCIENCE*^{*4} by Bahcall, Guhathakurta, and Schneider, they were considering a long exposure to be 1-2 orbits. In my mind Director's Discretionary Time is a specially useful tool that enables risky observations to be made that have a potentially great value if they succeed. This contrasts with the tendency of TAC committees to minimize risk in their evaluations and therefore downgrade proposals advocating uncertain returns.

I can tell you that my initial announcement of the 150 orbit HDF campaign to image a 'blank' field was met with support but also criticism in the community. Why use so much valuable telescope time to take an image that might contain few galaxies and nothing of interest when those orbits could support other TAC-approved programs that were likely to produce new results? I can tell you that both John Bahcall and Lyman Spitzer, the two great proponents of HST, were very much opposed to the idea of the HDF. John had already done studies that caused him to doubt that we would see many galaxies, and the HDF was to take place soon after the expensive First Servicing Mission. The public image of HST, which at that time was the most expensive science project in history (at US \$3 billion), was terribly negative because of the spherical aberration fiasco. The reputation of HST and NASA had been disastrous and they were just recovering credibility.

John came down to the Institute from Princeton on two occasions to talk to me about his concerns. He strongly urged me not to go through with the HDF. We had very professional conversations. It was always a pleasure to talk with John, and he did have good reasons, saying, "Bob, I think this is not the time to do this and not the right way to go about it. There are too many orbits. You should wait to try something like this." I respectfully disagreed with him, "No, I think this really should be done. I am prepared to take full responsibility and fall on my sword if the end result is a failure." Lyman Spitzer also was worried about the HDF. He did not express his disagreement as overtly as John,

but it was clear that the two of them had discussed things together. When Lyman attended the meetings of the Space Telescope Institute Council (STIC), of which he was a member, he would ask me during the open discussions, "Bob, are you sure you want to do this?" This was Lyman's style, indirect and diplomatic. He was trying to get his point across to me and to the important STIC. In spite of these understandable concerns, however, our HDF team and I never waived from what we believed was a necessary observation to image the distant universe.

Okamura: Sometimes older people tend to be against new ideas. Do you think this was a factor?

Williams: I don't know that it was so much that as the fact that both John and Lyman had put an important part of their lives into Hubble Space Telescope. They wanted to make sure that this resource was preserved. There were never any hard feelings between us, but the strength of their opposition was never in doubt! It was not so much a matter of age as it was whether or not this was the time and opportunity to be a risk taker. They clearly did not feel that way about Hubble Space Telescope.

Okamura: To me, the decision of this unprecedentedly long exposure and the choice of four filters are the key elements of the great success of the Hubble Deep Field.

Williams: We would not have enabled photometric redshifts, obviously. The ultraviolet filter was sensitive to the hot star population and it led to the initial Madau plot of the star formation rate, which has been one of the fundamental results of the HDF.

Okamura: Yes. In the Madau plot, which shows the cosmic star

formation rate as a function of redshift, two new points were added from the HDF in the frontier redshift range; one is at $\langle z \rangle = 2.75$ ($2 < z < 3.5$) and the other at $\langle z \rangle = 4$ ($3.5 < z < 4.5$) although both of them are lower limits. The nearer $\langle z \rangle = 2.75$ point came from 69 galaxies and $\langle z \rangle = 4$ point from 14 galaxies discovered in the HDF by the dropout technique.*⁶

Williams: By the dropouts, exactly. So that came out of it and these were very significant results. Subsequently, other results have followed, including the maps of the distribution of dark matter, gravitational lensing, cosmological acceleration, and black holes in galaxies.

Okamura: And also with the success of this HDF, it seems that the HST became as if a kind of survey telescope since then. A lot of deep surveys followed.

Williams: Yes, there was the COSMOS survey of 1 degree by 2 degrees. This mosaic of 7200 square arc minutes produced the very nice dark matter map. And then there were the Frontier Fields.

Okamura: The Frontier Fields, yes. It's another exciting campaign with spectacular images of rich cluster fields.

Williams: With the infrared passbands being used, there are now dropouts in the H band that enable redshift 7 galaxies to be detected. So there are some very distant galaxy candidates. And now with gravitational lensing the Frontier Fields have been able to detect candidates with redshifts $z=10-11$. Spectra have been taken of several of the candidates and based on the Lyman break, measured redshifts of $z \sim 11$ are confirmed. HST is detecting galaxies very near the epoch of their formation.

Okamura: Yes, redshift of 11.2—that's recently confirmed and announced in March.*⁷

Williams: And there is another candidate at $z=10.7$, I believe it is. My colleague Dan Coe has a paper on several objects where spectra confirm redshifts around 10.

Okamura: It is the HDF that gave birth to all the success of these surveys.

Williams: Yet there are people who would say "Enough of the Deep Fields." A lot of orbits have been put to them and we should move on to other things. I understand that thinking, but I don't agree with it.

Status of the James Webb Space Telescope

Okamura: Okay. Time has passed too quickly and we have been talking more than an hour. Finally, could you tell me how is the present condition of the JWST (James Webb Space Telescope) and how secure is its launching schedule?

Williams: There were substantial cost overruns and delays in the project three years ago and there were some organizational problems. I think Goddard Space Flight Center agrees that the management structure was not optimal. The problem triggered a big review because substantially more money was needed to complete the project—far above the amount that NASA had originally projected. For the review NASA committed itself to making major changes in how it dealt with the contractors and the administrative structure within NASA that it was using. They convinced Congress that it was worth one final authorization of extra funds to complete the project, and Congress obliged. Since that time the project has been on schedule and within its budget. It has gone very well for the

past 2-3 years and the launch date remains October 2018.

Okamura: Okay. The target is October 2018.

Williams: For several years it has not changed. Final integration and testing remain and at this point the detectors look good. But we all know that space is a risky business and particularly with pre-launch testing and launch itself things can go wrong that one does not anticipate. Because JWST will be stationed beyond the moon it will not be serviceable. It should yield tremendous returns on our understanding of the early universe and the nature of planets around other stellar systems.

Okamura: We really hope the successful launch of the JWST because we recently had a tragedy, as you know, of the Japanese X-ray satellite 'HITOMI'.

Williams: Very regrettable. We, too, have had some failures. As colleagues in science we are all in this together. We all hope to benefit from the discoveries that JWST will bring.

Okamura: Okay. Thank you very much. We have heard very very interesting stories today. We sincerely appreciate your taking time for this interview.

*⁶ A method to estimate the redshift (or distance) of a galaxy from how it appears in several passband images. Ultraviolet (UV) radiation from distant galaxies at wavelengths shorter than the Lyman-alpha resonance line at 121.6 nm is absorbed by hydrogen atoms in the intergalactic space, and therefore it hardly arrives at the Earth, making the galaxies invisible (drop out) in the rest-frame UV images. As light from distant galaxies is stretched in wavelength due to the redshift, the local Lyman-alpha line wavelength shifts to visible or near infrared region, depending on the galaxy's distance. By looking at images taken in the several wavelength bands from shorter to longer, to see at which band a galaxy drops out, it is possible to roughly estimate the galaxy's redshift.

*⁷ P.A. Oesch et al., *Astrophysical Journal* **819** (2016) 129.

Lectures on Cosmology with Planck at IPMU

Daisuke Kaneko

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

“Lectures on Cosmology with Planck at IPMU”^{*} was quite a stormy seminar due to Typhoon No. 10. The seminar was held from August 29 to 31 at the Kavli IPMU, but the schedule for August 30 and 31 was postponed in order to avoid the typhoon and any other accidents. Therefore, supplementary lectures were held on September 13 on the University of Tokyo’s Asano campus. The lecturer was Dr. Guillaume Patanchon (University Paris Diderot) who is working on the Planck experiment: a cosmic microwave background (CMB) observation with a satellite which was launched in 2009 by the European Space Agency.

The main target in the audience was young post-docs and students who are not yet particularly familiar with cosmology, and many attendees came from KEK (Sokendai), JAXA, NAOJ, Yokohama National University, and Okayama University, in addition to the University of Tokyo. It shows a high level of interest in the recent

results of the Planck experiment.

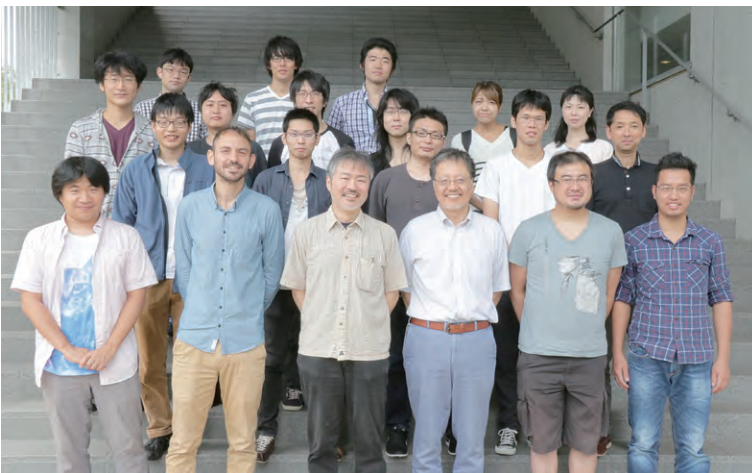
The lecture started with general relativity and an introduction to cosmology. Basic parameters in the standard model of cosmology were also introduced. The expansion of a homogeneous and isotropic universe was explained by calculating the FLRW (Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker) metric. On the second day, perturbation in the universe was discussed. Calculation of the anisotropy was carefully performed, as anisotropy of the CMB photon temperature is one of the most important topics. The relation between the CMB power spectrum and cosmological parameters was explained for beginners. Lectures then moved into observation of the CMB. The design of the Planck satellite, high-frequency and low-frequency instruments, cooling system, and bolometer sensor of the detectors were shown. At the end, results from the recent Planck experiment (published in 2015) were

presented. The observed CMB maps and spectra, as well as the fitted cosmological parameters, were shown in comparison with other experiments. The results with respect to B-mode polarization were presented with a comparison to a recent BICEP2 experiment. A measurement of non-Gaussianity was also mentioned.

On the additional day, the analysis method and systematic uncertainties were discussed. Issues such as long time-constant signal by cosmic rays, noise from 4K coolers, and non-linearity of ADC were realistically discussed, thanks to the lecturer’s experience in analyzing the Planck data.

Finally, a Q&A session of the lessons of the Planck experiment was held, and meaningful information was exchanged by CMB experimentalists. The seminar finished on a high note.

^{*} These lectures were supported by JSPS Core-to-Core Program, A. Advanced Research Networks.



Matrix Factorization and Related Topics, 2016

Dulip Piyaratne

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

The workshop “Matrix factorization and related topics, 2016”, organised by Hiroshi Ohta (Nagoya), Kyoji Saito (Kavli IPMU) and Atsushi Takahashi (Osaka), was successfully held at the Kavli IPMU for four days from September 5, 2016. The programme consisted of two series of lectures by Tobias Dyckerhoff (Bonn) and Daniel Murfet (Melbourne) together with related research talks by Atsushi Takahashi (Osaka), Andrei Losev (Moscow), and Michael Brown (Bonn). This workshop has brought together 35 participants from algebra, geometry, and mathematical physics.

Matrix factorizations were introduced by David Eisenbud, as a tool for studying the homological behaviour of modules over a hypersurface ring. More recently, matrix factorizations have begun appearing in a wide variety of contexts. For instance they arise in string theory as categories of D-branes for Landau-Ginzburg B-models. The expectation in homological mirror symmetry is that for any given symplectic manifold, there is a mirror Landau-Ginzburg model such that, the Fukaya category of the symplectic manifold should be

equivalent to the matrix factorization category of the Landau-Ginzburg model. In addition, Kajiwara-Saito-Takahashi’s explicit description of the equivalence of triangulated categories involving matrix factorizations of simple singularities nicely fits into this categorical expectation.

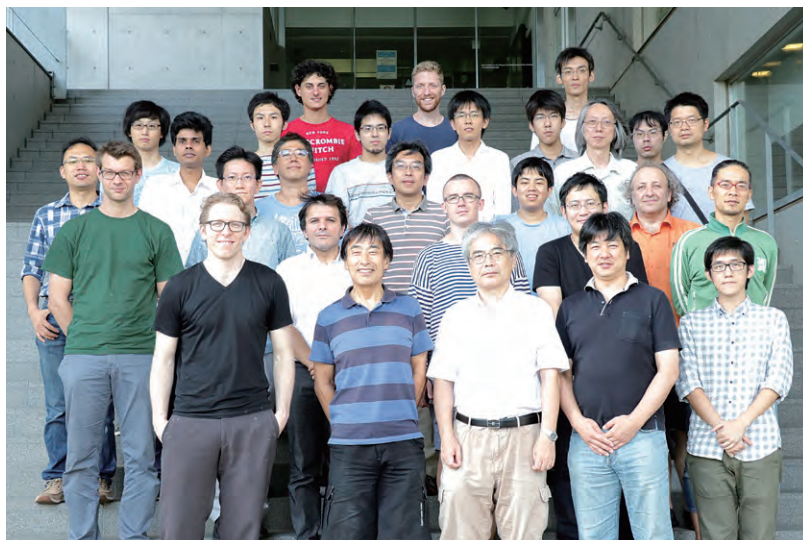
Tobias Dyckerhoff, following his joint works with Mikhail Kapranov, Chris Brav, Vadim Schechtman, and Yan Soibelman, discussed various topics on topological Fukaya categories. Firstly he constructed topological Fukaya categories for the two dimensional case. Then he introduced the concept of a relative Calabi-Yau structure and constructed them on topological Fukaya categories. Finally, he discussed more details using the categorical machinery of perverse sheaves.

Daniel Murfet gave his lectures under the title of generalized orbifolding of simple singularities. He started his lecture series by explaining an important result due to Carqueville-Ros Camacho-Runkel, which directly leads to new descriptions and relations between the associated categories of matrix factorizations and Dynkin

quiver representations of simple singularities. Then he discussed these concepts in the abstract bicategorical framework for generalised orbifolding. He concluded his lectures with some concrete examples of Landau-Ginzburg models and its graded version. In the final lecture, he explained how to obtain finite dimensional models of matrix factorization categories.

Atsushi Takahashi gave a gentle introduction to Kyoji Saito’s theory of primitive forms. He highlighted the historical development of the subject and directions for further advancements mainly in the categorical setup. Under the section of research talks, Michael Brown explained about the topological K-theory of matrix factorization categories in order to extract topological information from the matrix factorization category associated to an isolated singularity. In his research talks, Andrei Losev first discussed about the theory of primitive forms and generalised Hodge theory; and then he went to talk on tropical mirror symmetry where he considered tropical limit of Gromov-Witten theory.

Numerous discussions among the participants, most importantly from different mathematical communities, have contributed to the workshop in an essential way. Furthermore, participants also appreciated ample time for interaction with other researchers. So the workshop provided an ideal atmosphere for fruitful interaction and exchange of ideas.



FY2016 WPI Site Visit

An FY2016 WPI site visit was conducted on September 29 and 30 to evaluate the scientific results recorded by the Kavli IPMU researchers since the launch of the Institute from scratch in October 2007, the level of achievement of the initial implementation plan of the Institute as a WPI center, and its progress plan during the extension period starting from FY2017. The site visit team consisted of WPI Program Director (PD) Toshio Kuroki, Deputy PD Akira Ukawa, Program Officer (PO) in charge of the Kavli IPMU Ichiro Sanda, PO in charge of Tokyo Institute of Technology's Earth-Life Science Institute (ELSI) Shoken Miyama, members of the Working Group in charge of the Kavli IPMU (Hiraku Nakajima, Yutaka Hosotani, Tetsuji Miwa, Matthias Staudacher, Ian Shipsey, and Anthony Tyson), some of the WPI Program Committee members (Maki Kawai and Michiharu Nakamura), MEXT and JSPS officers, Takuya Saito (Director, Office for the Promotion of Basic Research, the Basic Research Promotion Division, Research Promotion Bureau) and others.

The first day was devoted to the overview report by Kavli IPMU Director Murayama and presentations by Kavli IPMU researchers on representative

research accomplishments as well as 19 poster presentations by young researchers.

In the morning of the second day, Director Murayama presented the progress plan of the Kavli IPMU. The University of Tokyo's President Makoto Gonokami and Executive Vice President for Research Kazuo Hotate joined the discussion and, together with the Kavli IPMU management, answered various questions from the site visit team. In the final session, PD, POs, and members of the Working Group expressed their comments, and the site visit was adjourned.



Director Hitoshi Murayama explaining the Kavli IPMU's future activity program to the site visit team.

Ninth External Advisory Committee Meeting

On August 22, 2016, the 9th Meeting of the Kavli IPMU External Advisory Committee was held. Chairman Steve Kahn (Stanford/SLAC), and all the committee members, John Ellis (King's College London), Young-Keek Kim (University of Chicago), Sadayoshi Kojima (Tokyo Institute of Technology), David Morrison (UC Santa Barbara), Sadanori Okamura (Hosei University), and Nigel Smith (SNOLAB), were present.

This time, the purpose of the Meeting was to prepare for the FY2016 WPI site visit, and the Committee discussed topics such as "Whether the research and implementation plan of the IPMU as a WPI center, proposed in 2007 when it was launched, has been fully achieved?" and "Whether the

preparation for the five years of extension period is appropriate?" and provided many useful comments and suggestions.



Kavli IPMU External Advisory Committee members discussing with researchers during tea time.

Hiroshi Ooguri Elected President of the Aspen Center for Physics

Hiroshi Ooguri, Principal Investigator of the Kavli IPMU and Professor of California Institute of Technology, has been elected the President of the Aspen Center for Physics for a three-year term by its board of trustees on July 12, 2016.

The Aspen Center for Physics was established in 1962 in Aspen, Colorado, one of America's picturesque resort areas, to provide physicists with a creative environment for their individual research and to encourage interactions between different fields to open new directions of research. It is a short-stay type physicists' paradise for thinking and talking, and, every year, more than 1000 physicists from around the world come to the Center, mostly in summer and winter. Since 1968 the Center has been an independent non-profit corporation operated for scientists by scientists.

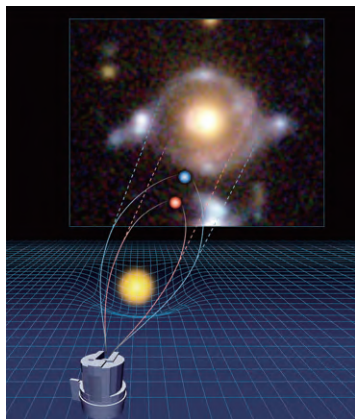
Hyper Suprime-Cam Found an "Ancient Eye" in the Sky

An international team of researchers from the National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), Kavli IPMU, and other institutes have discovered a rare gravitational lensing effect in the images obtained from the Subaru Telescope's Hyper Suprime-

Cam (HSC). It suggests lensing by a foreground galaxy of two background galaxies at different distances. The rare finding has been dubbed the “Eye of Horus” because of its eye-like appearance, resembling the eye of Horus, the ancient Egyptian sky god.

This discovery was reported in *Astrophysical Journal Letters* on July 25, 2016. Researchers involved in the discovery include Kavli IPMU Postdoctoral Fellows Anupreeta More and Alessandro Sonnenfeld as well as the University of Tokyo Graduate School of Science Assistant Professor Masamune Oguri, who is also Kavli IPMU Associate Scientist. It should also be noted that the first author of this paper, NAOJ Assistant Professor Masayuki Tanaka was at the Kavli IPMU as a Postdoctoral Fellow until March 2013.

In the HSC survey, it is expected to find 10 more systems of the same kind.



Schematic diagram showing the location of galaxies creating the gravitational lens effect of Eye of Horus. A galaxy at 7 billion light years from the Earth bends the light from the two galaxies behind it, one at 9 billion light years, and the other at 10.5 billion light years. (Credit: NAOJ)

KamLAND-Zen Searched for Neutrinoless Double β Decay with World Record Sensitivity

If neutrinos are Majorana particles (the anti-neutrino is the same as the neutrino), neutrinoless double-beta decay ($0\nu\beta\beta$) offers decisive evidence for it, and neutrinos may

be responsible for the dominance of matter over antimatter in the Universe. As a result, a number of experiments world-wide are in intense competition to discover $0\nu\beta\beta$.

The KamLAND-Zen international collaboration, led by Kunio Inoue (Director of the Research Center for Neutrino Science, Tohoku University and Kavli IPMU Principal Investigator), has been searching for $0\nu\beta\beta$ in an unprecedented amount of Xenon-136, the isotope where the double-beta decay occurs, using its ultra-low background liquid-scintillator detector located 1000 m underground in the Kamioka mine in Gifu Prefecture. Kavli IPMU Assistant Professor Alexandre Kozlov is one of the main players in this experiment. Recently, KamLAND-Zen succeeded in dramatically improving the upper limit of $0\nu\beta\beta$ rate by a factor of 6. This result has been published in *Physical Review Letters* on August 16, 2016 and selected as an Editors’ Suggestion paper.

Science Café Universe 2016

The annual “Science Café Universe 2016” was held at the Tamarokuto Science Center (TSC) in NishiTokyo City, jointly sponsored by the Kavli IPMU and the TSC. Two lectures were given, first in July and then in September.

On July 3, Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Ryo Namba talked about “Primordial Gravitational Waves and Magnetic Fields from the Very Early



During his lecture, Ryo Namba took time out to talk to each group of the audience sitting around the same table.

Universe: Forefront of Cosmology.” About 40 people listened, 70% being high-school and junior high-school students.

On September 4, Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Akishi Ikeda talked about the “Deep Relation between Mathematics and Physics: Equation of Everything Derived from Principle of Least Action.” About 50 people listened, 80% being high-school and junior high-school students.



Akishi Ikeda giving a lecture.

A Program to Encourage Female Students to Study Science: “Look into the Universe”

On August 20, 2016, a Program to Encourage Female Students to Study Science, “Look into the Universe,” was held at the Kavli IPMU. A total of 70 people, including junior high-school and high-school girls, their parents, and teachers listened to two lectures given by Chicago University Professor Young-Kee Kim, who was a former Deputy Director of Fermilab. The lectures were given in English and interpreted consecutively by Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama in Japanese. After the lectures, there was a Q&A session, and finally, the attendants enjoyed friendly conversation with Professor Kim and Director Murayama.

Booth at the 2016 Super Science High School Student Fair

On August 10 and 11, the 2016 Super Science High School Student Fair was held at the Kobe International

Exhibition Hall in Kobe, Hyogo Prefecture. The Kavli IPMU and other 8 WPI centers jointly ran a booth exhibiting their research activities.

Booth at the New Scientist Live in London

From September 22 through 25, 2016, a science event “New Scientist Live” was held in London. Eight Japanese universities and research institutes, including the Kavli IPMU, OIST (The Okinawa Institute of Science and Technology), Osaka University, RIKEN, and NAOJ (National Astronomical Observatory of Japan) jointly ran an exhibition booth, titled “The Best of Japan Science.”

Kavli IPMU Seminars

1. “The dark matter halo from hydrodynamic simulations”
Speaker: Nassim Bozorgnia (U Amsterdam)
Date: May 18, 2016
2. “Supergravity duals of N=4 theories in 2+1 dimensions on a Coulomb branch”
Speaker: Akikazu Hashimoto (U Wisconsin, Madison)
Date: May 18, 2016
3. “Colliding frontiers: the search for new physics at the LHC”
Speaker: Tom Melia (LBNL / UCB)
Date: May 23, 2016
4. “Towards a complete $\Delta(27) \times SO(10)$ SUSY GUT”
Speaker: Fredrik Bjorkerth (Southampton U)
Date: May 25, 2016
5. “Gravitational Positive Energy Theorems from Information Inequalities”
Speaker: Bogdan Stoica (Caltech)
Date: May 26, 2016
6. “Explaining the LHC 750 GeV Diphoton Excess via Photon Fusion”
Speaker: Neil Barrie (Sydney U)
Date: May 26, 2016
7. “Boundedness results on Fano varieties”
Speaker: Chen Jiang (Kavli IPMU)
Date: May 26, 2016
8. “Creation of an inflationary universe out of a black hole”
Speaker: Junichi Yokoyama (RESCEU, U Tokyo)
Date: Jun 01, 2016
9. “The Co-evolution of AGNs and Galaxies, Viewed from 2D Spectroscopy and Mid-infrared Spectroscopy”
Speaker: Lei Hao (Shanghai Optical Observatory)
Date: Jun 01, 2016
10. “Cosmic Gamma-Ray Lines: About supernova interiors, diffuse radioactivity, and black hole accretion”
Speaker: Roland Diehl (MPE)
Date: Jun 02, 2016
11. “Exponential networks and representations of quivers”
Speaker: Johannes Walcher (U Heidelberg)
Date: Jun 02, 2016
12. “Spread of entanglement and chaos”
Speaker: Mark K. Mezei (Princeton U)
Date: Jun 06, 2016
13. “Entanglement, conformal field theory, and interfaces”
Speaker: Enrico Brehm (Ludwig Maximilian U)
Date: Jun 07, 2016
14. “Monodromy Dark Matter”
Speaker: Viraf M. Mehta (Heidelberg U)
Date: Jun 08, 2016
15. “Divisionally free arrangements of hyperplanes”
Speaker: Takuro Abe (Kyushu U)
Date: Jun 16, 2016
16. “On a Canonical Quantization of Pure AdS₃ Gravity”
Speaker: Massimo Porrati (NYU)
Date: Jun 21, 2016
17. “The Painleve property for the Schlesinger equations”
Speaker: Todor Milanov (Kavli IPMU)
Date: Jun 23, 2016
18. “Parabolic Verma modules”
Speaker: Hisayoshi Matsumoto (U Tokyo)
Date: Jun 25, 2016
19. “Multidimensional Simulations of Core-Collapse Supernovae & their Impact on Supernova Nucleosynthesis”
Speaker: William Raphael Hix (U Tennessee)
Date: Jun 27, 2016
20. “Simulating metallicity distribution in the Universe”
Speaker: Chiaki Kobayashi (U Hertfordshire)
Date: Jun 28, 2016
21. “Nonequilibrium Chiral Magnetic Effect in Asymmetric Weyl Semimetals”
Speaker: Rene Meyer (Stony Brook U)
Date: Jun 28, 2016
22. “Noncommutative resolutions of discriminants of reflection groups”
Speaker: Colin Ingalls (U New Brunswick)
Date: Jun 29, 2016
23. “Latest Results from Advanced LIGO’s First Science Run”
Speaker: Kipp Cannon (RESCEU, U Tokyo)
Date: Jun 29, 2016
24. “Physics, Astronomy and Cosmology from the first direct detection of gravitational wave”
Speaker: Takashi Nakamura (Kyoto U)
Date: Jun 29, 2016
25. “Iterated convolution of resurgent functions”
Speaker: Shingo Kamimoto (Hiroshima U)
Date: Jun 30, 2016
26. “Precision Top mass from energy peaks”

- Speaker: Roberto Franceschini (CERN)
Date: Jul 01, 2016
27. “Understanding the Explosions of Massive Stars”
Speaker: Bernhard Mueller (Queen’s U, Belfast)
Date: Jul 06, 2016
28. “Accretion Induced Collapse of White Dwarf and its Possible Signals”
Speaker: Shuai Zha (Chinese U Hong Kong)
Date: Jul 07, 2016
29. “De Rham cohomology of vanishing cycles for non-isolated critical points”
Speaker: Kyoji Saito (Kavli IPMU)
Date: Jul 07, 2016
30. “Introduction to the star-triangle relation form of the Yang-Baxter equation and modern applications”
Speaker: Andrew Kels (Australian National U)
Date: Jul 12, 2016
31. “The spatially resolved transition between star formation and quiescence with SDSS IV MaNGA”
Speaker: Francesco Belfiore (U Cambridge)
Date: Jul 14, 2016
32. “Particle-Vortex Duality from 3d Bosonization”
Speaker: Andreas Karch (U Washington)
Date: Jul 26, 2016
33. “On the geometry of thin exceptional sets in Manin’s conjecture”
Speaker: Sho Tanimoto (U Copenhagen)
Date: Jul 26, 2016
34. “Primordial anisotropies and asymmetries during inflation”
Speaker: Hassan Firouzjahi (IPM, Tehran)
Date: Jul 27, 2016
35. “Recent Developments in the Study of Rational Conformal Field Theories”
Speaker: Sunil Mukhi (IISER Pune)

- Date: Jul 28, 2016
36. “Novel Approach to Fine-tuned Supersymmetric Standard Models, and the Explanation of the Muon Anomalous Magnetic Dipole Moment Anomaly”
Speaker: Wen Yin (Tohoku U)
Date: Jul 29, 2016
37. “Search for Sphalerons: LHC vs. IceCube”
Speaker: Kazuki Sakurai (Durham U)
Date: Aug 03, 2016
38. “A localization formula for epsilon factor of algebraic D-modules”
Speaker: Tomoyuki Abe (Kavli IPMU)
Date: Aug 04, 2016
39. “3D bosonization and Chern-Simons-matter theory”
Speaker: Djordje Radicevic (Stanford U)
Date: Aug 10, 2016
40. “Dark Matter Primordial Black Holes and their Formation”
Speaker: Encieh Erfani (IASBS)
Date: Aug 10, 2016

Personnel changes

Promotion

Naoyuki Tamura, who was Kavli IPMU Assistant Professor, became Kavli IPMU Associate Professor on August 1, 2016



Naoyuki Tamura

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 Assistant Professor Kevin Bundy [September 16, 2011 – September 4, 2016] moved to the University of California, Santa Cruz as an Associate Researcher.

Kavli IPMU Assistant Professor Alexie Leauthaud [September 16,

2011 – January 31, 2013 as an IPMU Postdoctoral Fellow, and then – September 4, 2016 as a Kavli IPMU Assistant Professor] moved to the University of California, Santa Cruz as an Assistant Professor.

Kavli IPMU Project Researcher [Adjunct Assistant Professor] Artan Sheshmani [September 7, 2015 – July 31, 2016] moved to the Ohio State University as an Assistant Professor.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Ran Huo [September 1, 2013 – August 31, 2016] moved to the University of California, Riverside as a Postdoctoral Fellow.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Yin Li [April 1, 2016 – September 30, 2016] moved to the Lawrence Berkeley National Laboratory as a Postdoctoral Fellow.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Ryo Namba [September 1, 2013 – August 31, 2016] moved to McGill University as a Postdoctoral Fellow.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Andreas Schulze [October 1, 2013 – September 30, 2016] moved to the National Astronomical Observatory in Japan as an EACOA (East Asian Core Observatories Association) Postdoctoral Fellow.

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Yue-Lin Sming Tsai [October 1, 2013 – September 30, 2016] moved to National Center for Theoretical Science (Taiwan) as an Assistant Research Scholar.

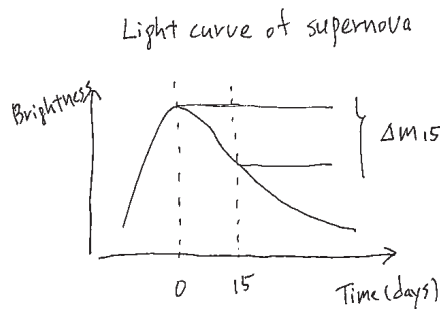
Kavli IPMU Project Researcher Kohei Hayashi [April 1, 2015 – March 31, 2016 as a JSPS Postdoctoral Fellow, and then – September 30, 2016 as a Kavli IPMU Project Researcher] moved to the Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University as a Postdoctoral Fellow.

Phillips Relation

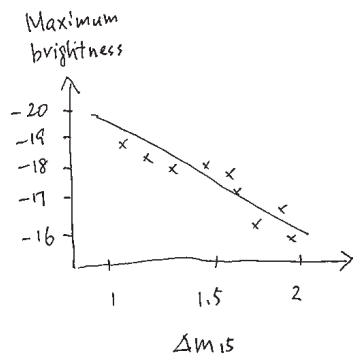
Naoki Yasuda

Kavli IPMU Professor

Phillips relation is the relation in the sense that type Ia supernova with slower decline rate has brighter maximum luminosity. Although a large dispersion of maximum luminosity is known, Type Ia supernova can be used as an accurate distance indicator by calibrating its maximum luminosity using this relation. This Phillips relation or, more generally, the light curve shape-luminosity relation, is the basis of the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observation of distant supernova. The discovery was awarded the 2011 Nobel Prize in Physics.



Define the decline rate as the magnitude difference between the maximum brightness and the brightness 15 days after that.



The correlation between Δm_{15} and the maximum brightness.

\Rightarrow Phillips relation

近況

Kavli IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし



7月15日：文部科学省研究振興局より小松弥生局長の訪問を受け、Kavli IPMU 所属研究者の出身地域を表した地図を紹介する。



8月20日：カブリIPMUにて開催された女子中高生理系進路選択支援イベント「宇宙ヲ覗クト?」(本誌63ページ)にて、招待講演者のシカゴ大学教授・ヤンキー・キムさんと一緒に会場からの質問に答える。



8月22日：外部諮問委員会にて、Kavli IPMU の概要を説明 (本誌62ページ)。



9月28日：科学番組の取材を受ける。



9月29日：WPIの現地視察にて概要を説明 (本誌62ページ)。

類似と数学

1940年3月、戦争の混乱の中、兵役に就かなかったことを理由に逮捕された一人の数学者がフランス・ルーアンのボンヌ・ヌヴェール刑務所の獄中から哲学者である彼の妹に向けて14ページにわたる手紙を送った。その中で彼はこう述べている。「数論^{*1}と(有限体上の関数体の理論と)の類似は強固であり、明らかです...一方で(有限体上の)関数体と「リーマン体」に関しては...後者から得られた知見を前者で適用したとき我々は極めて強力な手段を手にするのです...」^{*2} 彼の名はアンドレ・ヴェイユ。後にリーマン予想^{*3}の類似から有限体上の多様体のゼータ関数に関する驚くべき予想を提唱し、現代数学に至るまで絶大な影響力を及ぼした人物である。

§1 ヴェイユの哲学

1, 2, 3, ... 整数は誰もが慣れ親しんでいる数学の最も基本的かつ古典的な概念だろう。一方で極めて困難な研究対象であり、多くの素朴な疑問に対して現代数学は無力である。しかし、多大な努力の結果、数論の真髄に触れたとき、人々は極上の果実を手にしてきたことも事実である。

古来より数学者の興味を中心の一つは方程式を解くことであった。実用的な理由から生まれたのであろう、2次方程式 $x^2 + ax + b = 0$ の解法は古代バビロニアの時代には知られていた。時代を下り、どんどん複雑な方程式へ興味移っていく。方程式を研

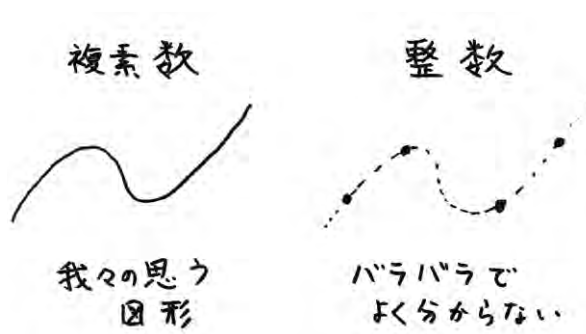


図1 代数多様体の複素数と整数の世界での実現

究する一つの方法は方程式を図形ととらえることである。例えば、 $y = x^2$ という方程式を考えよう。中学生の時にこの方程式は放物線を表すことを習ったはずである。放物線ととらえれば図形なので、幾何学的なアプローチが可能になってくる。この考えのもと、多変数連立方程式を幾何学的にとらえようとするのが代数幾何学と言われる数学分野である。これに関しては *IPMU News* でも戸田氏^{*4}やボンダル氏^{*5}が詳しく取り上げている。「多変数の連立方程式で定まる図形」を代数幾何学では代数多様体と呼んでいる。代数幾何学は様々な数学の交差点に位置している。代数多様体があれば、その整数解ででき

^{*1} 整数論とも言われる。

^{*2} ここで現れる体(たい)と§2に現れる環(かん)については、コラム1を参照。有限体については§2で詳しく述べる。リーマン体とは、後で述べる複素幾何学に関連する体で、複素数体上の関数体と言われることが多い。

^{*3} リーマン予想については、§3で述べる。

^{*4} 戸田幸伸, *Kavli IPMU News*, No. 20 (2012) p. 32.

^{*5} アレクセイ・ボンダル, *IPMU News*, No. 14 (2011) p. 32.

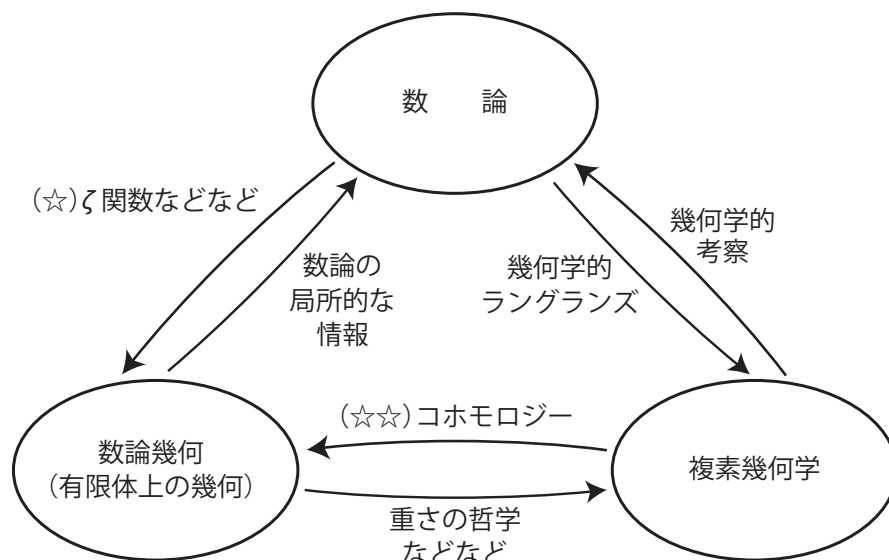


図2 ヴェイユの三位一体

る図形を考えることができる。この整数解を研究するのは数論である。一方で代数多様体の複素数解でできる図形を考えることができる。こうすると複素幾何学と結びつく。

一般的に、解を考える場所が違えば全く違う世界になってしまう。例えば複素数で考えれば、代数多様体を(高次元の)複素空間における図形と見なすことができるので、幾何学的な考察を加えることができる。一方で整数解を研究したければ解はまばらにしか存在しないので、ただそのまま考えていては我々の一般的な図形とかけ離れたものしか出てこない(図1参照)。

代数幾何という同じ土台にのっけいながら全く違う世界。しかし、これらの世界の間にも我々の感覚を超える関係、類似、があり、上の図2のように三位一体で考えたとき数学の真実にたどり着けるというのがヴェイユの哲学(この哲学を主張するのは彼が初めてではないと彼自身断りを入れている)である。

§2 ゼータ関数

リーマンのゼータ関数とは

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s}$$

で定義される関数であり、定義自体はとても素朴である。この関数は19世紀中頃リーマンにより素数の分布に関する情報を持っていることが発見され、期待される究極の情報が提唱された。これを現在ではリーマン予想^{*3}と呼んでいる。これは現在でも数学の中心に鎮座する最も重要な問題と言っても過言ではないが、残念ながら現段階で有効なアイデアがあるようには見えない。

整数の研究との比較対象として有限体上の多項式環の理論がしばしば考えられてきた。この理論を考察するため、まず有限体を定義しよう。 p を素数とする。このとき $\{\overline{0}, \overline{1}, \dots, \overline{p-1}\}$ という有限個の集合 \mathbf{F}_p を考える。実は、この集合には有理数(分数で表される

数のこと)の集合と同じように四則演算を定義できる。これはとても単純なことで、足したり掛けたりしたあと p で割った余りを考えれば良いのである。例えば $p=7$ と取れば (20 割る 7 の余りは 6 であるから)

$$\bar{4} \times \bar{5} = \overline{20} = \bar{6}$$

という具合に計算すれば良い。 $\overline{20}$ を定義しなかったので正確性に欠けるがお許し願いたい。割り算が多少問題になるが、

$$\bar{4} \div \bar{5} = ?$$

を計算したければ小学生に戻った気分で

$$\bar{5} \times ? = \bar{4}$$

となる $?$ を見つければよいのである。答えは 5 となるのでご自身で計算されたい。 p が素数でないものをとってもかけ算と足し算は同じように定義される。ところが、そうすると割り算は定義されない。例えば $p=12$ (これは時計の世界である) としてみれば

$$\bar{4} \times ? = \bar{1}$$

となる $?$ は存在しないことが容易に分かる。

コラム1: 体と環

環とは足し算とかけ算が定義されている集合のことを言う。例えば整数全体 ($\dots, -2, -1, 0, 1, \dots$) は足し算もできるしかけ算もできるので環をなしている。多項式環も環の例である。体とは、特に単純な環の一種である。正確には 0 以外の全ての元に対して、掛けると 1 になる逆数が存在する環を特に「体」というのである。有限体は体であるし、他にも有理数 (つまり分数) 全体や実数 (小数で書ける数) 全体は体である。ここで説明した「体」とは無関係であるが、「立方体」や、ここで頻繁に現れる「多様体」のように語尾に「体」のつく言葉がいろいろあり、非専門家にとっては紛らわしい。

話を戻そう。件の有限体上の多項式環 $\mathbf{F}_p[x]$ とは \mathbf{F}_p の元 (集合の要素のこと) を係数に持つような多項式全体である。たとえば $\mathbf{F}_3[x]$ の 1 次以下の式は

$$\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, x, x+\bar{1}, x+\bar{2}, \bar{2}x, \bar{2}x+\bar{1}, \bar{2}x+\bar{2}$$

の 9 個の式がある。同じように 2 次式以上も考えられるので、 $\mathbf{F}_3[x]$ には無限個の元がある。高校で習う多項式の足し算・かけ算と同じように $\mathbf{F}_p[x]$ にも足し算・かけ算があり、さらにこれ以上因数分解できないような多項式、既約多項式が定義できる。この既約多項式はまさに $\mathbf{F}_p[x]$ において素数に対応する概念である。

さて、リーマンのゼータ関数が難しすぎるのなら、整数の類似物である $\mathbf{F}_p[x]$ にもゼータ関数を考えて性質を見極めようとするのは一つの案である。そのために重要な発見はゼータ関数がオイラー積表示

$$\zeta(s) = \prod_{p:\text{素数}} \frac{1}{1-p^{-s}}$$

を持つことであった。これによりゼータ関数の「代数幾何学的解釈」ができるようになるのである。 f を $\mathbf{F}_p[x]$ の元としたとき、 $\deg(f)$ として f の次数を表すとする。このときこれらの類似をたどることで

$$\zeta_{\mathbf{F}_p[x]}(s) = \prod_{f:\text{既約多項式}} \frac{1}{1-p^{-\deg(f) \cdot s}}$$

と定義してみる。ここで $\zeta(s)$ の定義の p^s が $\zeta_{\mathbf{F}_p[x]}(s)$ では $p^{-\deg(f) \cdot s}$ に置き換わっている。これは $\zeta(s)$ の p を素数 p の“大きさ”と解釈した場合、 f に対応する大きさは $p^{\deg(f)}$ とするのが適当という考えからである。これで $\mathbf{F}_p[x]$ のゼータ関数が出るわけだが、代数幾何学的には $\mathbf{F}_p[x]$ は (有限体上の) 直線と考えられる。こう考え直すと $\zeta_{\mathbf{F}_p[x]}(s)$ の定義に出てくる数すべてに代数幾何的な意味づけができ、ほとんど同じ発想で有限体上の代数多様体 X に対してゼータ関数 $\zeta_X(s)$ を定義することができる。これがヴェイユの定義したゼータ関数であり、図2の三位一体の (☆) である。

§3 ヲェイユ予想

ヴェイユは $\zeta_{F[x]}(s)$ や、もっと一般に代数曲線 C に対する $\zeta_C(s)$ を計算した。その結果、リーマンのゼータ関数とは異なり、有理関数（つまり多項式の割り算）であることを発見した。もっと詳しく言うと

$$\zeta_C(s) = \frac{f_1(p^{-s})}{f_0(p^{-s}) \cdot f_2(p^{-s})}$$

(f_n は多項式) と書ける。さらに驚くべきことに $f_n(t) = 0$ という方程式の解の絶対値は $p^{n/2}$ となっていたのである! $n/2$ という分数が出てくるのがなんとも不思議であるが、彼にはこの数字に心当たりがあった。リーマン予想である。リーマン予想によれば、リーマンのゼータ関数は $1/2$ にのみ非自明な零点を持つことが予想されており、この形にぴったりはまるのである。リーマンのゼータ関数に対するリーマン予想は難しすぎてなかなか太刀打ちできないが、有限体上の代数曲線のリーマン予想類似はヴェイユによって定式化され証明されたのである。

これにとどまらずヴェイユは、 $f_n(t)$ には幾何学的な情報が含まれていることを見いだす。つまり、彼には $f_n(t)$ はさもコホモロジー $H^n(X)$ を計算しているように見えたのである。

コホモロジーとは図形の「位相」の情報を表したものである。そもそも学術研究において森羅万象の特徴を記述することは極めて大切な作業である。例えば以下のような図形があったときその特徴を取り出すにはどうしたらよいだろうか?



コラム2: 不変量

不変量とは文字通り、操作に対して不変な量という意味である。「面積」がなぜ不変量と考えられるのであろうか? 幾何学は変換による不変性によって分類されるという考え方がある。これはクラインのエルランゲン・プログラムに端を発した謂わば指針である。例えばユークリッド幾何は平行移動や回転移動という対称性に対して不変な幾何学であるし、トポロジーは連続変形に対して不変なもっと自由度の高い幾何学である。トポロジーの方が様々な操作に対して不変であるという意味でしばしば「軟らかい幾何学」と呼ばれる。ユークリッド幾何の不変量として面積などが出てくるし、トポロジーの不変量としてコホモロジーが現れる。もちろん、コホモロジーはユークリッド幾何の不変量としても機能する。不変量は幾何学がある毎にあるのである。

特徴を表す数学的な対象を不変量と呼ぶ。例えば、「体積」や「表面積」などは代表的な不変量である。しかし、これらは図形を少しでも変化させるとたちまち変化してしまう量で、もっと大雑把な特徴を表した場合にはあまり適していない。そのときは、例えば空いている穴の数に注目することがある。穴の数は図形を多少引っ張っても変わらない。一方で球面はどう引っ張っても浮き輪のように穴を開けることができない。そのため、穴の数のような不変量を用いても、図形を大別することはできることが分かる。このように引っ張るなどの連続的な操作で不変な図形固有の性質（この例では穴の数）を取り出す幾何学をトポロジーという。コホモロジーとは「穴の数」を一般化かつ抽象化した不変量であり、複素幾何など連続的な図形を扱う幾何学で頻繁に登場する極めて重要な不変量であ

る。一方で、有限体上の幾何学はトポロジーとは対極にある幾何学である。有限体上は有限個しか元がないのだからすべてがばらばらであり、連続的な不変量をどのように取ってよいのか分からない。それにもかかわらずゼータ関数にはなぜかトポジカルな情報が見え隠れする。これが図2の三位一体の(☆☆)の部分である。

これらの考察のあと、ヴェイユはもっと一般的な有限体上の代数多様体 X のゼータ関数 $\zeta_X(s)$ に関する一連の予想を打ち出す。つまり、曲線とは限らない一般の代数多様体に対して、 $\zeta_X(s)$ は有理式(つまり多項式の分数)となり、おのおの多項式の解は p^{n^2} (n は整数)という形をしていると予想した。この予想に付随して、ヴェイユは有限体上の代数多様体に対する位相的性質を取り出すようなコホモロジーの存在を予言する。終戦後間もない1949年のことであった。

ゼータ関数はなぜ大切なのか? これはどちらかという宗教的な問いだ。数論を研究する人々はゼータ関数に重大な情報が含まれていると「信じている」のだ。しかし、この信心もあながち空想的ではない。BSD (Birch and Swinnerton-Dyer) 予想と呼ばれ、リーマン予想と並んで1億円の懸賞がかけられている問題^{*6}は、代数多様体のゼータ関数の情報にその代数多様体を定義する方程式の解の個数の情報が含まれていると予言している。方程式の解の個数は数論を志すものが究極的にほしい情報であり、それがゼータ関数に含まれていることを示している。そのほかにも現在中心的な難問の多くはゼータ関数に関するもので、ゼータ関数を研究すれば偉大な真実にたどり着けると信じているのである。

§4 グロタンディークと ℓ 進コホモロジー

1950年代後半、ヴェイユによる予想を解くべく一人の天才が流星のごとく現れた。アレクサンダー・グロタンディークである。彼はヴェイユの予言したコホモロジー論の構築に動き出す。アルティンなどの協力

の下、10年の集中した年月を経てついに ℓ 進コホモロジーという有限体上の多様体に対する位相的なコホモロジー論を構築する。できあがったものはヴェイユの想像していたものを遙かに上回る一般性と抽象性を誇っていた。彼らの結果はSGA^{*7}と呼ばれるセミナーノートにまとめられた。総数5000ページを超える超大作であった。彼は後に自身の作った新しい幾何学を数論幾何と名付けた。

彼らの努力によりヴェイユ予想の大部分は解かれたもののリーマン予想の類似の部分だけは予想として残るかに見えた。しかし、グロタンディークの弟子であるもう一人の天才ドリーニュがグロタンディークの構築した枠組みをふんだんに用いることにより最終解決をする。1940年のヴェイユの手紙から30年以上の年月がたっていた。

複素幾何学では直感的だったものも数論幾何学では類似が極めて大変なことは多々ある。それを克服するために複素幾何の概念を極限までに理解しなくてはならない。そのため、数論幾何構築の過程で生まれた概念や哲学は膨大で、有限体上の幾何学が複素幾何学に与えた影響も計り知れない。ホッジ理論はある意味でヴェイユ予想の複素幾何類似であり(Deligne Hodge I^{*8}参照)、ホッジ理論から来る重さの理論は幾何学的表現論でなくてはならない道具となっている。幾何学的ラングランズ・プログラムも有限体上の幾何学を媒介とした数論と複素幾何の類似から得られた理論であり、理論物理学との関係も取りざたされている。Kavli IPMUと関わりの深い例で言えば、現代代数幾何学で盛んに研究されている導来圏の概念もその過程で生み出された巨大な副産物の一つであり、例を挙げれば枚挙にいとまがない。我々は巨大な果実を手にしたのだ。

^{*6} 2000年にアメリカのクレイ数学研究所が7つの数学の問題に各100万ドルの懸賞金をかけた。「リーマン予想」はそのうちの一つである。これまでに解決されたのは「ポアンカレ予想」のみで、グリゴリー・ペレルマンにより示された。

^{*7} Séminaire de Géométrie Algébrique (代数幾何学セミナー)、
<http://library.msri.org/books/sga/>から入手できる。

^{*8} P. Deligne, "Théorie de Hodge. I," *Actes du Congrès International des Mathématiciens* 1, (1970) 425.

§5 ℓ 進、 p 進、そして未来へ

さて、もう一度複素多様体と有限体上の多様体の類似に立ち戻ってみよう。複素多様体には位相的なコホモロジー論があるが、実は解析的なコホモロジー論も知られており、これら二つのコホモロジー論は一致していることが知られていた。グロタンディークの構築した ℓ 進コホモロジーの理論は位相的なコホモロジー論の類似であったわけだから、解析的なコホモロジー論の類似が有限体上でも期待される。実はこれはドゥウォークにより ℓ 進理論に先んじて考えられており、これを用いてヴェイユ予想の有理性の部分を解決していた。しかし ℓ 進のような一般論の構築は困難で、理論的に完成された ℓ 進コホモロジー論に大きく後れを取ったのだった。グロタンディークによるクリスタリン・コホモロジーやモンスキーとヴァシュニツァーによるコホモロジー論など、言及すべき結果は多々あるが、最終的に80年代、ベルテロによって有限体上の解析的なコホモロジー理論、リジツド・コホモロジーが定義された。このコホモロジーはしばしば p 進コホモロジーとも呼ばれる。定義された一方で基本的な性質が予想という形で残ったが、近年の p 進微分方程式論の進展やドゥ・ヨンクによる弱い意味での特異点解消定理の発見により最終的にケドラヤにより p 進コホモロジー論が完成する。これらの結果を活用することにより、近年筆者はラングランズ型の定理を示した。これは曲線の場合において実質的に p 進コホモロジー論も ℓ 進コホモロジー論も同じ情報を持っているという定理であり、グロタンディークの唱えた「コホモロジー論はモチーフから派生する」という哲学を、ある意味で具現化した定理であるといえる。

一口に有限体上の解析学と述べたが、有限体というばらばらな空間で解析学の「まねごと」ができるのは実に不思議なことだ。研究していると感じるが、現実世界で有限体上の理論と同じような現象が起きる理由は全くない。現時点で本当に何もないというのが率直な意見である。何か不思議な力で類似が引き起こされ

コラム3: ℓ 進と p 進

素数 p が一つ固定してあるとき、 p とは異なる素数のことを ℓ とよび、区別して考えることが数論ではしばしばある。例えば、二次方程式 $ax^2+bx+c=0$ を考えたとき、解は

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

の2つであった。分母に2があることに注目しよう。 \mathbf{F}_2 の中で考えると $2=0$ なのだから、この分母は意味を持たなくなってしまう。一方、 \mathbf{F}_ℓ ($\ell \neq 2$) で考えれば意味を持っている。このことから、別の挙動を示すことが分かるだろう。同じような理由から ℓ 進と p 進理論は本質的に区別され、コホモロジー論でも ℓ 進と p 進のコホモロジーは全く異なる手法で定義される。

ているようにしか見えないのである。私はこの不思議な力を「不思議な力」と崇めるのではなく、複素幾何における解析理論と同じ枠組みで捉えられるような人類の知恵にしたいと思っている。複素数体上の解析学と数論幾何学という新たな類似が実現された暁には、従来の三位一体の新たな化身として我々をさらなる高みへと誘ってくれるに違いない。

Our Team

マルコ・ベルトリニ Marco Bertolini 専門分野: 理論物理学 (素粒子論)

博士研究員

私の主たる研究対象は幾何学と物理学の超弦理論および場の量子論の関係です。研究分野の一つは(0,2) 超対称性を有する2次元共形場理論です。私は、対応するモジュライ空間に現れる弦理論特有の幾何学構造に興味を持っています。最近はある種類の超弦理論の真空を非摂動的に記述するF理論と(1,0) という種類の6次元超共形場理論の関係に興味を持つようになりました。



曹 亚龙 ツァオ・ヤロン 専門分野: 数学

博士研究員

私は代数幾何学、微分幾何学、超弦理論が交叉する研究を行っています。具体的には、複素4次元カラビヤウ多様体(CY4)上の“インスタントン”あるいは連接層を数え上げる理論であるところのドナルドソン-トーマス型理論(DT4理論)について研究してきました。

DT4理論は、向きづけられた4次元実多様体上でのドナルドソン理論の複素化と考えても良いでしょう。形式的には、DT4理論はSpin(7)、G2およびCY3多様体上のインスタントンの数え上げに関してトポロジカルな場の理論に適合するはずですが、CY4およびCY3の代数的な場合に限定するのが私の好みです。

基本的に、CY4から2つの4次元多様体を反標準因子Yに沿って張り合わせたものへの単純な退化 X_t に対して、 X_t の生成ファイバーのDT4不変量と(YのDT3コホモロジーの元であるところの) これら2つの4次元多様体の相対DT4不変量とを関係付ける張り合わせ公式が成り立つことを予想しています。



ピーター・コックス Peter Cox 専門分野: 理論物理学 (素粒子論)

博士研究員

私は標準模型を超える物理、中でも特に電弱スケールのナチュラルネスを議論する模型を研究しています。興味深い可能性として、ヒッグス粒子が何か新しい強結合力学の束縛状態として現れるかもしれないということがあります。私は、双対な弱結合の力学を与えることができる5次元のワープモデル (warped model) を使ってこの可能性を調べました。より一般的には、私は標準模型を超える (BSM) 現象論と、こ

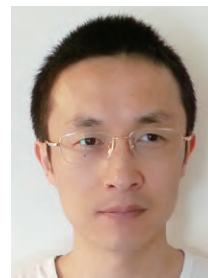


これらの模型の研究に現在実施されているLHCやダークマターの探索などの実験がどのように使えるのかを調べることに興味を持っています。

韩家信 ハン・ジャーシン 専門分野: 天文学

博士研究員

私は、広く宇宙論と銀河形成論を研究対象とし、ダークマターの性質の理解に特に強い興味を持っています。これまでは主としてダークマターの探索に理論および観測の両面から専念してきて、宇宙論的な数値シミュレーション、重力レンズ、力学モデルの構築、ガンマ線観測によるダークマターの検出を経験しています。私はいつも新しい分野の探求と革新的な新しい研究方法を楽しんでいます。これまでの研究では、常に



先進的な統計手法と効率的な計算手法を多用してきました。

金子 大輔 かねこ・だいすけ 専門分野: 実験物理学

博士研究員

私たちのグループは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を探索するPOLARBEARという実験に参加しています。CMBを観測することによって、宇宙初期のインフレーションやニュートリノの質量などの貴重な情報を得ることができます。

現時点で実験は南米チリのアタカマ高地で行われていて、さらに高性能なPOLARBEAR-2へのアップグレードも同時に進められています。博士課程を過ごした



素粒子実験領域での技術を生かして新たな受信器の完成に貢献したいと思います。

Our Team

藍 鼎文

ラン・ティンウェイ 専門分野: 天文学

博士研究員

私はデータベースを活用した銀河系外天文学を研究対象としています。具体的には、ダークマターハロー、星、ガスなど、種々の宇宙の構成要素の間の相互作用を研究するため、統計的手法を用いて大規模なサーベイ観測で得られたデータセットを利用してきました。Kavli IPMUでは、私はSuMIReプロジェクトによって提供される新しいデータセットを用いて研究を行います。この研究により、宇宙の歴史を通して銀河がどのよう



に形成され、進化するののかについての理解に向けて、全く新しい窓が開くこととなります。

カロール・セン

Kallol Sen 専門分野: 理論物理学

博士研究員

共形場理論は、従来型のラグランジアンによる記述ができない場合に強結合場の理論の理解を目指す方法として長い間用いられてきました。この方法は、対称性を用いて強結合領域での場の理論に関する非自明な情報を取り出すことができる共形ブートストラッププログラムの近年における復活後、利用度が増してきました。現在、私はブートストラップの定式化と種々の場の理論に対するその応用についてより詳細に理解することに焦点を絞って研究を行っています。その定式化の数値的および解析的



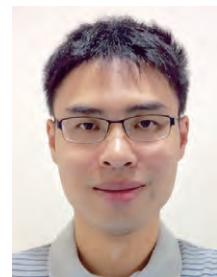
側面を用いて、弱結合領域と強結合領域の両方で場の理論を調べることができます。これにより、理論に含まれる演算子及びその相互作用がわかれば、ラグランジアンが未知の場合にもそれを書き下す第一歩になるかも知れません。

曾 柏彦

ツェン・ボーイエン 専門分野: 理論物理学 (素粒子論)

博士研究員

私は主として基本的素粒子であるヒッグスとダークマターを研究しています。これら2つの素粒子は数百年に渡る人類の科学の歴史から生まれたものであり、微視的世界から宇宙に至る私たちの理解を表すものです。私たちが理解する限り、ヒッグスは他の素粒子に質量を与えます。私たちの宇宙の1/4を構成するダークマターに関しては、その正体は不明です。



科学者と哲学者のある交流

野村泰紀

カリフォルニア大学バークレイ校 教授、
Kavli IPMU客員上級科学研究員

さる6月18日に、Kavli IPMUを通してUTCP（東京大学総合文化研究科・教養学部附属 共生のための哲学研究センター）で哲学者の方々と話をさせて頂く機会があり、そこで話されたこと、考えたこと等について書くための紙面を頂いたので、ここにまとめてみたい。イベント*は、カンタン・メイヤスー『有限性の後で』の出版を記念して行われたもので、千葉雅也（立命館大学）、大橋完太郎（神戸大学）、星野太（金沢美術工芸大学）、中島隆博（UTCP）の諸氏が参加された。私自身は第2部の「物理学と哲学の突端」に登壇し、マルチバースを含む最新の宇宙論を紹介し哲学者の方々と質疑応答等を行った。

まず感じたことは、科学と哲学の問題意識が驚くほど近いということだった。特にこのイベントで議論されていた問題の多く（時間とは何か等）は、ほぼそのまま現代物理学の問いとして通用するものであった。もちろん、両者はもともと同じものから「分かれた」ものであるのですが、これは当然かもしれないが、あまりにも共通のテーマが多かったので、それには改めて少し驚かされた。

一方で、問題へのアプローチに関しては、違う点多々あった。その典型例は、イベントのテーマでもあっ



写真提供: UTCP

たカンタン・メイヤスー自体にも見てとれる。私自身のつたない理解の限りでは、ここで議論されたのは（物理の言葉を使って言えば）「ある法則がある世界に適用できたからといって、なぜその法則が未来永劫成り立つといえるのだろうか?」、「根本的には何のルールもない世界、ではあるが限られた時間（状況）にのみルールがあるような世界を考えることはできるのか?」というようなことであった。（恐らく、この表現はメイヤスーの哲学をしっかりと捉えたものではないのだろうが、少なくともこのようなことがイベントで問われたことではあった。）

この問いに対する科学の答えは（少なくとも私の意見では）簡単である。最初の問いに関する答えは「そんなことを言い切ることはできない」、2番目の問いに関する答えは「できるかもしれないが考えない」、である。これははっきりと、科学が「方法論」であるこ

* カンタン・メイヤスー『有限性の後で』出版記念イベント「究極的な理由がないこの世界を言祝ぐ」。2016年6月18日、於東京大学駒場キャンパス。



パネルディスカッション風景。写真左より、中島隆博氏、星野太氏、筆者、大橋完太郎氏、千葉雅也氏。(写真提供: UTCP)

とを示す。科学とは、観測と理論的考察によって得られた法則が元々観測したシステムを超えて通用すると「仮定」して進む方法論のことである。もちろん、将来的にこの仮定によって予言される現象と、実際の観測結果が乖離することはあり得る。この場合には法則自体をより一般的に拡張することによって新たな現象も説明しようとするのだが、そのようなことが可能であるということ自体は「仮定」(もしくは願望)に過ぎない。もっと言えば、科学がこのような方法論を取るのには、それでこれまでうまくいってきたからに過ぎない。この意味で科学は常に「経験則」である。

しかし、この科学という方法論は非常に強力である(少なくとも今日まで強力であった)。ある意味では、20世紀の科学の爆発的發展はメイヤサーが投げかけたような問いを追求しないと決めたことにより得られたとさえ言うことができるかもしれない。(より以前の時代にはこのような問いを「科学」の問題として議論していたと思われる。) もちろん、これはそのような問いが無意味であるということの意味するものではない。単に科学はそれらをはっきりと自らの適用範囲の外と位置づけたのである。

この意味では、私が講演で話したマルチバース宇宙論は哲学者たちの期待を裏切るものであったかもしれない。この理論によれば、我々の宇宙は時として別の

宇宙に変わることがあり、その宇宙を支配する法則は我々の宇宙の法則とは異なるという予言をする。しかし、このことはメイヤサーが想像したように法則が消滅するというのではない。どのような宇宙が現れ、そこでの法則がどのようなものであるかは、より「上位の」法則により(少なくとも原理的には)計算可能なものであり、宇宙の法則(の一部)が変化するのは単に我々が基本法則であると思っていたものの一部がそれ程基本的なものではなかったということにすぎない。この意味でマルチバース宇宙論のアプローチは完全に科学のそれである。

では自然科学の発展とはどのようなことを言うのであろうか? それは最終的には「同じ現象をより少ない仮定で説明するルールを見つける」ということに尽きる。特に「何故」という問いに対する、仮定の数を減らすことのない「回答」は科学的な説明として本質的な意味をなさない(何故AはBなのかという問いに、なぜならCはDであるからと答えたところで、それは自動的に何故CはDなのかという新たな問いを生むだけである)。現代的に言えば、地動説が天動説よりもすぐれた理論なのはこの意味である。太陽系に関して言えば、プトレマイオスの体系でもある程度詳細な予言はできるだろうが、それにはケプラーの3法則より多くのルールが必要である。ここで重要なのは、歴

史的により単純な（少ない）ルールで構成された理論の方がより一般に適用できることが繰り返し示されてきたことである。太陽系を調べて見つけたケプラーの法則、及びより一般的なニュートン力学は、もはや太陽系という特定のシステムに依存しない形になっている。そのため、その法則は太陽系を超えて外挿可能であり、宇宙の理解に役立てることができる。科学がやっているのは、この論理の繰り返しである。そして、それは最新のインフレーション理論やマルチバース理論でも同じである。

他にもイベントでは「実在とは何か」等が議論された。この問いに関しても（少なくとも私の意見では）科学は明快な回答を与える。それは「知ったことではない」である。クォークは実在するのだろうか？ もちろんクォークは漸近状態としては取り出すことはできない。しかし、その概念を使うことにより理論の記述は大幅に単純化される。これをもって科学は「クォークは実在する」というのである。もしくは、実在という言葉が嫌であればそう言わなくてもよいのだが、とにかくクォークという概念は有効なのであるからそれで充分なのである。同じことはゲージ重力双対性の文脈における空間次元など、様々なもの（というか、大部分の現代物理学の概念）にあてはまる。

このように、科学という方法論では何を「問わないか」が重要な位置を占めるということができると思う。この意味で、科学はすべてを思考の対象とする哲学とは決定的に違うものであり、哲学を補完するものである。しかし一方で、この何を問わないかということの適用には細心の注意が必要であるとも思う。科学の定義として、しばしば「実験での検証可能性」、「反証可能性」等が挙げられることがある。私自身の意見では、これらを盲目的に運用することは非常に危険である。例えば、インフレーション理論が提唱された際、多くの人々はそれを観測的に検証できると考えたであろうか？ 密度ゆらぎに関する議論は（少なくとも大部分の）初期の論文には登場しない。もしその時代の科学者が、インフレーション理論を科学の外であると位置づけ、

その発展に貢献しなかったならば、現在のこの分野での（衛星での観測等の）精密科学は存在しなかったかもしれない。

同じようなことは、現代の超弦理論やマルチバース理論にも当てはまると思う。これらの理論が現在のテクノロジーですぐさま確認できないからといって、ある種の人々が主張するように、それらを科学の外にあると結論付けるのは危険である（とはいえ、マルチバース理論の宇宙の曲率の符号に関する予言等、これらの理論にも原理的な検証可能性はあるのだが）。また、これらの理論と予言との対応が間接的である（一対一でない）ことによって、理論の科学的価値を疑うのも危険である。実際、この基準に照らして言えば、大統一理論等の現代的な理論は全てその科学的価値が疑われるものになってしまう。（例えば、仮に陽子崩壊が見つかったからといって、直ちに大統一理論が正しいということにはならない。同じような崩壊を起こす大統一理論以外の理論を構築することは容易である。）我々は科学の定義を必要以上に狭めることのないように、常に注意しなければならない。（念のために言えば、これは個人的な研究テーマをこのような基準で選ぶことに反対しているのではない。ただ全ての研究をこれらの基準で判定する危険性を述べているだけである。）

以上、徒然なることを述べてきたが、これらは科学者であれば誰もが一度は考えたことではあると思う。ただ、それを思考するという事にかけては第一人者である哲学者の方々と議論する形で改めて明示的に思い返したのは、（少なくとも個人的には）意味のあることだったと思う。科学と哲学の距離はもはや数世紀前ほど近くはない、というのは正しいかもしれない。けれど、この二つのアプローチの交流はまだまだ多くの知的興奮を呼ぶことができる、というのもまた事実であろうと思う。そんなことを感じた一日であった。

Round Table Talk : ロバート・ウィリアムズ博士に聞く

ロバート・ウィリアムズ Robert Williams
宇宙望遠鏡科学研究所 (Space Telescope Science Institute) 名誉所員

岡村 定矩 おかむら・さだのり
法政大学理工学部創生科学科 教授

鈴木 尚孝 すずき・なおたか
Kavli IPMU 助教

岡村 ボブ^{*1}さん、覚えておられると思いますが、20年前の1997年に京都でIAU (国際天文学連合) 総会が行われた時に同じような対談をしましたね。今日、またそのような機会が得られたことを大変うれしく思っています。

ウィリアムズ 同感です、定矩さん。できるだけ面白い話をしましょう。

岡村 そうしましょう。あなたは天文学者の間で影響力をお持ちですし、一流の天文学者として、また非常に強力な天文学研究所の所長として多くの重要なプロジェクトを開始されました。

今日はそういったプロジェクトの話やエピソードについて、あなたにしか語れないようなことを伺いたいと思います。そういった話は、若い人たちでも私のような年寄りでも、プロジェクトの詳しい内容やそれがあなたの経歴に与えた影響に興味を持っている者には、非常に有益であろうと思います。

ウィリアムズ 尚さんがいることで、この機会に私が関わった大プロジェクトで、これまで公には議論してこなかった側面を幾つかコメントしたいと思います。特に、2つの独立な研究チームが、なぜ、どのようにしてダークエネルギーの発見に関与することになったのか、また、どうして2人の天体物理学の巨人がハッブル深宇宙 (HDF) プロジェクトに反対し、私た



岡村 定矩

ロバート・ウィリアムズ

鈴木 尚孝

ちにその観測をさせまいと説得したのかを取り上げてみたいと思います。

岡村 では、あなたのセロ・トロロ・汎米天文台 (CTIO) の所長時代の1987年に発生した超新星から話を始めましょうか。

1604年以来肉眼で見えた最初の超新星 1987A

ウィリアムズ それで結構です。SN1987Aについては非常に良く覚えています。

岡村 私の知る限り、あれは1604年のケプラーの超新星以来初めて肉眼で見えた超新星でした。ですから、南半球の天文台では大変な科学的フィーバーがあり、また大混乱もあったに違いありません。

ウィリアムズ 1987年2月下旬のその朝、オフィスに行った時のことを覚えています。私はチリのラ・セレナにあるAURA (天文学研究のための大学連合) の施設構内に住んでいて、家から

オフィスまでは歩いてたった3分の距離でした。

岡村 3分ですか。

ウィリアムズ ええ、理想的な環境でした。通勤は不要で、昼食には歩いて家に帰れたのです。私はそれが大好きで、仕事中毒なものですから、ほとんどいつも夜遅くまでオフィスで過ごしていました。それはともかく、ラス・カンパナスのカーネギー天文台の所員のビル・クンケルが突然やってきたのです。彼はCTIO研究棟の正面入り口にやってきて、オフィスには何人かが朝早くから出勤していましたが、私もその一人でした。彼は私のオフィスのドアから首を出して「ボブ、重要なことを話したいので、座ってくださいませんか」と言いました。「どうして座らなければならないのかね?」と聞いた私に、ビルはこう言い張ったのです。「これから話そうと思うことは、座って聞いてもらう方が良くと思うからです」

^{*1} ボブ (Bob) は日常的に使われる Robert の短縮形 (の一つ)。

よ。」そして、ビルは私に「我々は超新星を発見した。遠い銀河のことではない。昨夜イアン・シェルトンが肉眼で見える超新星を発見した。間違いない。」と告げたのです。

私は注意を集中しました。分かったことは、ラス・カンパナスの天文学者シェルトンと夜間観測助手のオスカー・ドゥハルデが独立に超新星を発見したということでした。シェルトンは連夜、写真乾板を使って大マゼラン雲の写真撮っていたのです。2月23日に撮影した写真はあまりよく撮れていなかったの、翌2月24日の夜、もう1枚の写真を取りました。2枚の乾板を比較していたところ、彼は前夜の写真には写ってなかった、肉眼で見えるほど十分明るい新しい天体が今夜の写真には出現していることに気づきました。その夜、シェルトンとドゥハルデは2人ともその天体を確認するため外に出て新しい超新星を見つけました。ビルは、その夜が明けた当日の朝、超新星が発見されたことを私に報告してくれたのです。それはこの400年間で最初の、局所銀河群の銀河で発生した超新星でした。

その超新星を直ちに調べなければならぬことは明らかでした。他の所員が出動してきたところで私は彼らを集め、思いついた2つのことを言いました。第一に、私たちには科学的な研究に着手すること、光度曲線の観測、つまり測光を行うこと、そしてスペクトルを観測することが必要であるということです。その超新星が明るいことは明らかで、肉眼で見えるわけですから、小さな望遠鏡で用が足りるだろうと考えられました。また、私はその超新星には一般の人々が大変な関心を持つであろうと述べて、情報を欲しがらる報道陣を満足させるための用意をするべきことを全員が了解しました。それには超新星の高品質な写真を撮ることが必要でした。

当日、それから私たちのチームは超新星を撮像する手はずを整えるために山上の天文台に行き、夜には最初のカ

ラー写真を手に入れました。その次の晩からは現地の官吏やアメリカの主な雑誌社や新聞社から記者達が、超新星を観望するために天文台を訪れました。特に、ピノチェト将軍が私的に任命した州監督官 (Intendente) のことは良く覚えています。

岡村 軍事政権のピノチェト大統領ですか？ 彼は独裁者として知られていませんね。

ウィリアムズ そうです。超新星が現れたのは圧政的なピノチェト政権の時に、州監督官や県知事、地方公務員は全員軍人でした。私は友好的な国際関係を維持するため、しばしば彼らと会いました。超新星発見後間もないある晩、州監督官は自分の目で望遠鏡を通して明るく輝く星を見るためにやってきました。また、当時ニューヨーク・タイムズの科学報道記者をしていたマルコム・ブラウンが訪れたことを思い出します。彼はチリで私たちと一緒に数夜を過ごし、超新星 1987A についての記事をニューヨーク・タイムズに連載しました。タイム誌もカバーストーリーとして取り上げました。当時、私たちは測光と分光によって超新星の研究を行う傍ら、アウトリーチにも随分力を入れました。

岡村 測光と分光にはどの望遠鏡を用いたのですか？

ウィリアムズ 分光観測には、利用申し込みが募集枠を大幅に上回ることが余りない中型望遠鏡の一つを使用しました。ですから観測スケジュールを組むことは容易でした。私たちはスティーヴ・ヒースコートが開発した分光器を持っていました。当時は大型の4メートル望遠鏡に搭載されていなかったの、これで定期的にスペクトルを取り始めました。また、私たちは正確な光度曲線を得るために測光観測を行いました。超新星 1987A は非常に明るかったため、40センチ望遠鏡による最短露光時間の観測さえ明るすぎてうまく行きませんでした。それで望遠鏡の口径を絞るために、穴を開けたマスク (アパーチャマスク) を取り付けな

ければなりませんでした。超新星が暗くなってからは、アパーチャマスクをはずし、何ヶ月も光度曲線の測光観測を続けました。また、定期的にスペクトルをとり、それを理解しようとしませんでした。

岡村 さて、それで発見後、晴れた夜が続いたのは何日間でしたか？

ウィリアムズ 2月、3月は夏の天気が良い時期で、ほとんど晴れていました。ですから観測開始初期には悪天候に悩むことはありませんでした。

岡村 そうでしたか。

超新星1987Aのスペクトル中にs-過程の元素を発見

ウィリアムズ 本当に面白かったのは超新星のスペクトルに何本か変わったライン (スペクトル線) が見えたため、それを解釈することでした。私はスペクトルを理解しようという試みにかなりの研究時間をつぎ込んだことを覚えています。他の超新星には現れなかった3、4本のラインを同定しようと原子物理のあらゆる参照マニュアルを調べました。私は「s-過程」と呼ばれる遅い中性子捕獲過程から生じる元素であるバリウムとストロンチウムを同定したことを決して忘れないでしょう。別の元素である可能性はないか、それを調べるために私は何時間も何時間も費やしました。

私は赤外領域のスペクトルを持っていたので、元素の同定にとっても役立つ特徴をつかめました。同僚のジェイ・エライアスが波長1ミクロンをちょっと超えたところに何かあると報告してくれましたが、その波長のラインをもつ元素の可能性の一つはイオン化したストロンチウム (Sr II) でした。既に私は可視光域にあるスペクトル線のうちの2本を暫定的にSr IIとしていましたが、これまでの超新星ではその元素は観測されていなかったため、やや疑念を持っていました。しかし、私が見出した他のスペクトル線のうちの1本がもう一つのs-過程の元素であるバリウムのように見えたため、これまで

予想されてはいなかったが、超新星1987Aの進化にs-過程が含まれていたことに自信を深めました。私は一人で週末に仕事をしていたことをはっきり覚えています。その日は4月4日の土曜日で、大きく宣伝されたローマ法王ヨハネ・パウロ2世の南アメリカ訪問の中で、法王が飛行機でラ・セレナに到着された日でした。その土曜日に私はオフィスにいましたが、他のラ・セレナの住人は、私の妻も含め全員法王の到着を歓迎するために小さなラ・セレナ空港に出かけていました。

私は法王の乗ったジェット機がCTIOのオフィスの上を低空で飛行する音を生き生きと思い出します。なぜならオフィスは空港からたった数マイルの位置にあり、法王ヨハネ・パウロ2世のジェット機が私のオフィスの上を飛ぶ轟音を聞いたのは、私が同定しようとしていたスペクトル線はs-過程の元素であるストロンチウムとバリウムであると最終的に結論を下してから数分のことだったからなのです！私はその瞬間を忘れないでしょう。

岡村 ローマ法王の到着と共にスペクトル線が同定されたとは、実にドラマチックですね。それは、重力崩壊型超新星爆発を起こす重い星の内部でs-過程が起きていることの初めての証拠だったのでしょうか？とすれば、スペクトル線同定の専門家であるあなたにとってさえ、ストロンチウムとバリウムのラインを同定することは非常に難しかったのではないのでしょうか。

ウィリアムズ ほとんどのラインの同定はかなり簡単にできましたが、それ以前の超新星では観測されなかったラインがいくつかありました。ストロンチウムとバリウムの同定は、最も矛盾のないものとして結論しました。私たちの観測したスペクトルは、重力崩壊型超新星が爆発を起こす前に遅い中性子捕獲が起きていることをはっきり示す証拠であり、進化した重い星が超新星爆発を起こす前にはs-過程が起きるというパラダイムを初めて確立したものです。

CTIOにおける超新星の研究

岡村 ところで、当時CTIOは強力な超新星研究者グループを擁していたのではないのでしょうか？

ウィリアムズ 超新星1987Aが弾みをつけました。歴史的にはCTIOとセロ・カランで超新星に興味を持ち、研究が行われていました。セロ・カランはチリの…

岡村 セロ・カランのカランは土地の名前ですか？カラン/トロロ超新星サーベイはよく知られています。

ウィリアムズ その通りです。セロ・カランはチリ大学が運営する天文台ですが、チリの国立天文台なのです。ホセ・マサを中心に何人かの研究者がいましたが、彼らは超新星の研究に興味を持っていました。私が1985年にチリに赴任する以前でさえ、チリのエル・ロプル天文台での超新星サーベイでいくつかの超新星が発見されていました。当時サーベイに関わった人はそれほど多くなかったのですが、1987Aの後、超新星に対する興味が増すに連れ、関わる人の数も増えました。特に、セロ・トロロ所員のマーク・フィリップス、ニック・サンツェフ、マリオ・ハムイは彼らが研究に割ける時間のかなりの部分を1987Aおよびその他の超新星の研究に振り向け始めました。

私たちは超新星1987Aの爆発の直前にCTIOでマリオ・ハムイをデータ処理のアシスタントとして雇用しました。マリオはチリの大学を卒業して天文学の学士号を得ましたが、その時は大学院で研究を続けることには興味がありませんでした。彼が所員に応募する可能性を誰かが私の耳に入れ、それで私たちは彼を面接したのです。アメリカの国立天文台としてCTIOは利用者全員のデータ取得とそのデータの処理を助ける義務があるため、私はマリオを雇用するのは非常に良いことだと考えました。私たちはマリオのようなデータ処理の経験者を必要としていました。彼は非常に頼りになる人物の一人でした。ところで、嬉しいことに、

丁度今年、マリオがバチレ大統領からチリ国科学賞を受賞したということをお知らせしておきます。

超新星1987Aの後、マリオとマーク・フィリップス、ニック・サンツェフはホセ・マサ、その他と一緒にCTIOの望遠鏡を使って発見された超新星の追跡観測を行うこれまで以上に徹底的な超新星プログラムを開始しました。1989年に彼らのうちの3人が超新星爆発の物理を理解するために新たなカラン/トロロ超新星サーベイを始めました。彼らのもう一つの動機は、発見された超新星をハッブル定数決定のための標準光源として利用することでした。このサーベイの結果は、最終的にダーク・エネルギーの発見につながる観測活動への重要な導入でした。

岡村 私は後に「フィリップス関係^{*2}」として知られるようになったIa型超新星の最大光度時の等級(M_{\max})と減光率(Δm_{15})の間の直線関係の発見を報告したフィリップスの論文を読んだ時のことを、まだ非常にはっきりと覚えています。明るい超新星ほどゆっくり減光する。この関係はIa型超新星のピーク時の絶対等級を校正し、その分散を大きく低減させ、その後のIa型超新星による宇宙論研究の鍵となりました。

ウィリアムズ その通りです。彼は1993年に私が宇宙望遠鏡科学研究所(Space Telescope Science Institute, STScI)へ行くためにセロ・トロロを離れようとしていた丁度その時にその論文を発表しました。私は、マークの論文は宇宙の距離尺度に対して強い影響力を持つ業績であると考えています。

岡村 そうですね。他の方法を使うことも調べられてはいましたが、彼の論文がIa型超新星を精密な標準光源として用いるようになった(当時から見て)将来の動向の基礎を築いたと思います。

ウィリアムズ あれがなかったら宇宙の加速膨張も分かっていなかったろうと

^{*2} 本号の裏表紙を参照。

思います。

岡村 その通りですね。CTIOにおける超新星の研究が最終的に宇宙の加速膨張の発見につながりました。

ウィリアムズ あれがなかったらハッブル定数は今知られているよりずっと不定性が大きく、恐らく宇宙の加速膨張の証拠はまだ得られていなかったろうと思います。私も本当に重要な成果であると思います。それはマークが手がけたものですが、その始まりはIa型とはタイプの異なる重力崩壊型超新星(II型)の1987Aを理解しようとしたことにあります。それが本当にマークに超新星への興味を持たせ、異なる種類の超新星の明るさ最大の時の光度を正確に理解しようと試みることになったのです。

岡村 では、話題をハッブル宇宙望遠鏡に変えましょうか。

鈴木 その前に一つ質問してよろしいでしょうか。別のパークレー・チームも超新星のデータを集めていました。CTIOではいろいろなタイプの超新星についてのデータを集めていたのですか。

ウィリアムズ どこまで正しく知っているかは分かりませんが、ソール・パールムッターとボブ・カーシュナーの両方が超新星のデータを集めるためにCTIOの望遠鏡を使っていました。しかし、超新星爆発の物理を理解しようとして、主としてII型超新星に興味を持っていたのはカーシュナーです。私の記憶では、当時ソールはもっと広く、距離の測定のために超新星を使うことに興味がありました。彼が早い時期からIa型超新星に興味を持っていたのはそのためだと確信しています。そうは言っても、後にソールが結成して率いたSupernova Cosmology Projectチームは、超新星1987Aの時点ではまだ結成されてはいませんでした。

ですから、確かに超新星の研究に興味を持つ人たちがパークレーにいましたが、後に減速パラメータ^{*3}を決定し

^{*3} 宇宙の膨張が内部にある物質の重力のために減速してゆく度合いを表す数値。

ようとするに一般的な興味を持たれるようになるよりも前のことでした。1987Aがより多くの超新星を発見することに対する興味を引き起こし、その結果、超新星の多くはIa型であることが理解されるようになったと言えると思います。人々がIa型超新星とその標準光源、つまり距離の物差しとしての利用にもっと注意を集中し始めたのがその頃です。

鈴木 では、明るさの変化を表す光度曲線を集めるという着想は1987Aによるものですか？

新星の分光学的研究を進める機会を与えてくれた超新星1987A

ウィリアムズ まさに1987Aが光度曲線を得ようという動機を与えました。この点については一連の出来事がありますが、このテーマを前進させたのは1987Aです。実際、私自身、新星の分光学的研究に長期的な興味を持ち始めたのは1987Aによるものです。

鈴木 その関係は興味深いですね。

ウィリアムズ 1987Aの爆発から引き続き、そのスペクトルを解釈しようとして私は自分の時間のほとんどを費やしていました。私たちが1987Aを観測できるのは毎晩5時間程度のため、私は1987Aが地球上で観測のために理想的な位置にいない夜間の数時間を使って望遠鏡で何をしようかと問いました。「新星に関するデータを得ることにしようではないか。」と言ったところCTIOの研究スタッフの何人かが賛成し、新しいプログラムが始まりました。それが新星のスペクトルの分類について明確にした1990年の論文につながったのです。

明るくて肉眼で見える新星はほとんどアマチュア天文家が発見します。発見の報告後、私たちが非常に急速に変化するスペクトルを取ります。私は新星の物理に魅せられてきました。さらに、他の人は誰もが超新星を研究していることにも魅力を感じ始めました。数人で新星を調べれば意義のある成果が得られると考え、ほとんど誰も興味

を示さない新星のデータを取ったのです。私たちは膨大な数の新星のスペクトルを集め、それをフルに使いました。

私は研究をするためにこんなに多くの新星のスペクトルがあることをうれしく思いました。スペクトルが関係すると、私はある意味で何でもきちんとしておきたがる「仕切りたがり屋」であることを認めます。私はデータを解釈するため、マリオ・ハムイ、ステイヴ・ヒースコート、マーク・フィリップスと共に随分働きました。そして1990年に新星の分類システムを明らかにした主要論文を発表することに成功しました。私たちは約15個の新星についてのデータを何年間にも渡って取り続け、進化の枠組みを提唱しました。この新星のプログラムはCTIOが大々的に行っていた超新星1987Aの観測業務に付随したものでしたから、1987Aがなかったら決してできなかったでしょう。

岡村 新星ですか! 新星のスペクトルの多様性と時間発展は有能な分光の専門家を魅了したに違いないですね。あなたにとっては1987Aと共に別の世界が開けましたね。さて、(鈴木) 尚さんがいるうちに話題をハッブル宇宙望遠鏡(HST)に進めましょう。彼がSCP(Supernova Cosmology Project)チームのメンバーであることはご存知のはずです。それで、彼はチームの一人として、あなたにHSTを用いた超新星観測について伺いたいことがあるそうです。

ウィリアムズ 想像できますよ。2つのチームが距離の指標としてのIa型超新星の研究を遂行した事実については強い思いがあることを承知しています。

鈴木 そう思います。

ハッブル望遠鏡を用いた超新星観測

ウィリアムズ では、その話をしましょう。どのように、そしてなぜそういうことになったのかに光を当てるため、幾つかの事実を提示したいと思います。



鈴木 SCPチームの側では1997年9月27日にグループミーティングでガスン・ゴールドハーバーが、「我々のデータが支持する宇宙は $\Omega_m = 0.3$ かつ $\Omega_\Lambda = 0.7$ である（加速膨張する宇宙）」と報告しました。

ウィリアムズ それはSCPチームのミーティングでのことでしたか？論文として出版しなければ研究成果としてのクレジットは得られません。

鈴木 その1か月前に京都でIAUの総会が開催されました。そのハイライトの一つはウェンディ・フリードマンが率いるHST Key Projectの結果でした。彼女は、最新のハッブル定数の測定結果は、アインシュタイン・ドジッター宇宙、すなわち物質優勢で空間が平坦な加速膨張しない宇宙の年齢と矛盾するという報告をしました。

ウィリアムズ 面白いのはウェンディがどちらの超新星観測チームのメンバーでもなかったことです。

鈴木 そうですね。観測と整合性のとれた宇宙モデルは宇宙項 Λ が存在する、いわゆるラムダ宇宙でした。SCPチームは我々が住んでいる宇宙は加速膨張宇宙でなければならないと結論しました。この結果は1998年1月にAAS（アメリカ天文学会）で公表されました。

岡村 私はSCPチームの結果については、発表された論文からだけフォロー

していました。ある時点で彼らの論文の結論が突然変わったように見えたので、ちょっと混乱したことを覚えています。

鈴木 ポブさん、あなたがラムダ宇宙、あるいは加速膨張宇宙を信じ始めたのはいつのことですか？

ウィリアムズ それより後です。というのは、超新星の最大光度に対するダストによる吸収の効果がはっきりしていないことを懸念したからです。

それでは、距離と減速パラメータの測定にIa型超新星を使うということに2つのチームが関わりあうようになったことについて、私の考えと事の起こりをお話ししましょう。それは加速膨張の可能性が議論されるようになった時よりずっと前のことです。ハッブル定数を測定したフリードマンやムールド達のHST Key Projectの研究を、特に減速パラメータに焦点を合わせて、進展させたいと希望する2つのチームが結成されました。ハッブル宇宙望遠鏡の球面収差を補正する装置を設置するため1993年に行われた最初のHSTのサービスミッションの後、背景銀河光差し引き^{*4}の精度が上がったため、遠方の超新星の光度をより正確に観測できるようになりました。また、マーク・フィリップスが先ほど話題に出たIa型超新星のピーク時の光度の決定を改良した重要な成果を発表したのも

1993年でした。Hi-zチームとSCPチームが結成されたのはこの数年後で、Hi-zチームにはブライアン・シュミット、ニック・サンツェフ、マーク・フィリップス、ポブ・カーシュナー、アダム・リースが参加し、SCPチームにはソール・パールムッター、ニーノ・バナジーア、それに加えて主としてアメリカ西海岸やローレンス・パークレー研究所からのメンバーが参加しました。彼らは超新星を研究するために地上の望遠鏡とHSTを利用する系統的な観測プログラムを開始しました。

鈴木 初期の段階ですね。

岡村 非常に早い時期です。

ウィリアムズ そうです。4ヶ月ごとに出版されたSTScIニューズレターに立ち戻ってみればTAC（Telescope Allocation Committee、望遠鏡観測時間割り当て委員会）がその年に採択した全ての観測プログラムのリストを見ることができます。私は自分のコンピューターにこの情報を持っています。というのは、何年前にある本について私に注意を促した人がいたからです。その本の題名は何だったか—A Four …

鈴木 *The 4 Percent Universe (4%の宇宙)*^{*5}です。

ウィリアムズ そう、「4%の宇宙」です。私の同僚が、本に書かれている事実は幾つか正確ではないと思うと言い、その本で取り上げている詳細についての私の記憶を聞きに来たのです。その結果、私はダークエネルギーの発見につながった出来事に私がどのように関わったのか、自分の記憶を書き留めました。これからお話しするのは歴史的な記録の一部となるべき情報です。全部ではありませんが、その大部分は公表されている情報です。

1994年から1996年にかけてのHST

^{*4} 超新星は銀河中で発生するので、その明るさを正確に測るには、背景として重なっている銀河(母銀河という)の光を差し引かなければならない。

^{*5} 4%の宇宙—宇宙の96%を支配する“見えない物質”と“見えないエネルギー”の正体に迫る、リチャード・パネク(Richard Panek) [著]、谷口義明 [訳]、ソフトバンククリエイティブ、2011年8月。

の観測サイクル4と5では超新星の研究を行ったプログラムがいくつかありました。ジャーミー・ムールドとウェンディ・フリードマンが Hubble constant Key Project を率い、ポブ・カーシュナーが SINS (Supernovae Intensive Studies) Survey を率いていました。カーシュナーらの興味の内容は超新星を距離の指標として用いることよりは、II型超新星と超新星爆発の本質を理解することにあります。宇宙望遠鏡科学研究所の所長はTACの審査によって勧告されたこれらのプログラムを最終的に認可する責任を負っているため、私はこれらに常に強い関心を持つように努めました。このTACの審査とは別に、私には、必ずしもTACによる審査の中で考慮されない観測から科学的に重要な結果が得られる可能性があるかという判断をし、それに基づいてHSTによる観測時間の10%までを所長裁量時間として配分する責任もありました。

1996年1月にサン・アントニオで開催されたアメリカ天文学会でソール・パールムッターが私に話しかけてきました。所長裁量時間を得るために提出したいと考えているプロポーザルについて議論するためでした。それは、距離の尺度と減速パラメータを決定するためにIa型超新星を使うという研究でした。彼との会話から私はその目標と方法が、ソールと共同代表研究者がサイクル6のTACに提出したが審査で実施が認められなかったプロポーザルと似ていることに気がつきましたが、プロポーザル提出を勧めました。実際、ソールは2月の初めに所長裁量時間へのプロポーザルを提出し、私は受け取ったことを通知しました。

毎年のTACのミーティングにはHSTの観測可能時間をはるかに超えて応募が殺到するため、終わった後には観測プロポーザルのうちかなりの割合で採択されなかったものが残ります。これらの不採択のプロポーザルの多くが直ちに所長裁量時間枠を申し込むことが普通のやり方になっていました。ソー

ルのプロポーザルはそのうちの一つでした。この時期に私はTACで不採択になったプロポーザルは所長裁量時間を与えないということを既に自分の慣例として確立していました。それよりも、私は所長裁量時間を新たな計画や新たな発見、それから緊急を要する観測のために確保しておくことの方を好みました。パールムッターらの所長裁量時間へのプロポーザルは実に面白いと思いましたが、TACの審査の評価意見も併せて読んだ後、私は彼のプロポーザルを直ちには採択しないと決め、この件を頭の中で保留しておくことにしました。

数か月後、1996年の5月に状況が変わりました。毎年5月に開催されるSTScI シンポジウムでのことですが、HSTを用いてもっと大々的に超新星観測を行うことに私も他の人たちもこれまで以上に興味を持ちはじめたのです。そのシンポジウムの主題は「銀河系外の距離尺度」で、ウェンディ・フリードマン、グスタフ・タマン、ポブ・カーシュナー、アビ・サハ、マーク・ポストマン、その他の人々が、測定精度が上がったハッブル定数 H_0 の値の報告と、HSTによる観測が減速パラメータを明らかにできる可能性、その結果宇宙の平均密度を決定できるようになるという講演を行いました。宇宙論の研究にHSTをユニークな手段として用いることに対して熱気が燃え上がりました。私は、サン・アントニオでソールが私に話した時に彼の熱意を認識しなかったのは先見の明がなかったと認めざるを得ません。

シンポジウムの終了までに、私は単にハッブル定数 H_0 をさらに精度よく決めるだけでなく、ソールが不採択とされたサイクル6および所長裁量時間へのプロポーザルで既に主張していたことですが、減速定数 q_0 も決めるためにHSTがかなりの努力をするべきであると確信するようになりました。ところが、サイクル6のHST TACは既に1995年11月に開かれ、1996年7月から1997年6月の期間のHSTの観測につ

いて勧告を終えていました。採択された観測の中で宇宙論的な距離の尺度に専念するプログラムはただ一つ、ムールドが責任者を務める、多数の近傍銀河中のセファイド型変光星を較正するものでした。シンポジウムでの興奮を考えれば、それ以外のプログラムがないことは残念でした。

サイクル6のHST TACでは、ポブ・カーシュナーとSINSチームの超新星の観測プロポーザルも採択されたことは言うおくべきですね。しかし、その主目的は異なる種類の超新星爆発の物理を理解する手段として、数個の超新星のスペクトルを特に紫外領域で測定することでした。是非理解してほしいのですが、これはかなりの所長裁量時間を割り当てて実施した大規模なHDF (Hubble Deep Field、ハッブル深宇宙) 観測プログラムが度々完結して結果を公表した時——大成功を収めたのですが——それから、まだ余り時間が経っていない頃のことだったので。そのため最初私が直観的に思ったのは、宇宙論的距離の尺度とその時間発展(宇宙膨張の歴史)はHSTで挑戦することができる同じくらい重要なトピックであり、直ちに進めるためには所長裁量時間を使う必要があるということでした。

この時、パールムッターの超新星観測チームは既に3か月前に私に観測時間を要求する交渉を始めていましたが、私は所長裁量時間を彼らだけに与えるのではなく、この問題に興味を持っていたもう一つの有力なチーム、ブライアン・シュミット、ニック・サンツェフ、マーク・フィリップス、ポブ・カーシュナー、その他のメンバーで構成されるHi-zチームにも与えることに決めました。銀河の後退速度と距離の関係を改良する目的で最初に所長裁量時間を要求したチーム、すなわちソールとSCPに優先権を与えない、という決定は、北カリフォルニアでは大きな衝撃と不満を引き起こすことになり、その余波は今日までも残っています。自分たちは他のチームと競争せず

にIa型超新星を使って距離の尺度の問題を調べる資格があったと彼らは信じています。私は彼らの考えを理解し尊重するものではありませんが、私にとっては、サイクル6のTACがソールのプロポーザルを不採択にしたことと、プロポーザルに対して述べた批判的な意見が、 H_0 と q_0 の値のもっと正確な測定に取り組むにはもう一つのチームも加わることが適切であるという考えに至る上で重要な役割を果たしたのです。

鈴木 それでは物議をかもした競争を引き起こしたのはあなたなのですね。

遠方のIa型超新星観測のため2つのチームに所長裁量時間を与える

ウィリアムズ ええ、そうです。それに、そうすることについて研究所で私の親しい同僚だったニーノ・パナジーアに励まされました。彼はソール・パールムッターのSCPチームのメンバーで、5月のシンポジウムでは彼と話をしました。サイクル6のTACの審査（その勧告を私は既に承認していました）の結果、HSTでは少なくとも1年半は距離の尺度とその時間発展を決めるために遠方の銀河を観測する予定はない状況でした。それが動機となって、私は所長としてこの問題を進展させるため所長裁量時間を使おうと考えました。そして、その重要性を考慮して、この課題に取り組むために必要な経験を持っているいくつかのグループを関与させることにしました。私は所長裁量時間を2つの独立なグループに与えることを一方的に決めました。もしサイクル6のTACが特定のグループだけにHSTの観測時間を与える勧告をしていたら、私はそういう決定はしなかったでしょう。

鈴木 HSTでの観測提案を出すように彼らに頼みましたか？

ウィリアムズ 所長裁量時間を与えたいと伝えた後で、私はまさにそのように頼みました。それは、こんな具合でした。5月のシンポジウムにはソール・パールムッター、アラン・サンデー、

ブライアン・シュミット、アダム・リースは欠席でした。しかしHi-zチームのマーク・フィリップスとニック・サンツェフ、SCPチームのニーノ・パナジーアは出席していました。マークとニックとはCTIOで、ニーノとはSTScIで同僚でしたので、私は彼らとは非常に親しい間柄なのです。5月のシンポジウムの最後に、距離の尺度とその時間発展について進展を図るため、どのようにHSTを使うかについて議論できるように、私は彼ら3人とHi-zチームのボブ・カーシュナーを招き所長室で会議を行う手配をしました。議論の中で、私はとりあえずSCPチームとHi-zチームの両方に25-30周回^{*6}程度の適度な所長裁量時間を割り当てたいと思っていることを示唆しました。この意味で、「4%の宇宙」^{*5}の中で著者のパネクが、 H_0 の時間依存性を調べる口火を切ったこの会議にHi-zチームのメンバーだけが出席していたと主張していることは正しくありません。事実、この会議でSCPチームのメンバーのパナジーアは両方のグループに所長裁量時間を当てるアイデアを強く支持しました。

鈴木 現在の標準と比べると、どちらかと言えば少ない観測時間ですね。

ウィリアムズ その通り、比較的少ない時間です。これは宇宙論的な超新星の観測プログラムを開始するためのものでした。私が驚いたことには、カーシュナーはその問題にHSTの観測時間を使うことに余り興味を示さなかったのです。彼は、母銀河の背景光を精度よく差し引くためには、彼らがやっていた地上からの観測で十分だろうと感じていたのです。

鈴木 本当ですか？

ウィリアムズ 本当です。私のオフィスでボブは力説しました。「銀河光の差し引きにハッブル宇宙望遠鏡は必要ないね。我々は十分良いデータを持っている。」私は同意しませんでした。「いいかね、これは今使うことのできる最高の装置なのだ。もしこれが重要なサイエンスであるなら、ハッブルをお使

いなさい。」彼らは数日間議論した後考えを変え、以前サイクル6のTACで採択されたSINSプログラムとは別に、 q_0 を決めるためHSTの所長裁量時間の提供を受け入れる価値について同意しました。先に述べた会議のすぐ後、地上の望遠鏡によって新しい超新星を発見する重要な探索方法を開拓したのはソールであることから、同じ所長裁量時間の提供をソールのSCPチームに申し出ました。Hi-zチーム同様、ソールも私が両方のチームに申し出た28周回の所長裁量時間を喜んで受け入れました。そして、やがて両チームとも正式に私の承認を求めるプロポーザルを提出しました。

岡村 その話はこれまで聞いたことがありません。

ウィリアムズ 今回、初めてこの情報を明かしました。

岡村、鈴木 誰も知らないのですね。

ウィリアムズ その通りです。私は、距離の尺度についてはソール達が努力してきたのに、それを別のグループと一緒にされた事実について、北カリフォルニアでは幾分悪感情があることを知っていますが、私はそういう風には考えません。SCPメンバーのニーノ・パナジーアでさえ、この問題には独立な2つのチームが取り組むことが賢明であろうと賛成したのです。仮にサイクル6のTACで、審査の結果その目標を掲げたチームに認められたプログラムがあったら、そのサイクルの間に私が別のチームに所長裁量時間を与えはしなかったでしょう。恐らく別のグループには将来のサイクルを目指してこの問題に興味を持つように促したのではないのでしょうか。しかし、そういう状況にはなりませんでした。

鈴木 あなたの先見の明には感銘を受けました。ノーベル物理学賞委員会の委員長が、彼らが加速膨張宇宙を信じたのは2つのチームがあったためであると言ったからです。過去において、

^{*6} ハッブル宇宙望遠鏡は約100分で地球を1周する。これを1単位として観測時間が割り当てられる。

ノーベル賞委員会のメンバーは報告された結果を確認するため自ら解析を行い、実験が正しいかチェックしました。しかし、加速膨張宇宙に対しては2つの独立なチームが同じ結果を得たわけですから、そうする必要はありませんでした。

ウィリアムズ どのようにして2つの独立なダークエネルギーチーム^{*7}がハッブル宇宙望遠鏡での観測に乗り出したのかという物語は興味深いものです。ですからそれは誰もが知る知識であることがふさわしいと思います。SCPチームとHi-zチームの間に競争はありましたが、距離の尺度について研究していた全期間にわたり、両チームは専門家としての良好な関係にあったことを強調しておきます。

岡村 それがあなたの精神で、ハッブル深宇宙プロジェクトの実施を決めた時に示されたものと同じ精神ですね。

ウィリアムズ その通りです。データを公開することも含め、同じ哲学です。

岡村 では、ハッブル深宇宙に話題を変えましょう。今やそれが歴史に残る記念碑的な事業であったことに異議を唱える者はいません。しかし、あなたの先週の講演のスライドを見て、初めはそうではなかったと知りました。その話も非常に興味深いのではないかと思います。

鈴木 その前に、まずダークエネルギーについての話を締めくくらせてください。あなたが宇宙の加速膨張を信じ始めたのはいつのことでしたか？私自身は、SCPチームとHi-zチームの論文が公表された後でさえ信じませんでした。

ウィリアムズ WMAPが宇宙マイクロ波背景放射のピークを見出した時です。私が本当に信じたのは、その時です。

鈴木 分かりました。

ウィリアムズ 私が信じ始めるについてはBOOMERanGの観測結果が大きかったのですが、それだけではダストの吸収の影響がないか心配しました。

岡村 私も2003年に「WMAPの1年目の観測」の論文を読んだ後で信じ始め



ました。

鈴木 グループ以外の他の人たちにとっては一つの瞬間ではなく、長い時間かけて「ああ、なるほど」ということだったのでしょ。私はもうすぐ失礼しますが、その前に一つ手短かに質問があります。今年11月に私たちはハイパー・シュプリーム・カムの超新星探索を試行します。すばる望遠鏡に搭載した新しい広視野カメラであるハイパー・シュプリーム・カムから素晴らしい超新星を見つけ始めるのです。あなたならハイパー・シュプリーム・カムあるいはすばる望遠鏡で何をされますか？

ウィリアムズ 私ならいろいろな宇宙モデルの間で大きな違いが現れる赤方偏移 $z=1-2$ ^{*8}の領域で対象となる銀河をもっと探索するでしょう。また、そのスペクトルを基に対象銀河の物理的性質がどのように違うか理解する研究をしなければなりません。私はそういったことに焦点を合わせるでしょう。

岡村 なるほど。分光の専門家はスペクトルを調べ続けるのですね！ハイパー・シュプリーム・カムはあなたのために大きな赤方偏移を持つ良い対象銀河を見出すことに非常に役立つはずですよ。

鈴木 見つけた標的を分光するのにKeck, Gemini, VLT、すばる、JWSTといった望遠鏡が必要になるでしょう。

ハッブル深宇宙

岡村 では話題を変えましょう。観測的宇宙論や銀河はあなた的主な研究分野ではありません。どのようにしてハッブル深宇宙（Hubble Deep Field, HDF）プロジェクトを着想されたのですか？

ウィリアムズ 私は少年の頃から天文学に興味を持っていました。自転車で新聞配達したのが最初の仕事でした。新聞配達で初めて25ドルを得た時、私は小さな屈折望遠鏡を買ったのです。そうして最初にしたことの一つですが、暗い夜に外に出てどんなに微かな光の天体が見えるか、もしかしたら銀河が見えるのではないかと、その望遠鏡で覗いてみました。勿論、ロサンジェルス郊外の2インチの小さな望遠鏡では大したものが見えませんでした。天文学者が望遠鏡を使う時にやってみたいことの一つが、どれだけ遠い天体を検出できるか試したいということは事実です。50年後、私はもっと大きな望遠鏡を手に入れました。そのハッブル宇宙望遠鏡で最初にしなければならないと考えたことの一つは、どれだけ遠くの宇宙が見えるか試すことでし

^{*7} 宇宙膨張を加速させている原因はまだわかっていないにもかかわらず、ダークエネルギーという名前が付けられている。

^{*8} 赤方偏移 z は遠方の天体の距離を表すためにも用いられる。

た。勿論、宇宙論研究で起きていたブレークスルーを考えれば、単にそれだけではなく、本当にもっと本質的な理由がありました。

岡村 なるほど、そんなに早くから天文学に興味を持ち始めたのですか。25ドルの2インチ望遠鏡がHDFの母だったわけですね。

ウィリアムズ 当時、それは私の研究の主要テーマではなかったのですが、私達にはこの分野の最高の装置があるわけですから、HSTが高赤方偏移の銀河の検出にどれほど優れているか決めようと試みるべきであると思いました。HSTが打ち上げられた1990年4月にジョン・バコールとその同僚のラジャ・グハタクルタ、ドン・シュナイダーは、HSTで期待される発見について総合的な論文^{*9}をサイエンス誌に書きました。その論文で彼らが予言したことの一つは、HSTが「恐らく新しい種族の銀河を明らかにすることはない」ということでした。彼らの論拠は確固たるものでした。計算に基づいたもので、遠方の天体の表面輝度が $1/(\text{距離})^2$ よりも速く $1/(1+z)^4$ で減衰するという宇宙論的效果によるものであり、理にかなっていません。通常距離の2乗の効果、 $1/(\text{距離})^2$ に加えて波長と時間の伸びの効果があり、銀河の表面輝度は極めて速く $1/(\text{距離})^4$ で減衰する関係があります。そこでバコール達は当然のことながらHSTによる高赤方偏移での重要な発見は難しいであろうと予言したのです。

岡村 当時、天文学の世界ではかなり多くの人たちが同じ感覚を持っていたかもしれません。HDFの直前に発表した1995年の論文^{*10}でチャック・スタイデルはこう書いています。「 $z>3$ での銀河の探索は、それに注がれた努力を考えればこれまでのところ大失敗に終わってきた。」

ウィリアムズ マーク・ディキンソンがHSTのサイクル3に $z=1.2$ のリッチな(空間密度の高い)銀河団3C 324を観測するプロポーザルを提出して認められた時に、それが完全に変わったの

です。彼は博士号を取得したばかりでまだ常勤の職についておらず、STScIで博士研究員をしていました。彼は1994年に32周回の観測時間を与えられましたが、その当時HSTで実施された観測では群を抜いて長いものでした。銀河団3C 324の中心には強力な電波源が存在しますが、地上の望遠鏡で撮った写真では解像度が悪くはっきり見えませんでした。それとは対照的に、マークが一つの波長帯域でHSTによって得た写真は見事なものでした。1ダースもの銀河の詳細がはっきりと見え、そのほとんどが非常に不規則な形態を示していました。遠方の銀河を撮像するHSTの能力を説得力のある1枚の写真が証明して見せたのです。

私たちは研究所で毎朝コーヒーを飲みながら研究の話をしていました。マークが初めてその写真を私たちに示してから数週間は、それが私たちの中心的話題でした。それは私にとって非常に刺激的であり、HSTによって遠方の銀河の研究を真剣に行うべきであると確信させてくれました。遠方銀河の研究を速やかに前進させるため、またそれらの銀河の観測とデータの記録・保管の促進に研究所が役割を果たすための最も簡単な方法は、所長裁量時間を使うことであることは明らかでした。

最初私がこうするべきであると考えたのは、天文学者に対してプロポーザルを募り、エキスパートがどのように応えるか見てみようということでした。私は銀河の研究に豊富な経験を持つサンディ・フェーバー、アラン・ドレスラー、サイモン・リリー、ケン・ケラーマン、リチャード・エリス、レン・カウイー、フレーザー・オーウェン、その他の研究者からなる諮問委員会を、彼らが所長裁量時間を与えられたら何をするか聞きくために招集しました。私は遠方の銀河の研究にほとんどの所長裁量時間を与える覚悟でいました。私は各委員に、それぞれ15分で遠方の銀河を研究するためにHSTを使う最善の方法は何かを私に示唆する

ように依頼しました。

委員会が取り上げた問題は次のようなものでした。どんなフィルターを使うべきか？ 既知の天体の観測を選ぶべきか未知の天体の探査を選ぶべきか？ 換言すると、撮影された画像の中に銀河が見つかることを保証するため既知の銀河団を観測するべきか、あるいは宇宙ではもっと典型的であるが恐らくほとんどが空っぽと思われる天域(ブランクフィールド^{*11})を観測するべきか？ 何周回の観測時間を使うべきか？ データはどうするのか、公表するのか？ 所長裁量時間であることから、私は研究責任者と共同研究者だけがデータを利用できるのは通常1年であるとする非公開期間のルールを適用除外とする権限を有していました。

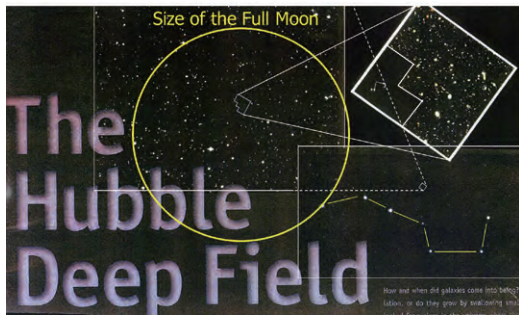
私は上述の問題全てに委員会のコンセンサスが得られることを期待していましたが、そうはなりません。一日中この問題について議論を戦わせた末、主な問題についてはほとんど一致点が見出せませんでした。委員の半数は、少なくとも何かを得られると分かっている既知の天体の観測を選ぶべきであると考えました。残りの半数は「いや、既知の天体は特殊な場合だから、選択効果のない観測、つまりブランクフィールドを選ぶことにしよう」と言いました。結局、はっきりした方向は何も決まりませんでした。

翌日、私は遠方銀河の研究に興味を持っていた若手の研究所員、ハリー・ファーガソン、マーク・ディキンソン、アンディ・フラッチャー、マウロ・ジャヴァリスコ、マーク・ポストマンと会い、何をすべきか議論しました。私たちはこの状況を何時間も議論し、「我々だけでも、広く天文学者コミュニティのためにプログラムを念入りに作り上げて実施することができ

^{*9} J.N. Bahcall, P. Guhathakurta, and D.P. Schneider, *Science* **248** (1990) 178.

^{*10} C.C. Steidel, M. Pettini, and D. Hamilton, *Astronomical Journal* **110** (1995) 2519.

^{*11} 銀河系の星は別として、これまでに知られている明るい銀河がなく、短時間露光の画像では何も天体がないように見える天域。



ハッブルディープフィールド(HDF)。北斗七星のそばのHDFを含む約30分角の天域(右下)を撮影した写真(パロマー・スカイサーベイ:真中上)に、満月の大きさとHDFの場所が示されている。右上はHDFプロジェクトで得られた画像。背景はNASAが作成したHDFのポスターの一部。(岡村定矩氏提供)

る」という認識に至りました。加えて、我々はHSTのデータを誰よりも良く理解していたので、データを処理して一般に公開することができます。従って私はこのグループで大掛かりなHSTのプログラムに着手することを決定しました。撮像するのは一つの視野とし、ブランクフィールドで未知の天体を探索することにしよう。感度を多少損するが、星質量(銀河中にある星の全質量)に関する基礎的な情報を得ることができるのでいくつかの波長帯域を使うことにしよう。これにはアウトリーチの目的でカラー写真を作れるという利点もありました。HSTのように過去にトラブルに見舞われた高価な望遠鏡にとって、アウトリーチは決して小さな問題ではありません。そして、我々はデータを公表し、完全に処理したデータセットも提供しよう。

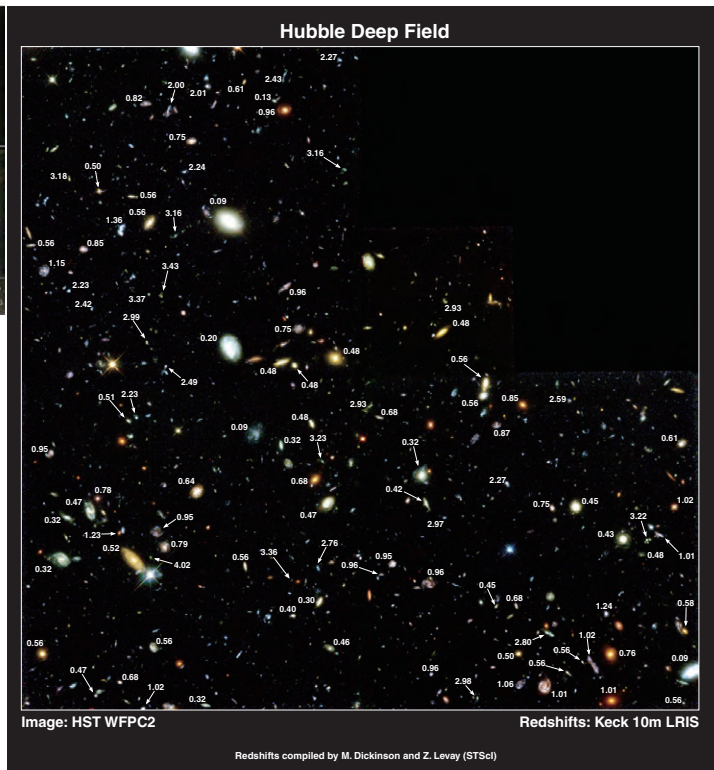
「ハッブル深宇宙(HDF)」と名付けたプログラムのための観測周回数を決定するため、私たちは計算をしました。その結果、撮影された暗い天体の信号対雑音比が150周回、すなわち10日間連続の露光時間を超えると、露光時間に比例して向上せず、露光時間の平方根に比例する領域に入って、観測効率が下がることが分かりました。そこで私たちはHSTのメインカメラで天球上の一ヶ所を10日間連続で深く撮影することに決めました。

私たちは早い段階から、撮影した銀河の赤方偏移、すなわち距離を決めるにはスペクトルを得ることが重要であると気が付いていました。従って私たちは世界で唯一、本当の巨大望遠鏡として稼働を開始したばかりのケック望遠鏡に提供するため、そのHDFの視野を2周回分撮影しました。そしてケックの天文学者に、その2周回分の写真の視野の中で最も明るく映っている複数の銀河のスペクトルを取り始めるように依頼しました。幸い、ケック望遠鏡を使用できる研究機構のメンバーのうち、カリフォルニア大学、ハワイ大学、カリフォルニア工科大学の3研究機関の天文学者が最も明るい天体のスペクトルを取ることに同意してくれました。これは私たちが実際にHSTでHDFの撮像を開始する9か月前のことでした。1995年12月の10日間にわたるHDFの観測活動の時までに、すでに

彼らはHDFの銀河のうち50個、そしてさらに2年後には最終的に130個のスペクトルをとり、彼ら自身のウェブサイトに掲載しました。

岡村 興味深いお話です。HDFの観測活動の前にケック望遠鏡でスペクトルを取るという協定が結ばれていたのですか。

ウィリアムズ チャック・スタイデル、ジュディ・コーエン、ガス・イリングワース、レン・カウイー、デイヴィッド・サンダースの全員がケック望遠鏡で最も明るいHDF銀河のスペクトルを取ることに貢献してくれました。そして、その結果を直ちに公開してくれました。彼らの偉大な功績です。彼らはスペクトルの情報を独占しておく当然の権利を持っていましたが、そうはしませんでした。このスペクトルは、それがなかったらただの美しい写真に過ぎなかったHDFの結果に大きな価値



HDFの中でケック望遠鏡で赤方偏移が測られた125個の銀河。数字は赤方偏移 z の値。(© M. Dickinson & Z. Levay)

を与えてくれました。

岡村 なるほど、それは素晴らしい!

ウィリアムズ ケック望遠鏡のスペクトルはHDFが見つけた2700の銀河全ての赤方偏移を測光から決定する基本的なデータセットとして用いられました。私はこれこそハッブル深宇宙プロジェクトから得られた最も重要な科学的成果であると信じています。現在ではスペクトルがなくても、どんな銀河の赤方偏移も5~6個の波長帯域で撮像した写真による測光から決定でき、それにより銀河までの距離を決定できます。赤方偏移の値の縮退を解くために、一つの波長帯域は赤外線領域に取ることが特に役立ちます。現在、6あるいは7帯域で撮影したイメージから測定される銀河の赤方偏移の値は、その分散が $\Delta z \sim 0.06$ と、見事なほど小さく精度の良いものが得られます。測光学的赤方偏移は宇宙全体を研究し、解釈する途を開きました。

岡村 おっしゃる通りだと思います。測光学的赤方偏移は最初1960年代に提案され、1980年代に幾つか実際に応用されました。しかし、時に「貧者の分光観測法」と呼ばれるこの方法を、遠方の銀河の研究に不可欠で決定的に重要な意味を持つ方法としたのはHDFです。ところで150周回もの露出時間は当時のHSTにとって前例のない大きなものでした。恐らくHDFの構想を批判した人達は、このような長時間の露出は想像していなかったのでしょう。

一流の天文学者に批判されたハッブル深宇宙の構想

ウィリアムズ その通りです。バコール、グハククルタ、シュナイダーがサイエンス誌に書いた論文*9をご覧になれば、彼らは長時間の露出を1~2周回と考えていました。私の考えでは所長裁量時間は、リスクを伴うが成功すれば大きな価値を持つかもしれないような観測を可能とする、特別に役に立つ方法なのです。これはTAC委員会が、リスクを最小にしようとし、そのため成果が不明確であると主張して審査で

プロポーザルを低く評価する傾向とは対照的です。

私が未知の天体を探査するための撮像に150周回のHDF観測活動を行うと初めて発表した時、天文学研究者の間では支持だけではなく批判もありました。なぜそんなに多くの貴重な観測時間を、銀河も含まず何も興味のあるものがないかもしれない写真を撮るために使うのか? それだけの周回数があれば、TACで採択された他のプログラムで新しい結果を期待できるものをもって支援することができるであろうに。HSTの偉大な提案者である二人、ジョン・バコールとライマン・スピッツァーは共にHDFの構想に大反対でした。ジョンは我々が多くの銀河を見つけることを疑問視する検討を既に行っていました。さらに加えて、HDFは多額の経費を要した最初のHSTのサービスミッションの後、すぐに実施されようとしていたのです。当時、歴史上最も高価な30億ドルの科学プロジェクトであったハッブル宇宙望遠鏡に対する一般大衆のイメージは、球面収差という大失敗のために恐ろしくネガティブでした。HSTとNASA(アメリカ航空宇宙局)は惨憺たる評判からやっと信用を回復しつつあるところでした。

ジョンは私に懸念を伝えるため、プリンストンから私の研究所を2回訪れました。彼は私にHDFを実行しないように強く主張しました。私たちは非常に専門的な会話を交わしました。ジョンと話すのはいつも楽しみなのですが、彼にはもっともな理由があってこう言いました。「ボブ、今は時期が悪い。それに取りかかるのは正しいやり方ではない。周回数が余りに多すぎる。こういったことを試みるのはまだ待つべきだ。」私は丁寧に反論しました。「いや、これは本当に行うべきことであると考えている。もし失敗したら私は全責任をとり辞職する覚悟だ。」ライマン・スピッツァーもHDFのことを心配していました。彼はジョンのようにあからさまに反対を述べたりしませんでした。彼らがこの件を一緒

に議論していたことは明らかでした。ライマンは宇宙望遠鏡研究所評議会(Space Telescope Institute Council, STIC)のメンバーで、その会議に出席すると公開討論でよくこう言ったものでした。「ボブ、本当にそれを行いたいのですか?」これが間接的でそつのないライマンのスタイルでした。彼はこうして自分の論点を、私と重要な役割を持つSTICに伝えようとしたのです。こうしたもっともな懸念にもかかわらず、私達のHDFチームと私は遠方の宇宙を撮像することは必要な観測であるという信念を決して放棄しようとはしませんでした。

岡村 老人は時々新しい考えに反対する傾向があります。これが要因の一つだったと考えますか?

ウィリアムズ ジョンとライマンは共に彼らの人生の重要な部分をハッブル宇宙望遠鏡に打ち込んだという事実があります。年齢という要因がどれくらいあったのか私には分かりません。彼らはハッブル宇宙望遠鏡が維持されることを確実にしたいと望んでいました。私たちの間には全く悪感情はありませんでしたが、彼らの反対は疑いの余地がありませんでした。年齢の問題というよりも、むしろ今が危険を冒す時と場合なのかということです。明らかに彼らはハッブル宇宙望遠鏡について、危険を冒す時とは感じていませんでした。

岡村 私には、この前例のない長時間の露出の決定と4色のフィルターを選んだ決断がハッブル深宇宙プロジェクトの偉大な成功の主要な要素であると思えます。

ウィリアムズ (フィルターがなかったら)明らかに測光による赤方偏移の測定を可能とすることはできませんでした。紫外域のフィルターは熱い星の種族に感度があり、宇宙の星形成率密度の最初の推定図であるマダウ・プロットに導きました。これはHDFの重要な成果の一つです。

岡村 そうですね。宇宙の星形成率密度を赤方偏移の関数として示すマダ

ウ・プロットに、未開拓の赤方偏移領域でHDFから新たに2つの点が見つかりました。共に下限値ですが、一つは $\langle z \rangle = 2.75$ ($2 < z < 3.5$)で、もう一つは $\langle z \rangle = 4$ ($3.5 < z < 4.5$)です。近い方の $\langle z \rangle = 2.75$ の点は69個の銀河から、 $\langle z \rangle = 4$ の点は14個の銀河から得られましたが、これらの銀河はドロップアウト法^{*12}によりHDFで発見されたものです。

ウィリアムズ その通り、ドロップアウト法によるものです。HDFから得られた非常に重要な結果です。その後、ダークマターの分布の地図、重力レンズ、宇宙の加速膨張、銀河中のブラックホールなどの結果が得られています。

岡村 また、このHDFの成功で、それ以来HSTは一種のサーベイ望遠鏡となったように見えます。多くの深い探査が続きました。

ウィリアムズ そうです。1°×2°のCOSMOSサーベイがありました。7200平方分のモザイクから非常に素晴らしいダークマターの地図が得られました。その次がフロンティア・フィールドズです。

岡村 そうです。フロンティア・フィールドズです。密度の高い銀河団の撮像を行う、もう一つのエキサイティングな観測です。

ウィリアムズ 赤外域のフィルターを使うのでHバンド（波長1.65ミクロン）でドロップアウトができ、赤方偏移7の銀河を検出できます。そこで非常に遠方の銀河の候補がいくつか見ついています。そしてフロンティア・フィールドズは重力レンズを用いて赤方偏移 $z = 10 - 11$ の銀河の候補を検出できます。候補のいくつかについてはスペクトルをとり、ライマン・ブレイクに基づいて $z \sim 11$ という赤方偏移の値が確認されました。今やHSTは、形成された時代に非常に近い時期の銀河を検出しています。

岡村 そうです。赤方偏移11.2が最近確認され、3月に報告されました。^{*13}

ウィリアムズ 別の $z = 10.7$ の銀河の候補もあると思います。私の同僚のダン・

コーがスペクトルから赤方偏移 ~ 10 が確認された幾つかの天体について論文を発表しました。

岡村 こういったサーベイ全ての成功の母となったのがHDFです。

ウィリアムズ それでも「深宇宙はもう十分だ」と言うであろう人達がいます。「十分な観測時間が注ぎ込まれたので、別のことに進むべきだ。」私はその考えを理解はしますが、賛成はしません。

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の現状

岡村 さて、時間が経つのはとても速くて、話し始めて1時間以上になります。最後にJWST (James Webb Space Telescope、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡)の現状と打ち上げのスケジュールがどれほど確実かについてお話しただけませんか。

ウィリアムズ 3年前、プロジェクトにかなりの予算超過と遅れがあり、また組織の問題が幾分ありました。私はゴダード宇宙飛行センターが、管理体制が最適ではなかったことに同意したと思います。この問題が、大々的なレビューを行うきっかけとなりました。なぜならプロジェクトの完成には予算のかなりの増額が必要で、NASAの当初見積りをはるかに超えるからです。このレビューに対し、NASAは請負業者及び利用していたNASA内部の管理の取り扱いに大改革を行うことを確約しました。NASAは議会を説得し、議会はプロジェクトを完成させるために最後の追加資金の支出を承認しました。その時以来プロジェクトは予定通りに、また予算内で進んでいます。過去2～3年は順調に進み、打ち上げ予定は2018年10月のままで変わってはいません。

岡村 分かりました。2018年10月が目標ですね。

ウィリアムズ 数年の間変わっていません。最終的な組み込みと試験が残っていますが、現時点で測定器は問題ないようです。しかし、誰もが知っている

ように宇宙というのはリスクの大きい事業であり、特に打ち上げ前の試験と打ち上げ自体、予期せぬ失敗が起こり得るものです。JWSTは月の彼方に位置することになるため、修理することができません。成功すれば、初期宇宙と他の恒星の周りを回る惑星の性質についての我々の理解に対し、計り知れない利益を生み出してくれるに違いありません。

岡村 JWSTの打ち上げに是非成功して欲しいと願っています。ご存じの通り日本のX線衛星「ひとみ」の悲劇があったばかりですから。

ウィリアムズ とても残念なことでした。私たちがも幾つか失敗を重ねてきました。科学者仲間として、私たちは皆同じ志をもっています。JWSTがもたらす発見を享受できることを皆願っています。

岡村 どうもありがとうございます。今日は実に面白いお話を聞かせていただきました。このインタビューにお時間をいただき、大変感謝しています。

^{*12} 画像中の銀河の見え方で赤方偏移（距離）を推定する方法。遠方銀河の紫外線放射（121.6 nmのライマンアルファ共鳴線より短波長側）は銀河間空間にある水素に吸収されてほとんど地球に届かないので、画像では銀河が見えなくなる（ドロップアウト）。遠方銀河からの光の波長は赤方偏移により伸びているので、観測されるライマンアルファ輝線の波長も、距離に応じて可視光から近赤外波長域にシフトする。短い方からいくつかの波長帯で撮影した画像を短波長のものから順に見て、どの波長帯までドロップアウトしているかで、銀河のおおよその赤方偏移が推定できる。

^{*13} P.A. Oesch et al., *Astrophysical Journal* **819** (2016) 129.

Lectures on Cosmology with Planck at IPMU

金子大輔 かねこ・だいすけ

Kavli IPMU 博士研究員

台風10号の接近とともに8月29日から31日まで開催された“Lectures on Cosmology with Planck at IPMU”^{*}は台風等の影響のために30、31日の予定が変更になるなど、波乱のセミナーであったといえます。延期になった講義は9月13日、東京大学浅野キャンパスで開講されました。講師はパリ・ディドゥロ大学（フランス）のGuillaume Patanchon 博士で、欧州宇宙機関（ESA）により2009年に打ち上げられた人工衛星による宇宙背景放射（CMB）探索実験、Planck実験の共同実験者でもあります。

主な受講対象者は宇宙論分野初学者の若手ポストドクと学生で、参加者は東京大学のみならず、KEK、JAXA、国立天文台、横浜国大、岡山大学から多数集まり、Planck実験の注目の高さをうかがわせました。

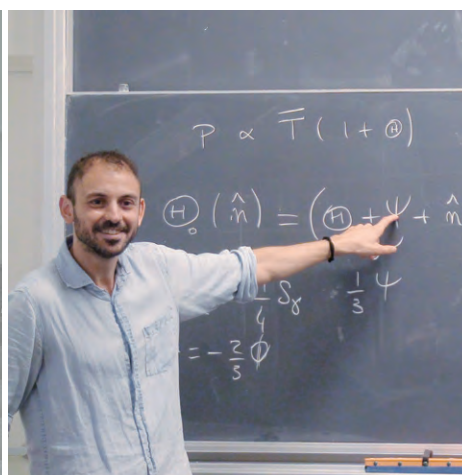
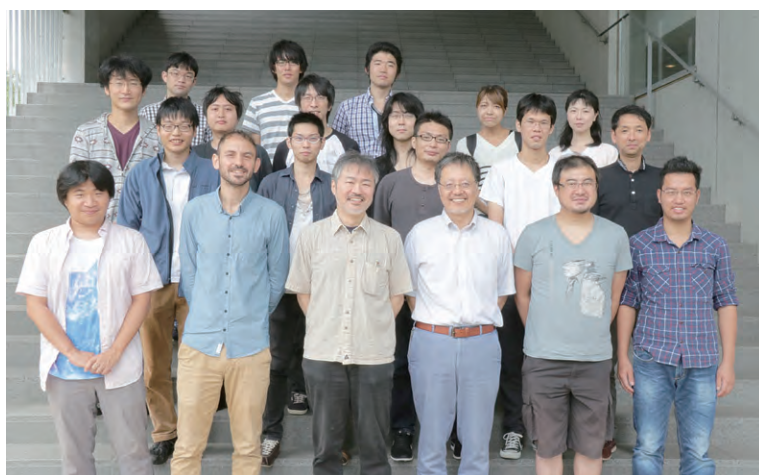
初日の講義は一般相対論と宇宙論の基礎に始まり、宇宙論の標準模型パラメータの解説、FLRW（フリードマン・ルメートル・ロバートソン・ウォーカー）計量の計算による膨張宇宙の導出と続きました。二日目の講義では摂動のある場合の宇宙論が展開されました。CMB観測において特に重要となる宇宙温度の非等方性の計算は特に注意深く議論され、CMBパワースペクトルと宇宙論パラメータの関係については初学者にもやさしく説明がなされました。その後話題はCMBの観測に移り、Planck実験の衛星、高周波数・低周波数用の検出装置、冷却装置、センサー等の詳細が解説されました。最後に2015年に公表されたPlanck実験の結果に移り、CMBマップとパワースペクトルなどが他の実験と比較して紹介されました。Bモード偏光の結果

もBICEP2実験の結果と比較しながら解説されました。非ガウス性に関する結果も取り上げられていました。

補講日である9月13日には、実験データの解析方法と系統誤差に関する講義が行われました。実験データに実際に見られた、宇宙線による長い時定数の雑音、4K冷凍機による振動、ADCの非線形性による誤差などに関する臨場感のある議論は、講師の実際の解析における経験によるものといえます。

最後にPlanck実験の教訓について質疑応答形式の講座が開かれました。CMB実験者にとって有意義な議論が交わされ、盛況のうちにセミナーの全日程が終了しました。

^{*} 本研究活動は、独立行政法人日本学術振興会の「研究拠点形成事業(A先端拠点形成型)」の助成を得ています。



行列因子化および関連する話題、2016

ドゥリップ・ピヤラトナ Dulip Piyaratne

Kavli IPMU 博士研究員

太田啓史(名古屋大学)、斎藤恭司(Kavli IPMU)、高橋篤史(大阪大学)が組織し、2016年9月5日から4日間Kavli IPMUにおいて開催された研究集会『行列因子化および関連する話題、2016』は成功を収めました。プログラムはTobias Dyckerhoff(ボン大学)とDaniel Murfet(メルボルン大学)による2つの連続講義と、高橋篤史、Andrei Losev(モスクワ大学)およびMichael Brown(ボン大学)による関連した研究についての講演で構成されました。参加者は代数、幾何、数理物理の各分野から計35名を数えました。

行列因子化はhypersurface(超曲面)ring上の加群のホモロジカルな振る舞いを研究するための手段としてDavid Eisenbudにより導入されました。この行列因子化が、最近様々な場面で現れ始めています。例えば、超弦理論ではLandau-GinzburgのBモデルにおけるDプレーンの圏として現れます。ホモロジカルミラー対称性では、任意のシンプレクティック多様体に対してその

深谷圏がLandau-Ginzburgモデルの行列因子化圏と同値であるようなミラー対称なLandau-Ginzburgモデルがあると予想されています。加えて、単純特異点の行列因子化のなす三角圏と一致する梶浦-齋藤-高橋の明示的記述はこの圏論的予想に良く当てはまります。

Tobias DyckerhoffはMikhail Kapranov、Chris Brav、Vadim Schechtman、Yan Soibelmanとの共同研究に従ってトポロジカル深谷圏に関する様々な話題を議論しました。彼は最初に2次元の場合にトポロジカルな深谷圏を構成し、次いで相対カラビ-ヤウ構造の概念を紹介してトポロジカル深谷圏の上でそれを構成し、最後に偏屈層の圏論的機構を用いてより詳細な議論を行いました。

Daniel Murfetは「単純特異点の一般化されたオービフォールド(円錐形に巻かれた空間)化」と題して講演しました。彼はCarqueville-Ros Camacho-Runkelによる行列因子化に付随する圏と単純特異点のDynkin 筋図形による表現の

間の新しい記述及び関係を直接導く重要な結果の説明から連続講演を開始し、続いて一般化されたオービフォールド化に対する抽象的な双圏の枠組みによってこれらの概念を議論し、Ladau-Ginzburgモデルおよびその次数付けられたバージョンの具体的な例を示して講義を締めくくりました。最後の講義では行列因子化の成す圏の有限次元モデルの求め方が説明されました。

高橋篤史は斎藤恭司の原始形式の理論を丁寧に紹介し、主として圏論的な構図でその歴史的な展開と更なる発展の方向にハイライトを当てました。研究報告の部分では、Michael Brownが孤立特異点に付随する行列因子化の成す圏から位相的な情報を引き出すために行列因子化の成す圏の位相的K理論について説明しました。Andrei Losevの研究報告では最初に原始形式の理論と一般化されたHodge理論を議論し、次に話題をトロピカルミラー対称性に移し、Gromov-Witten理論のトロピカル極限について考察しました。

参加者の間での数多くの議論は、中でも最も重要なことは、参加者が数学の異なるコミュニティから集まったことですが、ワークショップへの本質的な貢献となりました。さらに、参加者からは互いの交流に十分な時間をとれたことについて喜ばれました。従って、このワークショップは実り多い交流とアイデアの交換に対する理想的な雰囲気を提供したと言えます。



WPI平成28年度現地視察

2016年9月29日、30日にWPI視察団による平成28年度現地視察が実施され、2007年10月の拠点設立以来の成果と当初の拠点構想の達成状況、来年度以降の進展計画の確認が行われました。視察団は、黒木登志夫PD(プログラムディレクター)、宇川 彰PD代理、三田 一郎PO(プログラムオフィサー、Kavli IPMU 担当)、観山正見PO(東京工業大学「地球生命研究所」担当)、Kavli IPMU 担当作業部会の中島 啓、細谷 裕、三輪哲二、Matthias Staudacher、Ian Shipsey、Anthony Tyson 各委員、WPI プログラム委員会から川合眞紀委員(分子科学研究所所長)、中村道治委員(科学技術振興機構顧問 特別主監)、文部科学省及び日本学術振興会WPI事務局から齊藤卓也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をはじめとする方々でした。

初日は村山機構長の概要説明と、Kavli IPMU の研究者からの代表的な研究成果報告に加え、若手研究者らによる19件のポスター発表も行われました。2日目は村山機構長による進展計画の説明に続き、ホスト機関である東京大学の五神真総長、保立和夫研究担当理事・副学長も拠点関係者に加わり視察



視察団にKavli IPMUの今後の活動計画を説明する村山機構長

者側からの質問に答えました。最後にPD、PO、各作業部会委員からの講評があり、午前中で終了しました。

第9回 Kavli IPMU外部諮問委員会開催

2016年8月22日にKavli IPMUの第9回外部諮問委員会が開催され、Steve Kahn(Stanford/SLAC)委員長をはじめ、John Ellis(King's College London)、Young-Kee Kim(University of Chicago)、小島定吉(東京工大)、David Morrison(UC Santa Barbara)、岡村定矩(法政大学)、Nigel Smith(SNOLAB)の全委員が出席しました。

今回は、WPI平成28年度現地視察に対する準備のために行われ、2007年の発足時に提案した研究内容や運営方針等が十分に達成できたか、今後の5年間延長への準備は適切か、等をテーマに様々な有益な意見をいただきました。



外部諮問委員を交えてのtea time風景

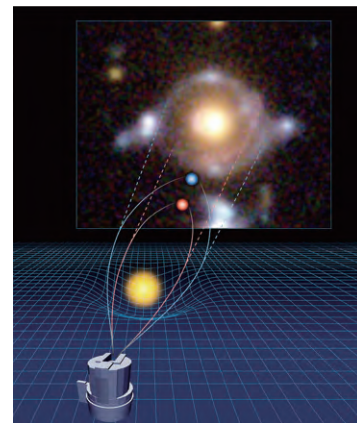
大栗博司主任研究員、アスペン物理学センターのプレジデントに選出される

2016年7月21日にアスペン物理学センターの理事会において、大栗博司さんがアスペン物理学研究所のプレジデント(任期3年)に選出されました。

アスペン物理学センターは、物理学者に研究に専念できる環境を与え、自由な発想のもと、分野の垣根を超えて議論することで新たな研究の方向性を生み出すことを目的として、1962年に米国有数のリゾート地であるコロラド州アスペンに設立された滞在型の研究施設で、1968年からは物理学者の会員と理事からなる非営利法人が運営しています。夏と冬のシーズンを中心に毎年1000人以上もの物理学者が、ワークショップや共同研究で思索を深めるために滞在しています。

Hyper Suprime-Camで極めて珍しい重力レンズ天体を発見

すばる望遠鏡に搭載された超広視野主焦点カメラHyper Suprime-Cam(ハイパー・シュプリーム・カム、HSC)で撮影したデータの中から、国立天文台、Kavli IPMUなどの研究グループが、2つの遠方銀河が手前にある別の銀河によって同時に重力レンズ効果を受けている、極めて珍しい重力レンズ天体を発見しました。この天体は、見た目の特徴から古代エジプトの神聖なる神の目にちなんで「ホルスの目」と名付けられました。



重力レンズ天体「ホルスの目」を形成する銀河の位置関係を模式的に示した図。手前(距離70億光年)にある銀河が背景にある2つの銀河(距離90億光年と105億光年)の光を歪めています。(クレジット: 国立天文台)

この成果は、天体物理学研究の専門誌*Astrophysical Journal Letters*に2016年7月25日付で掲載されました。著者にはKavli IPMUから博士研究員のAnupreeta Moreさん、Alessandro Sonnenfeldさん、准科学研究員を兼ねる東京大学理学系研究科助教の大栗真宗さんが含まれ、また、筆頭著者で今回研究の中心となった国立天文台助教の田中賢幸さんは2013年3月まで博士研究員としてKavli IPMUに所属していました。

HSCでは、今回発見されたような重力レンズ天体が今後さらに10個ぐらい見つかることが期待されています。

カムランド禅、二重ベータ崩壊の探索で世界最高感度を達成

ニュートリノを伴わない二重ベータ

崩壊($0\nu\beta\beta$ と略記)の探索は、ニュートリノが粒子と反粒子が同一のマヨラナ型粒子であるかどうかを決定する決め手であるとともに、現在の宇宙では反物質が消えて物質だけが残されているという「宇宙物質優勢の謎」を解く鍵の一つであることから、世界中で激しい競争が繰り広げられています。

東北大学ニュートリノ科学研究センター長で Kavli IPMU 主任研究員を兼ねる井上邦雄さんと、Kavli IPMU 助教のAlexandre Kozlovさんが参加する国際共同実験グループは、キセノン136の $0\nu\beta\beta$ を岐阜県神岡の地下1,000mに設置した大型実験装置「カムランド禅(KamLAND-Zen)」を使って探索し、これまでのカムランド禅の $0\nu\beta\beta$ 崩壊頻度上限値を6倍更新しました。

この研究成果は物理学の専門誌 *Physical Review Letters* に2016年8月16日付で掲載され、注目論文として Editor's suggestion に選定されました。

「サイエンスカフェ宇宙2016」開催

今年も多摩六都科学館で恒例の同科学館と Kavli IPMU 共催による「サイエンスカフェ宇宙」が2回開催されました。

7月3日に行われた第1回では Kavli IPMU 博士研究員の難波 亮さんが「原始宇宙から来る重力波と磁場—宇宙論最前線—」と題して講演し、約40名(内、70%は中高生)が参加しました。



各テーブルをまわり説明する難波さん

9月4日に行われた第2回では Kavli IPMU 博士研究員の池田暁志さんが「数学と物理の深い関係—『最小作用の原理』から導く万物の方程式」と題して講演しました。参加者は約50名(内、80%は中高生)でした。



講演する池田さん

女子中高生理系進路選択支援イベント「宇宙ヲ覗クト?」開催

2016年8月20日、女子中高生を対象とした理系進路選択支援イベント「宇宙ヲ覗クト?」が Kavli IPMU レクチャーホールで開催され、女子中高生とその保護者と教員、約70名が参加しました。今年前は前 Fermilab 副所長の Young-Keek Kim シカゴ大学教授が2つの講演を英語で行い、村山機構長が逐次通訳をしました。講演の後は Q&A セッション、その後 Kim さんと村山さんを囲む懇談会で盛況のうちに幕を閉じました。

SSH全国大会でブース展示

2016年8月10日と11日の2日間、Kavli IPMU は世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)の他8拠点と共に、神戸国際展示場(兵庫県神戸市)で開催された「平成28年度スーパーサイエンスハイスクール生徒研究発表会(通称:SSH全国大会)」においてブース展示を実施しました。

ロンドンで開催のNew Scientist Liveに参加

2016年9月22日から25日の4日間、ロンドンで開催された科学イベント New Scientist Live において、沖縄科学技術大学院大学、大阪大学、理化学研究所、国立天文台など Kavli IPMU を含む8つの日本の大学及び研究機関が“The Best of Japan Science”と題して合同でブース展示を行いました。

人事異動

昇任

Kavli IPMU 助教の田村直之さんが

2016年8月1日付けで Kavli IPMU 准教授に昇進されました。



田村直之さん

転出

次の方々が転出しました。[括弧内は Kavli IPMU 在任期間です。]

Kevin Bundy さん [2011年9月16日—2016年9月4日]、Kavli IPMU 助教からカリフォルニア大学サンタクルーズ校 Associate Researcher へ。

Alexie Leauthaud さん [博士研究員として2011年9月16日—2013年1月31日、その後2016年9月4日まで現職]、Kavli IPMU 助教からカリフォルニア大学サンタクルーズ校助教授へ。

Artan Sheshmani さん [2015年9月7日—2016年7月31日]、Kavli IPMU 特任研究員(非常勤講師)からオハイオ州立大学助教授へ。

Ran Huo さん [2013年9月1日—2016年8月31日]、Kavli IPMU 博士研究員からカリフォルニア大学リバーサイド校博士研究員へ。

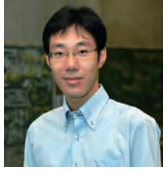
Yin Li さん [2016年4月1日—2016年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員からローレンス・バークレー国立研究所博士研究員へ。

難波 亮さん [2013年9月1日—2016年8月31日]、Kavli IPMU 博士研究員からカナダの McGill 大学博士研究員へ。

Andreas Schulze さん [2013年10月1日—2016年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員から国立天文台 EACOA(東アジア中核天文台連合)博士研究員へ。

Yue-Lin Sming Tsai さん [2013年10月1日—2016年9月30日]、Kavli IPMU 博士研究員から国家理論科学研究中心(台湾) Assistant Research Scholar へ。

林 航平さん [東京大学特別研究員(日本学術振興会特別研究員)として2015年4月1日—2016年3月31日、その後2016年9月30日まで現職]、Kavli IPMU 特任研究員から北京大学カブリ天文・天体物理学研究所博士研究員へ。

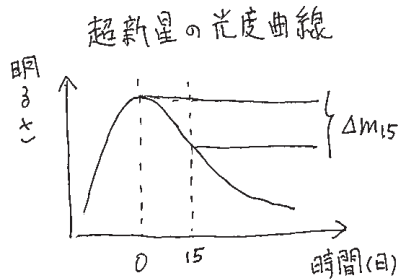


フィリップス関係

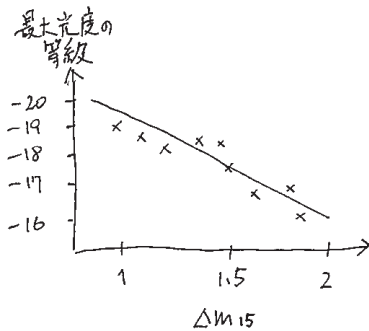
安田 直樹

Kavli IPMU 教授

フィリップス関係は、Ia型超新星の最大光度が、ゆっくり暗くなるものほど明るいという関係です。Ia型超新星の最大光度には数倍のばらつきがあることが知られていましたが、Ia型超新星の最大光度をこの関係を使って較正することでIa型超新星の距離を測るための精度の良い指標として使うことができます。このフィリップス関係、より一般的には、光度曲線の形と明るさの関係は、2011年のノーベル物理学賞が与えられた遠方のIa型超新星の観測により宇宙の加速膨張を発見した研究の基礎となっています。



最大光度の15日後に
どれだけ暗くなるかが
暗くなる速さを定義



Δm_{15} と最大光度の間に
相関がある。
⇒ Phillips 関係