

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



Today Institutes for Advanced Study



The University of Tokyo
東京大学国際高等研究所

Feature Cosmology and Statistics
Interview with Freeman Dyson



No. **26**

No.

June 2014

Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Hitoshi Murayama at Work
- 4 **Feature**
Cosmology and Statistics
Masahiro Takada
- 12 **Our Team**
Mikhail Kapranov
Shamik Banerjee
Christophe Bronner
Yohsuke Imagi
Hironao Miyatake
Koichi Nagasaki
Natsumi Nagata
Rio Saitou
Hiroshi Takano
Yasuhiro Takemoto
Alexey Tolstov
- 16 **Round Table Talk**
Peter Goddard with Hitoshi Murayama and Hiroshi Ooguri
- 22 **Interview** with Freeman Dyson
- 31 **Workshop Report**
Kavli IPMU-FMSP Workshop
"Supersymmetry in Physics and Mathematics"
Toshitake Kohno
- 32 **Workshop Report**
Peter Goddard Symposium
Hiroshi Ooguri
- 33 **Workshop Report**
Workshop on "Floer and Novikov Homology,
Contact Topology and Related Topics"
Andrei V. Pajitnov
- 34 **News**
- 38 **Cosmic Inflation and Primordial Gravitational Waves**
Katsuhiko Sato

Japanese

- 39 **Director's Corner** 村山 斉
近況
- 40 **Feature**
宇宙論と統計 高田 昌広
- 48 **Our Team**
ミハイル・カプラノフ
シャミック・バナジー
クリストフ・ブローナー
今城 洋亮
宮武 広直
長崎 晃一
永田 夏海
齋藤 亮
高野 浩
竹本 康浩
アレクセイ・トルストフ
- 52 **Round Table Talk**
村山斉と大栗博司、ピーター・ゴダードと語る
- 58 **Interview** フリーマン・ダイソン教授に聞く
- 67 **Workshop Report**
Kavli IPMU-FMSP ワークショップ
「物理学と数学における超対称性」
河野 俊文
- 68 **Workshop Report**
ピーター・ゴダード・シンポジウム
大栗 博司
- 69 **Workshop Report**
フレアーホモロジー、ノビコフホモロジー、接触トポロジー、
及び関連する話題に関する研究集会
アンドレイ V. パジトノフ
- 70 **News**
- 72 **宇宙のインフレーションと原始重力波**
佐藤 勝彦



Masahiro Takada is a Professor at the Kavli IPMU. He graduated from Tohoku University in 1996. He received a Doctorate in Physics from Tohoku University in 2001. He became a JSPS (the Japan Society for the Promotion of Science) fellow in 2000, postdoctoral fellow at the University of Pennsylvania in 2002, Assistant Professor at Tohoku University in 2004, and Associate Professor at the IPMU in 2008. Since October 2012, he has been a Professor at the Kavli IPMU. At present, he is a chairperson of the Hyper Suprime-Cam (HSC) Science team and Project Scientist of the Prime Focus Spectrograph (PFS). He received ASJ (Astronomical Society of Japan) Young Astronomer Award (2008) and PASJ (Publications of Astronomical Society of Japan) Excellent Paper Award (FY2012).

高田昌広：Kavli IPMU教授。1996年3月東北大学理学部卒業。2001年3月東北大学大学院理学研究科博士課程修了、博士の学位を取得。2000年1月より日本学術振興会特別研究員、2002年米国ペンシルバニア大学博士研究員、2004年東北大学大学院理学研究科助手（2007年4月より助教に呼称変更）、2008年3月よりIPMU准教授、2012年10月よりKavli IPMU教授。現在、Hyper Suprime-Cam(HSC)サイエンスチームの議長およびPrime Focus Spectrograph(PFS)のプロジェクトサイエンティストを務める。日本天文学会研究奨励賞（2008年）、日本天文学会論文研究報告論文賞（2012年度）受賞。

Hitoshi Murayama at Work

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama



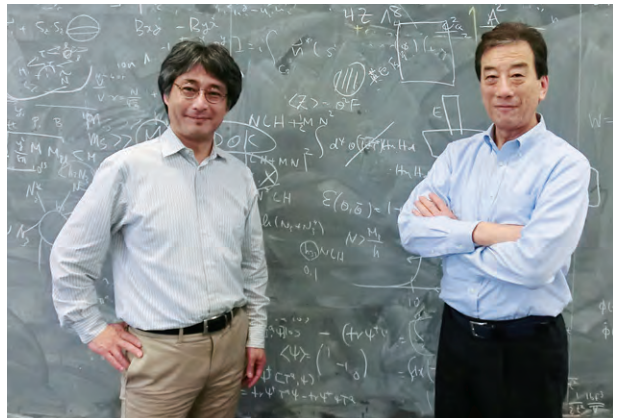
April 1: Appointment of Kavli IPMU Deputy Director Yoichiro Suzuki as a Project Professor. Previously, he was a Professor at ICRR.



April 1: Round-table talk with Peter Goddard (right) and Hiroso Ooguri (left).



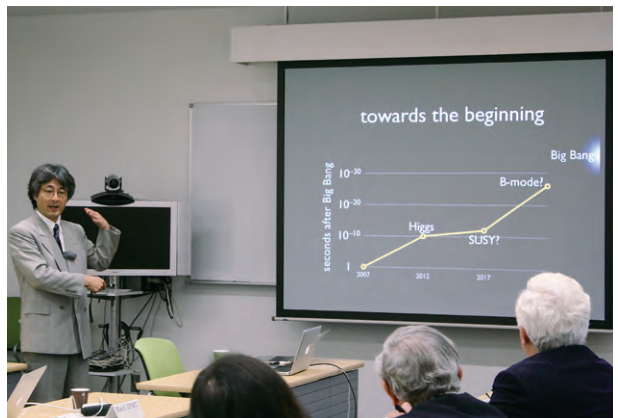
April 16: Photo with Freeman Dyson (center) and Masataka Fukugita (left).



May 26: Photo with Kiyoshi Kurokawa, Academic Fellow at the National Graduate Institute for Policy Studies.



June 21: Introducing the Kashiwa campus to second-year students at the Kamaba campus of the University of Tokyo.



June 30: Presentation at the Seventh External Advisory Committee.

Cosmology and Statistics

1. Introduction

Observational cosmology is an exciting research field. High-precision cosmology data sets, as represented by the cosmic microwave background (CMB) experiments, have allowed us to address the most fundamental questions of the Universe, such as dark matter, dark energy, and the age of the Universe. 21st century cosmology requires both theory and observation and has now grown to be an “experimental” science.

Since some articles in the previous IPMU News touched on these advances in cosmology, we would like to discuss a different topic in this article, namely, statistical aspects of cosmology. Cosmological theory and methodology involve various statistical concepts. Cosmological data sets may look complicated at first glance. For instance, the fundamental observational quantity for CMB is the black-body radiation temperature of CMB photons observed in each direction in the celestial sky. In the case of a galaxy survey, the spatial distribution of galaxies is the fundamental observational quantity. How can these cosmological data sets be quantified and compared with theory? What are the premises and assumptions made in cosmological analysis and what are the limitations? The goal of this article is to discuss these questions.

2. Cosmological Principle, Ergodic Hypothesis and Two-Point Correlation

Suppose that $F(\boldsymbol{\theta})$ is a fluctuation field obtained

from a cosmological data set. In the case of CMB, it is the CMB temperature fluctuation field, defined as $F(\boldsymbol{\theta}) \equiv [T(\boldsymbol{\theta}) - \bar{T}]/\bar{T}$, where $T(\boldsymbol{\theta})$ is the CMB temperature in the direction $\boldsymbol{\theta}$ and \bar{T} is the average temperature over the sky (see the upper-left plot of Fig. 1). Although a similar field can be defined in three-dimensional space, let's consider the two-dimensional field in the following. The field $F(\boldsymbol{\theta})$ is observed with a finite angular resolution in actual observation, and would therefore be given in discretized pixels. The Planck satellite observed the CMB sky with angular resolution of about 5 arcmin, providing the CMB temperature fluctuation field in about 5 millions pixels. This is an enormous data set.

However, cosmology theory cannot reproduce the $F(\boldsymbol{\theta})$ field as is observed. More precisely, to build a model to reproduce the observed $F(\boldsymbol{\theta})$, one would need to introduce too many model parameters that can be as many as the degrees of freedom of the data. This is obviously not interesting, and we do not want to make such a fruitless effort. For this, a cosmological analysis usually employs the cosmological principle:

- the Universe is homogeneous and isotropic in a statistical sense.

In simpler terms, it says that there is no *spatial* direction or position in the Universe, or we on the Earth are not located at a spatial position in the Universe. Thus, this principle would be regarded as a democratic concept.

If we accept the cosmological principles, we can

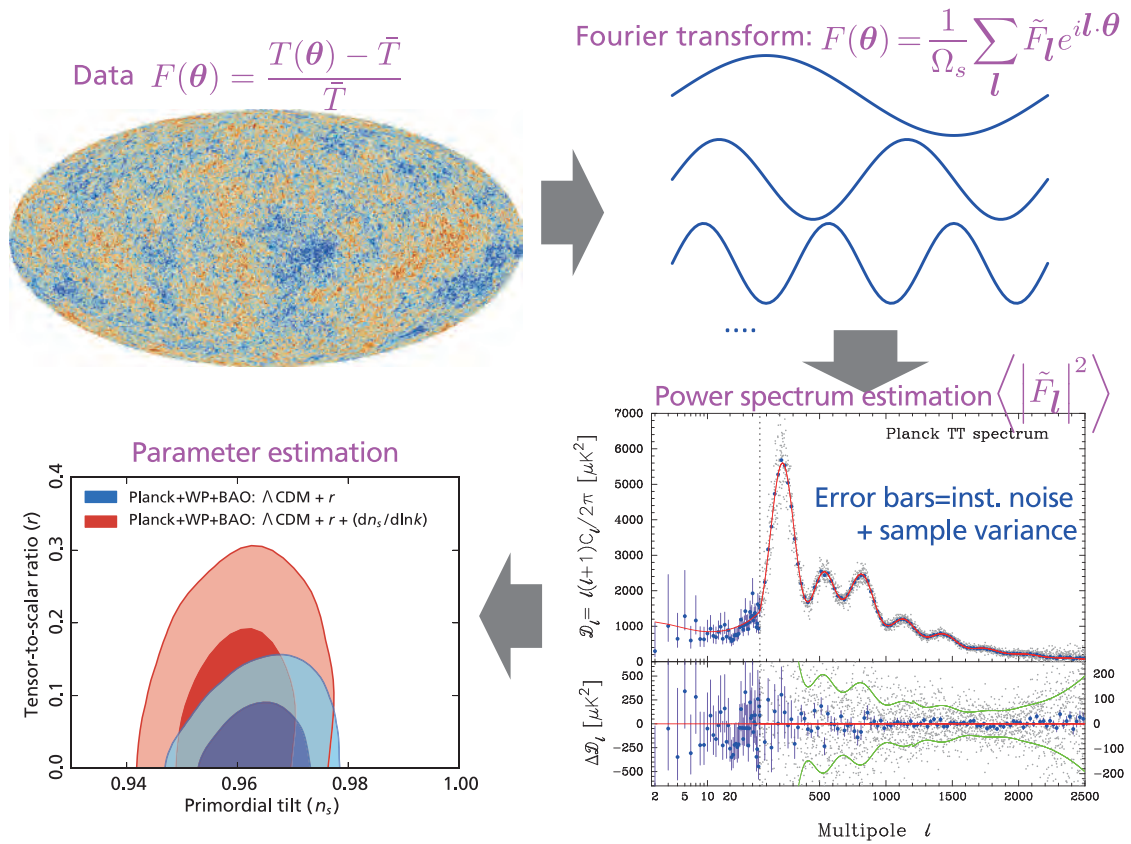


Figure 1. A flowchart of cosmological analysis. *Upper-left plot*: A cosmological fluctuation field $F(\theta)$. In this example, the temperature fluctuation field of the cosmic microwave background (CMB), taken from the Planck data. *Upper-right plot*: A Fourier decomposition of the field, \tilde{F}_l . The gray points (in the upper panel) show the measured value at each wavenumber bin (more exactly multipole bin in the spherical harmonics expansion). The blue points are the average among the several wavenumber bins. The error bars account for statistical uncertainties in each bin arising from both the sample variance due to a finite number of the Fourier modes and observational effects such as the instrumental noise. The red curve is the best-fit theoretical model. *Lower-left plot*: An example of parameter estimation, obtained by comparing the measurement with the model prediction. The confidence region of each parameter is obtained by properly propagating the measurement errors into parameters.

consider that the observed field $F(\theta)$ is a representative sample of the parent population of $\{F(\theta)\}$ that exists in a vast universe. Again in the CMB case, we assume that even if an independent observer who is located somewhere far away from us in the Universe observed the CMB, he would see a similar field of the CMB fluctuations as what we observed. We need to statistically quantify the extent of similarity, however; i.e., how typical or representative the field we observed is compared to the expectation, as we will discuss below.

A Fourier decomposition is useful to quantify the observed field $F(\theta)$. That is, we decompose the field into orthogonal functions of different wavenumbers:

$$F(\theta) = \frac{1}{\Omega_s} \sum_l \tilde{F}_l e^{i.l.\theta} \quad (1)$$

Here we ignored the curvature of the celestial sphere for simplicity and assumed that the sky is a two-dimensional flat space. If Ω_s is an area of the observed region, the fundamental wavenumber of the Fourier decomposition $l_f \equiv 2\pi/\Omega_s^{1/2}$ ($\Omega_s^{1/2}$ is a one-side length of the observed area). Then the Fourier modes are given as $\mathbf{l} = l_f(n_x, n_y)$ ($n_x, n_y = \pm 1, \pm 2, \dots$). The Fourier coefficient \tilde{F}_l is a quantity to describe how much the Fourier mode of wavenumber \mathbf{l} contributes to the observed field.

The Fourier coefficient is generally expressed as $\tilde{F}_l = |\tilde{F}_l| e^{i\varphi_l}$, carrying two degrees of freedom: the amplitude and the phase. Due to the statistical isotropy of the cosmological principle, the phase unlikely carries useful information.¹ Hence, as

¹ If there is any correlation between the phases of different Fourier modes, it easily causes an anisotropic or direction-aligned pattern of the field.

a useful quantity to characterize the amplitude information of the Fourier mode, we can define the power spectrum estimator as

$$\hat{P}_F(l) \equiv \frac{1}{N_{\text{mode}}(l)\Omega_s} \sum_{|l' \in l} |\tilde{F}_{l'}|^2 \quad (2)$$

where $\sum_{|l' \in l}$ denotes a summation over all the Fourier modes satisfying $|l'| \in l$ to within the bin width. $N_{\text{mode}}(l)$ is the number of the Fourier modes in the summation, and is approximated for the mode $l \gg l_f$ as

$$N_{\text{mode}}(l) \equiv \sum_{|l' \in l} \simeq \frac{2\pi l \Delta l}{(2\pi)^2 / \Omega_s} \quad (3)$$

where Δl is the bin width around the mode l , which an observer has to choose. Here $2\pi l \Delta l$ is the area of Fourier space used for the power spectrum estimation, while $(2\pi)^2 / \Omega_s = l_f^2$ is the area of the fundamental mode element. Thus, the power spectrum estimation allows for a significant data compression, from the vast information content of two-dimensional data to the one-dimensional scalar quantity, $\hat{P}_F(l)$. By ignoring the phase information of the Fourier coefficients and assuming that the Fourier modes with the same length $l = |l|$ are equivalent to each other due to the cosmological principle, we estimate the power spectrum from the average of the Fourier coefficients $|\tilde{F}_l|^2$. This would be the simplest statistical quantity to characterize the amplitude of the Fourier coefficients.

What is the main difference between laboratory physics and cosmological experiments? In most cases a physics experiment can be repeatedly done at a laboratory. Then, the expectation value and the statistical error can be estimated from the average and variance of the independent experiment events (realizations). On the other hand, we cannot repeat a cosmological experiment: there is one observation region or there is only one universe even if the all-sky survey is done. Thus, in a cosmological analysis we approximate the ensemble average of independent realizations by the “sample average”; for the above example, the power spectrum is estimated from the average over the Fourier modes of the same length,

$|\tilde{F}_l|^2$, which are all drawn from the same realization (one survey region). This is sometimes called the “ergodic hypothesis” in cosmology. A cosmologist has to take into account statistical uncertainty and limitation arising from this hypothesis.

3. Primordial Gaussian Random Fluctuations and Sample Variance

In the preceding section we introduced the power spectrum that is a standard statistical quantity in cosmology. In fact, there is a case that the power spectrum carries *all* the statistical information of data. You may wonder, “is there such a convenient case for us?”, but the answer is indeed yes! As we will see below, our Universe appears to be simple and beautiful in a “statistical” sense.

The inflationary scenario provides a plausible mechanism to explain the origin of cosmological fluctuation fields such as the CMB temperature fluctuations and large-scale structure. It is a scenario that the universe underwent an exponential expansion at the beginning of hot Big Bang universe. Since the universe itself is tiny during the inflation era, one needs to consider a quantization of a field that causes an inflationary expansion, which is often called *inflaton*. Due to the uncertainty principle of quantum mechanics, the inflaton inevitably has quantum fluctuations. Then the inflationary scenario predicts that the quantum fluctuations are stretched out by the exponential expansion to macroscopic scales, leaving classical fluctuations on horizon scales (the scales beyond causal contact). In quantum field theory, different wavenumber modes (\mathbf{k}) correspond to different quantum states. Furthermore, it is assumed in a standard inflation model that an interaction involved in the inflation field is small, and different quantum states are independent from each other. That is, if we denote the primordial classical fluctuation field by $\tilde{\zeta}_{\mathbf{k}}$ (often called the primordial curvature perturbation), the following condition is satisfied:

$$\langle \tilde{\zeta}_{\mathbf{k}} \tilde{\zeta}_{\mathbf{k}'} \rangle \equiv P_{\zeta}(k) (2\pi)^3 \delta_D^3(\mathbf{k} + \mathbf{k}') \quad (4)$$

where $P_\zeta(k)$ is the primordial power spectrum. $\delta_D^3(\mathbf{k} + \mathbf{k}')$ is the three-dimensional Dirac delta function imposing that the fields of different wavenumbers are independent. In addition, we assumed that the primordial field is statistically isotropic, leading the power spectrum P_ζ to depend only on the length $k = |\mathbf{k}|$, which is valid as long as an inflation expansion is isotropic.

Thus, the inflationary scenario naturally predicts the generation of isotropic classical perturbations across the whole universe originating from random, free quantum fluctuations. More precisely, we expect that the phase of the primordial fluctuation field, $\tilde{\zeta}_\mathbf{k}$, is a random zero-mean variable, and only the amplitude contains the physical information, where the typical amplitude is given by the primordial power spectrum $P_\zeta(k)$. This means that the primordial field $\zeta(\mathbf{x})$ is a *Gaussian random field*. The Gaussian field has simple statistical properties. The even order correlation functions² are given by a product of the two-point correlation function, which is the inverse Fourier transform of the power spectrum. The odd order correlation functions³ are all vanishing. That is, *the statistical properties of a Gaussian random field are fully described by its power spectrum*.

One problem of cosmic structure formation is solving how the perturbations of each component of radiation, baryon and dark matter have evolved in an expanding universe that has undergone from the radiation-, matter-, and dark-energy dominated era, given the initial conditions such as those set by the inflation models. As long as the amplitude of the perturbations is much smaller than unity, we can use *the linearized perturbation theory* to solve the dynamical evolution of multi-component system based on the linearized Einstein equations and the linearized Boltzmann equations. The nice thing is that different Fourier modes evolve *independently* in the linear regime. This means that the perturbations in the linear regime preserve statistical properties of the primordial perturbations. In fact the observed CMB temperature fluctuation field, which is well

in the linear regime, is found to be in remarkable agreement with a Gaussian random field, which is considered as one of the pieces of strong evidence of the inflationary scenario.

Hence, a power spectrum estimation from the cosmological data can be regarded as an appropriate approach, motivated by the inflationary scenario. As we stated in the previous section, we need to take into account statistical uncertainty in the power spectrum estimation arising due to a finite number of the Fourier modes. This uncertainty is called the *sample variance*. The statistical uncertainty in the power spectrum estimation is given by the covariance matrix, and can be analytically computed for a Gaussian field:

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\hat{P}_F(l), \hat{P}_F(l')] &\equiv \langle \hat{P}_F(l) \hat{P}_F(l') \rangle - \langle \hat{P}_F(l) \rangle \langle \hat{P}_F(l') \rangle \\ &= \frac{2}{N_{\text{mode}}(l)} \delta_{ll'}^K P_F(l)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Here $\delta_{ll'}^K$ is a Kronecker-type delta function, defined in that $\delta_{ll'}^K = 1$ if $l = l'$ to within the bin width, otherwise $\delta_{ll'}^K = 0$. Thus the covariance matrix for a Gaussian field has only diagonal elements.⁴ In other words, the power spectra of different bins are independent from each other. For a non-Gaussian field, the covariance matrix has additional contribution that arises from the 4-point correlation function that cannot be expressed by a combination of the power spectra, causing correlations between the power spectra of different bins. In actual observation, other statistical noise such as instrument noise also contributes to the covariance, but we ignore the contribution for simplicity in the following.

The covariance elements at each l bin give a 1σ -distribution of the measurement values around the expectation value, when the power spectrum at the l bin is estimated from each of the survey realizations for the fixed area Ω_s . Hence an expected statistical significance of the power spectrum

² For instance, the 4-point correlation function is given by $\langle \zeta(\mathbf{x}_1) \zeta(\mathbf{x}_2) \zeta(\mathbf{x}_3) \zeta(\mathbf{x}_4) \rangle$.

³ For instance, the 3-point correlation function is given by $\langle \zeta(\mathbf{x}_1) \zeta(\mathbf{x}_2) \zeta(\mathbf{x}_3) \rangle$.

⁴ The prefactor 2 on the r.h.s arises from the fact $\hat{P}_l = \hat{P}_l^*$ due to real condition of the fluctuation field $F(\theta)$.

estimation at each l bin is

$$\left[\frac{P_F(l)}{\sigma(P_F(l))} \right]^2 = \frac{N_{\text{mode}}(l)}{2} \quad (6)$$

where $\sigma(P_F(l)) = [\text{Cov}(\hat{P}_F(l), \hat{P}_F(l))]^{1/2}$. For a Gaussian case the statistical significance does not depend on the power spectrum, but rather depends only on the number of Fourier modes around the bin l , $N_{\text{mode}}(l)$. Because of $N_{\text{mode}}(l) \propto \Omega_s l \Delta l$, the statistical significance is greater for a larger area, a higher wavenumber bin l , and a wider bin width Δl .

The lower-right panel of Fig. 1 shows the CMB temperature power spectrum measured from the Planck data. The plot clearly shows that the measurement accuracy is increasingly higher at higher wavenumber bin l (more exactly the higher multipoles that are the order in spherical harmonics expansion). The error bars around blue data points denote the statistical uncertainties due to the sample variance as well as the instrumental noise. Again we would like to emphasize that an observer has to model the sample variance.

Once the statistical uncertainties in the power spectrum measurement are given, one can compare the measurement with theory:

$$\hat{P}_F(l) \longleftrightarrow P^{\text{model}}[l, P_\zeta(k), \Omega_{\text{m}0}h^2, \Omega_{\text{b}0}h^2, \Omega_{\text{de}}, \dots] \quad (7)$$

Here we assumed on the r.h.s that the model power spectrum, $P_F^{\text{model}}(l)$, is given as a function of the primordial power spectrum and other cosmological parameters that specify the cosmic expansion history. This assumption is valid as long as the fluctuations are in the linear regime. First, we can study whether a model of interest can give a good fit to the measurement to within the error bars. Next, by propagating the measurement errors into parameter estimation, we can estimate a confidence region for each parameter. The lower-left panel shows such an example. Strikingly, the Planck team successfully attained the ultimate statistical precision allowed by the sample variance up to $l \sim 2000$, as it uses the all-sky data and the instrument noise is negligible up to the multipoles. Namely,

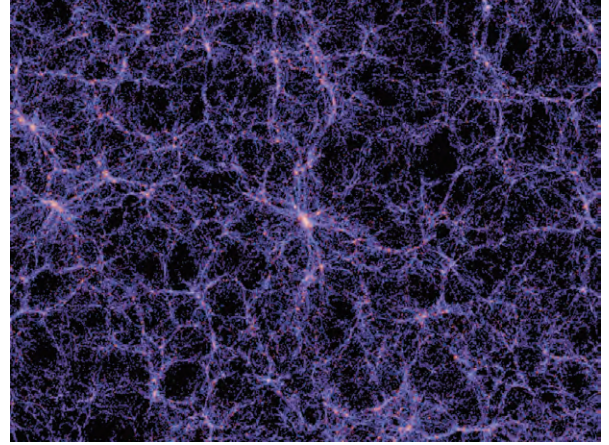
since the power spectrum contains all the statistical information for a Gaussian field, they were able to use all the CMB temperature information in the Universe in order to extract the cosmological information.

What we have so far described is summarized by the following three remarks. (1) We measure the power spectrum from a cosmological data set assuming the cosmological principle that the Universe is statistically isotropic and homogeneous. (2) Assuming the ergodic hypothesis that an observed region is a representative sample randomly drawn from the parent populations, an observer needs to “model” sample variance effects in the power spectrum estimation. (3) If the cosmological fluctuation field is a Gaussian random field as predicted by the inflationary scenario, the power spectrum contains all the statistical information of the field. If any of these three breaks down, the power spectrum is no longer the optimal quantity to extract all the statistical information.

4. Large-Scale Structure Formation: Nonlinearity of Gravity

While we have so far mainly discussed the linear Gaussian field such as the CMB field, in this section we consider the cosmological data sets available from galaxy surveys that are aimed at exploring the accelerating universe. The dynamical evolution of fluctuations after the CMB epoch is driven mainly by the spatial inhomogeneities of dark matter distribution. The current standard scenario is that the seed perturbations have grown due to gravitational instability and then formed the present-day, cosmic hierarchical structures containing nonlinear structures such as galaxies, clusters of galaxies and large-scale structure seen through the distribution of galaxies. This scenario is the cold dark matter dominated structure formation model (hereafter simply CDM model). The CDM model predicts a bottom-up structure formation: small-scale nonlinear structures are first formed

Figure 2. An example of N-body simulations for the cold dark matter (CDM) dominated the structure formation model. Even if starting from the initial Gaussian condition, the spatial distribution of dark matter, as represented by N-body particles, display rich non-Gaussian features as a consequence of complex nonlinear gravitational instability. Dark matter halos appear at the spatially small places where dark matter particles particularly cluster. Very massive halos of cluster scales, with masses $\geq 10^{15} M_{\odot}$, tend to appear at the intersection of cosmic webs/filaments (the obvious example is the halo at the center of the plot). The amount of dark matter contained in halos with masses greater than galactic scales $10^{12} M_{\odot}$ is a few 10 percent of the total matter in the universe. On the other hand, about 70 percent of the spatial volume is occupied by the spatially big, under-density regions – the so-called voids. Reflecting such asymmetry, the dark matter distribution becomes to have non-vanishing values for all the n -point correlation functions.



and then merge in a continuous hierarchy to form larger-scale structures.

We assume that CDM particles have negligible thermal velocity (cold) and interact with other particles only via gravity. We can show that, on scales well within horizon scale and from a spatially coarse-grained viewpoint, the time evolution of dark matter clustering follows the pressureless and irrotational fluid equations in an expanding universe:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta_m}{\partial t} + \frac{1}{a} \nabla \cdot [(1 + \delta_m) \mathbf{v}_m] &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{v}_m}{\partial t} + \frac{\dot{a}}{a} \mathbf{v}_m + \frac{1}{a} (\mathbf{v}_m \cdot \nabla) \mathbf{v}_m &= -\frac{1}{a} \nabla \phi \\ \nabla^2 \phi &= 4\pi G \bar{\rho}_m a^2 \delta_m \end{aligned} \quad (8)$$

Here $a(t)$ is the scale factor that is an increasing function with cosmic expansion, $\delta_m(\mathbf{x}) \equiv [\rho_m(\mathbf{x}) - \bar{\rho}_m]/\bar{\rho}_m$ is the mass density fluctuation field, $\mathbf{v}_m(\mathbf{x})$ is the peculiar velocity field, and $\phi(\mathbf{x})$ is the gravitational potential field. In a completely isotropic and homogeneous universe, $\delta_m = |\mathbf{v}_m| = 0$ everywhere. We can study the dynamical evolution of the dark matter fields by solving these equations, starting from the initial conditions constrained by the CMB observations. As is obvious from the above equations, the dark matter fields linearly evolve as long as the amplitudes of the perturbations are much smaller than unity, i.e. $|\delta_m| = |\mathbf{v}_m| \ll 1$ in units of $c = 1$ for speed of light. Once the nonlinear terms $\delta_m \mathbf{v}_m$ and $(\mathbf{v}_m \cdot \nabla) \mathbf{v}_m$ become non-negligible compared to the linear terms as time goes by, however, the

dark matter fields enter into the nonlinear regime. The nonlinear evolution induces a mode coupling between different Fourier modes, leading to a complex evolution of the dark matter fields. Thus, even if the initial fields are Gaussian, the nonlinearity of gravity induces non-Gaussian features in the spatial distribution of dark matter. The degrees of non-Gaussianity become greater at smaller scales and at lower redshift.

Thus, the power spectrum no longer describes the full information of dark matter distribution in the late-time universe. In fact, N-body simulation based studies for the CDM model, as illustrated in Fig. 2, have shown that the all n -point correlation functions of the dark matter distribution generally become non-vanishing.

Having described the non-Gaussian features of large-scale structure, one question arises. As described in the previous sections, the power spectrum describes the *full* information contained in the linear, Gaussian fluctuation field in the early universe, which gives the initial conditions of structure formation. On the other hand, the dark matter fluctuation field displays non-Gaussian features, and has non-vanishing values for all higher-order correlation functions beyond the power spectrum. Since we cannot extract any extra information beyond the initial conditions in analogy to the second law of thermodynamics, we can consider that some of the initial Gaussian

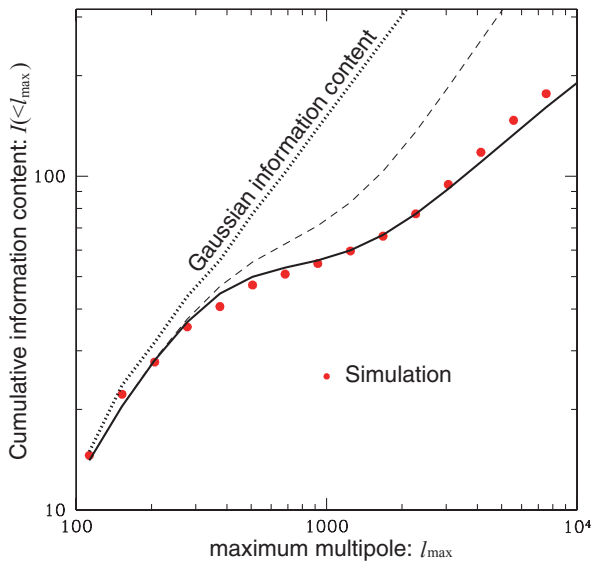


Figure 3. The cumulative information content in the weak lensing power spectrum. The weak lensing field is the projected field of the mass density fluctuation field along the line-of-sight, between an observer and source galaxies at redshift $z_s = 1$. Here we assume $\Omega_s = 1400$ sq. degrees for the survey area. The “cumulative” information content is obtained by summing the signal-to-noise ratio of the power spectrum measurement (e.g., see Eq. 6) from the minimum wavenumber $l_{\min} = 72$ up to a certain maximum wavenumber l_{\max} as denoted by the x-axis. The dotted curve shows the information content if the weak lensing field is Gaussian as expected from the initial linear fluctuation field – the maximum information content. In this case, the information content follows a simple scaling given by $I(<l_{\max}) \propto l_{\max} \Omega_s^{1/2}$. The circle points show the result obtained by using mock catalogs of the weak lensing field that are constructed by using N-body simulations of nonlinear large-scale structure for the CDM model as in Fig. 2. In this case we fully take into account correlations between the power spectra of different bins, due to the non-Gaussianity of the weak lensing field. The solid curve shows the analytical model, showing remarkably nice agreement with the simulations. The dashed curve is the analytical result, if we ignore the effect of super-survey modes on the covariance (see text for details).

information leak into the higher-order correlation functions as a consequence of the nonlinear structure formation. Namely, the question is

- Can we recover the initial Gaussian information content from the present-day dark matter distribution by combining the statistical quantities?

This is indeed an unresolved problem in the field of cosmology. If the dynamical system is time-reversible, we can back to the initial conditions, and therefore should be able to recover the initial information content from observables of the current data (the final state). In the bottom-up CDM model the density fluctuations at sufficiently large scales are still in the linear regime, preserve the Gaussianity of the initial field, and therefore we can recover the initial information. On the other hand, the density fluctuations at very small scales are in the strongly nonlinear regime ($|\delta_m| \gg 1$) and the scales may have already lost the initial memory. For example, consider dark matter particles that are bound in a dark matter halo. Such particles may have a complex orbit scattering or oscillating around the halo center during their evolution history, so the

snapshot information alone of the final state would not allow us to perfectly back their distribution to their initial positions in a time-reversible way. At the intermediate scales, which are in the weakly nonlinear regime, we may be able to recover “most” of the initial information. It is still not clear, however, to what extent we can recover the Gaussian information from the available observables from the scales. In fact, upcoming galaxies surveys aim at achieving a high-precision measurement of galaxy clustering or weak lensing observables in the weakly nonlinear regime, in order to use the measurements to do cosmology. Hence this question is very important for cosmologists.

In recent years we have been addressing the above question based on both N-body simulations and analytical model of structure formation. Fig. 3 shows one of our results. Here, we studied how much information the weak lensing power spectrum in the late-time universe carries, by using mock catalogs of weak lensing observables that were constructed using N-body simulation outputs of CDM structure formation. At small wavenumber $l \sim 100$, the weak lensing power spectrum recovers almost all the Gaussian information. However, at the larger wavenumber $l \gtrsim$ a few 100, the information

content of the power spectrum is significantly reduced compared to the Gaussian information, more than a factor of 2 at $l \sim 1000$, from around which multipoles we expect to extract most useful cosmological simulation for upcoming surveys such as HSC. Thus the plot clearly shows that the power spectrum alone cannot extract all the information contained in the weak lensing field, and more than half of the Gaussian information has gone somewhere! We have indeed found in other work that the 3-point correlation function does add the information. However, the combined information of the 2- and 3-point correlation functions is not still as sufficient as the initial Gaussian information. This implies that the 4-point correlation function is important, which is even more complicated to measure.

Through these studies, we are also finding something very interesting we did not expect. We found that most of the information lost is caused by Fourier modes that are comparable with or beyond a survey region – *super survey modes*. Obviously super survey modes are not observable. This super-survey mode is regarded as a constant offset in the mean density inside the survey region compared to the cosmic mean (the ensemble averaged mean). However, we cannot know whether a modulation in the mean density is positive or negative. Suppose that a survey region is embedded into a slightly coherent, over-density region. In this case, the survey region is considered as a slightly positive curvature universe. Due to the nonlinear nature of gravity, the positive super-survey mode becomes coupled with all the Fourier modes inside the survey volume once the nonlinear structure formation evolves. That is, the time evolution of all sub-volume Fourier modes is enhanced compared to what we naively expect. We found that the mode-coupling between the super-survey mode and the Fourier modes inside the survey region causes a significant contribution to the sample variance in the power spectrum measurement. We then succeeded in formulating this effect in a unified form that can be applied to

any large-scale structure probes. The solid curve in Fig. 3 shows the analytical model prediction for the information content including the effect of the super-sample mode, showing a remarkably nice agreement with the simulation results. Our finding opens up a new and interesting possibility: if we can properly take into account the effect of super-survey mode when comparing the measured power spectrum with theory, we may be able to infer the existence of the super survey mode, which lies in very, very large length scales, for upcoming wide-area surveys. This is potentially very interesting, and we are planning to further explore this effect.

5. Future Prospects

Upcoming galaxy surveys such as the SuMIRe galaxy survey are increasingly expensive, both in terms of time and cost. We want to attain the full potential of these surveys in order to tackle the most fundamental, yet profound problems such as the nature of dark energy. In this article we have described the hypotheses, assumptions and procedures that are often used when measuring statistical quantities from a cosmological data set and then using those to estimate cosmological parameters. The CMB experiment attained the maximum success in terms of the extracted information content, largely because the CMB field is Gaussian, the simplest field. For galaxy surveys, on the other hand, it is not yet clear which observables are most optimal to extract the maximum information. Given these facts, an interdisciplinary field between cosmology and statistics will be more and more strengthened. If you have any new idea, you should work on this new subject!

References

- M. Takada and S. Bridle, *New J. Phys.* 9, 446 (2007)
- M. Takada and B. Jain, *MNRAS* 395, 2065 (2009)
- M. Sato et al., *Astrophys. J.* 701, 945 (2009)
- I. Kayo, M. Takada, and B. Jain, *MNRAS* 429, 344 (2013)
- M. Takada and W. Hu, *Phys. Rev. D* 87, 123504 (2013)
- Y. Li, W. Hu, and M. Takada, *Phys. Rev. D* 89, 083519 (2014)
- M. Takada and D. N. Spergel, *MNRAS* 441, 2456 (2014)

Our Team

Mikhail Kapranov

Research Field: **Mathematics**

Professor



My research is in the areas of algebra, algebraic geometry and category theory. These areas are the source of powerful conceptual tools for understanding the concept of space in a wide sense, from very classical to very abstract.

For example, the classical subject of hypergeometric functions was developed (in my joint works with I.M. Gelfand and A.V. Zelevinsky) to include period integrals of algebraic hypersurfaces in toric varieties. This led us to the discovery of secondary polytopes, which are combinatorial geometric objects governing both hypergeometric functions and discriminant polynomials in singularity theory. These concepts are now widely used in Mirror Symmetry.

Other directions of algebraic geometry which I am interested in (and have worked) include non-commutative geometry (study of the neighborhood

of the commutative regime), derived and infinite-dimensional geometry (algebraic-geometric study of spaces of formal loops and paths).

Category theory provides a unified background for all these areas. In addition, various flavors of category theory (triangulated categories, higher categories, theory of operads) lead to contexts where algebraic expressions themselves become objects with non-trivial geometric structure, not really expressible on a (1-dimensional) line. This additional interface of algebra and geometry seems necessary in order to approach truly higher-dimensional problems.

Shamik Banerjee

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc



My main research interest is string theory and field theory. My recent work focuses on entanglement entropy. Entanglement entropy has applications in many branches of physics starting from black holes to quantum critical phenomena. It is also an emerging tool in field theory. I am trying to develop new non-perturbative techniques for calculating entanglement entropy in field theory. I am also interested in holographic, or, more precisely, AdS-CFT duality. It

gives us a host of exact results for entanglement entropy, and one of the motivations for developing new techniques is to explain these results from the field theory side.

Christophe Bronner

Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc

My research focuses on the experimental study of neutrinos, and more particularly on the phenomenon of neutrino oscillations, where a neutrino produced in a given flavor can be later observed to interact as a neutrino of another flavor. This phenomenon could also violate CP symmetry, in which case neutrinos and anti-neutrinos would oscillate differently.

Most of my work has been done in the Tokai to Kamioka (T2K) experiment, in which a beam of muon neutrinos is produced in the J-PARC center on the East coast of Japan and sent to the Super-



Kamiokande detector in the Gifu prefecture to study neutrino oscillations. I have been working on the near detectors construction and operation, as well as on analysis of T2K data to measure some of the parameters of the PMNS model, describing neutrino oscillations.

Yohsuke Imagi

Research Field: **Mathematics**

Postdoc

I am studying special Lagrangian geometry, an area of differential geometry. For Yang-Mills instantons in dimension 4 and pseudo-holomorphic curves, we already have a good understanding of singularities, and we can define a nice compactification of moduli spaces, which is a source of interesting mathematics and physics. One may want to do something similar for special Lagrangian submanifolds, but their singularities seem considerably more difficult to analyze than those of Yang-Mills instantons in dimension 4, or those of pseudo-holomorphic



curves. So we have not yet achieved a “nice” compactification of the moduli space of special Lagrangian submanifolds. I am developing a deep theory on “simple” singularities, using some techniques from geometric measure theory and Lagrangian Floer theory.

Hironao Miyatake

Research Field: **Cosmology**

Postdoc

I am interested in what the acceleration of the Universe indicates in the context of fundamental physics. I have been working on reconstructing the distribution of dark matter by analyzing the weak lensing effect on imaging data. What I would like to accomplish at the Kavli IPMU is to measure the matter distribution of an even larger volume through data taken by the Hyper Suprime-Cam Survey that



started from March 2014, and to constrain the nature of dark energy and test gravity theory based on this mass distribution.

Our Team

Koichi Nagasaki

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

I was working on string theory and supersymmetric field theories. Now I am interested in the AdS/CFT correspondence which is thought to be a useful tool for studying unknown properties of string theory. Recently I was studying a certain class of operators called non-local operators. I proposed their gravity duals and showed complete agreement between gauge and gravity theories.

Recently, I am considering a system consisting of D3 branes and probe D-branes. This system gives



a special gauge theory which contains defects or boundaries. Using this system, I am thinking of revealing relations between these non-local operators and brane configurations.

Natsumi Nagata

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

My current research interest is to study the physical observables which are sensitive to physics beyond the Standard Model. In particular, I have been focusing on the direct searches of dark matter, the measurements of the electric dipole moments, and the proton decay experiments, and developed the method of evaluating the contribution of new physics to the corresponding physical quantities. Such an approach based on the precision measurements can be complementary to the collider searches, and



in fact the most promising when the scale of new physics, such as supersymmetry, is somewhat higher than the electroweak scale, as is suggested by the null result at the early stage of the LHC running.

Rio Saitou

Research Field: **Cosmology**

Postdoc

I aim to reveal the whole cosmic history from the beginning to the present day or the future. People believe that in the early universe, the universe had experienced the accelerated expansion called inflation, and the present universe is also accelerated by dark energy. We must make these phenomena clear. With this in mind, I investigated the models which unify the inflation and late-time acceleration. Now, I'm interested in the details of the gravitational



wave created during inflation and the effect of the vacuum expectation value of the Higgs particle on the evolution of the universe.

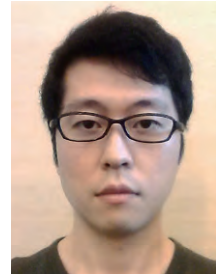
Hiroshi Takano

Research Field: **Theoretical Physics**

Postdoc

I am studying about the phenomenology of neutrino and dark matter. These problems can be explained in TeV energy scale new physics, which is accessible by experiments in the near future. Recently, I am interested in the production scenarios of dark matter particles, thermal or non-thermal relics, cold or warm, and so on. I am trying to understand these

scenarios and their general behavior.



Yasuhiro Takemoto

Research Field: **Experimental Physics**

Postdoc

How has this universe been formed? Neutrinos, one of the elemental particles, are an important probe for this question. Due to their extremely small cross section, neutrinos have provided us with direct information inside the sun or the earth. The possibility that neutrinos are Majorana particles further gives clear explanation of the current matter-dominant universe. I have been studying the universe using neutrinos in the KamLAND and KamLAND-Zen

experiments. At the Kavli IPMU, I will continue this research and also I will start dark matter search using KamLAND.



Alexey Tolstov

Research Field: **Astrophysics**

Postdoc

The key issue around which my research interests are constructed is a question of understanding the mechanisms of supernova explosion and the origin of gamma-ray bursts based on the analysis of observational data: spectra and light curves. Numerical modeling of non-equilibrium radiative and hydrodynamic processes in expanding supernova envelopes provides me the ability to study nucleosynthesis signatures in the optical light curves and spectra of faint supernovae, the

origin of extremely metal poor stars, and supernova shock breakout phenomenon for mildly relativistic ejecta. All of this helps to answer on some pressing questions of stellar evolution and cosmology.



Our Team

Round Table Talk: Peter Goddard with Hitoshi Murayama and Hirosi Ooguri

Peter Goddard

Professor, the School of Natural Sciences, the Institute for Advanced Study

Hitoshi Murayama

Kavli IPMU Director

Hirosi Ooguri

Kavli IPMU Principal Investigator



How the Newton Institute Got Off the Ground

Ooguri: Thank you for joining us for this conversation today.

Goddard: It's my pleasure.

Ooguri: You were the Deputy Director of the Newton Institute which is now one of the leading institutes in mathematical science in the world and you have been responsible in starting that institute, including the designing and the construction of the building.

Goddard: With other people, yes.

Ooguri: You were also the Director of the Institute for Advanced Study and led the expansion of programs. You guided the institute through

financially turbulent periods. So, I think we have a lot to learn from your experience. The areas you have worked on are also quite relevant for this institute. In fact, tomorrow, you're going to give a colloquium about the interdisciplinary research between mathematics and physics—that would be another subject that we would like to talk about today.

Murayama: I'd love to hear about the story of how the Newton Institute got off the ground—how you actually had a vision for the institute and how you tried to bring people in.

Goddard: Well, I think that in the middle of 1980s, I and many of my colleagues in the UK, and particularly

in Cambridge, realized that the country didn't have such institutes. We realized that there was a growth in such institutes because the Institute for Advanced Study had been playing a particular role worldwide for many years and that had inspired various people to start other institutes. For example, Hirzebruch's Institute in Bonn is one famous example, and the IHES (Institut des Hautes Études Scientifiques) near Paris is another that was inspired by the IAS.

Ooguri: And there is RIMS (Research Institute for Mathematical Sciences in Kyoto).

Goddard: So, often people who had been at the IAS had seen there were

things that they could emulate in their own countries—they didn't usually make replicas. In the United States the MSRI (Mathematical Sciences Research Institute) in Berkeley and ITP (Institute for Theoretical Physics), now the Kavli ITP, in Santa Barbara were started. I think many of us found that we were spending our sabbaticals and our vacations in these institutes because they were very good places to go to intersect with lots of people and to be in a research intensive environment. But there really wasn't any such institute in the United Kingdom. We thought that it was excellent that we should go and help run a program in Santa Barbara or take part in the workshop in Oberwolfach (The Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach), or what have you, but it's important to have a two-way flow and to be able to bring people to the UK and, of course, to Cambridge. Some people had already started thinking about this in London. Michael Green was involved, but they hadn't managed to get off the ground. And we saw an opportunity in Cambridge because, at that particular moment, we could see that there might be resources available in the colleges rather than in the university, in Trinity College and Saint John's College, and that it might be possible then to convince the UK research councils to match the resources that Cambridge was finding for itself, to make an international institute there. Then we had to decide what the appropriate scope of the institute, and what the appropriate model of operation of the institute should be. We felt that the scope should be very broad and this would help get broad support, but also many of us thought that the interesting areas were perhaps

preferentially where there were crossovers between disciplines or between sub-disciplines. Then you had a greater added value from an institute because you could bring together people, who would not normally have the time to get together in universities, from different disciplines. I think one of the reasons that institutes have grown in importance—and it was one of the founding principles of the institute in Princeton even back in the 1930s, is that the modern university, and I think this is true all over the world, is now a busy place. It's a place in which the academics are expected to be entrepreneurial, not a place in which they're expected to sit in their offices and have the detachment to think about fundamental questions. They don't, in general, have the time to interact with their colleagues in the next department. They're more likely to interact with colleagues from other disciplines when they're in other places, when they don't have to go to meetings—I think that has been one of the reasons for the growth of institutes like ours worldwide. We saw all those reasons as good reasons. The idea was that if we had a broad institute, it would gain perhaps more support from a wider range of colleagues and, secondly, that it would have the opportunity then to operate in cross disciplinary areas: not that the things that happened in the Newton Institute had to be cross disciplinary, but in each program, in comparing one with another, one looks at what is the added value of having this happen in this institution.

Murayama: Who initiated this discussion? Was it Michael Atiyah or you or...?

Goddard: Well, there were a number

of people who initiated it. Peter Landshoff, Martin Rees, and others.

Murayama: Oh, Martin Rees?

Goddard: Yes, Martin Rees was involved all the way through, and Peter Landshoff played an important role along with me. We did most of the donkeywork, as they say. Then there were very skilled mathematicians, John Coates and...

Ooguri: Is that because of the British tradition that theoretical physicists are regarded as part of the mathematics department?

Goddard: It was partly that, because the initial push for this came from the Faculty of Mathematics which included the Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics.

Ooguri: It included many of the leading theoretical physicists like yourself and Martin Rees.

Goddard: Yes. Then we got support from other Faculties as well. The dominant push came from inside the Faculty of Mathematics. I was a professor of theoretical physics in the Faculty of Mathematics.

Ooguri: I have a question regarding the scope of the institute. You mentioned several mathematics institutions existed before your institute. But there are different kinds. For example, places such as IAS and IHES have their own strength in the faculty. They have leading scholars in the area, and they are the attractions. On the other hand, the places like MSRI have only a very lean faculty, basically just the director, and the strength of their program attracts people. You chose the MSRI mode.

Goddard: Yes.

Ooguri: What has led to that kind of choice?

Goddard: There was a discussion among those people who were forming the institute—and this is at

the end of the 1980s. [We started thinking in about '88.] There were a number of points if you look at the taxonomy, if you like, of these institutes, their various structural aspects. And this is an important one. Do you have a permanent faculty or do you not have a permanent faculty? There are arguments each way. One of the issues for an institute in particular is, "how do you gain a body of support for it?" How do you have a group of people who care about it? One way, of course, is to have leading academics be faculty members. I think this is true of ITP in Santa Barbara, and so on. The other issue you have there if you have a permanent faculty is that you could make some wrong appointments. Now, in fact, if you take something like the Institute for Advanced Study, I think it has a remarkable record of not making wrong appointments.

Ooguri: You can't afford to make mistake at places like this.

Taking Risks to Do Things That Change How People Think

Goddard: Well, I think the problem is—the way I would say is and when I was director at the institute I would try to explain to trustees is the following. Even if we make a mistake, we're making them extremely rarely, and it is more important that people do groundbreaking work. What one has to try to get across is that we are not trying to do quality control here. We're not trying to be in a risk-free environment. What is important is that we do things that change how people think, that we change the nature of the subject, that we make break throughs, if the choice is between doing that and doing very good research that doesn't really change anything.

Ooguri: That's a difficult decision, right? You have to take risks to do that.

Goddard: Yes, you have to explain to people that that is the whole point. That it is much preferable to have an institution in which there might be one or two people who are not as great as you might like, though I don't think this is true of the institute, but even if it were true, that would be better, because alongside that there are people like Edward Witten, Pierre Deligne, and so on, who are completely reconfiguring how we understand whole areas of intellectual activity. You should be more concerned about that than you have nobody who falls below a certain standard. The analogy I used to take, it probably works in Japan as well, is—if you want to take the driving test, you go to the driving school, presumably.

Murayama: In Japan, yes.

Goddard: Then all you're concerned with is passing the test.

Murayama: Right. There is a minimum threshold. Other than that, you don't care.

Goddard: There's a very precise thing that you want. You don't care...

Murayama: You don't care whether you take 100—yes, that's right.

Goddard: You don't want to get a perfect score. That's not really relevant.

Murayama: That's not necessary.

Goddard: You don't go home and boast to your spouse or your parents that you have a perfect score. You don't go there to have your life changed. You might expect when you go to a university, perhaps at 18, that your life will be changed and that it will be a formative experience. But that's not the purpose of the driving school. The purpose of the

driving school is to have a very quality controlled result and if you looked at choosing between driving schools, you'd just select the one that had the highest passed rates, whereas—this is the complete antithesis of this—we're not trying to produce people who can drive cars. We're trying to change the way people think, and so it doesn't matter if there are one or two bad results.

Ooguri: I recognize that. "I shouldn't make a mistake" alone is not a good way to approach this recruitment.

Goddard: You shouldn't if you got very few appointments. Then if you make a mistake, that's a real problem. But I don't think it's possible to have an attitude that you're trying to avoid risks and still really, really do dramatic things.

Ooguri: But in the case of the Newton Institute, you decided not to go that way, but rather...

Goddard: Yes. There were a number of reasons but I think the fundamental one was really related to the sort of model of programmatic activity that we decided on, which was based on, let's say, particularly Santa Barbara. We decided that a permanent faculty wasn't necessary for this model of operation. It would be quite expensive. It would also arouse jealousy in the sense that in Cambridge, by and large, nearly everybody is teaching. If we were to try to create positions in the university, which were completely free of teaching like this, or even if ones which would in some sense be seen as privileged in this institution, this would arouse some opposition. I think one of the considerations we have to have—I don't know whether this applies very much in Japan; it applies much less in the United States I think than in the UK—is that

there is a danger when you try to make such an institute other people, outside Cambridge, would be jealous because it's in Cambridge, and inside Cambridge people might be jealous because it was being given such special terms.

Ooguri: I think, you can argue in both ways. In the case of Santa Barbara, there could be people who are jealous, but most of the faculty members who are not at ITP would recognize that this is an excellent tool to recruit people like Joe Polchinski and Lars Bildsten.

Goddard: Of course, they had some good people like Jim Hartle, John Cardy and Bob Sugar and so on, before, but I think it must be true that the standing of Santa Barbara as a graduate school in physics has changed enormously.

Ooguri: For the university as a whole, they benefited by having this, so probably most of the people recognize the value there.

Goddard: Yes. But, at Cambridge, it is more difficult to get that to be recognized, I think, because there are already so many good things happening.

Ooguri: So they might argue, "We don't need that because we are at Cambridge and we are already excellent."

Goddard: Some people would argue that.

Ooguri: So it sounds like it was a political decision.

Goddard: It was partly a political decision, yes, and it was partly financial. But it was a challenge to get the resources together anyway. And to get these resources as well, and with these political considerations, we decided at least to put the issue off.

Ooguri: It is functioning very well because it's located right next to the

math department and within this mathematics complex.

The Institute Constructed outside the Traditional Univ. Area: The Faculty of Math Moved There

Goddard: It is now, yes. We had to make a decision at some point as to whether we would try to get a building in the middle of Cambridge. In that case it would be a preexisting building. We already thought that it was very important to design this building so as to encourage interaction, and if we had the existing building, it would almost certainly be impossible to do that very well, because it's very expensive to rip apart an existing building and to reconfigure it inside.

Ooguri: Was it why you decided to move outside of this traditional Cambridge University area?

Goddard: That was probably the major consideration. The second one was that the buildings of the faculty of the two departments (theoretical physics and applied mathematics, and pure mathematics) were overcrowded, so that we were inhibited in doing new things or even having very many visitors in comfort because every space was already over-occupied.

Ooguri: I remember your previous location at Silver Street.

Goddard: Yes.

Ooguri: That was some kind of a factory or something like that.

Goddard: You're very discerning. It was a book factory! It was the building in which the University Press actually printed the books.

Ooguri: So then, it's interesting that the institute was constructed outside and the math department followed it and moved to that location.

Goddard: What we perceived was

that if we put it in the center, the departments might have to move anyway, at some point, and that probably we should force the issue. Then fortuitously, my college, St. John's College, had a field of seven acres available. It had been reserved for the expansion of one of the colleges that was further out, Girton College, to come more into Cambridge. It had been kept empty for a few decades actually when it might have been developed. It was earmarked for college or university purposes so that when we talked inside the college about whether the college had any land that might help with this process, the Bursar of the college, Chris Johnson, mentioned this particular site. We saw that actually the whole of the faculty would fit in this site.

Ooguri: So, you already had the vision of eventually building this mathematics complex there.

Goddard: We thought it would probably take more years. But as soon as the institute was opened and I was there running it day to day for Michael Atiyah, we felt that one mile from the old faculty buildings was a real disadvantage. People would not just pop over to go to the talks, and then they wouldn't feel so supportive or get so much value from it. In some sense actually a mile is a very bad distance because somebody will make a special effort to go to London but they don't necessarily make a special effort to go a mile. So we decided that, very soon after we opened the Newton Institute, that we should seek to move the faculty next to the...

Ooguri: And you succeeded in doing that.

Goddard: Yes. Then we had to raise money. So, Peter Landshoff and I,

with help from people like Martin Rees, set about raising the money funding those buildings.

Murayama: It's a doubly expensive proposal to do that, right? You started a new institute and at the same time were working to move the mathematics faculty.



Goddard: But we had already started the institute. So the fundraising then was for these new buildings.

Murayama: I see.

The Institute's Building Designed to Promote Highly Interactive Activities

Ooguri: Now, since we are talking about buildings, I want to ask you this. When I first went to the institute, I immediately fell in love with the building. It really worked like a dream. You have the central interaction area and you come out and you're in the middle of discussion. But if you want to focus on your research, you can just retire to your office. It's very well thought out, and it works very well.



Goddard: Thank you.

Ooguri: It has been subsequently emulated by many institutions, including this one. What was the process of coming up with this kind of design?

Goddard: We wrote a brief for architects. We listed all the things we felt we needed, what were important to try to achieve. And, in particular, we explained that we needed to encourage interaction. I should say there was one prior aspect to this. You said that there are different

sorts of institutes in which different things happen and you distinguished whether there was faculty or not, but along with that also goes whether you're bringing people there to interact or whether you're bringing people there to do their own thing. At the institute in Princeton, basically people do their own thing though some schools are more interactive than others. Natural Sciences is more interactive perhaps than, say, Historical Studies, and Social Science is a bit more interactive perhaps than Historical Studies. It just depends on the style of the particular school, but the institute can accommodate those differences of style. If you go into IHES, it's more like IAS, in terms of people sitting in their offices. But we decided—so it was a choice—that we should have activities going on at the Newton Institute that would be highly interactive. There would be programs and we would specifically tell people that you're not meant to come here and write your book or your paper. You're coming here to discuss. As you say, you must have the opportunity to go to your private room and work out your calculations if you want, but there will be a tendency to interact. We put all of these into the brief...

Ooguri: So, that probably also has to do with the focus on interdisciplinarity that was already there from the beginning of the idea of the institute.

Goddard: Yes, exactly, to bring together people who weren't normally talking to one another. We wrote down a whole series of considerations about this and then we selected with the help of the central university authorities, a number of architectural firms—maybe four. We got these firms

together for a day and we showed them the existing departments. We talked about what was happening there that we wanted to happen in a new place, what was not happening well there, and we spent the whole day talking to them about the issues. We gave them a formal document as well. Then we asked them to come back in a month, and each to make a presentation for an hour or two to us about how they would tackle what we were after. The firm that won came with a model and the model was conceptually very like the institute that you came to. It had a central mezzanine floor and it emphasized the fact that you would know what was going on in the building. One way I think about this is that people's experience of buildings has a characteristic timescale that depends on what you're doing there. If you come to be a student in the mathematics complex in Cambridge, your experience there is on a timescale of 2, 3, and 4 years. If you're a faculty member, it's ten years. Now, if you're coming to this institute, the timescale is 2 to 3 months. And that effects how your experience of the building should be. For example, if you're coming somewhere for 2 or 3 years, you can spend time learning how to get around the building.

Ooguri: It should be more intuitive if you only have a short time.

Goddard: Yes, exactly. It should be immediate. If somebody takes you on ten-minute tour of the building, you will already know it. That goes along with the interactivity because you can see everything that's happening in that building once somebody shows you around and takes you to your office. You've already seen where the coffee is, you can see into the two seminar rooms, you can see where

the library is. Now, the mathematics faculty buildings are built next door—they're built more on a three-year timescale, and you'll take some time to learn all the nooks and crannies. It's not so transparent. It's also the case that at Newton Institute, if you go to your office, there's basically only one way you can do that, and that way involves going through the central area, whereas in the faculty buildings, you can get to your office in one of a number of ways.

Ooguri: Sometimes you may want to do that.

Goddard: You can either walk through the main concourse and advertise your presence ... you



know, like in Italy, they have this practice in the evening in the cities of walking through the streets, families walk through the streets in Florence or in Siena, and advertise their presence to see people and so the Newton Institute makes you do that. I don't know if I already told you the story about Vladimir Arnold. He was a very lively character. He was a member of the first program and after a while, he stopped me and he said, "You know this building is terrible for my health." I said "What's wrong? Nobody is complaining." He said, "Well, you see, I come in here, I have a cup of coffee and then after an hour, I need to go to the men's room. So I go out of my door, I go to the men's room, and immediately somebody stops me and then I manage to get past them and then somebody else talks to me and eventually there is going to be some terrible problem."

Ooguri: Yes. My experience was like that, and it was very intuitive

and so it would naturally be in the middle of a discussion when I go out of the office. Also, I like some of the playful elements of the building such as having a small blackboard in the elevator. I remember when I was there, somebody wrote, "I found a remarkable proof of the Fermat's Last Theorem, but the elevator ride is too short to write it." And, of course, it was soon afterwards that the proof was actually announced at the Newton Institute.

Goddard: Only one year afterward. Somebody wrote that very early.

Ooguri: So the remarkable proof was almost there.

Goddard: Yes.

One Should Have an Idea of Timescale for an Academic Institute

Ooguri: You were the deputy director of the institute. For how many years?

Goddard: For three years, formally. For one year before that I was doing it in practice. So, I was really looking after it for two years before it opened and then two years after. I decided after a year of its operating, it would actually be good to leave after two years and let somebody else continue. If you start something like that, your experience may be different, but mine was that it's probably good for the person who starts it not to continue too long because it's like you have a parental relationship and it's good to let go.

Ooguri: At some point, you have to let go of your kids.

Goddard: Yes, I think so. Since I had been dealing with all the practicalities, many of the things started as a file on my desk in my academic office, and now there was the whole building, and so on, and I just felt it would actually be good to step away. I actually planned then to

go on sabbatical to IHES.

Ooguri: Just to be intentionally away from the institute.

Goddard: Yes, for the next year. But then my colleagues in my college elected me master of the college so that thwarted my ambition to get away.

Ooguri: So, what's your view of the institute now? Has it turned out in exactly the way you anticipated it would be, or were there any surprises?

Goddard: I went back there for the 20th anniversary. We had a short meeting and they asked me to give a talk, so I surveyed what had happened, and I felt very content about the model. At the start, I thought that you should have an idea of timescale for the institute—at least that particular institute, and Peter Landshoff and I and the others felt confident that what this model of the Santa Barbara and MSRI type of interactions, which had really become much more prevalent in the previous 20 years, I would say, would be a very good model for the next 20 years—50 years, perhaps, who knows? But at least 20 years. Let's think that this place would exist for 20 years and it should function well for that period, and after that one could revise one's view, and so you acquire permanent fixtures, etc., thinking about that timescale. And so, after 20 years was a good point to review it since it had reached that point and I think now they still think a 20 years' horizon is a good horizon and are striving to get more endowment. I think it's approaching £10 million. It really needs at least £20 million together with grant income, too. But I think it's made valuable contributions. So, I'm pleased that it worked.

(to be continued)



Interview with Freeman Dyson

Interviewer: Masataka Fukugita

Freeman Dyson visited the Kavli IPMU at Kashiwa from 15th to 19th of April, 2014, and at Kamioka from 20th to 22nd. Masataka Fukugita organized a special Q&A session with Freeman Dyson on 17th of April for 4 hours. This document excerpts this session, supplemented by an additional interview on 18th and another Q&A session held at Kamioka on 22nd.

Fukugita: You were educated at the Winchester College. Would you tell us about this legendary college?

Dyson: Winchester College was founded 650 years ago by William of Wykeham, a Bishop of the Catholic Church and

an advisor to the King. William of Wykeham was a capable administrator. He founded 6 foundations, including New College in Oxford. Students are allowed to enter Winchester College at age 12 after a tough, very competitive competition.

Freeman Dyson was educated from 12 to 17 years of age at Winchester College, a famous elite high school of England. He then went to the mathematics department of Cambridge University, where he was supervised by Abram Samoilovitch Besicovitch. Afterwards he worked for the Royal Air Force, while WWII was raging. A year after the war ended he returned to Cambridge, and gradually switched to theoretical physics. He then went to Cornell University and worked under Hans Bethe. He visited the Institute for Advanced Study in 1948, where his great work for QED was completed. Quantum field theory we learn today is the formulation thanks to Dyson. His work serves as the best example of a mathematical mind clearing up the mess of physics to create a beautiful theory. He was appointed as a professor at Cornell University in 1951, and then invited as a professor in the School of Mathematics of the Institute for Advanced Study in Princeton in 1953, where he served as a professor (now

as a professor emeritus) for 60 years. He has just passed 90 years of age, but still actively engaged in science.

During his long research life he has worked on an amazing variety of subjects, often two or more subjects at the same time. Starting with number theory, the subjects he worked on include:

- Quantum electrodynamics – foundations of quantum field theory;
- Statistical mechanics and solid-state physics;

- Random matrices;
- Stability of matter;
- Adaptive optics;
- Nuclear engineering, nuclear power as space propulsion;
- Model for the origin of life;
- Time variation of the physical constants;

- Carbon dioxide problem, and also some others.

Now he is working on game theory, prisoner's dilemma, besides graviton detection, which was presented in his colloquia on the 16th of April at Kashiwa and on the 21st at Kamioka.

The exam is for ten subjects, including Latin and Greek. There were two for mathematics, one pure math and the other applied math. The exam also includes a modern language. My father was a teacher at this college, so I was already familiar with it as a college brat from the age of 3. The number of students is 70, 15 each year, boys only. This has not been changed until now. The college is still flourishing the same way as in the old days. I still visit it frequently.

The graduates are not necessarily academic; some become bankers and some go to government offices. England is a very class divided society, commercial middle class for business people and academic middle class including university and government people, and there is an antagonism between them. We, the academic middle class, considered ourselves the top students in the school and looked down on the others. That tradition was intact, until Margaret Thatcher took her revenge, putting the commercial middle class firmly in power.

We lived in the same building originally built in the 14th century. It has thick walls, cool in summer and warm in winter. It is comfortable to live there, not much need for heating

or cooling. Education is carried on in a very free style. In the top form we were in class only for 7 hours a week. So we found ample time to learn whatever we wanted.

Fukugita: Have you decided to be a mathematician from the time of Winchester College?

Dyson: No. I was much younger. Mathematics was born in me. I loved numbers and very much enjoyed calculating from the time I was around 3 years old. This is the same as with musicians who start playing piano at age 3. It is the same for mathematics. I knew that mathematics was what I can do best. I was already determined to be a mathematician when I entered the College at age 12.

In the college I found "Cours d'Analyse" by Camille Jordan in the library. It consists of 3 fat volumes, containing the whole of 19th century mathematics. It is a classic work, written around 1900 and used in École Normale in France as a text book. It was a miracle that this book was in the library.

Masataka Fukugita is professor at the Kavli IPMU. He served as a principal investigator at IPMU from October 2007 to March 2012. He is also a part-time member of School of Natural Science of the Institute for Advanced Study in Princeton since 1988. So, he has got along with Freeman Dyson over 25 years.



My fellow classmate James Lighthill, who became a famous mathematician, discovered this book in the library, and we both read and talked about it.

G.H. Hardy was already an old man in Cambridge and the most famous mathematician in England. He had been at Winchester College as a boy 40 years earlier. In his autobiography "Cours d'Analyse" appears, and I strongly suspect that it was he who brought this book to Winchester College. I cannot imagine anybody else bringing it. Unfortunately, I never asked him about this.

Fukugita: Then you went to Cambridge?

Dyson: In 1941 I came to Cambridge. I entered the mathematics department. Mathematics and physics were separate departments. Physics was then still called Natural Philosophy. Mathematics was considered by the physicists to be a French disease.

It was in the middle of the war. There were very few students in the class. The others were fighting the war. Lectures were given by Hardy, John E. Littlewood, Abram Samoilovitch Besicovitch, but students were only a few. We did not sit in class-rooms but sat around small tables with a few students and one teacher.

It was a very lucky time to be a student.

I was a student of Besicovitch, expert on measure theory. He came from Russia, spoke English with a very strong Russian accent. Besicovitch gave me problems to work on. I liked the Russian language, so we spoke in Russian. We often went for long walks in Cambridge, and while doing so were not allowed to speak English. I was influenced by the Besicovitch style: it is architecture. Besicovitch had the ability to build beautiful structures from simple components, which were used in his mathematical proofs. I have used the same style for my calculations in physics.

After Rutherford died in 1937 physics was at a low ebb in Cambridge. In physics, the only professor was Dirac. Dirac did not interact with anybody. Eddington was also there, he was an astronomer. We did not count him as a physicist.

At the time I was there, Lawrence Bragg was in charge of the physics department. He succeeded Rutherford. Bragg said: "Rutherford was the best physicist in the world and I am not: so we should do something else". It was amazing wisdom. He made a quite astonishing decision, not to do physics

but to do two new subjects instead: molecular biology and radio astronomy.

Martin Ryle brought military radar equipment and started receiving signals from the sky. For radio-astronomy, English weather doesn't matter, whether it is cloudy or raining. He immediately made great discoveries. In the molecular biology group Max Perutz and John Kendrew became leaders. Both were enormously successful and Cambridge became the world leader in both the two subjects introduced by Bragg.

After two years at Cambridge, I worked for the Royal Air Force (1943-1945). It was a grim time of the war. I was a civilian scientist at the headquarters of RAF Bomber Command, collecting information about the strategic bombing of Germany. After the bombing of Germany stopped in April 1945, we still had a huge bomber force. I would have flown to Okinawa, in order to bomb Japan from there, but the war ended in August; so we did not need to bomb any more. It was a great relief. We did not need to kill more people. We were very grateful to the atomic bombs for ending the war. At that time everybody thought that

this was the cause of the Japanese surrender, and so we were told. I recently read the book by historian Hasegawa who claims that the real reason for the surrender of Japan was not the atomic bombs but the invasion of the Soviet army from the north. Japan could not defend against Russians from the north and Americans from the south. So the Japanese generals thought that it was better to surrender to Americans, while keeping Russians out, using the atomic bomb as an excuse for their dishonorable surrender. Now I agree with Hasegawa and wish that we had not dropped the bomb on Hiroshima. The bomb was not as important as we believed.

Fukugita: Cambridge is the great place for mathematical physics, with Newton, Maxwell and Dirac. You were following in their footsteps. Why is Cambridge so successful?

Dyson: The image is presented to school children that each country is good at one special thing: music in Germany, painting in France, and in England it is science. This provokes gifted young children in England to go to Cambridge and become scientists. The tendency was enhanced by the famous Tripos exams in Cambridge.

Fukugita: What did bring

you from mathematics to physics?

Dyson: We saw the news on the day when Hiroshima was bombed: it did not say 'Hiroshima was attacked', but said 'New force of nature harnessed'. It meant that new science had emerged. I did not want to use the bomb, but wanted to use knowledge that came out of the bomb. Nuclear physics became suddenly a fashionable subject, and it gave a motivation to learn physics. Quantum mechanics was still new and exciting. General relativity was also exciting. Many things were going on in physics. I then started to study Heitler's book, "The Quantum Theory of Radiation". Two years later there was a miracle, the experiment of Willis Lamb at Columbia University measuring the energy levels of hydrogen atoms.

I went back to Cambridge to study physics. Nicholas Kemmer was my teacher, from whom I learned quantum field theory. I wanted to go to the United States. Geoffrey Taylor, a great hydrodynamics expert who had worked at Los Alamos, immediately said that I should go to Cornell, where Hans Bethe and the young bright physicists from Los Alamos were all working. I had no idea about Cornell,

but I went to Cornell and worked under Bethe. When I came to Cornell in September 1947, I knew the Columbia experiment finding a 1050 megacycle shift between 2P and 2S states of hydrogen. The old quantum mechanics of Dirac was wrong. I knew that Bethe had beautifully explained it. It was exciting. It was exactly the right time and the right place for me to be. Richard Feynman was then a young professor at Cornell.

In early 1948 Oppenheimer received a batch of the new Japanese journal, *Progress of Theoretical Physics*. He copied it to Bethe and Bethe showed it to me. I found the Tomonaga paper, where Tomonaga had done everything before we did. We also knew the work of Hans Kramers which appeared a year earlier, as a paper to be presented at the 1948 Solvay Conference, explaining the idea of renormalisation.

I remember, when I visited Berkeley in 1948, I was impressed by the chemist Melvin Calvin. He used for the first time a short-lived carbon radio-isotope to understand photosynthesis, how carbon dioxide is absorbed and converted into sugar, by tracing the move of carbon atoms from molecule to molecule

in a few seconds. How chemistry was going on second by second. It was the first application of nuclear physics to biology, and since that time biology evolved fast with the use of radioactive tracers. Oppenheimer said that the application of nuclear physics to biology was more important than the bomb.

Fukugita: How was the Institute in Princeton at that time?

Dyson: When I came to Princeton, Einstein was there. I think it was a bad mistake for him to come to Princeton. When he came he had two choices, either Caltech or Princeton. He chose the latter since in Caltech he had to teach. In Princeton he did not need to teach, so he lost contact with students. As a professor in the old German style, he had an assistant who was his personal slave. In my time, Einstein's last assistant was Bruria Kaufman, who herself is a good physicist. Kaufman said to me that being Einstein's assistant looks very good on a resumé but in fact was a boring job. All she had to do was routine calculations.

There were many young fellows around Einstein, doing new science in the adjoining building. Einstein was never interested in what we were doing and

never spoke to us. He never came to seminars, never to lunch. So there was zero communication between him and the young members of the Institute. I think it was mainly his fault, although partly ours. We were young and arrogant, and we didn't think we had much to learn from him.

Fukugita: Have you ever talked to Einstein?

Dyson: No, never!

He loved children, and certainly got along very well with them.

Einstein's long-term secretary Helene Dukas was a good, able woman, and a fierce protector of Einstein's privacy and private affairs. We were friendly with her. After Einstein's death she often came to our house. My children adopted her as their substitute grandmother. One rainy night, a truck came to the Institute, and took away all the Einstein papers that she had collected and cared for. The papers were on their way to the Hebrew University in Jerusalem, as Einstein had directed in his will. A few days after this, Helene passed away.

Bohr often came to the Institute. He was completely different from Einstein. He was very much interested in new experiments. He came to our seminars, had lunch



with us, and talked to young people. He was then working as a diplomat, representing Denmark at the United Nations in New York, campaigning for international control of nuclear power and nuclear weapons. But he kept up his interest in new physics.

Tomonaga also came to Princeton. I liked him very much. Unfortunately, he arrived in the week I left Princeton. So I had only a short time to talk to him. He was an extremely unselfish person. He had done much of what Schwinger and Feynman did, five years earlier, but he never said so. Tomonaga felt guilty as he was not sharing the great hardships his students were suffering in Tokyo. He felt bad to be in the comfortable environment of Princeton, so he took an

early chance to go back to Japan.

Fukugita: How was Wolfgang Pauli?

Dyson: Pauli left the Institute before I came to Princeton. He was at the Institute all the time during the war. He was close to Einstein and enjoyed talking to him. He was, however, isolated and quite unhappy at the Institute. He settled in Switzerland after the war, and finally got citizenship, which had been refused when he lived in Switzerland before the war. He didn't come back to Princeton.

I got to know him in Switzerland in 1951. Pauli had a big psychological problem. Fortunately, it was one of the rare times when he was very happy, disobeying the order of doctors and his wife. We had a very good friendship.

He was in a relaxed state. We went out to walk every day and talked a lot about physics. We called at all the ice-cream places along the way, because his doctor had forbidden him to eat ice-cream. He understood all the results from on-going high energy physics, where cosmic ray experiments were the cutting edge at that time. I was working on the convergence of the perturbation expansion in quantum electrodynamics. Pauli maintained that it is divergent. I tried to convince him that the series converges, but he did not agree. After all, we know now that he was correct. I was not unhappy, as I could write a paper on the divergence of the series, thanking Pauli for his help.

Fukugita: And, Dirac?

Dyson: Dirac quite often came to Princeton. He changed his character, from a silent young man difficult to approach, to a talkative, friendly old man with a big sense of humor. Like Einstein, he stuck to theories of his own preference, the large number hypothesis which turned out not to work, and the negative metric field theory which I never understood. When he was old, he seemed to have lost his intuitive ability to guess what is right or wrong. He became more and more

a normal person. Much nonsense has been written about him. He was not an outstandingly strange man. He was an outstandingly intelligent man.

Fukugita: I think Heisenberg did not come to Princeton?

Dyson: Heisenberg did not visit the Institute, but he visited Einstein once. It is recorded in the diary of Johanna Fantova. She was an Austrian Jew, whose family had been acquainted with Einstein in 1912 while he was working at the German University in Prague. She became a friend of Einstein 20 years later in Berlin, organising his personal collection of books, sailing a boat with him on a lake, and 20 years later again in Princeton. In Princeton she took a course to qualify for a job as a librarian, following the advice of Einstein, and worked at the University Library. They sailed on Carnegie Lake. She kept a diary which was recently published. From this diary we can glimpse Einstein's life in Princeton. In it Heisenberg's and Bohr's visits to Einstein appear. Neither of them made a good impression. Heisenberg was still a big Nazi, dreaming of a greater Germany. Bohr would not stop talking until Einstein was totally exhausted.

Heisenberg, too, was devoted to his personal theory, spinor field theory,

in his late years. He required his assistant to work on that. The assistant that I knew was Hans-Peter Dürr. His career was ruined by this work. Heisenberg did not give up spinor field theory until his death.

Fukugita: Have you got any impressions of Japanese scientists, other than Tomonaga, who came to Princeton?

Dyson: Yukawa came to Princeton, but he was not doing physics. He came to Princeton as a politician, perhaps as a symbol of Japanese science. He worked for public relations or as a diplomat and made a public appearance at the United Nations. I saw him a few times but never talked to him about physics.

Taro Asano was a young mathematical physicist from Tokyo. I had invited him to the Institute. He had done a beautiful piece of work on quantum ferromagnets. He was isolated, he was shy, he had no friend to talk to, and did not speak much to colleagues. Possibly the language was a problem. Towards summer he got depressed and disappeared. After the term ended, he drove his car at a crazy speed up Springdale Road, crashed head-on with a heavy car and killed himself. I was very sorry for this. I escorted his wife, Sachiko, back to Japan, carrying his

ashes. This was incidentally my first landing in Japan, although I didn't go out from the airport.

Fukugita: This reminds me of the episode of Yutaka Taniyama, who was invited by André Weil to the Institute, but committed suicide before he came to the Institute, and his fiancée followed him.

Dyson: André Weil was the most friendly person. He would have cared for him if he had come to Princeton. When I visited Chicago as a young student, Weil took me out for a long walk of three hours, and talked about many things. He had a reputation for being fierce, but I never saw him fierce. Maybe he had two sides.

Fukugita: Was there any impact from the work of Yang and Mills?

Dyson: Yang did this work with Mills at Brookhaven in summer. At that time I was not working on particle physics, but on random matrices. I think that Yang's motivation was to make a gauge theory of isospin, rather than to make gauge theories a central feature of the universe. Pauli was at Princeton at the time. He was very negative because Yang's gauge field was massless. Pauli thought that it had nothing to do with nature and was not interesting. His opinion had a big effect on people including Yang himself.



Fukugita: How about contacts with legendary mathematicians, such as Hermann Weyl, Johann von Neumann, Carl Siegel?

Dyson: Shortly after I came to Princeton, Hermann Weyl and Carl Siegel left to Zürich and Germany, respectively. Siegel knew me, because I had strengthened his theorem about the approximation of algebraic numbers by rationals. Hermann Weyl somehow knew me too, and helped to get me hired as an Institute professor. Soon after I came to the Institute as a professor, they had already gone. So I had not much contact with these people. The only one I knew well was Johann von Neumann who stayed longer. He was enthusiastically working on the electronic computer project. I was

much interested in it, but the majority of people at the Institute were not. Oppenheimer was not interested in it. I was one of the few who tried to keep the project alive after von Neumann left.

The meteorologist Jule Charney came to Princeton and ran climate models with von Neumann's computer. When the computer project ended, Charney left. This was a great opportunity missed. The Institute could have been the centre of two new sciences, climate studies and computer science, in the same way that Cambridge became the centre of molecular biology and radio astronomy under the leadership of Bragg. I proposed that Charney be employed as a professor at the Institute, saving the

computer programme, but my efforts failed miserably. Oppenheimer did not show any interest.

The computer project went briefly to Princeton University before it was dropped a year or so after von Neumann left. Twenty years later, computer science was centred at MIT and IBM, and climate science was centred in UCLA and in Norway. I feel sorry for this. The dropping of the Institute computer project probably delayed the growth of the two new sciences by twenty years.

Fukugita: How about Oppenheimer?

Dyson: Robert Oppenheimer was a complicated character. With Hartland Snyder, he did his most important scientific work understanding black holes. They showed that every massive object, with zero internal pressure, will enter a state of permanent free fall, as a consequence of Einstein's equations. They predicted the existence of black holes in any universe obeying Einstein's equations. You don't need any new physics. Just Einstein's theory is good enough. It is a wonderful paper. This work appeared in the 1 September 1939 issue of *Physical Review*. The paper appeared at a bad time, on the day that Hitler invaded Poland and started World War II.

Nobody paid attention to it.

Einstein never believed in black holes. He not only didn't believe in them, but also wrote a paper claiming that black holes could not exist. Oppenheimer, too, never revisited this subject. He refused to talk about black holes, even after candidate black holes were discovered in the sky. I tried to talk about it with him and to explain to him why it is interesting, but he always changed the subject. I did not know why. The father and the grandfather of the black hole did not like their son.

I would mention two important people of genius that Oppenheimer failed to recognise. One is Fritz Zwicky, who had many wonderful new ideas. He was an astronomer who discovered dark matter and the two main types of supernova, and predicted neutron stars. He is now recognised, but had never been recognised while he was alive. Oppenheimer never spoke to him while both were at Caltech. Einstein visited Caltech, but he wasn't interested in him, and never spoke to him. I have never met Zwicky. The other is John Wheeler. He is also poorly recognised. Oppenheimer disliked him strongly. Unlike Zwicky, he was not a difficult person. He had a large number of

students and was very generous to them. He gave Feynman full credit for work on problems that he had suggested. He was an extreme patriot, very right wing, a 150% American, politically opposite to Oppenheimer. Wheeler was a big protagonist of black holes. This might possibly be the reason why Oppenheimer did not like to talk about black holes. Oppenheimer disliked talking to him. Both Zwicky and Wheeler deserve a better recognition.

Fukugita: What is the biggest surprise you experienced in your research life?

Dyson: The discovery of weak vector bosons. I had not taken the theory of Weinberg and Salam seriously, and I had a personal theory of weak interactions. So the discovery of the vector bosons was a surprise to me. The discovery was so beautiful that it made me happy to be proved wrong.

Fukugita: What do you think of the relation between mathematics and physics as a mathematical physicist?

Dyson: The real gap was between pure mathematics and applied mathematics. Pure mathematicians were talking a different language. Bourbaki was fashionable pure mathematics, and I was not very interested in it.

I remember a talk about "flabby sheaves". Somebody asked what are flabby sheaves. The chairman, André Weil, said "that is already a classical terminology and we do not need to explain it". I never understood what it was. I got to understand fibre bundles, but I have not gone beyond that. Pure mathematics had somehow become extremely abstract. It did not seem to me to be a fruitful way to go. I preferred to stay with applied mathematics.

There seems to be no barrier between string theory and mathematics. They understand each other. There is a big barrier between string theory and the rest of physics. A new trend is good contact between computer scientists and mathematicians. We now have two professors in the School of Mathematics working on computer science. One of them is Voevodsky. He is working on the mathematical logic of computability.

Fukugita: How do you think about the present status of physics? What do you want to encourage?

Dyson: Physics has slowed down. 60 years ago, experiments were done in 6 months and they were explained in 6 weeks. Now experiments take 20 years. Except for high energy

physics, there is still a lot to do. Small scale science is still flourishing. Particle physics is a special case. Even in particle physics, a small experiment, such as the measurement of the electric dipole moment of the electron by Gabrielse at Harvard, is an example on the frontier and has a chance to find something new.

Progress in astronomy is great. Twenty years ago, we knew only a tiny part of the Universe, only out to redshift 0.2. Now this horizon has been enormously extended. We can see and explore the Universe all the way back to the Big Bang. Astronomy can do a lot of important science with small instruments, both on the ground and in space. Kepler is a small satellite, but enormously successful. The BICEP2 microwave anisotropy experiment at the South Pole is not expensive and is equally successful. Politics focuses attention on big science, and big science also gets too much attention from the media. I want to encourage studies in as wide a field as possible. Especially in astronomy, there are so many things to explore. Zwicky emphasized the advantage of single-purpose instruments. Kepler is a beautiful example. We can still find others.

Fukugita: How about particle physics?

Dyson: I have a critical view of LHC. Every event is complicated with an enormous background of uninteresting particles. Software must be written specifically to pick out what is looked for. You can discover only what you expected. Every discovery is predictable. The LHC cannot make unexpected discoveries. The accelerator still uses radio-frequency acceleration, with the electric voltage per unit length the same as it was half a century earlier. Ordinary lasers have electric fields 1000 times higher. The use of laser fields for acceleration must be studied. Bigger accelerators using the same acceleration principle are not a good way to go.

There are several ways we can go for particle physics. Underground detectors have a good future. They can detect everything that happens. Two countries, Japan and Canada, with good scientists and not too much money, lead the world in the use of underground detectors. Their projects are more cost-effective than the projects in America and Europe, which invested a large amount of money in accelerators. Kamiokande is a very good experiment that has already brought

several important results. It is always ready to detect something unexpected. I strongly support this experiment and its upgrade. They may wait for a long time, but they have a good chance to discover something unexpected.

In general, experimentalists ought to be prepared for something unexpected to happen. This is also true for theorists. They should not stick to one thing, but should think about a variety of subjects. If they get bored with one subject, they should break out into other subjects. I have been doing it this way throughout my long research life.

String theory is beautiful. One day it may turn out to have something to do with nature. String theory is now close to mathematics, but the gap between string theory and the rest of physics is very wide. String theory does not have enough good problems for ten thousand people to work on. I am not worried about string theory in itself, but I am concerned with their narrow training of students. This makes them unemployable for jobs other than string theory. Changing people's careers every five years would help to solve this problem. Particle physics is not easy to escape from. Escape from other branches of science is easier.

I know some people who switched from string theory to genomics. 95% of genomes are not genes. We do not understand what these non-coding parts of genomes are doing. The discovery of Human Accelerated Regions of genomes, where significant changes are seen between chimps and humans, could motivate the start of a new science. We must be flexible and ready to move into new sciences as they emerge.

When I was young, I carried out hard calculations competitively. I was not concerned with philosophical questions. For me, philosophy was a branch of literature, not a branch of science. Science was a collection of tools that I used for solving problems. When I got older, I wrote books and articles for magazines, rather than doing competitive science. So my work has changed with age.



Climate? It takes much too long to explain. In short, I am skeptical about prevailing anxieties about climate. Oak Ridge National Laboratory had a very good climate programme, started 50 years ago, before it became fashionable. The director was Alvin Weinberg. He insisted that we must understand the real world. I worked with him for some years. There were a lot of biologists, who were concerned with soils, trees, vegetation, microbes and all kinds of ecology. In addition there were physicists who wanted to understand climate. So, it was a well balanced programme.

For carbon dioxide in the atmosphere, half of the effects are concerned with climate and half with ecology. Carbon dioxide is a powerful fertiliser. It can be a substitute for water. The limitation is that it is only a small fraction of the air, while the fraction of water vapour is usually larger. Suppose we open a pore in a leaf and get one carbon dioxide molecule to go in through the pore. While the pore is open, about 100 water molecules come out. So the leaf is evaporating water much faster than

it is absorbing carbon dioxide. If more carbon dioxide is in the air, the process is more efficient and evaporates less water, encouraging plant growth. The effect of carbon dioxide is substantial for biology. There is a 30% increase of CO₂ in the atmosphere compared with the amount a hundred years ago, and it caused an increase in vegetation, wild forest and also food crops roughly half as great, namely 15% increase of biomass due to 30% increase of CO₂. This is not well known to the public.

For climate, carbon dioxide is the easy part of the problem. There is a huge complicated feedback and recycling of carbon dioxide, but it can be measured and is fairly well understood. Water vapour is much more difficult. It is more abundant and the greenhouse effect is larger. Evaporation of carbon dioxide from the ocean is a minor effect. Evaporation of water from the ocean is much larger and dominates the effect of CO₂. Water vapour is strongly absorbing, but also has a tendency to condense into clouds. This is why the problem is difficult. Vegetation is also a huge source of water vapour, and so is coupled to the circulation of water. Evaporation of water is crucial to the final effect. That is why it is so hard to calculate. If you only have to deal with carbon dioxide, the problem is

simple.

Carbon dioxide causes warming of the climate. This is a serious concern. Unfortunately, the United Nations set up the committee IPCC for studying climate. They have written into the definition of the programme that they should look at effects of human activity on the climate, but are not supposed to look at non-human effects. The programme is highly biased from the beginning, and this is what I am fighting against: I am not simply opposing what they are doing. The scientists working for the United Nations are allowed only to look at human causes of climate change.

Climate is a difficult problem. Particularly, clouds are crucial but poorly treated. The resolution is poor in simulations. One takes averages over 100 km in global climate models, while actual clouds require a resolution of at most 1 km vertically and 10 km horizontally. What the models do is not to model clouds but to represent average cloudiness in a region by fudge factors. The present state of understanding of climate is poor. I don't trust the models.

I also mention that there was the little ice age in the 17th century, when the sun went to sleep for 70 years. The world suffered from a cold climate. There is a strong correlation between the

sun and the climate. This is totally absent in the climate models. The sun was active for the last 50 years, and less active in the last 5 years. Strong global warming lasted for 50 years, but seems to have stopped for the last ten years. This is a clear observational hint, but it is not included in the climate models.

The world average temperature is a misleading concept. It is unclear what it means. The most intense warming happens in very cold places, mostly at high latitudes. There are a lot of unknowns in the model.

It is also not clear if local warming is bad. In some arctic areas, local people are happy with the warming. They had a very hard life in the past, relying on fishing in a horrible climate. Warming has made their life easier. There are always winners and losers when the climate changes.

I am skeptical whether models give good pictures of reality. The real world is much more complicated. My conclusion is that I do not believe the official predictions of climate for the next 100 years. The models are good tools for understanding climate but bad tools for predicting climate. They are good for understanding because they allow us to see the effect of changing one factor at a time. They are bad for predicting because they leave out a large number of factors that might be important.

Kavli IPMU-FMSP Workshop “Supersymmetry in Physics and Mathematics”

Toshitake Kohno

Kavli IPMU Principal Investigator

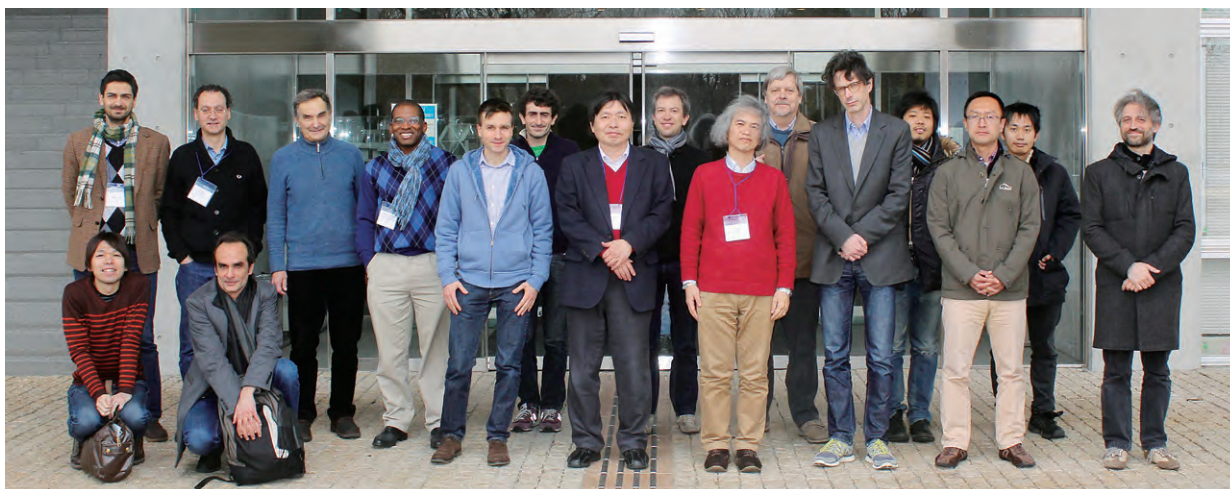
Supersymmetry is originally a notion in particle physics describing the symmetry between two basic classes of elementary particles: bosons, which have an integer valued spin; and fermions, which have a half integer valued spin. Supersymmetry is a recurring theme in theoretical physics to find a unified description of the fields and forces of nature. On the other hand, supersymmetry is an interesting structure also from the purely mathematical viewpoint, for example, as a natural and rich generalization of classical algebraic structures such as Lie algebras, or as realizations via special types of spinor fields on Riemannian or pseudo-Riemannian manifolds. The last theme is also intimately connected with classical and quantum field theories on curved spacetime with supersymmetry, which have recently attracted interest among both physicists and mathematicians.

The purpose of the workshop was to promote interaction between physicists and mathematicians in various aspects of supersymmetry. Among

participants, there were theoretical physicists and mathematicians of various disciplines including the theory of operator algebras, representation theory and geometry. The workshop took place for 9 days from March 10–20, 2014, at the Kavli IPMU’s Lecture Hall. There were in principle three talks per day, and we had a lot of time to discuss among physicists and mathematicians.

Main subjects discussed in the workshop were generalizations of Lie algebras and their representations, non-commutative geometry, cyclic cohomology, supersymmetric generalization of vertex operators, twistor spinors, conformal analogs of Calabi-Yau manifolds, etc.

The organizers of the workshop were Yasuyuki Kawahigashi, Toshitake Kohno, and Stefan Hollands. The workshop was supported by Kavli IPMU and “Frontiers of Mathematical Sciences and Physics” (FMSP), which is a part of the Program of Leading Graduate Schools, MEXT Japan.



Peter Goddard Symposium

Hiroshi Ooguri

Kavli IPMU Principal Investigator

Professor Peter Goddard is a distinguished mathematical physicist. He formulated the quantization of the relativistic string, proved the “no ghost theorem” of string theory, proposed the electromagnetic duality in non-abelian gauge theory, and provided remarkable evidences for it, introduced and studied a class of conformal field theory, which has become the foundation of our understanding of gauge symmetry in string theory. His seminal achievements in these areas provide important examples for researchers at the Kavli IPMU, who try to open new avenues of research at the interface between mathematics and physics.

Professor Goddard has also contributed in creating and maintaining environments for researchers. He played a leading role in establishing the Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences at Cambridge University, where he was the Deputy Director. He was the Master of St. John's College, before becoming the eighth Director of the Institute for Advanced Study in Princeton. He stepped down from the position in 2012 and is currently a professor at the Institute.

Professor Goddard received the Dirac Prize and Medal from the International Center for Theoretical Physics in Trieste and is a Fellow of the Royal Society of London and a Commander of the Order of the British Empire.

Peter Goddard (left) and Hitoshi Murayama (right) talking at the Symposium.

Professor Goddard visited the Kavli IPMU in March and April, 2014. On this occasion, we organized a one-day symposium to celebrate his contribution in science. Some of the faculty members and affiliated members of the Kavli IPMU, who were visitors of the Newton Institute and members of the Institute for Advanced Study under his leadership, spoke at the symposium.

The Symposium opened with a talk by Hitoshi Murayama, the Director of the Kavli IPMU, on his recent work on geometry of non-relativistic Goldstone bosons. This work generalizes Nambu's work on spontaneous symmetry breaking in nontrivial ways.

Tohru Eguchi of Rikkyo University spoke on the Mathieu Moonshine, a joint work with Hiroshi Ooguri and Yuji Tachikawa of the Kavli IPMU. This work originated from the work of Eguchi and Ooguri, 25 years ago, with Anne Taormina and Sung-Kil Yang. 21 years after this original work, a chance encounter of Eguchi with Ooguri and Tachikawa in 2010 led to a discovery

of the remarkable connection between K3 geometry and the largest Mathieu group M24.

Kentaro Hori of the Kavli IPMU also talked about his PhD thesis published 20 years ago, which turned out to have significant implications of current theoretical research. Yuji Tachikawa talked about instantons and string theory and Simeon Hellerman on string theory of the Regge intercept. The Symposium ended with a talk by Peter Goddard himself on the formula of Cachazo, He, and Yuan for Yang-Mills tree amplitudes.

The speakers chose their topics to fit with the range of research activities of Peter Goddard, and there were lively discussions during coffee breaks and lunch. On the day after the symposium, the Kavli IPMU recorded a conversation of Peter Goddard with Hitoshi Murayama and Hiroshi Ooguri on research at the interface of physics and mathematics. Its transcript appears in two parts (Part I, pp. 14-21 in this issue, and Part II in the next issue) of the Kavli IPMU News.



Workshop on “Floer and Novikov Homology, Contact Topology and Related Topics”

Andrei V. Pajitnov

Professor at the Department of Mathematics, the University of Nantes
and Kavli IPMU Senior Visiting Scientist

This International Workshop was held at the Kavli IPMU from April 21 to April 24, 2014. The aim of the meeting was to bring together the experts from different domains of geometry and topology related to the Floer and Novikov homology and the contact topology. There were 13 speakers and about 50 participants in total.

An application of the classical algebro-topological tools to the contact topology (namely to the growth of the number of Reeb chords in the cotangent bundles) was the subject of the talk by Urs Frauenfelder (joint with F. Schlenk), which opened the Workshop.

The Floer theory was the subject of the talk of Mihai Damian, who spoke about lifted Floer cohomology, which is a variant of Lagrangian Floer cohomology and its application to topology of monotone Lagrangian submanifolds. His methods allow in particular to show that nontrivial connected sums of manifolds of odd dimensions do not admit monotone embeddings to the complex affine space.

Kei Irie gave an estimate of Hofer-Zehnder capacity using symplectic homology, product structures, and Chas-Sullivan loop product.

A generalization of the Morse-Novikov theory to the case of ANR

spaces and continuous maps was discussed in the talk of Dan Burghela. He suggested new topological invariants related to such maps, and computer-friendly tools to calculate these invariants. F. Manjarrez-Gutierrez spoke about the Morse-Novikov number for a -small knots. A conjecture, due to M. Boileau and C. Weber, says that the Morse-Novikov number for knots is additive, similarly to the knot genus. F. Manjarrez-Gutierrez confirmed this conjecture for the class of a -small knots.

Classical Morse theory was discussed in the talk of Manabu Akaho, who presented his construction of a Morse complex for Morse functions on manifolds with boundary. Tadayuki Watanabe spoke about relations of the Morse theory to Chern-Simons perturbation theory.

The talk of Yasha Saveliev was dedicated to the global Fukaya category and its applications to Hofer geometry.

Several talks were dedicated to the contact topology. River Chiang

presented some examples of higher dimensional non-fillable contact manifolds. Tetsuya Ito's lecture was about open book foliations. Otto van Koert spoke about fractional twists in contact topology.

S. Sandon spoke about the positive loops of contactomorphisms. She explained how non-squeezing property for contact manifolds holds or fails, and how the group of contactomorphisms admits or does not admit orderability.

The conclusive talk of the Workshop was delivered by Vincent Colin. His joint work in progress with Ko Honda is related to both the contact topology and the Floer homology. He presented a construction of a hat version of Heegaard Floer homology for contact manifolds of arbitrary odd dimension.

The Workshop was a highly successful event that enabled experts in symplectic and contact topology from all over the world to present their results and communicate with each other.



Toshiyuki Kobayashi Awarded the Medal with Purple Ribbon

On April 28, 2014, the Japanese government announced this spring's recipients of the Medal of Honor.



Toshiyuki Kobayashi

Toshiyuki Kobayashi, Professor at the Graduate School of Mathematical Sciences, the University of Tokyo, and Principal Investigator at the Kavli IPMU, was selected as a recipient of the Medal with Purple Ribbon in the field of mathematics. The Medal with Purple Ribbon is awarded to people who have made outstanding contributions in academic fields, the arts, and sports.

Professor Kobayashi's research is magnificent in scope, ranging from algebra to geometry and analysis, with a key word of "symmetry," and his achievements are influential in the whole area of mathematics. In particular, the following achievements received high recognition internationally and realized essential breakthroughs in mathematics: (1) Pioneering the theory of "discontinuous groups for homogeneous spaces beyond Riemannian geometry"; (2) Substantial breakthrough in the theory of "branching laws of infinite-dimensional representations,"

particularly, creating the theory of "discretely decomposable restrictions"; (3) Pioneering work on the "global analysis arising from minimal representations"; (4) Original theory of "visible action on complex manifolds" towards a unified theory of multiplicity-free representations.

Hiroshi Ooguri Appointed as the Founding Director of the Burke Institute

On May 14, 2014, the California Institute of Technology announced the establishment of the Walter Burke Institute for Theoretical Physics (Burke Institute) with Hiroshi Ooguri as its Founding Director. Ooguri has been Principal Investigator at the Kavli IPMU since October, 2007. The Burke Institute has been established with a \$75 million endowment, gifted by the Sherman Fairchild Foundation, where Walter Burke served for 35 years as president, and by other funders, aiming to promote research, and to nurture the next generation, in theoretical physics.

7th Meeting of the Kavli IPMU External Advisory Committee

On June 30, 2014, the seventh meeting of the Kavli IPMU External Advisory Committee was held with the attendance of all the committee members. This time, with the



Committee members: far side, from left to right, Nigel Smith (SNOLAB), Steve Kahn (Chair, Stanford Univ./SLAC), John Ellis (King's College London), Young-Kee Kim (Chicago Univ.), Sadanoti Okamura (Hosei Univ.), David Morrison (UC Santa Barbara), and Sadayoshi Kojima (Tokyo Tech)

submission deadline approaching about a half month ahead of the proposal for a five-year extension of the WPI funding after the initial ten years of support, the Committee gave many valuable suggestions for the content of the proposal and related issues.

Kavli IPMU Established an Endowed Research Unit

On April 1, 2014, the Kavli IPMU, Todai Institutes for Advanced Study, the University of Tokyo, and Hamamatsu Photonics K.K. established the Endowed Research Unit: Dark side of the Universe. This is the first endowed research unit for the field of fundamental science, such as elementary particle physics and cosmology, in the University of Tokyo.

Kavli IPMU Professor Ken'ichi Nomoto, who is famous internationally for his achievements in the research of supernovae and is a recipient of a Japan Academy award, assumed the post of Hamamatsu Professor in the unit. He leads diverse research projects related to dark energy, dark matter, and supernovae.

Quimby's Team Found a Lens Galaxy Magnifying a Type Ia Supernova

A supernova is a tremendously luminous object caused by a stellar explosion. Among various types of supernovae, those classified as type Ia (SNIa) have strikingly similar peak luminosities, and this property allows astronomers to use SNIa as standard candles to measure cosmological distance. However, PS1-10afx, a supernova observed at a distance of about 9 billion light years from the Earth was much more luminous than the normal SNIa, though it showed other properties almost identical

to those of SNIa. So, this was a big puzzle.

Last year, as reported in the June 2013 issue of the *Kavli IPMU News* (see No. 22, page 33), a team of researchers at the Kavli IPMU including Robert Quimby and Marcus Werner published the argument that PS1-10afx is a type Ia supernova 30 times magnified by a strong gravitational lens effect due to a massive galaxy (lens galaxy) existing in front of the PS1-10afx; the lens galaxy warps space-time to form magnified images of the supernova.

A question remained as where the lens galaxy is located, however, because, observed from the Earth, the lens galaxy overlaps with the host galaxy wherein the supernova appeared; the existing data do not allow us to separate the signal of the foreground lens galaxy from that of the host galaxy.

In September 2013, when the PS1-10afx sufficiently faded away, Quimby's team successfully extracted the light signal of the foreground galaxy in the glare of the relatively bright host galaxy, using the Low-Resolution Imaging Spectrograph on the Keck-I telescope located in Hawaii. This result confirmed the existence of the lens galaxy, which causes the lensing, between the host galaxy and us. The team reported this result in *Science*, a famous academic journal published by the American Association for the Advancement of Science (AAAS), on April 25, 2014. At



Press conference at the Sanjo Conference Hall

the same time, Quimby's team held a press conference at the University of Tokyo's Sanjo Conference Hall on the Hongo campus. The AAAS/Science side moderated the conference. The news was covered widely in the media internationally.

Freeman Dyson Visited Kavli IPMU

On April 15-19, 2014, Freeman Dyson visited the Kavli IPMU. He is a Professor Emeritus of the Institute for Advanced Study, famous for his outstanding achievements in various scientific fields, in particular, quantum electrodynamics. He is just over 90 years of age, and he is still actively engaged in science. Then, he visited the Kamioka Observatory of the Institute for Cosmic Ray Research / the Kamioka Branch of the Kavli IPMU on April 21-22, and in particular, Super-Kamiokande and other underground experiments.

In this issue of the *Kavli IPMU News*, you can find an interview (including a summary of the Q&A session) with him by Kavli IPMU Professor Masataka Fukugita, see pp. 22 - 30.



Freeman Dyson giving a lecture

10th ICRR-Kavli IPMU Joint Public Lecture "Decoding the Mystery of the Universe"

On April 12, 2014, the 10th ICRR (Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo)-Kavli IPMU joint public lecture, entitled "Decoding the Mystery of the Universe," was held at Amuser Kashiwa, which is located

near the JR Kashiwa station.

The first lecture was given by Toshitake Kohno, Professor at the Graduate School of Mathematical Sciences, the University of Tokyo and Kavli IPMU Principal Investigator, on "The Shape of the Universe ~ Mathematical Challenges." He talked about proposing models of the "shape of the Universe," which are in agreement with the observational data, using mathematics. Next, Vice-Director of ICRR, Professor Toshio Terasawa, gave a talk entitled "Shocking Universe ~ Universe Is Full of Shock Waves." He talked about the roles which strong shock waves, produced by explosive phenomena in the Universe, such as solar flares, supernovae, gamma-ray bursts, etc., play in the Universe.



Toshitake Kohno giving a lecture

Evening of Art and Live Music in Piazza Fujiwara

On April 25, two social groups of Kavli IPMU researchers and staff, the IPMU Chamber Orchestra and the Arts Society for the first time cohosted the *IPMUSIC+arts night*. On the 3rd floor of the Kavli IPMU Building, in front of the wall of the Piazza Fujiwara, on which 35 pictures contributed from Kavli IPMU researchers and staff with the theme, "Repetition, Scale, Duration" were exhibited, as many as 10 programs of musical performance, including the IPMU Chamber Orchestra's performance, and piano

solo, *koto* (traditional Japanese stringed musical instrument), *karaoke*, and singing and playing guitar, were presented by researchers and staff for 3 hours including a break. In Piazza Fujiwara, a great many researchers, staff, and their families and friends gathered, and they enjoyed the *IPMUSIC+arts night*, with wine and snacks contributed by Administrative Director Haruyama and others. There were many vivid conversations among the participants, irrespective of their positions, nationalities, and research fields, on, for instance, art, and music skills that are unexpected from their everyday life.



IPMUSIC+arts night in Piazza Fujiwara

Kavli IPMU Seminars

1. "Naturalness, Conformal Symmetry and Duality"
Speaker: Yoshiharu Kawamura (Shinshu U)
Date: Nov 06, 2013
2. "The SIMP Miracle"
Speaker: Jacob Wacker (SLAC)
Date: Apr 01, 2014
3. "A working Verlinde Formula for logarithmic CFT"
Speaker: Simon Wood (Australian National U)
Date: Apr 01, 2014
4. "The Search For New Physics in the LHC Age: Implications of the LHC and the Prospects for the Future"
Speaker: Jacob Wacker (SLAC)
Date: Apr 01, 2014
5. "Higher-order QCD effects in Higgs boson production"
Speaker: Bryan Webber (U Cambridge)
Date: Apr 02, 2014
6. "Interdisciplinarity and the interplay between mathematics and physics"
Speaker: Peter Goddard (IAS)
Date: Apr 02, 2014
7. "The Dark Side of Galaxy Evolution"
Speaker: Andrew Hearin (Fermilab)
Date: Apr 03, 2014
8. "Response theory of relativistic quantum Hall: A new topological current"
Speaker: Matthew Roberts (U Chicago)
Date: Apr 08, 2014
9. "Formulation of effective theories for dark matter direct detection"
Speaker: Natsumi Nagata (Kavli IPMU)
Date: Apr 09, 2014
10. "3D Mapping of the IGM on ~Mpc scales with Ly- α forest Tomography"
Speaker: Khee-Gan Lee (MPIA)
Date: Apr 10, 2014
11. Stability conditions for an N -Calabi-Yau algebra of the A_n -quiver"
Speaker: Akishi Ikeda (U Tokyo)
Date: Apr 14, 2014
12. "BICEP2 results, implications, and future"
Speaker: Chao-Lin Kuo (Stanford U/SLAC)
Date: Apr 14, 2014
13. "Cylinders in smooth del Pezzo surfaces"
Speaker: Jihun Park (Postech)
Date: Apr 15, 2014
14. "S-duality of nonsupersymmetric gauge theories"
Speaker: Anson Hook (IAS)
Date: Apr 15, 2014
15. "Decay of charged Higgs bosons into charm and bottom quarks in multi-Higgs doublet models"
Speaker: Andrew Gerard Akeroyd (U Southampton)
Date: Apr 16, 2014
16. "Can a Single Graviton be Observed?"
Speaker: Freeman Dyson (IAS)
Date: Apr 16, 2014
17. "Cylinders in singular del Pezzo surfaces"
Speaker: Ivan Cheltsov (U Edinburgh)
Date: Apr 17, 2014
18. "Q&A with Freeman Dyson"
Speaker: Freeman Dyson (IAS)
Date: Apr 17, 2014
19. "Seiberg-Witten invariants of smooth 4-manifolds"
Speaker: Tirasan Khandhawit (Kavli IPMU)
Date: Apr 17, 2014
20. "Recent advances in dS/CFT"
Speaker: Edgar Shaghoulian (Stanford U)
Date: Apr 22, 2014
21. "Cosmology with clusters, voids and their profiles"
Speaker: Ravi Sheth (ICTP)
Date: Apr 24, 2014
22. "Alpha-prime adventures"
Speaker: Ruben Minasian (CEA Saclay)
Date: Apr 24, 2014
23. "Some recent results on massive gravity"
Speaker: Cedric Deffayet (IAP)
Date: Apr 25, 2014
24. "Warped entanglement entropy"
Speaker: Edgar Shaghoulian (Stanford U.)
Date: Apr 28, 2014
25. "Multicomponent scenario of WIMP dark matter in the radiative seesaw models"
Speaker: Hiroshi Takano (Kavli IPMU)

- Date: Apr 30, 2014
26. "Complementarity of weak lensing, galaxy clustering and CMB data: constraints on neutrinos, dark energy and gravity"
Speaker: Roland de Putter (JPL)
Date: May 01, 2014
 27. "Precision of Standard Model parameters and Higgs properties"
Speaker: Bryan Webber (U Cambridge)
Date: May 07, 2014
 28. "Improved distance measurements with reconstructed WiggleZ"
Speaker: Eyal Kazin (Swinburne U of Technology)
Date: May 08, 2014
 29. "Homological mirror symmetry for the genus 2 curve"
Speaker: Daniel Pomerleano (Kavli IPMU)
Date: May 08, 2014
 30. "General instanton counting and 5d/6d SCFT"
Speaker: Seok Kim (Seoul National U)
Date: May 13, 2014
 31. "Relative BPS state counts for toric Del Pezzo surfaces and log mirror symmetry"
Speaker: Michel van Garrel (KIAS)
Date: May 14, 2014
 32. "Simulations of SNe Ib/c Shock Breakouts using multigroup radiation hydrodynamics"
Speaker: Alexey Tolstov (Kavli IPMU)
Date: May 15, 2014
 33. "Effective Temperature of Non-equilibrium Steady States in AdS/CFT"
Speaker: Shin Nakamura (Chuo U)
Date: May 20, 2014
 34. "Evolution of dust size distribution and extinction curves in galaxies"
Speaker: Takaya Nozawa (NAOJ)
Date: May 21, 2014
 35. "Known and unknown Zeldovich: simplest paths to complexity
- from flames to Large Scale Structure"
Speaker: Sergei Blinnikov (ITEP)
Date: May 22, 2014
 36. "On equivariant Pieri rule of isotropic Grassmannians"
Speaker: Changzheng Li (Kavli IPMU)
Date: May 22, 2014
 37. "Muon and neutral hadron detection in high energy physics"
Speaker: Eiichi Nakano (Osaka City U)
Date: May 28, 2014
 38. "Unusually Bright Supernovae"
Speaker: Robert Quimby (Kavli IPMU)
Date: May 29, 2014
 39. "Statistical properties of deterministic systems by elementary means"
Speaker: Boris Hasselblatt (Tufts U)
Date: Jun 03, 2014
 40. "Axion cosmology with high scale inflation"
Speaker: Kazunori Nakayama (U Tokyo)
Date: Jun 04, 2014
 41. "Counting curves in terms of modular forms"
Speaker: Jie Zhou (Harvard U)
Date: Jun 04, 2014
 42. "On some strange dynamical systems in the real plane"
Speaker: Sergei Duzhin (Steklov Inst of Mathematics)
Date: Jun 05, 2014
 43. "CMB B-mode polarization experiments: Recent results from POLARBEAR (and BICEP2)"
Speaker: Haruki Nishino (Kavli IPMU)
Date: Jun 05, 2014
 44. "Trees and an Affine Cover of $\bar{\mathcal{M}}_{0,n+1}$ "
Speaker: Charles Siegel (Kavli IPMU)
Date: Jun 05, 2014

45. "Flag Varieties and Quantum Cohomology, H. Schubert, A. Grothendieck and C. Dunkl"
Speaker: Anatol Kirillov (RIMS & Kavli IPMU)
Date: Jun 09, 2014

Personnel Changes

Reappointment

Exploiting a joint-appointment system that had been approved in the University of Tokyo in FY2012, Naoki



Naoki Yoshida

Yoshida, Professor at the Department of Physics, School of Science was reappointed as a Kavli IPMU Professor on April 1, 2014, with 40% of his time allocated for working at the Kavli IPMU. Previously, he was a Kavli IPMU Associate Professor from September 1, 2008 to March 31, 2012. Professor Yoshida speaks of his aspiration, "I am very excited about this new opportunity at Kavli IPMU. I've been working on numerical cosmology, especially on structure formation in the Universe. At Kavli IPMU, I'd like to make the best use of data from the Subaru HSC survey to study the nature of dark matter and distant supernovae."

Moving Out

Kavli IPMU postdoctoral fellow Atsushi Nishizawa has taken a position as a Lecturer at the Institute for Advanced Research of Nagoya University. He was at Kavli IPMU from September 1, 2010 to April 30, 2014.

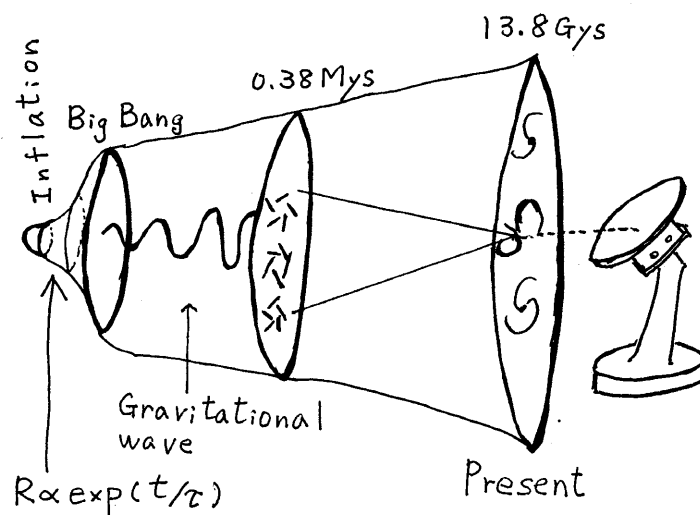
Also, Kavli IPMU postdoctoral fellow Malte Schramm resigned the Kavli IPMU at the expiration of his term, from May 1, 2011 to April 30, 2014 and from May 16 to June 30, 2014.

Cosmic Inflation and Primordial Gravitational Waves

Katsuhiko Sato

President of the National Institutes of Natural Sciences,
and Kavli IPMU Visiting Senior Scientist

BICEP2 is a radio telescope located at the South Pole. On March 17, 2014, the BICEP2 collaboration announced the indirect detection of primordial gravitational waves by measuring the polarization of the cosmic microwave background (CMB). The world's press reported that the *inflation theory*, the Big Bang paradigm for the origin of the Universe, has been confirmed by this discovery. The inflation theory predicts the exponential expansion of tiny quantum space-time, which turned the Universe into a fire ball with tremendous heat created when the rapid expansion stopped, and the production of density fluctuations, which later grew into galaxies or groups of galaxies, as a result of tremendous expansion of quantum fluctuations in the exponential expansion era, and so on. NASA's CMB satellites, COBE and WMAP, unveiled the picture of the Universe only 380,000 years after its birth, and found the density fluctuations predicted by the inflation theory; this result supported the inflation theory. On the other hand, quantum fluctuations not only produce matter-energy density fluctuations, but they also produce space-time fluctuations, i.e., gravitational waves, at the same time. These gravitational waves produce a twisting pattern of the CMB polarization, called the B-mode. If it is really observed, the inflation theory will be further strengthened. However, the effect of interstellar dust in our Galaxy could produce a similar pattern, and criticisms have been raised that the BICEP2 estimation of this effect is underestimated. In October this year, ESA's CMB satellite Planck will announce the results of polarization measurements. Also, a number of groups including POLARBEAR, in which Hazumi from KEK and collaborators are working, are measuring the CMB polarization at the South Pole, the Atacama Desert in Chile, and other such locations. We are looking forward to seeing the results from these measurements.



近況

Kavli IPMU 機構長
村山 斉 むらやま・ひとし



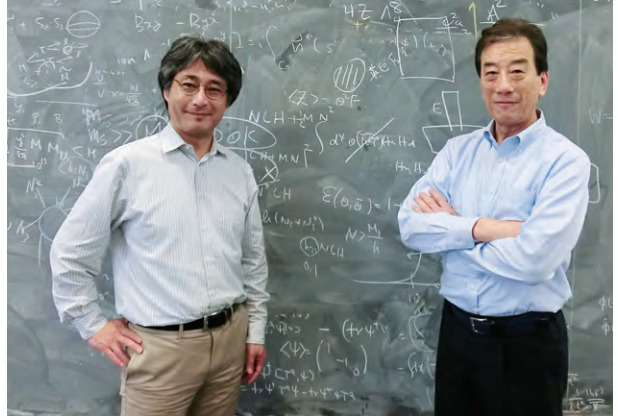
4月1日：鈴木洋一郎副機構長の Kavli IPMU 特任教授着任に際し辞令交付



4月1日：Peter Goddard(右)、大栗博司(左)両氏との鼎談



4月16日：Freeman Dyson (中央)、福来正孝(左)両氏と

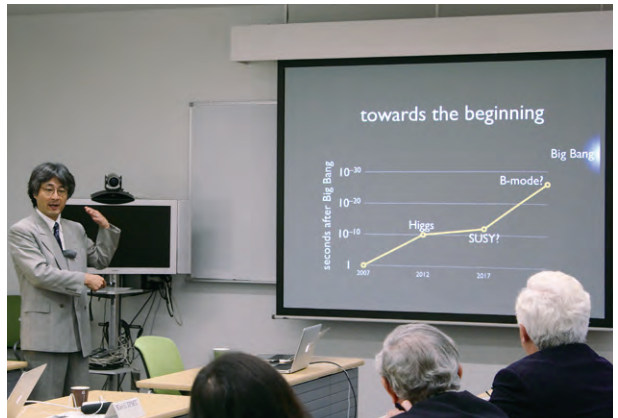


5月26日：来訪した黒川 清政策研究大学院大学アカデミックフェローと

Director's
Corner



6月21日：駒場で学生に柏キャンパスの紹介



6月30日：第7回 Kavli IPMU 外部諮問委員会

宇宙論と統計

1. はじめに

現在の観測的宇宙論は、非常にエキサイティングな研究分野です。宇宙背景放射（CMB）の宇宙論に代表されるように、高精度の測定結果から、ダークマター、ダークエネルギーの存在量、宇宙年齢など、人類の根源的な疑問に答えることに成功しています。21世紀の観測的宇宙論は、もはや理論と実験の垣根がない、言わば実証的科学とも言える分野に成長しています。

過去のIPMUニュースの記事でも、観測的宇宙論の進展を扱ったものがありますので、今回は少し変わった話をしたいと思います。それは宇宙論における統計的側面についてです。宇宙論の理論や解析には、統計的概念が多く取り入れられています。宇宙論の観測データは、一見複雑です。例えば、CMBの場合には、空の各方向からやってくるCMB光子の黒体輻射の温度が基本観測量になります。¹ 銀河サーベイの場合は、多数の銀河の空間分布が基本観測量です。これら宇宙論データをどのようにして定量化し、理論モデルと比較できるのでしょうか？ この宇宙論解析で用いられる作業過程、またその前提になっている仮定、さらにはその限界は何でしょうか？ これらの疑問を解説することが今回の記事の主題です。ここで解説すること以外にも、宇宙論と統計の境界領域の進展は近年目覚ましいものがあります。この記事で触れるテーマは、そのごく一部であることに注意して、話を進めたいと思います。

2. 宇宙原理、エルゴード仮定と 2 点相関関数

まず、議論のために、 $F(\theta)$ を宇宙論データから得られる「ゆらぎ場」としましょう。例えば、CMBの場合には、温度ゆらぎ場に対応し、 $F(\theta) = [T(\theta) - \bar{T}] / \bar{T}$ です。ここで $T(\theta)$ は空の θ 方向のCMB温度、 \bar{T} はCMBの平均温度（全天平均した温度）です（図1の左上図参照）。3次元空間のゆらぎ場についても同様に定義できますが、とりあえずは2次元の場合を考えましょう。² 実際の観測では、ゆらぎ場 $F(\theta)$ は有限の角度分解能で測定されますので、 $F(\theta)$ は離散的なピクセル形式で与えられているとします。最新のCMB衛星Planckでは、約5分角³の角度分解能で、約40,000平方度の全天をサーベイしましたので、CMB温度ゆらぎ場は約500万ピクセルのデータで与えられ、膨大なデータ量になります。

しかし、宇宙論の理論モデルは観測した $F(\theta)$ 場を忠実に再現することはできません。より正確に言えば、再現するモデルを構築するためには、データの自由度に匹敵するパラメータを導入する必要があり、見返りの小さい、無駄な努力を払うことになります。そこで、宇宙論の解析では、**宇宙原理**を仮定するのが通常です。

- 宇宙は統計平均的な意味で一様かつ等方である

¹ 今回の記事では、主に宇宙論のゆらぎ場に注目します。

² 以下の議論では、空間の次元数は本質的ではありませんので、3次元の場合についても同様の結論が得られます。

³ 1分角は1度角の1/60の大きさ。

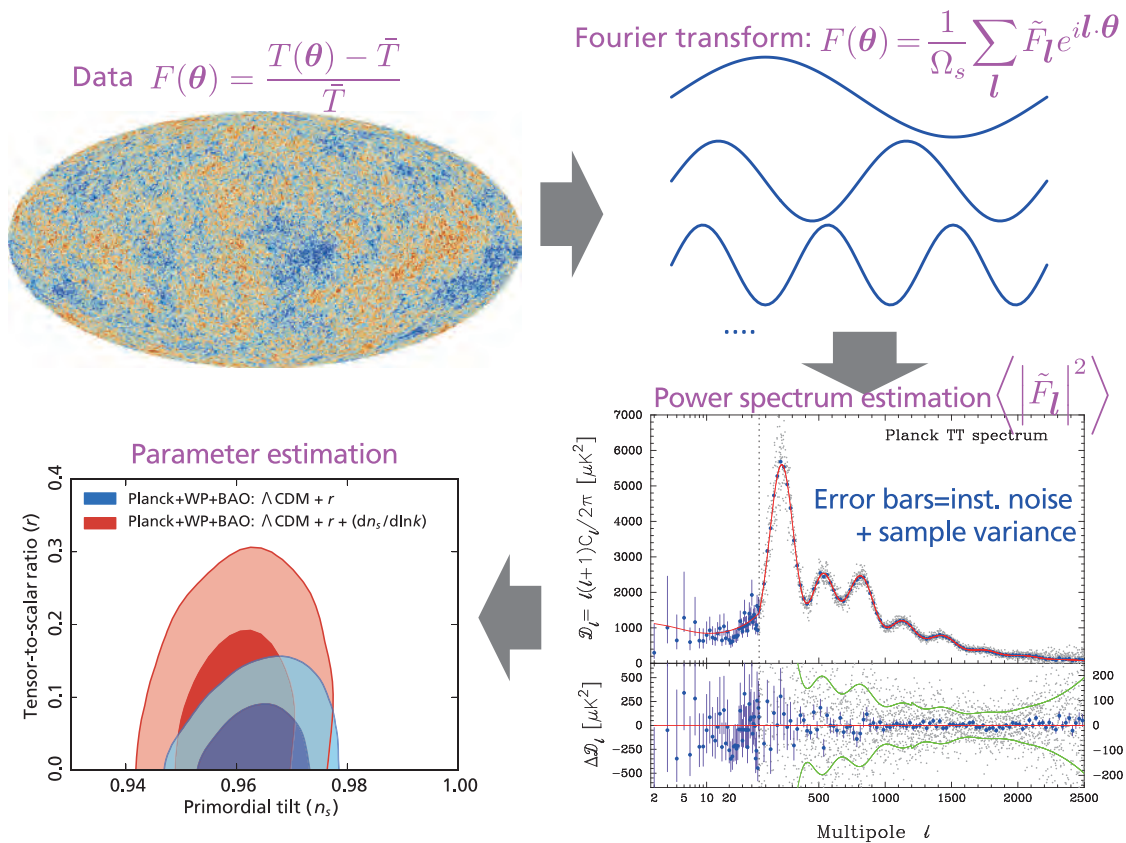


図1 宇宙論解析の流れ (2次元データのCMBの例)。宇宙論ゆらぎ場 $F(\theta)$ の測定 (左上図)。ゆらぎ場のフーリエ波数分解 (右上図)。右下図は、パワースペクトル推定の結果。灰色点は各波数ビンでの測定値。エラーバーを伴う青点は、複数の波数ビンで測定値を平均した結果。エラーバーとして、有限数のフーリエモードしか測定できないという事実から生じる標本分散および検出器などに付随するエラーが考慮されている。実線はベストフィットの Λ CDMモデルの理論予言。統計誤差内で観測データを良く再現している。左下図は、測定とモデルの比較により得られた宇宙論パラメータの推定結果の例。パワースペクトルの統計誤差をパラメータの決定の信頼区間に伝播させている。

という原理です。要するに、宇宙には特別な場所あるいは方向が存在しない、あるいは我々の天の川銀河は宇宙のなかで特別な位置に存在するわけではない、という民主的な考えです。

この宇宙原理を受け入れれば、我々が観測した $F(\theta)$ 場は、広大な宇宙のなかに存在する母集団の $\{F(\theta)\}$ から得られた典型的な標本サンプルと考えられます。CMBの例で言えば、宇宙のなかで遠く離れたところにいる観測者 (人類とは限りませんが) がCMBを観測したとしても、我々が見ているCMB温度ゆらぎ場と「大体」同じものを見るだろうと考えるわけです。この「同じ」程度、つまりどのくらい我々の観測したCMB場が「典型的」かを確率的に定量化する必要があります。

観測したゆらぎ場を定量化するために、フーリエ分

解を考えましょう。フーリエ分解とは、 $F(\theta)$ 場を以下のようにモード分解する方法です (図1の右上図)。

$$F(\theta) = \frac{1}{\Omega_s} \sum_l \tilde{F}_l e^{i\mathbf{l} \cdot \theta} \quad (1)$$

簡単のため、天球の曲率は無視し、天球上の観測領域を2次元平面と近似することにします。観測領域の天球上での面積を Ω_s とすれば、フーリエ分解の最小波数、いわゆる基本波数は $l_f \approx 2\pi/\Omega_s^{1/2}$ ($\Omega_s^{1/2}$ は面積の一辺の長さ) となります。この基本波数の整数倍の波数、つまり $\mathbf{l} = l_f (n_x, n_y)$ ($n_x, n_y = \pm 1, \pm 2, \dots$) の波数で、ゆらぎ場 $F(\theta)$ をモード分解します。フーリエ係数 \tilde{F}_l は、 $F(\theta)$ 場が波数 \mathbf{l} のモードに対して、どの程度の振幅を持つかを表す量になります。

波数 l のフーリエ係数は、 $\tilde{F}_l = |\tilde{F}_l| e^{i\theta_l}$ と表せるので、振幅と位相の 2 つの自由度を持ちます。宇宙原理の統計的等方性から、位相は興味のない量でないことが予想できるでしょう。⁴ そこで、振幅 $|\tilde{F}_l|$ の典型的な大きさを特徴づける統計量として、パワースペクトルを定義します。

$$\hat{P}_F(l) \equiv \frac{1}{N_{\text{mode}}(l)\Omega_s} \sum_{|l'| \in l} |\tilde{F}_{l'}|^2 \quad (2)$$

$\sum_{|l'| \in l}$ は、ビン幅内で $|l'| \in l$ を満たす全てのフーリエモードについての和とします。 $N_{\text{mode}}(l)$ は和に含まれる独立なフーリエモードの個数です。

$$N_{\text{mode}}(l) \equiv \sum_{|l'| \in l} \simeq \frac{2\pi l \Delta l}{(2\pi)^2 / \Omega_s} \quad (3)$$

Δl はビン幅 (観測者が決める量) です。 $2\pi l \Delta l$ は、フーリエ空間における半径 l 、幅 Δl の円環の面積 (2次元) であり、 $(2\pi)^2 / \Omega_s = l_f^2$ は基本波数で決まる面積要素です。この操作により、2次元データの膨大な情報量⁵を、 l の関数で与えられる1次元スカラー量のパワースペクトルに圧縮しています。宇宙原理に基づき、波数ベクトル l の方向依存性を無視し、大きさ $l = |l|$ を満たすフーリエ係数を全て同等と見なすことで、その振幅の平均がパワースペクトルです。フーリエ係数の振幅を定量化する統計量としては、最も単純なものと言えるでしょう。

地上の物理実験との違いは何でしょう? 地上実験の多くの場合、実験は何度も繰り返し行うことができます。多数の独立な実験結果の平均値と分散を取ること、実験結果の期待値と統計誤差を直接推定できるのです。しかし、宇宙論では観測領域は一つ、あるいは全天サーベイであっても宇宙は一つしかありませんので、これできません。このように、独立な事象 (リアライゼーション) によるアンサンブル平均を、観測データ内の同等の標本 (サンプル) 平均で代用する方

⁴ 異なる波数モード間でそろった位相が存在すると、結果の場 $F(\theta)$ には指向性が現れます。
⁵ 3次元データの場合も同じ。

法は、宇宙論におけるエルゴード仮定と呼ばれます。この仮定には、統計的不定性を伴うので、後に述べるように観測者がモデル化する必要があります。

3. 原始ガウシアンゆらぎと標本分散

前節では、宇宙論で良く用いられるパワースペクトルという統計量を定義しました。実は、パワースペクトルが観測データの「全て」の統計的情報量を記述する場合があります。そんな都合の良いことなんてあるの? と思われるかもしれませんが、あるのです。以下に見るように、宇宙は統計的にも単純で、美しいのです。

本記事では宇宙論のゆらぎ場に注目していますが、CMB温度ゆらぎ、宇宙の大規模構造など、宇宙に存在するゆらぎ (非一様性) の起源を説明するのがインフレーション宇宙シナリオです。ビックバン宇宙の始まりに (起こったと信じられている)、宇宙が指数関数的に膨張したというシナリオです。インフレーション時は、宇宙そのものも非常に小さかったので、インフレーション膨張を起こす場 (インフラトンと呼ばれる) の量子化を考える必要があります。量子力学の不確定性関係より、インフラトン場は必然的に量子ゆらぎを持ち、その量子ゆらぎがインフレーション膨張で引き伸ばされ、古典ゆらぎを生成したというのです。場の量子論では、異なる波数ベクトルのモードは異なる量子状態に対応します。通常のインフレーションモデルでは、インフラトン場への相互作用の影響は小さいと考えられ、異なる波数の量子ゆらぎはほぼ独立であったと考えられています。つまり、インフレーションによって生成された古典ゆらぎを $\tilde{\zeta}_{\mathbf{k}}$ (曲率ゆらぎと呼ばれる) とすれば、以下の条件が満たされることになります。

$$\langle \tilde{\zeta}_{\mathbf{k}} \tilde{\zeta}_{\mathbf{k}'} \rangle \equiv P_{\zeta}(k) (2\pi)^3 \delta_D^3(\mathbf{k} + \mathbf{k}') \quad (4)$$

$P_{\zeta}(k)$ は原始パワースペクトルです。 $\delta_D^3(\mathbf{k} + \mathbf{k}')$ は3次

元のデルタ関数で、異なる波数ベクトルのモードは独立であることを保証しています。また、インフレーション膨張が等方である限り、原始パワースペクトルの等方性、すなわち P_ζ が波数の大きさ $k = |\mathbf{k}|$ にも依存することも自然に帰結されます。ここで、記号 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均を意味します。

このようにインフレーションは、ほぼ自由場の量子ゆらぎというランダム過程で、宇宙全体に等方的な古典ゆらぎを生成するのです。より正確には、古典ゆらぎ $\zeta_{\mathbf{k}}$ の位相は確率的な変数（ランダム）であり、その振幅は量子ゆらぎがどのくらい引き伸ばされたかという物理的な情報を含み、その典型的な大きさは原始パワースペクトル $P_\zeta(k)$ で与えられます。これは原始古典ゆらぎ場 $\zeta(\mathbf{x})$ がランダムガウシアン場であるということと等価です。ガウシアン場は非常に単純な統計的性質を持ちます。偶数次の多点相関関数⁶は2点相関関数（パワースペクトル）の積で与えられ、奇数次の多点相関関数⁷は場の対称性から、ゼロになります。つまり、**ガウシアン場の統計的性質はパワースペクトルで完全に記述されるのです。**

宇宙論の構造形成の問題とは、インフレーションなどで与えられたゆらぎの初期条件から出発し、輻射優勢期、⁸ 物質優勢期、⁹ そしてダークエネルギーが卓越する加速膨張期と変遷する膨張する宇宙のなかで、光子、バリオン、ダークマターなどの各成分のゆらぎの力学的進化を解くことです。ゆらぎの振幅が小さい限り、この多成分の力学進化は、アインシュタイン方程式とボルツマン方程式を組み合わせた力学系を「線形」摂動理論で調べることができます。線形解析では、異なる波数のフーリエ成分はそれぞれ「独立」に時間成長します。すなわち、ゆらぎが線形段階にある限りは、ゆらぎの統計的性質は原始ゆらぎのものを保持することになるのです。実際に、観測されるCMB温度ゆらぎはガウシアン場と矛盾しないことが示されており、インフレーションシナリオをサポートする一つの証拠となっています。¹⁰

このように、宇宙論データからパワースペクトルを

測定することは、インフレーション理論から動機づけられた自然なアプローチになります。しかし、前節で述べたように、有限観測領域からパワースペクトルを推定する際には、ゆらぎ場の有限モード数（標本）に起因する統計的不定性を考慮する必要があります。¹¹ この不定性は標本分散（sample variance）と呼ばれます。この統計的不定性は、推定パワースペクトルの共分散で与えられ、ガウシアン場については厳密に計算できます。

$$\begin{aligned} \text{Cov}[\hat{P}_F(l), \hat{P}_F(l')] &\equiv \langle \hat{P}_F(l) \hat{P}_F(l') \rangle - \langle \hat{P}_F(l) \rangle \langle \hat{P}_F(l') \rangle \\ &= \frac{2}{N_{\text{mode}}(l)} \delta_{ll'}^k P_F(l)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで $\delta_{ll'}^k$ はクロネッカーのデルタ関数で、ビン幅内で $l=l'$ のとき $\delta_{ll'}^k = 1$ 、それ以外は $\delta_{ll'}^k = 0$ と定義されます。このように、ガウシアン場の共分散行列は対角成分しか持ちません。言い換えれば、異なる波数ビンのパワースペクトルは独立であることを意味します。¹² 非ガウシアン場の場合には、パワースペクトルの積では表現できない4点相関関数の寄与を考慮する必要があります。一般に異なるビン間のパワースペクトルの相関が生じます。実際の測定では、検出器のノイズの影響等を考慮する必要がありますが、今回の主題ではありませんので、無視することにします。

上述の共分散行列は、ある面積 Ω_s の観測領域リアライゼーションから各波数 l のパワースペクトル $\hat{P}_F(l)$ を推定したときに、その測定値が期待値（真の値）まわりに分布するばらつき（ $\pm 1\sigma$ ）を与えます。つまり、統計誤差のことです。このことから、各波数ビンでのパワースペクトル測定の統計的有意度は、

⁶ 例えば、4点相関関数であれば、 $\langle \zeta(\mathbf{x}_1) \zeta(\mathbf{x}_2) \zeta(\mathbf{x}_3) \zeta(\mathbf{x}_4) \rangle$ 。

⁷ 例えば、3点相関関数であれば、 $\langle \zeta(\mathbf{x}_1) \zeta(\mathbf{x}_2) \zeta(\mathbf{x}_3) \rangle$ 。

⁸ 宇宙の全エネルギーに対して、光子、ニュートリノなど相対論的粒子が支配的な時期。

⁹ 宇宙が膨張するにつれ、相対論的粒子のエネルギー密度が減少し、ダークマターなど非相対論的粒子が宇宙の全エネルギーに対して支配的になる時期。

¹⁰ 例えば、天球上の各ピクセルで観測された温度ゆらぎの分布関数を調べると、その分布がガウシアンで非常に良くフィットできる。

¹¹ 宇宙の大きさは、我々の観測領域より大きいので、量子ゆらぎの波数刻みは、観測者のフーリエ分解能よりも常に高いと考えられます。つまり、観測するフーリエモードは多数の量子ゆらぎ起源の独立なゆらぎで構成されていると考えられます。

¹² 係数2は、ゆらぎ場の実数条件 $\hat{P}_F = \hat{P}_F^*$ という条件から、フーリエ係数の自由度が半分になることにより現れます。

$$\left[\frac{P_F(l)}{\sigma(P_F(l))} \right]^2 = \frac{N_{\text{mode}}(l)}{2} \quad (6)$$

と見積もれます。ここで、 $\sigma(P_F(l)) = \text{Cov}[(\hat{P}_r(l), \hat{P}_r(l))]^{1/2}$ です。このように、統計的有意度はパワースペクトルの値に依存せず、波数 l まわりのモード数 $N_{\text{mode}}(l)$ のみに依存することが分かります。 $N_{\text{mode}}(l) \propto \Omega_s l \Delta l$ であるので、観測領域 (Ω_s) が大きいほど、波数 l が大きいほど、またピン幅 Δl が大きいほどパワースペクトル測定の有意度は高くなります。

図1の右下図は、Planck衛星によるCMB温度ゆらぎのパワースペクトルの測定結果を示します。波数 l (厳密には球面調和関数の展開次数) が大きくなるにつれ、パワースペクトルの測定精度が向上しているのが分かります。各 l ビンのパワースペクトルの測定値まわりの誤差棒は、上述した標本分散と検出器のノイズの寄与を考慮したものです。

パワースペクトル推定の統計誤差が与えられれば、理論モデルと比較することができます。

$$\hat{P}_F(l) \longleftrightarrow P_F^{\text{model}}[l; P_c(k), \Omega_{\text{m}0} h^2, \Omega_{\text{b}0} h^2, \Omega_{\text{de}}, \dots] \quad (7)$$

右辺は、理論モデルによる F 場のパワースペクトルが、原始パワースペクトル、その他宇宙膨張を記述するための宇宙論パラメータの関数として与えられることを意味しています。これはゆらぎが線形成長する限り、正しい仮定です。まず、統計誤差内で、理論モデルが観測データを再現することができるかどうかを調べます (図1の右下図参照)。次に、統計誤差が許す範囲をパラメータ決定に正しく伝播させることで、各パラメータの決定の信頼区間 (C.L.) を求めることができます。Planckチームは、このような作業過程を用いて、ダークマター、バリオン、宇宙年齢などのパラメータを高精度で決定したのです。図1の左下図に示されているのは、そのような例の一つです。特筆すべきは、Planckの場合には、すでに全天データが存在し、また $l \sim 2000$ までのデータについては、検出器に

よる誤差が効かない、標本分散による統計精度まで実験結果が達成していることです。つまり、人類は(温度ゆらぎについては) CMBデータから引き出すことが可能な全ての統計情報を宇宙論に用いることに成功したのです。

以上ここまでの話をまとめると、(1) 宇宙原理の統計的一様性、等方性を仮定し、興味あるゆらぎ場の統計的性質を測定するために、一次元関数であるパワースペクトルを測定すること、(2) エルゴード仮説、つまり観測した領域が宇宙の典型的な標本であると仮定し、パワースペクトルの測定に伴う標本分散をモデル化すること、(3) インフレーションシナリオが予想するように、(線形段階の) ゆらぎ場がガウシアンである場合、ゆらぎ場の統計的性質はパワースペクトルで全て決定されること、を述べてきました。これら (1), (2), (3) のいずれかの仮定が破れれば、パワースペクトル以外の統計量を用いる必要があることとなります。

4. 宇宙の構造形成: 重力の非線形性

前節までは、CMBゆらぎ場に代表される、線形かつガウシアンゆらぎ場を考えてきましたが、この節では加速膨張する宇宙の探査を目的とする銀河サーベイから得られる宇宙論データを考えてみましょう。CMB以降の物質優勢期のゆらぎの力学進化は、主にダークマターの重力により引き起こされます。重力の不安定性により、ダークマターの空間分布の非一様性が増幅され、現在観測される、銀河、銀河団、さらに銀河の分布で見られる宇宙の大規模構造が形成されたというシナリオです (以後CDM構造形成モデル)。この CDM構造形成モデルでは、より小スケールの構造から形成され、徐々に大きなスケールの構造が形成されたという、ボトムアップ的な階層構造形成シナリオを予言します。

冷たいダークマターの仮定は、その熱的速度が小さい (冷たい)、重力のみで相互作用する、という性質です。ホライズン内の領域で、また空間的に粗視化し

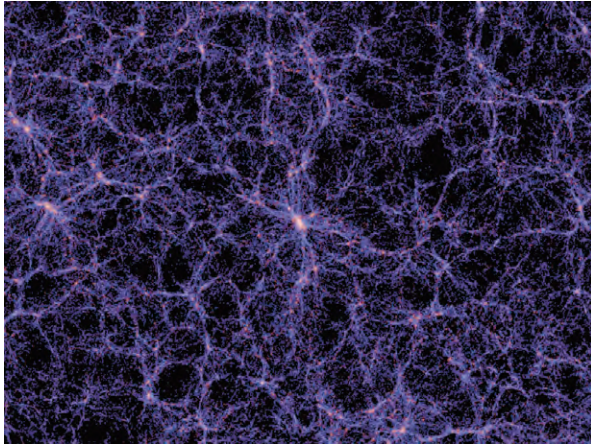


図2 冷たいダークマター構造形成モデルに基づく宇宙論 N 体シミュレーションの例。ガウシアン場の初期条件から出発したとしても、非線形重力進化の結果として、ダークマターの分布は複雑な非ガウシアン性を有する。ダークマターが特に集中している領域はダークマターハローと呼ばれる。フィラメントの交差点には、太陽質量の 10^{15} 倍もの銀河団スケールの巨大ハローが存在することがある（図の中心にある巨大ハローはそのような例）。宇宙全体の総質量に対して銀河スケール以上のハローに含まれるダークマター質量は数10%にも及ぶ。一方、70%ほどの体積比は、ダークマター密度が平均より少ない、質量密度ゆらぎが負になっているボイド領域が占める。このような非対称性より、ダークマター分布は、ゼロでない多点相関関数を持つことになる。

た観点では、ダークマターの質量密度場、速度場は、膨張宇宙における渦なし、無圧力の流体の方程式系に従うことが示されます。¹³

$$\begin{aligned}\frac{\partial \delta_m}{\partial t} + \frac{1}{a} \nabla \cdot [(1 + \delta_m) \mathbf{v}_m] &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{v}_m}{\partial t} + \frac{\dot{a}}{a} \mathbf{v}_m + \frac{1}{a} (\mathbf{v}_m \cdot \nabla) \mathbf{v}_m &= -\frac{1}{a} \nabla \phi \\ \nabla^2 \phi &= 4\pi G \bar{\rho}_m a^2 \delta_m\end{aligned}\quad (8)$$

$a(t)$ は宇宙のスケール因子であり、宇宙膨張とともに増加する関数、 $\delta_m(\mathbf{x}) \equiv [\rho_m(\mathbf{x}) - \bar{\rho}_m]/\bar{\rho}_m$ は質量密度ゆらぎ場であり、 $\mathbf{v}_m(\mathbf{x})$ は固有速度ベクトル場、 $\phi(\mathbf{x})$ は重力ポテンシャルです。一様等方宇宙では、至るところで $\delta_m = |\mathbf{v}_m| = 0$ になる宇宙ですので、 δ_m と \mathbf{v}_m はゆらぎ場です。CMB の測定で制限されているゆらぎの初期条件から出発し、この方程式系を解くことにより、宇宙構造の力学進化を調べることができます。この方程式系から明らかのように、ゆらぎ場の振幅が小さいとき、つまり $|\delta_m| = |\mathbf{v}_m| \ll 1$ (光速 $c=1$ の単位系) では、方程式は線形化でき、ゆらぎ場は線形進化します。しかし、ゆらぎが時間とともに成長し、非線形項 ($\delta_m \mathbf{v}_m$ 、 $(\mathbf{v}_m \cdot \nabla) \mathbf{v}_m$) が無視できなくなると、ゆらぎ場は非線形進化することになります。つまり、異なる波数のフリーモードが混合し (モードカップリング)、複雑な

進化を始めるのです。原始ゆらぎがガウシアン場があったとしても、重力の非線形性がダークマターの空間分布にガウシアン性を誘発するのです。その非ガウシアン性の程度は、小スケールほど、また現在に近い低赤方偏移ほど大きいこととなります。

このように、現在の宇宙のダークマターの分布の統計的性質は、パワースペクトルの情報だけでは記述できません。実際に図2に示されるような、CDM構造形成モデルのN体シミュレーションの研究は、ダークマターの分布が一般に3点以上の多点相関関数の値を持つようになることを示しています。例えば、非ガウシアン性の情報を持つ最低次の3点相関関数を考えてみましょう。非線形構造の成長の結果として、低密度領域については、最小でもダークマターが空っぽの領域 ($\rho_m(\mathbf{x}) = 0$) になりますが、そこでは $\delta_m(\mathbf{x}) = -1$ です。一方、ダークマターが密集する領域では、質量密度 $\rho_m(\mathbf{x})$ は幾らでも増幅する可能性があり、実際にN体シミュレーションではダークマターが密集するダークハローの中心で密度が発散する領域 ($\delta_m \rightarrow \infty$) が現れることを予言しています。このように、密度分布の非対称性により、一般に3点相関関数が値を持つようになるのです。

以上を踏まえ、宇宙論場の統計的情報量という観点から疑問が生じます。前節で述べたように、線形段階にある宇宙初期ゆらぎはガウシアン場であり、その統

¹³ 厳密には無衝突ボルツマン方程式系を解く必要があり、N体シミュレーションはそれを近似的に解く方法になっています。

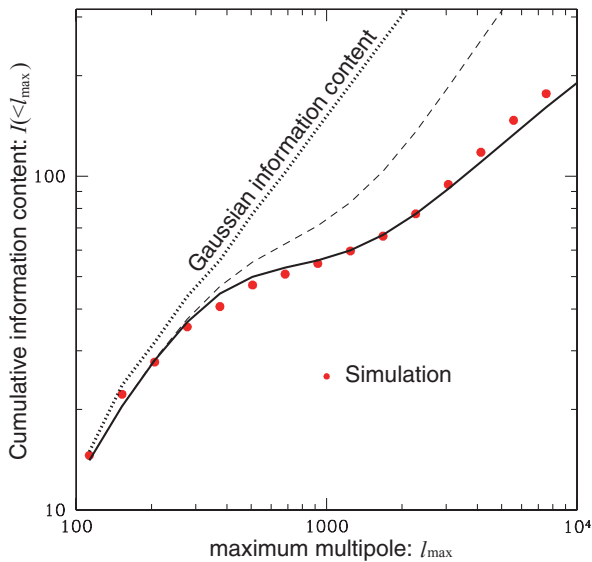


図3 宇宙の大規模構造による重力レンズ場のパワースペクトルに含まれる情報量 $I(<l_{\max})$ 。ここで考える重力レンズ場とは、観測者と赤方偏移 $z_s = 1$ にある光源銀河間にある質量密度ゆらぎ場を視線方向に投影した2次元場。観測面積として1400平方度を仮定し、パワースペクトル推定の統計誤差として、標本分散のみを考慮した（銀河固有の楕円率によるノイズは無視した）。示すのは、各波数ビンのパワースペクトル推定の統計的有意性（ガウシアン場については式6を参照）を、最小波数 $l_{\min} = 72$ から、 x 軸に与えられる最大波数 l_{\max} まで積分した量。この場合、 $I(<l_{\max})$ はピン幅 Δl に依存しない。点線カーブは、重力レンズ場がガウシアンの場合の結果、つまり宇宙の大規模構造の初期線形ゆらぎ場が持つ最大情報量。この場合、情報量はモード数の和にだけ依存し（式6）、 $I_{\max} \propto l_{\max} \Omega^2$ と表せ、 l_{\max} までのフーリエ空間での面積の平方根に比例する（3次元場の場合には、 $I(<k_{\max}) \propto k_{\max}^3 V_s^{1/2}$ となる。 V_s は観測量の3次元体積）。丸点は、図2に示されるようなCDM宇宙構造形成モデルのN体シミュレーションの結果を用い、重力レンズ場を再現した疑似カタログを使った結果。この場合、情報量を求めるために、重力レンズ場の非ガウス性のために生じる異なる波数のパワースペクトル間の相関を正しく考慮している。実線は解析的なモデルで、模擬カタログの結果を良く再現している。破線は、観測領域を超えるゆらぎ場による標本分散への影響を無視した場合（詳しくは本文参照）。

計的信息はパワースペクトルが全てです。一方、現在の宇宙では、ダークマターのゆらぎ場は非ガウシアン性を有し、パワースペクトル（2点関数）以外に多点相関関数が値を持つようになります。熱力学第二法則的な考えから初期条件以上の情報を引き出すことはできませんので、ダークマターの統計量の時間進化を考えると、非線形構造形成の結果として、ガウシアン場のパワースペクトルの一部の情報が多点相関関数の情報へ流出したとも考えられます。つまり、疑問は

- 現在のダークマターの空間分布から得られる統計量を組み合わせることで、宇宙初期に持っていたガウシアン情報量を復元できるか？

ということです。実は、これは宇宙論の業界で**未解決問題**になっています。力学系が時間可逆な系であれば、完璧に初期条件に戻せるので、復元は可能でしょう。CDM構造形成モデルでは、大スケールの密度ゆらぎは、まだ線形段階にあり、ガウシアン性を保っているため、復元は可能ということになります。一方、小スケールの強非線形領域にある密度ゆらぎは、初期条件の情報を既に失っているかもしれません。例えば、ダー

クマターハロー内で重力的に束縛されているダークマターは、何度もハロー中心回りを振動あるいは散乱してきた軌道を持っていた可能性があり、現在の粒子分布の情報だけでは、可逆的に初期条件に戻すことは不可能なように思います。これら中間スケールの弱非線形領域では、重力進化がまだ十分に進んでおらず、初期条件のガウシアン情報の「大部分」を復元することが可能かもしれません。「大部分」と書きましたが、どの程度復元できるかについては、まだ良く分かっていません。実は、銀河サーベイから測定できる、銀河のクラスタリング、重力レンズの宇宙論統計量の興味あるスケールはこの弱非線形領域にあります。

この数年、私たちは構造形成のN体シミュレーションあるいは解析的モデルを用いて、この問題を調べてきています。図3は、その研究から得られた結果の一つです。宇宙の構造形成のN体シミュレーションを使って再現した宇宙の中を光を飛ばし、重力レンズ効果の観測量を復元した疑似カタログを用い、その重力レンズ場のパワースペクトルがどの程度の情報量を持っているかを調べた結果です。波数 l が小さいところでは、この領域は線形段階のゆらぎの影響が支配的ですが、ガウシアン場から期待される情報量をほぼ復

元しています。一方、波数 l が数100以上のところでは、パワースペクトルが持つ情報が大きく減少していることが分かります。HSCのような今後のサーベイが宇宙論に用いる、1～1000のスケールでは、半分以上の減少があります。この結果は、パワースペクトル解析だけではガウシアン情報の一部しか復元できないことを示しています。実際に、別の研究では、3点相関関数が情報を加えることを見つけていますが、それでもまだガウシアン情報を復元することには成功していません。4点以上の相関関数も同様に重要かもしれません。

これらの研究を通して、予想しなかった面白い結果も発見しています。実は、ダークマターのパワースペクトルにおける情報の消失は、主にサーベイ領域より大きなゆらぎによって引き起こされているのが分かったのです。観測領域を超えるゆらぎは観測できないため、観測領域が、一様等方宇宙より正の密度ゆらぎ領域にいるのか、あるいは負の密度ゆらぎ領域にいるのか分からないのです。つまり、観測領域内で平均した密度ゆらぎは一般にゼロではありません。重力の遠距離力、非線形性の性質により、全ての波長はモードカップリングしますので、もし観測領域が正の密度ゆらぎの領域にいれば、ダークマターの質量密度パラメータが宇宙全体の平均より若干大きな宇宙、つまり正の曲率の宇宙にいることと同等になり、観測領域内の全てのスケールのゆらぎの成長が加速されることとなります。もし観測領域が負の密度ゆらぎの領域であれば、小スケールのゆらぎの成長は抑制されるのです。実は、このモードカップリングによる影響が標本分散に最も寄与することが分かり、我々はこの効果を定式化することに成功しました。図3の実線は、この効果を考慮した予言で、N体シミュレーションの結果を良く再現していることが分かります。逆に、この効果をパラメータに推定に正しく考慮することで、大スケールのゆらぎを制限できる可能性があります。これは非常に面白い可能性で、今後もさらに研究を進めていく予定です。

5. 今後の課題

IPMUが進めるSuMIRe計画に代表されるように、今後の宇宙論銀河サーベイは益々大型化し、またダークエネルギー問題に代表される、より難しい、より根源的な問題に挑むこととなります。この記事では、宇宙論観測データから統計量を測定し、宇宙論パラメータを推定するときの作業過程、その前提になっている原理、仮定を解説してきました。CMBの場合は、ゆらぎ場がほぼガウシアンであるために、最大限の成功を収めています。一方、銀河サーベイの場合には、重力の非線形進化の帰結として、どんな統計量が最適であるのか未だ分かっていません。また、有限領域に起因する標本分散をモデル化する困難さもあります。逆に言えば、未解決問題が沢山あり、嫌というほど研究の余地があるのです。銀河サーベイによる宇宙論をCMB宇宙論のレベルまで成熟させるのが目標と言えます。今回は、宇宙論の統計的側面に焦点を当てましたが、今後もこの流れは益々強くなると思われます。新しいアイデアがある方、是非私の方までご連絡ください...特に統計が専門の方、ご連絡お待ちしております!

参考文献

- M. Takada and S. Bridle, *New J. Phys.* **9**, 446 (2007)
- M. Takada and B. Jain, *MNRAS* **395**, 2065 (2009)
- M. Sato et al., *Astrophys. J.* **701**, 945 (2009)
- I. Kayo, M. Takada, and B. Jain, *MNRAS* **429**, 344 (2013)
- M. Takada and W. Hu, *Phys. Rev. D* **87**, 123504 (2013)
- Y. Li, W. Hu, and M. Takada, *Phys. Rev. D* **89**, 083519 (2014)
- M. Takada and D. N. Spergel, *MNRAS* **441**, 2456 (2014)

Our Team

ミハイル・カプラノフ

Mikhail Kapranov 専門分野: 数学

教授

私の研究は、代数、代数幾何学そして圏論の分野にあります。これらの分野は、非常に古典的なものから非常に抽象的なものを含む広い意味での空間の概念を理解するための強力な概念的道具の源です。例えば、古典的な研究課題である超幾何関数論は（私のI.M. GelfandとA.V. Zelevinskyとの共同研究によって）トーリック多様体の代数的超曲面の周期積分を含む形で進展しました。これは、超幾何関数と特異点論における判別多項式を統治する組み合わせ幾何学的対象である、第2ポリトープの発見に繋がりました。これらの概念は現在ミラー対称性に広く用いられています。

私が興味を持っている（そして研究してきた）代数幾何学の他の方向に、非可換幾何学（可換領域の近傍



の研究)、導来及び無限次元幾何学（形式的ループやパスの空間の代数幾何的研究）があります。

圏論はこれら全ての分野の統一的バックグラウンドを与えます。加えて、圏論の様々な趣向（三角圏、高次圏、オペラド理論）は、それら代数的表現自体が実際に（1次元の）直線上に表現されない非自明な幾何構造を持つ対象となる状況へと誘導します。この代数と幾何との追加的接点は、実に高次元の問題にアプローチする際に必要になると考えられます。

シャミック・バナジー

Shamik Banerjee 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私の主たる研究対象は、弦理論と場の理論です。最近エンタングルメント・エントロピーに集中して研究を行っています。エンタングルメント・エントロピーは、ブラックホールから量子臨界現象まで、物理学の様々な分野に応用されてきており、また場の理論におけるツールとしても浮かび上がってきています。私は、場の理論においてエンタングルメント・エントロピーを計算するための新たな非摂動的手法の開発を試みています。また、ホログラフィック双対性、より正確にはAdS-CFT双対性（反ドジッター時空における弦



理論と共形場理論の間の対応)にも興味をもっています。この双対性は、エンタングルメント・エントロピーについて多くの正確な結果を与えます。これらの結果を場の理論の側から説明することが、新たな手法を開発する動機の一つになっています。

クリストフ・ブローナー Christophe Bronner 専門分野: 実験物理学

博士研究員

私はニュートリノの実験的研究、特にニュートリノ振動現象に焦点を当てて研究を行っています。この現象では、あるフレーバーで生成されたニュートリノが、その後別のフレーバーのニュートリノとして反応し、観測されることが可能になります。また、この現象はCP対称性を破るかもしれません。その場合、ニュートリノと反ニュートリノが異なる振動を示すことになります。

これまで、私は大部分T2K (Tokai to Kamioka) 実験において研究を行ってきました。この実験では、ニュートリノ振動を研究するため、茨城県東海村の大強度陽



子加速器施設 J-PARCで生成されたミューニュートリノビームが岐阜県神岡のスーパーカミオカンデに向けて発射されます。私は、これまで、前置検出器の建設と運用、およびニュートリノ振動を記述するPMNS (ポンテコルボ-牧-中川-坂田) 模型のパラメーターを決定するためのT2K実験のデータ解析を行ってきました。

今城 洋亮 いまぎ・ようすけ 専門分野: 数学

博士研究員

私は微分幾何、特にスペシャルラグランジュ部分多様体を研究しています。例えば、4次元ヤン・ミルズインスタントンや擬正則曲線については特異点の振舞が既に良く分かっており、それらのモジュライ空間をコンパクト化して色々なことに応用する、ということが数学でも物理でもよく見られます。同様のことをスペシャルラグランジュ部分多様体にも行いたいのですが、スペシャルラグランジュ部分多様体は4次元インスタントンや擬正則曲線よりも(特異点の解析が)本質



的に難しく、今のところモジュライ空間の「良い」コンパクト化はできていません。私は幾何学的測度論やラグランジアンフレア理論を使いながら「単純」な特異点の構造を詳しく調べています。

宮武 広直 みやたけ・ひろなお 専門分野: 宇宙論

博士研究員

私は、現在観測されている宇宙の加速膨張が基礎的な物理法則にどのような示唆を与えるのかということに興味があります。今までは望遠鏡で撮像した画像の解析を通して、弱重力レンズ効果から宇宙の質量分布を明らかにする研究を行ってきました。Kavli IPMUでは、2014年3月から始まったHyper Suprime-Camサーベイで得られるデータを通して、より広い範囲で宇宙の



質量分布を測定し、そこから暗黒エネルギーの性質に制限を付けることや重力理論を検証することを目指します。

Our Team

長崎 晃一 ながさき こういち 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私は今まで弦理論と超対称ゲージ理論について研究してきました。今興味を持っているのは、これらの理論を結びつけるとされるAdS/CFT対応と呼ばれる予想です。これは現在解析が困難とされている弦理論とゲージ理論を結びつける予想で、これにより謎の多い弦理論についてますます理解が深まることが期待されます。

最近調べてきたのは、非局所演算子と呼ばれるゲージ理論のオブジェクトです。過去の研究では、ある種の非局所演算子の重力理論側の対応物を予測し、計算によってその確かさを検証しました。従来のD3ブレーン



からなる系にプローブブレーンを入れた系は、Defect (欠陥) もしくは境界を持った特種なゲージ理論を実現します。このような系の解析によって非局所演算子とブレーンの関係を明らかにしたいと思っています。

永田 夏海 ながた なつみ 専門分野: 理論物理学

博士研究員

標準模型を超える物理に対して高い感度を持つ物理量を研究対象としています。これまでは、特に、暗黒物質直接探索、電気双極子モーメント測定、陽子崩壊探索、といった実験に焦点をあて、観測量に対する新物理の寄与を高精度で計算するための手法を研究してきました。上記のような精密測定実験に基づく新物理探索は、加速器による新物理探索と相補的になってい



ます。特に、初期LHC実験で新物理の兆候が見つからなかったことを踏まえると、このような取り組みはますます大事になるのではないかと考えています。

齋藤 亮 さいとう りょう 専門分野: 宇宙論

博士研究員

私の目標は、宇宙の始まりから現在、あるいは未来までの宇宙の包括的な歴史を明らかにすることです。宇宙初期には加速膨張（インフレーション）があったと信じられており、現在の宇宙も暗黒エネルギーによって加速膨張しているとされています。宇宙の歴史を説明するためには、これらの現象をきちんと解明する必要があります。これを受けて、私はインフレーションと暗黒エネルギーの統一模型の研究などを行ってきました。また、現在は、インフレーション期に生成さ



れる重力波の詳しい取り扱いや、ヒッグス粒子の真空期待値が宇宙の発展に及ぼす影響に興味を持って研究しています。

高野 浩 たかの・ひろし 専門分野:理論物理学

博士研究員

暗黒物質やニュートリノ質量に関する現象論の研究を行っています。これらの問題を実験的に到達可能なTeVスケールの素粒子模型で説明することを考えています。最近、特に、暗黒物質の熱的・非熱的生成や冷たい・温かい暗黒物質などの宇宙史におけるシナリオや、複数の暗黒物質が存在する可能性などを網羅

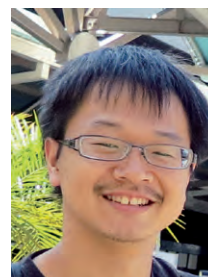


的に理解することを目指しています。

竹本 康浩 たけもと・やすひろ 専門分野:実験物理学

博士研究員

宇宙はどのようにして今ある形に作り上げられたのでしょうか？素粒子の一つであるニュートリノはこの疑問を調べるためのプローブになります。ニュートリノはその非常に小さな反応断面積によって、太陽や地球の中から直接的な情報を与えます。また、ニュートリノがマヨラナ粒子であるという可能性は、現在の物質優勢宇宙の自然な説明をも与えます。私はニュートリノを用いて、このような研究をKamLANDおよびKamLAND-Zen実



験で行ってきました。カブリIPMUにおいては、この研究を続けるとともに、検出器KamLANDを用いた暗黒物質探索の研究を開始します。

アレクセイ・トルストフ Alexey Tolstov 専門分野:天体物理学

博士研究員

私の研究対象は、超新星の爆発機構とガンマ線バーストの起源を、スペクトルと光度曲線の観測データの解析に基づいて理解するという問題を中心として構成されています。私は、膨張中の超新星の外層における非平衡輻射流体過程の数値モデリングにより、暗い超新星の光学領域の光度曲線とスペクトルに見られる元素合成の信号、超金属欠乏星の起源、及び軽度に相対論的な放出物に対する超新星のショックブレイクアウト現象（超新星は、爆発で内部に発生した衝撃波が表面を突き抜けることにより急激に光り始めるが、その



際、数時間から1日程度の間、紫外光や軟X線を放射する現象）を研究しています。これらの研究全てが、星の進化と宇宙論に関する幾つかの差し迫った問題に回答を与える上で役立ちます。

Our Team

Round Table Talk: 村山 斉と大栗博司、ピーター・ゴダードと語る

ピーター・ゴダード Peter Goddard
プリンストン高等研究所教授

村山 斉 むらやま・ひとし
Kavli IPMU 機構長

大栗 博司 おおぐり・ひろし
Kavli IPMU 主任研究員



ニュートン研究所を軌道に乗せるまで

大栗 今日は私たちとの鼎談にご参加くださり、ありがとうございます。

ゴダード どういたしまして。

大栗 ゴダードさんは、今や数理科学の分野では世界有数の研究機関となっている、ニュートン研究所の初代副所長を務められました。発足の際には、研究棟の設計と建設も含め、責任をもって尽力されたとお聞きしています。

ゴダード はい、他の人たちと共にその任に当たりました。

大栗 その後、プリンストンの高等研究所 (IAS) の所長も務められ、研究所のプログラムを拡大されました。在任中には、リーマンショックなど、財政的に不安定な期間もありましたが、

見事な成り取りをされました。そこで、私たちはあなたの経験に学ぶべきことが多々あると思います。また、あなたの研究されてきた分野は、当研究機構と深い関係があります。実際、明日は Kavli IPMU のコロキウムで数学と物理学の間の学際的研究について話されますが、それは今日の話題にしたいもう一つのテーマでもあります。

村山 私は、どうやってニュートン研究所を軌道に乗せたのか—研究所のビジョンをどのように描かれたのか、どうやって研究者を集めようとしたのか、ということについてお話を伺いたいと思います。

ゴダード 1980年代半ば、私と、英国、特にケンブリッジ大学での同僚たちの多くは、国内にこういった研究所が無

いということを感じてきたようになりました。長年にわたり高等研究所が世界的に特別の役割を果たしてきて、それに触発された様々な人たちが他の研究所を設立したため、こういった研究所がいくつも新設されていたのです。高等研によって触発された研究所の一例として、ドイツのボンにあるヒルツェブルッフの研究所 (ヒルツェブルッフはマックス・プランク数学研究所設立以来、長年にわたり所長を務めた) は有名ですし、パリ近郊にある IHES (フランス高等科学研究所) はもう一つの例です。

大栗 京都大学の数理解析研究所もありますね。

ゴダード 高等研究所に滞在した人たちは、しばしば自分の国で真似ること

ができるものがあることを目にしました。まったくの複製ではありませんが。アメリカではパークレーにMSRI（数理論科学研究所）、サントバーバラにITP（理論物理学研究所）—現在はKavli ITP（カブリ理論物理学研究所）ですが—が発足しました。私たちの多くがこういった研究所でサバティカルや休暇を過ごしています。多くの研究者と交流し、研究に集中できる環境で過ごすために出かけるには非常に良い場所ですから。しかし、英国にはこういった研究所が皆無でした。私たちは、サントバーバラに行って研究プログラムの運営を手伝ったり、オーバーヴォルフアッハ数学研究所のワークショップに参加したり、等々、は結構なことではあるが、一方、双方向の流れを作り、イギリスへ、勿論ケンブリッジへ、研究者を引き寄せることができることも重要だと考えていました。既にロンドンではこのことを考え始めた人たちもいました。マイケル・グリーンも関わっていましたが、実現には至りませんでした。そして、ケンブリッジでは私たちに好機が訪れました。丁度その時、ケンブリッジ大学全体ではなく、その中のカレッジトリニティ・カレッジとセント・ジョンズ・カレッジに利用可能な資産があるかもしれないことがわかったのです。ケンブリッジ大学が資金を提供し、英国研究会議にそれにマッチする資金を出すように説得すれば、国際的研究所を設立できるかもしれないと思いました。次に、私たちは研究所の研究分野および運営のモデルはどうあるべきかを定める必要がありました。私たちは、研究分野は非常に広く設定されるべきで、そうすれば広い支援を得る助けになるであろうと感じていましたが、それと同時に、私たちの多くは、興味深い研究領域としては、分野間あるいは分科間でのクロスオーバーが起きているところが望ましいのではないかと思いました。そうすれば、新たに設立する研究所には、通常大学では集まる機会のない研究者を異なる学問分野から参集させること

ができるという、より大きな付加価値があることとなります。このような研究所の重要性が増した一つの理由は—それは1930年代においてさえプリンストン高等研究所創設の基本理念の一つだったのですが—現代の大学が今や多忙な場所であるということだと思います。世界中どこでもそうであると思います。大学は学者が研究室の机に向かい、世俗に超然として基本的な問題について思索にふけることを期待される場ではなく、起業家として期待される場なのです。一般的に、彼らには隣の学科の同僚達と交流する時間がありません。むしろ、他の場所において会議に出る必要が無い時に、異なる学問分野の研究者たちと交流することの方が多いためです。これが世界中で私たちの所のような研究所が増えた理由の一つであると思います。私たちは、このような理由は全て良いものと思いました。もし私たちが幅広い研究分野を有する研究所を作れば、恐らくより広範囲の研究者からより多くのサポートを得るであろう、第2に、そうすれば学際領域で運営する機会が得られるであろうと考えたのです。これは、別にニュートン研究所で行うことが学際的でなければならないということではなく、個別の研究プログラムをそれぞれ比較して、この研究所でそれを実施することによる付加価値は何か考えようということなのです。

村山 その議論の口火を切ったのは誰ですか？マイケル・アティヤーですか、それともあなたか他の誰かですか？

ゴダード 何人かいました。ピーター・ランドスホフ、マーティン・リース、その他です。

村山 マーティン・リースが？

ゴダード ええ、マーティン・リースは最初から最後まで関わりました。それからピーター・ランドスホフは私と一緒に重要な役割を果たしました。私たちは単純で退屈な仕事をほとんど引き受けました。それから、非常に優れた数学者であるジョン・コーツと…

大栗 それは、英国では伝統的に理論

物理学者は数学科に所属すると考えられたためですか？

ゴダード 部分的にはそうですね。というのは、この議論を最初にプッシュしたのは、応用数学・理論物理学科を含む数学部だったからです。

大栗 あなたご自身やマーティン・リースのような一流の理論物理学者多数が数学部に所属していたのですか？

ゴダード はい、そうです。他の学部からもサポートを得ましたが、数学部が主として議論を推し進めました。私は数学部の理論物理学教授でした。

大栗 研究所の仕組みについて質問があります。先ほど、ニュートン研究所より前に数学の研究所がいくつか存在していたとおっしゃいましたね。しかし、研究所にはいくつかの種類があります。例えば、IASやIHESのような研究所の強みは、その教授陣にあります。その分野の指導的学者たちがいて、彼らが研究者を惹きつけています。一方、MSRIのような研究所は、教授陣は基本的には所長と副所長だけで、研究プログラムの力で研究者を惹きつけます。あなたが選択したのはMSRI方式でした。

ゴダード そうです。

大栗 そういう種類の選択をした理由は何だったのでしょうか？

ゴダード 研究所を構成しようとしていた研究者の間で、1980年代の末ですが、次のような議論がありました（私たちが考え始めたのは'88年頃でした）。こういう研究所の言ってみれば分類学、つまり、その各種の構造的側面を見ると、幾つかのポイントがあります。重要な点の一つはこうです。「任期無しの教授陣を持つか、それとも持たないか？」それぞれに論拠があります。特定の研究所にとっての論点の一つは、「どうやって研究所を支援する組織を確保するか？」です。どうやって研究所のことを大切にしてくれる集団を得るか。勿論、一つの方法は指導的学者たちを教授陣に据えることです。これにはサントバーバラのITPなどが当てはまります。任期無しの教授

陣を置いた場合に起きる他の問題は、間違った人事です。高等研究所のようなどころで、これまで教授人事の失敗がほとんどなかったことは驚くべきです。

大栗 そういう研究所では、人事で失敗をする訳にはいきませんね。

リスクを覚悟しなければ思考様式を変革するような仕事は成し遂げられない

ゴダード 問題は一私がいつも言っていることであり、また私が高等研究所の所長を務めていた時は理事たちに説明しようとしてきたことですが、こういうことです。たとえ失敗をするとしても非常に稀なケースであって、それよりも重要なことは画期的な成果を挙げることです。品質管理をしようとしているのではないことを分かってもらうよう、努力が必要です。リスクのない環境にしようとしているわけではありません。重要なことは、人々の思考様式を変革するような成果を挙げることに、対象の本質を変えること、ブレークスルーを達成することなのです。そういうことを成し遂げることと、非常に良い研究をしているが実際には何も変えられないようなことと、二者択一であるならば。

大栗 その決断はなかなか難しいですね。そうするにはリスクを覚悟でしなければなりません。

ゴダード そうです、それが肝心なのだと言わなければなりません。一人か二人期待された程優れた仕事はしない人がいるかもしれない研究所の方が一私は高等研がそうだとは思いますが、たとえそうであったとしてもその方がましなのです—エドワード・ウィッテンやピエール・ドリーニュ、等々のように、私たちの知的活動の全領域の理解の仕方を完全に再構築してしまう人たちが出てくるわけですから、はるかに望ましいのです。ある標準より下の人が誰もいないことよりも、今言ったことの方をもっと気にかけるべきなのです。私は良くこういうアナロジーを使いましたが、多分日本でも当て

はまると思います。運転免許の試験を受けたければ運転教習所に行くでしょうね。

村山 日本でもそうです。

ゴダード その際、気にするのは試験に受かることだけです。

村山 その通りです。合格に必要な最低線があって、それ以外は気にかけません。

ゴダード 望むことは非常にはっきりしていて…

村山 満点を取るかどうかは気にしません。その通りです。

ゴダード 全問正解を望んだりはしません。実際、そんなことは関係無いですから。

村山 必要ありません。

ゴダード 家に帰って奥さんや両親に満点を取ったと自慢したりはしません。人生を変えるために運転教習所に行くわけではないのです。多分18歳で大学に入学する時は人生が変わるであろう、人格を形成する体験となるであろうと期待するかもしれません。運転教習所に行く目的は違います。運転教習所の目的は非常に良く品質管理された結果を得ることで、どの教習所を選ぶか決める際、単に一番合格率の高い所を選ぶでしょう。それとは全く正反対で、私たちは自動車を運転できる人々を作ろうとしているわけではありません。私たちは人々の物の見方を変えようとしており、芳しくない結果が一つや二つあっても問題ではないのです。

大栗 このような研究所の人事では、「失敗は許されない」という姿勢だけではうまくいかないということですね。

ゴダード もちろん、たった数人しか採用できないなら、失敗はできません。そこで間違えたら困ったことになりま。しかし、私は、リスクを避けようとしながら真に画期的なことを成し遂げようとするのができるとは思いません。

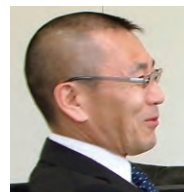


大栗 しかし、ニュートン研究所の場合は別の方向をとることに決められました。

ゴダード そうです。理由は色々ありましたが、実は本質的な点は私たちが決定したプログラムの研究活動のモデル、まあ言うてみれば、特にサンタバーバラのモデルに関係するものでした。私たちは、この運営のモデルを念頭に、任期無しの教授陣は必要ないと決めたのです。任期無しの教授陣を置くと、非常に多額の経費を要しますし、また、ケンブリッジでは概ねほとんど全員が教育の義務を負っているという意味で、ねたみを生じさせるでしょう。大学内で全く教育義務のないこのような教授職、あるいはある意味でこの研究所に与えられた特権と見えられるような教授職を新しく作り出そうとすれば、何らかの反対を引き起こすことになるでしょう。私は次のことが考慮すべきことのひとつであると思います—これが日本にぴったり当てはまるかどうかは分かりません。アメリカでは英国程強く当てはまるわけではないのですが—このような研究所を作ろうとすると、ケンブリッジ外の人たちはケンブリッジにできるからという理由で嫉妬するであろうし、ケンブリッジ内の人たちは研究所がこのような特別の条件を与えられているという理由で嫉妬するかもしれないという危険があります。

大栗 そうとも言えますが、別の見方もできると思います。サンタバーバラにITPができたと、嫉妬した人もいないかもしれませんが、ITPに属さないほとんどの教授たちは、これがジョセフ・ポルチンスキーやラース・ビルドステンのような研究者を惹きつける優れた手段であると納得したのではないのでしょうか。

ゴダード 勿論、ITPができる以前でもジム・ハートル、ジョン・カーディ、ボブ・シュガー、その他、優れた人々



ちがいましたが、ITPができたために物理学の大学院としてのサンタパーバラの地位が非常に上がったと思います。

大栗 ITPがあることにより、大学全体として利益を得ています。ですから、多分学内の多くの人がそこに価値を認めていると思います。

ゴダード そうですね。しかし、ケンブリッジではそれを認識してもらうことはもっと難しいのです。なぜなら、既に良いことが非常に多く起きているからです。

大栗 「我々はケンブリッジいるだけで、既に卓越しているのだから、それは必要ない」と言われるかもしれない訳ですね。

ゴダード そう言う人もいます。

大栗 ニュートン研究所の運営方式は政治的に決定されたということでしょうか。

ゴダード ええ、部分的には政治的な決定でした。また、部分的には財政的な理由によります。しかし、いずれにせよ資金を集めるのは難題でした。資金を集めるためにも、またこういった政治的な配慮もあり、私たちは少なくとも問題となる点を選避することに決めました。

大栗 ニュートン研究所は数学関係の建物群の中にあり、数学科と隣あっているため、非常に良く機能しています。

伝統的な大学エリアの外に建設されたニュートン研究所、数学科もそこに移転

ゴダード 現在はその通りです。私たちは、ある時点で、ケンブリッジ大学の中心部に研究棟を建てるのかどうか決断を下さなければなりませんでした。その場合には既存の建物ということになります。既に私たちはこの建物を研究者の交流を促進するように設計することが非常に重要であり、もし既存の建物を手に入れた場合、それを満足がいくように実現するのはほとんど

確実に不可能であると考えていました。既存の建物を切り裂いて内部を再構築するのは非常に高くつくからです。

大栗 それでケンブリッジ大学の伝統的なエリアの外に移ることを決断されたのですか？

ゴダード 多分それが主要な理由でした。2番目の理由は2つの学科（応用数学・理論物理学と純粋数学科）から構成される数学科は過密状態で、あらゆるスペースが既に満杯でしたから、私たちは新しいことは何もできず、多くのビジターを呼ぶと快適に過ごしてもらうことさえできませんでした。

大栗 以前の建物はシルバー・ストリートにありましたね。

ゴダード ええ。

大栗 何かの工場のような建物でした。

ゴダード よくお分かりですね。本を作る工場でした。その建物の中で大学の出版局が実際に本を印刷していました。

大栗 研究所が外に建設され、数学科がそれを追ってその場所に移ったということですね。

ゴダード 私たちは、もし研究所を大学の中心部に置いたとしても、数学科はどのみちある時点で移転しなければならぬかもしれず、そうであるならば多分我々がそう仕向けるべきであろうということを悟ったのです。その時、幸運にも私の所属するセント・ジョンズ・カレッジが7エーカーの未使用地を所有していました。それはもっと遠くのガートン・カレッジを拡張してケンブリッジに近づけるためにずっと留保されていたものです。利用されるかもしれないかと思いましたが、実際は数10年空き地のままでした。その土地はカレッジあるいは大学の目的とする用途に充てることになっていたのです。私たちがカレッジ内部で、数学科の移転に役立つかもしれない土地をカレッジが所有していないかという話を持ち出した際、カレッジのバルサー（財務担当のフェロー）、クリス・ジョンソ

ンがこの特定の用地について言及してくれたのです。実際は数学科全体がこの敷地にぴったり収まるということが分かりました。

大栗 いずれは数学関係の建物群をそこに建設するというビジョンを既にもっておられた訳ですね。

ゴダード 私たちは多分もっと時間がかかるだろうと考えていました。しかし、研究所が発足するやいなや、私は所長のマイケル・アティヤーのために連日そこに詰めて運営に携わっていたのですが、元の数学科の建物から1マイルの距離にあるということは実に不便だと感じました。思い立ってちょっと話をしに行こうという気にはならないでしょう。そういう人たちは余り協力しようという気にならないでしょう。研究所に余りありがたみを感じないでしょう。ある意味、1マイルというのは非常にまずい距離なのです。ロンドンに行くためには特段の努力をする人も、1マイルのためには必ずしも特段の努力はしません。それで、私たちは、ニュートン研究所の開設直後、数学科を隣に移転させるよう努力しなければならぬと決めたのです。

大栗 そして成功しました。

ゴダード ええ。それから私たちは資金を調達しなければなりません。そこでピーター・ランドスホフと私はマーティン・リースのような人たちの助けも借りて数学科の建物の建設資金の調達に着手しました。

村山 それは2重にお金のかかる計画だったのではないですか？あなた方は新しい研究所を発足させると同時に数学科を移転させたのですから。

ゴダード 私たちは既に研究所を発足させていました。ですから資金集めは数学科の新しい建物のためでした。

村山 なるほど。

研究者の交流活発化に成功したニュートン研究所の建物設計

大栗 さて、建物の話といえば伺いたいことがあります。初めてニュートン研究所を訪れた時、たちまち建物に魅

了されてしまいました。研究者にとって全く夢みたいによくできた建物で、中央に交流スペースがあり、オフィスから出るともうそこは議論のまっただ中です。しかし、自分の研究に集中したければ、すぐに自分のオフィスに戻れます。とても良く考えられており、非常にうまく機能しています。

ゴダード ありがとうございます。

大栗 その後Kavli IPMUも含め多くの研究所がニュートン研究所の建物を見習ってきました。こういう設計を考えたつくまでには、どんな経過をたどったのでしょうか？

ゴダード 建築家向けに概要を書きました。必要と考えたこと、実現を図ることが重要なこと全てをリストし、特に、研究者の交流を促進する必要があることを説明しました。まあ、その前に一つの方向性があったのですが。先ほど、あなたは色々な種類の研究所があって、違うことが行われていると言い、また教授陣の有無で区別しましたが、それに加えて研究所に研究者を呼ぶのが研究の交流を図るためか、あるいは一人で自分の研究をするためかということもあります。プリンストン高等研究所では、スクールによって交流の程度は違いますが、基本的に研究者は自分自身の研究を行います。交流の程度は、自然科学では多分、例えば歴史学より高く、社会科学は多分歴史学よりやや高いのですが、それぞれのスクールのスタイルだけによるもので、高等研究所はこういうスタイルの違いに対応可能です。IHESは研究者がオフィスで机に向かっているという点で高等研究所に近いと言えます。しかし、私たちはニュートン研究所で行われる研究活動は交流の程度が非常に高いものであるべきだと決めたのです。そういう選択をした訳です。研究プログラムを用意し、参加する研究者には本や論文を書く積もりで来ないでほしいと具体的に言おう。議論するために来るのだと。今あなたが言われたように、もし望むなら自分のオフィスに行き、自分の計算をする機会も必要で

が、方向性としては交流することなのです。私たちは、こういったこと全てを概要に盛り込みました。

大栗 多分、それは研究所の構想に最初からあった学際性に焦点を合わせることも関係していますね。

ゴダード その通りで、通常は互いに話をする事のない人たちを集めます。私たちはこういった一連の検討事項全てを書面にし、大学本部の専門家の助けを借りて建築事務所を幾つか、多分4つでしたが、選定しました。これらの建築事務所へ一旦集まってもらい、私たちは実際の学科を見せ、そこで行われていることで新たな研究所でも同じようにしたいことと、そこではうまくできていないことについて話をし、終日彼らに重要な点を説明しました。正式な書類も渡し、それぞれ一ヶ月で私たちが求めているものにどのように取り組もうとするのか、1～2時間のプレゼンに来てほしいと依頼しました。競争に勝った建築事務所は模型を持参しましたが、その模型は実際にあなたが訪れた研究所に概念的に非常に近いもので、中央に中二階があり、建物の中で何が行われているか誰もが分かっているということを強調するものでした。私はこれについて、ある意味、こういう風に考えるのです。建物に関する我々の経験には、そこで何をするかによって特徴的な時間スケールがあります。ケンブリッジの数学関連の建物群に学生としてやって来るなら、建物について経験する時間スケールは、2年、3年、あるいは4年になります。教員であれば10年です。もしニュートン研究所にビジターとして来るなら時間スケールは2～3ヶ月です。そして、建物についての経験がどのようなものになるかは、その時間スケールが影響します。例えば、もしどこかに2～3年滞在するなら、建物内をどこにどのように行くか時間をかけて学ぶことができます。

大栗 短い間しかいないなら、もっと直感的に分かるようであればいい

ゴダード 全くその通りで、すぐわかるようであればいいです。誰かに建物内を10分で案内してもらえば分かってしまうこと。それは交流のしやすさと一体のものです。一度建物内を案内してもらいオフィスに連れて行ってもらえば、もう建物内で起きていることは何でも分かってしまうわけですから。どこにコーヒーがあるか見てしまったら、二つのセミナー室の場所を見抜けるし、どこに図書室があるか分かります。さて、数学部の建物は隣なのですが、3年の時間スケールに基づいて建てられたものですから、あらゆる場所をくまなく知るにはある程度時間がかかります。そんなに分かり易くはありません。これもニュートン研究所に当てはまるのですが、自分のオフィスに行こうとすると、基本的にルートが一つしかなくて、中央部を通り抜けることになります。これに対して、数学部の建物では色々なルートでオフィスにたどりつきます。

大栗 時にはそうしたいと思うことがあるかもしれませんね。

ゴダード 中央ホールを通り抜けて自分の存在を示すか…これはイタリアの習慣に似ているのですが、イタリアでは、夕方、フィレンツェやシエナのような街の目抜き通りを、家族で自分たちの存在を示しながらそぞろ歩きをするのです。友達と会っておしゃべりするためなのですが。ニュートン研究所もそうするようにしているわけです。以前ヴラジミール・アーノルドの話をしたかどうか分かりませんが、彼はすごく陽気な人で、研究所の最初の研究プログラムのメンバーでした。少ししてから、私を呼び止めてこう言ったのです。「ここはとんでもなく健康に悪い建物ですね。」「何が悪いのですか？だれも苦情を言ってませんよ。」と私が言うと、彼曰く「いやいや、ここに来て、コーヒーを一杯飲んで、1時間もするとトイレに行きたくなります。それでトイレに行こうと部屋を出ると、たちまち誰かに呼び止められる。なんとか通り抜けると、また誰かが話

しかけてくる。そのうち、恐ろしいことになるんです。』

大栗 ええ、私も同じような経験をしました。建物の構造が直感的に分かりやすく、オフィスを出ると自然に議論の真っ最中でした。また、私が好きなのは、エレベーターの中に小さな黒板があるといったような、建物がもつ遊び心にあふれた要素です。私がいた時のことですが、『私はフェルマーの最終定理の驚くべき証明を見出したが、エレベーターに乗っている時間は短すぎて、それを書けない』と書かれていたのを覚えています。そして、勿論、実際にニュートン研究所でフェルマーの最終定理の証明が発表されたのは、その後すぐのことでした。

ゴダード わずか1年後でした。かなり早かったですね。

大栗 それでは、「驚くべき証明」はほとんどできていたのですね。

ゴダード ええ、そうです。

学術的研究所に必要な時間スケールの観念

大栗 あなたはニュートン研究所の副所長でしたが、何年務められたのですか？

ゴダード：正式には3年ですが、事実上その前に1年務めました。ですから、実際は開所以前に2年間、それから開所後に2年間、世話をしました。私は、発足1年後にこう決めました。2年経ったら辞めて他の人に続けてもらうのが実際は良いであろうと。同じようなことをあなたがスタートさせたら違う経験をするかもしれませんが、私の経験では、スタートさせた者が余り長くやると親子のような関係になってしまうので、解放してやる方が良いのです。

大栗 ある時点で子どもは親離れさせなければならない。

ゴダード ええ、私はそう思います。私はあらゆる実務を取り扱ってきたので、多くのことが私の研究室の机の上でファイルとして始まりました。今や建物全体、その他が完成したので、私はここで去ることが本当に良からうと

感じたのです。実際、私はサバティカルを取ってIHESに行く計画を立てました。

大栗 まさに意図的に研究所から離れようよと。

ゴダード ええ、次の年にです。ところが私のカレッジの同僚達が私をカレッジのマスター（長）に選んでしまったため、私の野望は阻まれてしまって捨てざるを得ませんでした。

大栗 それで、現在はニュートン研究所についてどのようにお考えですか？ こうなるであろうと予期した通りになったのか、それとも何か驚くことがありましたか？

ゴダード 20周年記念の時に研究所に戻りました。短い記念集会がありましたが、そこで話を頼まれました。私はそれまでのできごとを概観しましたが、研究所創設の際のモデルについて非常に満足を感じました。設立時、私は研究所には一少なくともこのニュートン研究所には、時間スケールの観念があるべきであると考えました。そして、ピーター・ランドスホフと私と他の人たちは、このサンタバーバラとMSRIタイプの交流のモデルがそれまでの20年間にもっとずっと広く普及し、恐らく次の20年、ことによたら多分50年かもしれないませんが、少なくとも20年は確実に、非常に良いモデルであろうということを確認したのです。次のように考えてみましょう。この研究所が20年存続し、その間良く機能する、そしてその後考え方を修正することになるかもしれない、20年の時間スケールを考えて恒久的な設備を取得する、等々。ですから20年後というのは、そういう時点に達した訳で、レビューをする良い時点なのです。研究所は今もまだ20年の視野が良い視野であると考えており、基金を増やす努力をしていると思います。私は基金が1千万ポンドに近づいていると思いますが、実際には少なくとも2千万ポンドの基金と、助成金の収入も必要です。しかし、私はニュートン研究所が貴重な貢献をしてきたと思います。

ですから、私は研究所がうまくいったことに満足しています。

(以下、*Kavli IPMU News* No. 27に続く)

Interview

フリーマン・ダイソン教授 に聞く

聞き手・福来正孝

フリーマン・ダイソンさんが2014年4月15日～19日に柏のKavli IPMUを、また20日～22日には神岡を訪問されました。この対談は、4月17日にKavli IPMUの福来正孝教授が企画した4時間にわたる特別Q&Aセッションの要約を主とし、これに翌18日に行われたインタビュー及び22日に神岡で行われたもう一つのQ&Aセッションの内容を補って構成されたものです。(以下、本文中敬称略。)

福来 あなたはウィンチェスター・カレッジで学ばれました。この伝説的なカレッジについてお話しいただけませんか。

ダイソン ウィンチェスター・カレッジは、650年前にカトリック教会の司教で国王の側近であったウィカムのウィリアムによって創設されました。彼は有能な行政官でした。オックスフォード大学のニュー・カレッジ

を含む、学校などの基金によって支えられた6機関を設立しました。ウィンチェスター・カレッジに入学を許可されるには、12歳の年に極めて難しく厳しい競争を勝ち抜かなければなりません。ラテン語とギリシャ語を含む10科目の試験が行われます。数学は2科目あり、純粋数学と応用数学です。現代語の試験もあります。父がこのカレ

フリーマン・ダイソンさんは12歳から17歳までイギリスの有名なエリートパブリックスクール、ウィンチェスターカレッジで教育を受けました。そしてケンブリッジ大学の数学科に入学し、アブラム S. ベシコヴィッチ教授の指導を受けました。その後、第2次世界大戦の激化に伴い、イギリス空軍で勤務しました。戦争が終わって1年後、ケンブリッジに戻り、徐々に理論物理学に転向しました。その後ダイソンさんはコーネル大学に行き、ハンス・ベークの下で研究しました。1948年にはプリンストン高等研究所を訪問し、そこで量子電磁力学に関する偉大な研究が完成しました。私たちが現在習う場の量子論はダイソンさんの定式化によるものです。この研究は、数学的頭脳の持ち主が物理のごたごたをきれいに片付けて美しい理論を創る格好の例として上げてよいでしょう。ダイソンさんは1951年にコーネル大学教授となり、1953年にプリンストン高等研究所自然科学部門の教授に招かれました。それ以来60年間同研究所教授（現在は名誉教授）を務

めています。ダイソンさんは90歳を超えたところですが、今でも活発に科学の研究を行っています。

長い研究生活において、ダイソンさんは驚異的に数多いテーマを研究してきましたが、しばしば同時に2つあるいはそれ以上の研究テーマを手がけることがありました。数論に始まり、ダイソンさんが研究したテーマには次のようなものがあります。

- 量子電磁力学 一場の量子論の基礎
- 統計力学と物性物理学
- ランダム行列
- 物質の安定性
- 補償光学
- 原子核工学、宇宙空間飛行の推進力としての原子力
- 生命起源のモデル
- 物理定数の時間変化
- 二酸化炭素問題、その他

現在、ダイソンさんは重力子の検出(4月16日に柏で、また21日に神岡でコロキウムを行った)の他、ゲーム理論、数学的問題としての囚人のジレンマを研究しています。

ッジの教師だったので、私は3歳の頃からカレッジに慣れ親しんだやんちゃ坊主でした。男子校で、生徒数は70人、学年当たり15人です。今に至るまで変わっていません。このカレッジは現在でも昔と同じやり方で名声を誇っています。私は今でも度々訪れています。

卒業生は学者になるとは限らず、銀行家になる者もいれば官僚になる者もいます。イギリスは非常な階級社会で、実業家はコマーシャルな中流階級、大学人や官僚はアカデミックな中流階級であり、相互に反目し合っています。私たちアカデミックな中流階級は、自らを学校における優等生と自負し、コマーシャルな中流階級を見くだしていました。この伝統は変わることなく続いてきましたが、コマーシャルな中流階級を確固たる権力の座につけたマーガレット・サッチャーによる復讐によって終わりを告げました。

カレッジでは14世紀に建てられた建物に居住しました。壁が厚く、夏は涼しく冬は暖かい建物です。暖房や冷房の必要は余り無く、快適に暮らせます。教育は極めて自由なスタイルで行われます。最高学年では教室にいるのは週にたった7時間でした。ですから私たちには何でも好きなことを勉強する時間がたっぷりありました。

福来 あなたはウィンチェスタ

ー・カレッジの時に数学者になると決めたのですか？

ダイソン いえ、もっと若い時です。私の頭の中から数学が生まれてきました。私は数が大好きで、3歳くらいの頃から計算しては喜んでいました。これは音楽家が3歳でピアノを弾き始めるのと同じです。数学も同じなのです。私は数学が一番得意だと分かっていました。12歳でカレッジに入学した時には既に数学者になろうと決めていました。

カレッジの図書館にカミーユ・ジョルダンの「解析教程」がありました。それは19世紀の数学全体を含んだ3冊の分厚い本でした。1900年頃に書かれた古典的著作で、フランスのエコール・ノルマルで教科書として使われていました。この本が図書館にあったのは奇跡でした。私の同級生で有名な数学者になったジェームズ・ライトヒルが図書館でこの本を見つけ出し、二人で読んで話をしました。

G.H. ハーディーは既にケンブリッジでは老人でしたが、イギリスで最も有名な数学者でした。彼は40年前にウィンチェスター・カレッジで少年時代を

福来正孝さんはKavli IPMU教授です。2007年10月から2012年3月まで同主任研究員を務めました。また、福来さんは1988年以来プリンストン高等研究所自然科学部門の非常勤メンバーです。従って、フリーマン・ダイソンさんとは25年に渡って付き合いが続いています。



過ぎました。彼の自伝に「解析教程」が出てくるので、この本をウィンチェスター・カレッジに持ち込んだのは彼ではないかと私は強く感じています。他の誰かが持ち込んだとは想像できません。残念ながら、私はこのことについて彼に一度も聞いたことはありませんでした。

福来 それからケンブリッジ大学に入学されたのですか？

ダイソン 1941年にケンブリッジの数学科に入学しました。数学科と物理学科は別でした。当時、物理学はまだ自然哲学と呼ばれていました。数学は物理学者からフランス病と思われていました。

当時、第二次大戦の最中で、教室にはほとんど学生がいませんでした。ほとんどは戦地で戦っていました。ハーディーとジョン E. リトルウッド、アブラム・サモイロヴィッチ・ベシコヴィッチが講義をしていましたが、学生はほんの少数でした。私たちは教室で座るのではなく、一人の先生と数人の学生が小さなテーブルを囲んで座りました。その時に学生であったことは実に幸運でした。

私は測度論の専門家であるベシコヴィッチの学生でした。彼はロシアからやってきて、非常に強いロシアなまりの英語を話しました。ベシコヴィッチは私に問題を解かせました。私はロシア語が好きでした。それで、

私たちはロシア語で話をしました。私たちはケンブリッジでしばしば長時間の散歩をし、その間は英語で話をしないことになっていました。私はベシコヴィッチのスタイルに影響を受けました。構成的なスタイルです。ベシコヴィッチは単純な構成要素から彼の数学的証明に使われた美しい構造を創る能力に長けていました。私は物理の計算に同じスタイルを用いました。

1937年にラザフォードが亡くなった後、ケンブリッジの物理は衰退期にありました。物理学ではディラックがただ一人の教授でした。ディラックは誰とも交流しませんでした。エディントンもいましたが、彼は天文学者でした。私たちは彼を物理学者とは見なしていませんでした。私がいた頃、ローレンス・ブラッグが物理学科の責任者でした。ラザフォードが亡くなって、彼が後継者になりました。彼はその時こう言ったのです。「ラザフォードは世界一の物理学者だったが、私は違う。従って、我々は別のことをするべきだ。」それは全く見事な知恵でした。彼は、物理をせずに、それに代わる新しい2つの研究課題、分子生物学と電波天文学を研究するという実に驚くべき決断を下しました。

マーティン・ライルが軍用のレーダー装置を持ち込み、宇宙からの信号を受信し始めまし

た。電波天文学にとってはイギリスの天気が曇りであろうと雨であろうと問題ではありません。彼はたちまち幾つかの大発見をしました。分子生物学グループではマックス・ペルーツとジョン・ケンドリューがリーダーになりました。ブラッグが導入した2つの研究課題は両方とも非常に成功を収め、ケンブリッジ大学は両分野における世界のリーダーとなりました。

ケンブリッジで2年を過ごした後、私は1943年から1945年までイギリス空軍で勤務しました。大戦中の凄惨な時代でした。私はイギリス空軍の爆撃機軍団で民間人科学者としてドイツに対する戦略爆撃に関する情報収集を行っていました。1945年にドイツに対する空襲が終了した後、イギリスはまだ巨大な爆撃機団を擁しており、私は日本に対する空襲を行うため沖縄に派遣されるところでしたが、8月に戦争が終わり、もはや空襲は必要無くなりました。本当に救われました。もう人を殺さずに済んだのですから。原爆のおかげで戦争が終わったことをありがたく思いました。当時、誰もが原爆のために日本が降伏したと考え、また、そう聞きました。最近、私は日本が降伏した本当の理由は原爆ではなく、北方からのソ連軍の侵攻であると主張する歴史学者の長谷川毅の著書 (*The Northern Territories*

Dispute and Russo-Japanese Relations, University of California, International and Area Studies, 1998) を読みました。日本は北からのロシア軍と南からの米軍を防げなかったため、日本軍の指導者は、原爆を不名誉な降伏の口実としてアメリカに降伏し、ロシアを閉め出す方がましであると考えた、という主張です。今、私は長谷川の主張に同意するもので、広島に原爆を投下しなければ良かったと思っています。原爆は思ったほど重要ではなかったのです。

福来 ケンブリッジ大学はニュートン、マクスウェル、ディラックを輩出してきた数理論物理学の名門であり、彼らに続いてあなたがおられます。ケンブリッジが成功してきた理由は何なのでしょう？

ダイソン 子ども達は、学校で、どの国も特に得意とするものが一つあるというイメージを教わります。ドイツは音楽、フランスは絵画、そしてイギリスは科学です。イギリスでは才能のある若者がこれに刺激を受けてケンブリッジに入学し、科学者になります。有名なケンブリッジ大学の最終的な優等学位の試験(トライポス)によって、この傾向が更に高まりました。

福来 あなたが数学から物理学に変わった理由は何だったのでしょうか？

ダイソン 広島に原爆が投下さ

れた日のニュースは、「広島が攻撃された」ではなく、「新しい自然の力が利用された」というものでした。それは、新しい科学が出現したことを意味するものでした。私は原爆を用いたとは思いませんでしたが、原爆から派生した知識を用いることを望みました。突然、原子核物理学が流行の研究テーマとなり、物理を学ぶ動機となりました。まだ量子力学は新しく刺激的でした。一般相対論もまた刺激的でした。物理学では色々なことが起こり続けていました。そこで、私はハイトラーの「輻射の量子論」の勉強を始めました。2年後にコロンビア大学でウィリス・ラムが水素原子のエネルギー準位を測定する実験を行うという素晴らしいできごとがありました。

私は物理を学ぶためにケンブリッジに戻りました。私の先生はニコラス・ケンマーで、場の量子論を教わりました。私はアメリカに行くことを希望しました。流体力学の権威で、ロス・アラモスで働いたことのあるジェフリー・テイラーが即座に私にコーネル大学に行くべきであると言いました。コーネルにはハンス・ベーテがおり、そこにロス・アラモスから若手の優秀な物理学者が皆移って研究をしていました。私はコーネルについて何も知りませんでしたが、とにかくそこに行き、ベーテの

下で研究しました。コーネルに着いたのは1947年の9月でしたが、コロンビアの実験で水素原子の2P状態と2S状態の間に1050メガヘルツの差が見出されたことを知りました。旧来のディラックの量子力学は正しくなかったのです。私はベーテが見事にそれを説明したことを知りました。わくわくするできごとでした。コーネルは、私にとって、正しく丁度良い時にいるべき丁度良い場所でした。その当時、リチャード・ファインマンはコーネル大学の若き教授でした。

1948年初めに、オッペンハイマーが日本の新しい学術誌 *Progress of Theoretical Physics* を一束受け取りました。彼はそのコピーをベーテに渡し、ベーテがそれを私に見せました。私は朝永の論文を見つけましたが、彼は我々より先に何もかもやっちゃってしまっていました。また、私たちは、繰り込みのアイデアを説明するハンス・クラマースの研究が1948年のソルベイ会議で発表されることになっていた論文として1年前に出たことを知っていました。

私は1948年にパークレーを訪問した時、化学者のメルヴィン・カーヴィンに強い感銘を受けました。彼は炭素原子の分子間の移動を数秒間追跡することにより、光合成、すなわちどのようにして二酸化炭素が吸収さ

れ、糖に変換されるか、を理解するため、初めて炭素の短寿命放射性同位元素を利用しました。1秒毎に化学反応がどのように進むか。生物学に対して、初めて原子核物理学が応用されたのです。その時以来、放射性的トレーサーを用いて生物学は急速に発展しました。オッペンハイマーは、生物学に対する原子核物理学の応用は原爆よりも重要であると述べました。

福来 当時、プリンストン高等研究所はどんな様子でしたでしょうか。

ダイソン 私がプリンストンに行った時、アインシュタインがいました。私は彼がプリンストンに来たのは大間違いだったと思います。彼にはカリフォルニア工科大学 (Caltech) に行くかプリンストンに行くか2つの選択肢がありました。Caltechでは教育義務があるという理由で彼はプリンストンを選びました。プリンストンでは教育の必要が無かったので、学生との接点を失いました。古いドイツ流の教授として、彼は自分の奴隷とでもいうべき助手をもっていました。私がいた頃、アインシュタインの最後の助手はブルリア・カウフマンでしたが、彼女自身、優秀な物理学者でした。カウフマンは私に「アインシュタインの助手は履歴の上では非常に良く見えるけれど、実際はうんざりするような仕事です。」

と言いました。彼女のすることは機械的な計算だけでした。

アインシュタインの周りでは、新しいサイエンスの研究をしている数多くの若手研究員が近くの建物にいました。アインシュタインは私たちがしていたことに全く興味を示さず、決して私たちに話しかけませんでした。彼はセミナーにもランチにも全く来ることがありませんでした。ですから彼と高等研の若手メンバーとの間には何の交流もありませんでした。私は、部分的には我々にも責任があったにせよ、大部分は彼の落ち度であったと思います。私たちは若くて傲慢で、彼から学ぶものが余りあるとは思っていませんでした。

福来 アインシュタインと話したことがありますか？

ダイソン いや、全然ありません。彼は子ども好きで、実際、子ども達とはとても仲良しでした。

長いことアインシュタインの秘書を勤めたヘレーネ・ドゥカスは賢く有能な婦人で、またアインシュタインの私生活と個人的問題に関しては猛烈な守護者でした。私たち家族は彼女とは親しい仲でした。アインシュタインの死後、彼女は度々私の家にやってきました。私の子ども達は彼女を祖母の代役として家族のように接していました。ある雨の夜、高等研に1台のトラックが来て、彼女が集めて大事に



保管してきたアインシュタインの書類をすべて運び出しました。その書類はアインシュタインが遺言で指示したとおり、エルサレムのヘブライ大学に向けて送り出されました。ヘレーネはその数日後に亡くなりました。

ポーアはしばしば高等研にきました。アインシュタインとは全く違い、彼は新しい実験に非常な興味を示しました。私たちのセミナーに来て、ランチを共にし、若手と話をしました。その後ニューヨークの国連で、デンマークを代表する外交官として働き、原子力と核兵器の国際管理を推進する運動を行っていました。しかし、彼は新しい物理に興味を持ち続けました。

朝永もプリンストンにきました。私は彼が大好きでした。残念なことに、彼は私がプリンストンを離れる週に到着しました。それで、短い間しか話ができませんでした。全く無私無欲の人で、シュヴィンガーとファインマンがやった仕事の大部分を彼らより5年も早くし遂げていたのですが、決してそうは言いませんでした。朝永は彼の学生達が東京で大変な苦勞をし

ているのを分かち合えないことに罪悪感を覚えていました。プリンストンの快適な環境にいることを心苦しく思い、早期に日本に戻る機会を捉えました。

福来 ヴォルフガング・パウリはどんな様子でしたか？

ダイソン パウリは私が行く前にプリンストンを離れてしまいました。戦争中はずっと高等研に滞在しており、アインシュタインとは親しくして会話を楽しんでいました。しかし、高等研では孤独で、余り合わせではなさそうな様子でした。戦後、彼はスイスに落ち着き、戦争前に住んでいた時は拒否されていた市民権を遂に手に入れ、プリンストンには戻って来ませんでした。

私は1951年にスイスでパウリと知り合いました。パウリは大きな精神的問題を抱えていましたが、幸いにもめずらしくとても調子の良い時で、医者や奥さんの指示を無視していました。私たちはとても親しくなり、彼はリラックスしていました。毎日一緒に散歩に出かけ、大いに物理について語りました。私たちは、道々、アイスクリームの店があると必ず立ち寄りまし

た。なぜなら、彼は医者からアイスクリームを禁止されていたからです。当時は宇宙線実験が高エネルギー物理の最先端でしたが、彼は進行中の実験の結果をすべて理解していました。私は量子電磁力学の摂動展開の収束について研究していましたが、パウリは発散すると断言しました。私はその級数が収束することを説得しようとしたのですが、彼は同意しませんでした。結局、今は彼が正しかったことが分かっています。私はその級数の発散について論文を書くことができたので、パウリの手助けに感謝しており、不満はありませんでした。

福来 ディラックについてはいかがですか？

ダイソン ディラックは頻繁にプリンストンにやってきました。彼は若い時の寡黙で近寄り難い性格から、年を取って話し好きで親しみやすくユーモアのセンスにあふれた性格に変わりました。アインシュタインと同様、彼は自分好みの理論—うまくいかないことが分かった「大数仮説」、それから私には全く理解できなかった「負計量の場の理論」—に固執しました。年を取ってからは、何が正しく何が間違っているかを直感的に推測する能力を失ったように見え、どんどん普通の人になっていきました。ディラックについては随分ナンセンスなことが書

かれてきましたが、彼は飛び抜けて風変わりな人ではなく、飛び抜けて聡明な人でした。

福来 ハイゼンベルクはプリンストンに來なかつたのではないですか？

ダイソン ハイゼンベルクは高等研には來ませんでした。一度アインシュタインを訪ねました。ヨハンナ・ファントヴァの日記に記録があります。彼女はオーストリア系ユダヤ人で、その家族はアインシュタインがブラハのドイツ大学で働いていた1912年に彼と知り合いになりました。20年後、彼女はベルリンでアインシュタインの友人となり、彼の蔵書を整理したり湖と一緒にヨットに乗ったりしましたが、更に20年後、プリンストンで同じことが繰り返されました。彼女はプリンストンで、アインシュタインのアドバイスに従い、司書の資格を得るための講習を受け、大学の図書館に職を得ました。彼らはカーネギー湖でヨットに乗りましたが、彼女は日記をつけていましたが、最近、それが出版されました。この日記からプリンストンでのアインシュタインの生活を垣間見ることができます。その中に、アインシュタインをハイゼンベルクが訪れたことと、ポーアが訪れたことが出てきます。どちらも彼女に良い印象は与えず、ハイゼンベルクは未だに大ドイツを夢見るナチスの大

物、ポーアはアインシュタインが疲れ果てるまで話を止めようとしない、と書かれています。

ハイゼンベルクもまた晩年には自分の理論である「スピノル場の理論」に打ち込みました。彼は自分の助手にその研究をするように要求しました。私の知っている助手はハンス・ペーター・デュールですが、彼のキャリアはこの仕事で台無しになってしまいました。ハイゼンベルクは死ぬまでスピノル場の理論をあきらめませんでした。

福来 朝永以外にプリンストンを訪れた日本人科学者について、何か印象をお持ちですか？

ダイソン 湯川はプリンストンに来ましたが、物理はしませんでした。彼はプリンストンに政治家として、恐らくは日本の科学のシンボルとして、やってきました。広報活動のため、あるいは外交官として働き、国連で公式の場に姿を見せました。彼とは数回会いましたが、物理について話したことはありません。

浅野太郎は東京大学から来た若手の数理物理学者で、私が高等研に招待しました。彼は量子強磁性体に関して立派な研究をしました。しかし、いつも一人でいて、内気で話し相手の友人もなく、同僚にも余り話しかけませんでした。恐らく言葉の問題だったと思います。夏になる頃、落ち込んで、姿を見せなくなりました。任期終了後、スプリン

グデール街で車を飛ばし、大型車との正面衝突事故で亡くなりました。大変残念なことでした。遺骨とともに日本に帰国する浅野夫人に付き添い、私は初めて日本の地を踏みましたが、空港の外には出ませんでした。

福来 谷山豊のエピソードを思い出します。彼はアンドレ・ヴェイユによって高等研に招待されましたが、渡航前に自殺し、婚約者も後を追いました。

ダイソン アンドレ・ヴェイユはとても親切な人間です。もし谷山がプリンストンに来たとしたら、よく世話をしたことでしよう。私が若い学生としてシカゴ大学を訪問した時、ヴェイユは3時間もの長い散歩に連れ出し、色々なことを話してくれました。彼は怖いという評判でしたが、私はそう思ったことは一度もありません。彼には二面性があったのかもしれませんが。

福来 ヤンとミルズの仕事からは何か影響を受けましたか？

ダイソン ヤンは夏の間ブルックヘブンにいて、ミルズとこの仕事をしました。当時、私は素粒子物理ではなく、ランダム行列を研究していました。ヤンの動機はゲージ理論を宇宙の根本的な機構としようというのではなく、アイソスピンのゲージ理論を作ろうというものであったと思います。当時、パウリがプリンストンに滞在中でしたが、非常に否定的で、ヤンのゲージ



場は質量を持たないため、自然とは何の関係もなく、従って興味なしと考えました。彼の意見は、ヤン自身も含め、人々に大きな影響を与えました。

福来 ヘルマン・ワイルやヨハン・フォン・ノイマン、カール・ジーゲルといった有名な数学者との交流はいかがでしたか？

ダイソン 私がプリンストンに来た直後、ヘルマン・ワイルはチューリッヒに、カール・ジーゲルはドイツに、それぞれ移りました。私は有理数による代数的数の近似に関するジーゲルの定理を強めたため、彼は私のことを知っていました。ヘルマン・ワイルもなぜか私のことを知っていたようで、私が高等研の教授に採用されるように助力してくれました。私が教授として高等研に着任した後、すぐに彼らは去ってしまいました。ですから、余り交流はありませんでした。私が良く知っているのは、もっと長い間高等研にいたヨハン・フォン・ノイマンだけです。彼は熱心に電子計算機プロジェクトに携わっていました。私はこのプロジェクトに非常に興味がありましたが、高等研の人た

ちの大多数は興味を示しませんでした。オープンハイマーも興味を持ちませんでした。フォン・ノイマンが高等研を去った後、何人かがそのプロジェクトを生き延びさせようとしたましたが、私もその一人です。

気象学者のジュール・チャーニーがプリンストンに来てフォン・ノイマンの計算機で気象モデルの計算をしました。彼は計算機プロジェクトの終了と共に去りました。高等研は大きな機会を逃してしまったのです。ケンブリッジがブラッグのリーダーシップの下で分子生物学と電波天文学の中心となったように、高等研は気候の研究と計算機科学という2つの新しい科学の中心になれたかもしれなかったのです。私はチャーニーを高等研教授に採用し、計算機の研究プログラムを救うことを提案しましたが、私の努力は散々な失敗に終わりました。オープンハイマーは何の興味も示さなかったのです。

計算機プロジェクトは、フォン・ノイマンが去った後1年ほどで中止する前に短期間プリンストン大学に移管されました。

20年後、MITとIBMが計算機科学の中心となり、気候科学はUCLAとノルウェーが中心となりました。私はこれを大変残念に思っています。高等研が計算機プロジェクトを中止したことは、恐らく2つの新しい科学の成長を20年遅らせたのです。

福来 オッペンハイマーについてはいかがですか？

ダイソン ロバート・オッペンハイマーは複雑な性格の人でした。ハートランド・スナイダーと一緒に彼の学問的成果として最も重要な、ブラックホールを理解する研究をしました。彼らは、内部圧ゼロの重い物体はアインシュタイン方程式の帰結として永久自由落下状態となることを示しました。彼らはアインシュタイン方程式に従う宇宙にはブラックホールが存在することを予言したのです。ここで新しい物理は必要ありません。アインシュタイン方程式だけで十分なのです。それは素晴らしい論文でした。Physical Reviewの1939年9月1日号に載りました。しかし、それは最悪のタイミングで、その日、ヒトラーがポーランドに侵攻し、第二次世界大戦が始まりました。それで、誰もその論文に注意を払わなかったのです。

アインシュタインは全くブラックホールを信じていませんでした。それどころか、ブラックホールは存在できないという論

文を書いたのです。オッペンハイマーも二度とこの問題に立ち戻ることはありませんでした。宇宙でブラックホールの候補が複数個発見された後でさえ、彼はブラックホールについて語ることを拒否しました。私は彼とブラックホールについて話をし、なぜそれが面白いのか説明しようとしたのですが、そうすると彼はいつも話題を変えてしまいました。どうしてなのか、私には分かりません。ブラックホールは、その父からも祖父からも嫌われた息子でした。

オッペンハイマーが評価できなかった重要な天才二人について触れたいと思います。一人はフリッツ・ツヴィッキーで、驚くような新しいアイデアにあふれていました。彼はダークマターを発見し、そして超新星に2つの主要なタイプがあることを発見し、そして中性子星を予言した天文学者でした。今は彼は評価されていますが、生前は全く評価されたことはありませんでした。オッペンハイマーはCaltechでツヴィッキーと一緒にいた時も決して彼に話しかけようとはしませんでした。アインシュタインがCaltechを訪れた時も彼には興味を示さず、一度も話しかけませんでした。私はツヴィッキーとは会ったことはありません。もう一人はジョン・ホイーラーです。彼もまた認められませんでした。オッペン

ハイマーは彼のことをものすごく嫌っていました。ツヴィッキーとは違い、ホイーラーは難しい人間ではありませんでした。多くの学生をもち、非常に寛大でした。彼が示唆した問題についてファインマンが上げた研究成果については、完全にファインマンの業績としました。彼は極端な愛国者で、極右で、150%アメリカ人といった人間で、政治的にはオッペンハイマーと正反対の立場でした。ホイーラーはブラックホールの中心的な主唱者でした。オッペンハイマーがブラックホールについて話したらなかったのは、ひょっとするとこれが理由なのかもしれません。オッペンハイマーは彼と話すことを嫌いました。ツヴィッキーとホイーラーは、二人共もっと評価されて然るべきです。

福来 あなたがこれまでの研究生活で経験された中で、最も驚いたことは何でしょうか？

ダイソン ウィークボソンの発見です。私はワインバーグとサラムの理論を真剣に受け止めませんでした。独自に弱い相互作用の理論を作ったのです。ですから、弱い相互作用のベクトルボソンの発見は驚きでした。実に見事な発見でしたから、私が見違っていたことが証明されて満足でした。

福来 数理論理学者として、数学と物理学の関係をどのように

お考えですか？

ダイソン 本当に溝があったのは純粋数学と応用数学の間です。純粋数学者は違う言葉を話していました。ブルバキが流行の純粋数学でしたが、私はそんなに興味はありませんでした。「脆弱層」についての講演を思い出します。誰かが脆弱層とは何なのか質問しました。座長のアンドレ・ヴェイユがこう言いました。「それは既にクラシックな専門用語になっているので、説明する必要はありません。」私はそれが何のことも全然理解していませんでした。私はファイバー束は理解するようになりましたが、そこから先には進みませんでした。どうも純粋数学は極端に抽象的になってしまっていました。私にはそれが稔りの多い方向とは思えません。私は応用数学に留まる方を好みました。

超弦理論と数学の間を隔てるものは無いように思えます。互いに理解しています。超弦理論とそれ以外の物理の間には大きな障壁があります。新しい動向として、計算機科学者と数学者の間に良好な接点が現れています。高等研の数学部門には今や計算機科学を研究する教授が2人います。一人はヴォエヴオドスキーです。彼は計算可能性の数理論理学を研究しています。

福来 物理学の現状をどのようにお考えですか。どんな研究を

奨励したいと思われませんか？

ダイソン 物理はスピードが遅くなりました。60年前は6ヶ月で実験が終わり、結果は6週間で説明されました。今は実験に20年かかります。高エネルギー物理以外では、まだすることが数多くあります。小規模な研究はまだ盛んです。素粒子物理は特殊なケースです。素粒子物理でさえ、ハーバード大学のガブリエルスによる電子の電気双極子モーメントの測定のような小規模実験は、最先端研究の一例で、新しい発見のチャンスもあります。

天文学の進歩は大変なものです。20年前、私たちは宇宙のほんの一部、赤方偏移が僅か0.2までしか知りませんでした。今や、私たちの知っている宇宙の範囲がとてつもなく広がりました。宇宙をビッグバンにまで遡って観測し研究できます。天文学は、地球上の、あるいは大気圏外の小さな装置で多くの重要な研究を行えます。ケプラーは小さな衛星ですが、極めて成功しています。南極におけるマイクロ波異方性実験、BICEP2は多額の予算は必要とせず、ケプラーと同様に成功しています。政治はビッグ・サイエンスに注意を集中し、ビッグ・サイエンスはまたメディアから過剰に注目されます。私はできる限り幅広い分野の研究を奨励したいと思います。特に天文学では

研究するべきことが山のようにあります。ツヴィッキーは単一目的の装置の優れている点を強調しました。ケプラーはその見事な一例です。他にも例を見出すことができますでしょう。

福来 素粒子物理についてはいかがでしょうか。

ダイソン 私はLHCについては批判的に見えています。どのイベントも興味のない粒子の膨大なバックグラウンドによって複雑になっています。探しているものを拾い出すために具体的にソフトウェアを書かなければなりません。予期したものしか発見できないのです。発見するものは、どれも予言できるものです。LHCは予期せぬ発見はできないのです。加速器は未だに高周波加速を用いています。単位長さ当たりの電圧は半世紀前と同じです。普通のレーザーは1000倍も強い電場をもっています。レーザーの電場を加速に用いることを研究しなければなりません。同じ加速原理を用いるもっと大きな加速器は、取るべき途としてよろしくありません。

素粒子物理にとって進むべき道は幾つかあります。地下実験の測定器には将来性があります。測定器中で起きるあらゆる事象を検出できます。日本とカナダの2ヶ国は、地下実験の測定器利用に関して、良い研究者が余り金をかけずに世界をリードしています。そのプロジェク

トは、加速器に大きな予算を注ぎ込んだアメリカとヨーロッパのプロジェクトよりも費用対効果が優れています。神岡実験は非常に良い実験で、既に幾つか重要な結果を得てきました。この実験では、いつでも予期せぬものを検出する準備ができています。私はこの実験とその次期計画を強く支持します。長い時間待たなければならぬかもしれませんが、予期せぬ発見の機会が十分にあります。

一般的に実験研究者は予期せぬことが起きることに備えておかなければなりません。これは理論研究者にも当てはまりません。一つのことに固執するべきではなく、多くの研究テーマを考えるべきです。一つの研究に飽きたら、さっさと別の研究に取りかかるべきです。私は長い研究生生活でずっとそうしてきました。

超弦理論は美しい理論です。いつか自然と何らかの関係があることが分かるかもしれません。現在は超弦理論は数学に近く、他の物理との間には非常に広いギャップがあります。超弦理論には良い問題がそんなにあるわけではなくて、1万人の人が研究を進めるわけにはいきません。私は超弦理論自体は心配していませんが、学生を訓練するには幅の狭いことを懸念しています。超弦理論以外には学生の就職先が無くなってしまい

ます。5年毎に専門を変えることにすればこの問題の解決に役立つでしょう。素粒子物理から抜け出すことは簡単ではありません。他の分野から抜け出すのはもっと簡単です。

私は超弦理論からゲノム科学に転向した人を何人か知っています。ゲノムの95%は遺伝子ではありません。このゲノムのノンコーディング領域はタンパク質情報をコードしませんが、私たちはそれがどんな機能を果たしているのか理解していません。チンパンジーとヒトの間で著しい違いが見られる、人特有のゲノムの領域である「ヒト加速領域」の発見が、新しい科学の始まりを促すこともあり得ます。新しく登場した科学に移行するためには、私たちは柔軟で、いつでもそうする覚悟ができていることが必要です。

若い頃、私は人と競争して難しい計算をやりました。哲学的な問題には関心がありませんでした。私には哲学は文学の一分野で、科学の分野ではありません。科学とは、私が問題を解くために使った道具の集積です。年取ってから、私は競争的な科学の研究を行うよりは、本を書いたり雑誌に論文を書いたりしました。ですから、私の仕事は年齢と共に変わってきました。



気候?それを説明するには相当時間がかかります。簡単に言えば、私は気候に関して一般的になっている心配には懐疑的です。オークリッジ国立研究所には、50年前に始まった非常に優れた気候研究プログラムがありました。流行になる前のことです。アルヴィン・ワインバーグが所長でした。彼は現実の世界を理解しなければならないということを主張していました。私は彼と数年間一緒に研究しました。土壌や樹木や草、微生物、あらゆる種類の生態学に関心を持っている生物学者が多数参加していました。加えて、気候を理解したいと思う物理学者がいました。ですから、その研究プログラムは良くバランスが取れたものでした。

大気中の二酸化炭素について言えば、その効果の半分は気候に関係し、半分は生態学に関係します。二酸化炭素は植物の強力な成長促進剤で、水と置き替わることができます。しかし、空気の成分としては二酸化炭素は非常に僅かで、通常は水蒸気の方が多いということが限界になります。仮に植物の葉に二酸化炭素分子1個を取り込む穴をあけるとしましょう。穴が開いている間に100個の水分子が放出され、従って葉は二酸化炭素を吸収するより速く水を蒸発させます。もし空気中の二酸化炭素がもっと多ければ、二酸化炭素吸収過程はも

っと効率的で水の蒸発量はもっと少なく、植物の生長が促進されるでしょう。生物学にとって二酸化炭素の効果は相当なものです。100年前に比べて、空気中のCO₂は30%増加しました。その結果、草木や原始林、それから食用作物もほぼその半分増えました。つまり、CO₂が30%増加したことにより、エネルギー源として利用される生物資源、バイオマスが15%増えました。これは一般の人たちには余り知られていないことです。

気候にとって、二酸化炭素は問題として易しい方です。膨大かつ複雑な二酸化炭素のフィードバックと再循環がありますが、測定可能であり、かなり良く理解されています。水蒸気はもっとずっと難しい問題です。存在量ももっと大きく、温室効果も大きいです。海からの二酸化炭素の蒸発は大した効果ではありません。水の蒸発の方がずっと大きく、重要性においてCO₂の効果を圧倒します。水蒸気は熱を強く吸収しますが、また凝縮して雲になる傾向があります。これが問題を難しくする理由です。植物も莫大な水蒸気源であり、従って水循環と結合しています。水の蒸発は最終的な効果にとって極めて重要です。それが計算が非常に難しい理由です。もし二酸化炭素を取り扱うだけで良ければ、問題は簡単です。

二酸化炭素は気候温暖化の原因になります。これは深刻に懸念されています。残念なことに、国連は気候の研究のために、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)委員会を設置しました。彼らはその研究プログラムの定義に、気候に及ぼす人為的效果を調べるべきであると書き込みま

したが、非人為的效果を調べることは想定しません。このプログラムは最初から極めて偏ったもので、私が闘っているのはこの点です。彼らがしていることに単純に反対しているわけではありません。国連のために働いている科学者は人為的原因による気候変動を調べることのみが許されています。

気候は難しい問題です。特に、雲が決定的に重要ですが、不適切に取り扱われています。シミュレーションでは解像度が不足しています。全球気候モデルでは100 kmにわたる平均を取りますが、実際の雲には垂直方向に1 km、水平方向に10 kmの解像度が必要です。モデルがしていることは雲のモデル化ではなく、地域の平均雲量を表すために任意係数を持ち込むことです。現状では気候の理解は不十分です。私はこのモデルを信用しません。

17世紀に70年間太陽活動が不活発だった時に小氷期があったことも覚えておきます。世界中が気候の寒冷化に苦しみました。太陽活動と気候の間には強い相関があります。気候モデルにはこれは全く考慮されていません。過去50年間太陽活動は活発でしたが、最近5年間は活動が衰えてきています。50年間、地球の温暖化が強く進みましたが、最近10年間は止まったように見えます。これは明白な観測的ヒントですが、気候モデルには取り入れられていません。

世界平均気温は誤解を招く概念です。それが何を意味するのか、はっきりしません。温暖化が最も強く起こったのは主として高緯度の非常に寒い地域です。モデルには考慮されていない点が多くあります。

また、局地的な温暖化が悪いことであるのかどうか、明らかではありません。北極地域の地元民にとっては温暖化が喜ばしいところもあります。彼らは過去、恐ろしい天候の中で漁業に頼るといふ非常に厳しい生活を強いられました。温暖化によって彼らの生活はずっと楽になりました。気候が変動すると、常に勝者がいれば敗者もいます。

私は気候モデルが現実の良い描像を与えるかどうかについては懐疑的です。現実の世界はもっとずっと複雑です。私の結論は、公の機関による今後100年間の気候の予報は信じないというものです。モデルは気候を理解するためには良い道具ですが、予報のための道具としては不適當です。理解するための道具としては良いという理由は、一度に1個のファクターを変化させた時の効果を調べることができるからです。予報の道具としては不適當な理由は、重要であるかも知れない非常に多くのファクターを無視しているからです。

Kavli IPMU-FMSP ワークショップ

「物理学と数学における超対称性」

河野俊丈 こうの・としたけ

Kavli IPMU主任研究員

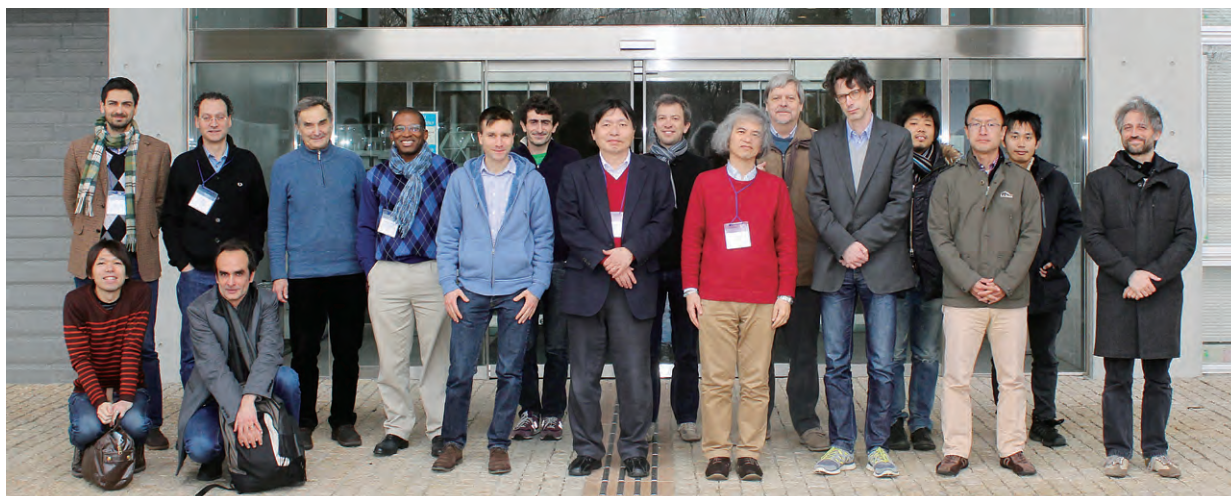
超対称性は、元来、素粒子物理学において整数スピンをもつボゾンとよばれる族と半整数スピンをもつフェルミオンとよばれる族の間の対称性を記述する概念であり、自然界における場と力の統一的な記述のために理論物理学においてさまざまな場面で登場します。一方、超対称性は、数学の立場からもきわめて興味深い研究対象です。例えば、リー代数などの古典的な代数構造の自然で豊かな拡張、リーマン多様体や擬リーマン多様体の上での、ある特別なタイプのスピン場の実現問題などにおいて超対称性が現れます。特に、後者のテーマは超対称性をもつ曲がった時空における古典場理論および量子場理論と密接に関係していて、物理学者と数学者ともに大きな関心をいただいています。

このワークショップの目的は、このような超対称性のさまざまな側面に関して、物理学者と数学者の間で交流を深めることにあり、参加者は理論物理学の研究者と数学のさまざまな分野、例えば、作用素環論、表

現論、幾何学の研究者でした。ワークショップはカブリ数物連携宇宙研究機構のレクチャーホールを会場として、2014年3月10日から20日にかけて9日間にわたって開催され、原則として一日に3講演とし、物理学者と数学者の間の議論に十分な時間がさけるようにしました。

ワークショップで議論された主なテーマは、超対称性に触発された、リー代数やその表現論などの拡張、非可換幾何学、巡回コホモロジー理論、頂点作用素代数の超対称性への拡張、ツイスタースピノール、カラビ・ヤウ多様体の共形類似などでした。

このワークショップは河東泰之、河野俊丈、ステフェン・ホランズにより組織され、カブリ数物連携宇宙研究機構に加えて、文部科学省博士課程教育リーディングプログラム「数物フロンティア・リーディング大学院」の支援を受けて実施されました。



ピーター・ゴダード・シンポジウム

大栗博司 おおぐり・ひろし

Kavli IPMU主任研究員

ピーター・ゴダード博士は、数理論物理学において大きな業績をあげられました。ゴダード博士は相対論的弦理論の量子論を定式化し、その「ノー・ゴースト定理」を証明されました。また、非可換ゲージ理論における電磁双対性を提唱し、それについて重要な証拠を提示されました。ゴダード博士が構成された共形場の量子論は、弦理論におけるゲージ対称性の理解に重要な役割を果たしました。これらの画期的な業績は、物理学と数学との境界で新しい分野を開拓しようとするカブリIPMUの研究者にとって大切なお手本でもあります。

また、ゴダード博士は、科学者の研究環境の整備においても重要な役割を果たして来られました。英国ケンブリッジ大学においては、アイザック・ニュートン数理科学研究所の設立に尽力され、初代の副所長も務められました。同大学のセント・ジョンズ・カレッジの学長を務められた後、米国プリンストンの高等研究所第8代所長になられました。2012年に所長職を退かれた後は、同研究所の教授として研究を続けられています。

ゴダード博士は、トリエステの国際理論物理学センターからディラック賞を受賞され、英国王立協会のフェローで、大英帝国勲章（コマンドー）も叙勲されています。

2014年の3月から4月にかけてゴ

講演するピーター・ゴダード博士（左）と村山斉 Kavli IPMU機構長（右）

ダード博士がカブリIPMUを訪問されたので、博士の科学への貢献を讃えるシンポジウムを開催しました。ケンブリッジのニュートン研究所やプリンストンの高等研究所で、ゴダード博士の招待を受けて研究をした、カブリIPMUの教員や連携研究員の数名が講演をしました。

シンポジウムの皮切りはカブリIPMU機構長の村山斉で、自身の最近の研究から非相対論的ゴールドストーン・ボゾンの幾何学的性質について講演しました。この仕事は、南部陽一郎の対称性の自発的破れの業績を50年ぶりに拡張するものです。立教大学の江口徹は、カブリIPMUの大栗博司と立川裕二との共同研究による、いわゆる「マチュー・ムーンシャイン」について講演しました。これは、25年前に、江口と大栗がアン・タオルミナや梁成吉と発表した論文に基づくものです。この仕事から21年たった2010年に、江口が大栗や立川と偶然出会って議論をする機会があったことから、K3曲面の

幾何学とマチュー群の代数的性質について思いがけない発見がありました。

カブリIPMU教授の堀健太郎も、自身の20年前の博士論文の、最近の理論物理学の発展における意義について講演しました。また、立川裕二はゲージ理論におけるインスタントン解と弦理論について、シメオン・ヘラーマンはQCDの弦理論について講演しました。シンポジウムの最後には、ゴダード博士ご自身が、ヤン-ミルズ理論のツリー振幅についてのカッチャーゾ-ヒー-ユアンの公式について講演されました。

各講演者は、ゴダード博士の研究の幅と重なるような話題を選んだので、講演の間のお茶や昼食の時間にも議論が盛り上がりました。また、シンポジウムの翌日には、ゴダード博士と、村山斉、大栗博司の鼎談が行われました。この鼎談の記録は2部に分けて、Part Iが今号のカブリIPMUニュースp.48-55に掲載されています。Part IIは次号のカブリIPMUニュースに掲載される予定です。



フレアーホモロジー、ノビコフホモロジー、接触トポロジー、及び関連する話題に関する研究集会

アンドレイ V. パジトノフ Andrei V. Pajitnov

ナント大学数学科教授、Kavli IPMU客員上級科学的研究員

この国際研究集会は、2014年の4月21日から24日にかけてKavli IPMUにおいて開催されました。フレアーホモロジー、ノビコフホモロジー、及び接触トポロジーに関わる幾何学とトポロジーの様々な分野から専門家を結集することを目的とし、13人の講演者を含めて、全部で50人ほどの参加者がありました。

研究集会はUrs Frauenfelder氏によるF. Schlenk氏との共同研究についての講演で開始され、彼は古典的な代数トポロジー的ツールの接触トポロジーへの応用、つまり余接束内におけるReeb 弦の個数の増大度への応用について話をしました。

Mihai Damian氏はフレアー理論からの話題として、ラグランジュ-フレアーコホモロジーの変種である、“持ち上げられた (lifted)” フレアーコホモロジーと、その応用として単調ラグランジュ部分多様体のトポロジーについて話しました。彼の議論を用いると、特に、奇数次元の多様体の非自明な連結和が複素アファイン空間へ単調には埋め込めないことを証明できます。

入江慶氏はシンプレクティックホモロジー、積構造、およびChas-Sullivanのループ積を用いHofer-Zehnder容量を評価することについて話しました。

Dan Burghlea氏はANR（絶対近傍レトラクト）空間の間の連続写像の場合に対するモース-ノビコフ理論の一般化について議論しました。彼はこのような写像に関連した新しい位

相不変量を提案し、これらをコンピューターを用いて計算できるツールを紹介しました。F. Manjarrez-Gutierrez氏は、a-smallと呼ばれる結び目に対するモース-ノビコフ数について話しました。M. Boileau氏とC. Weber氏の予想によると、結び目のモース-ノビコフ数は結び目種数と同様に加法的に振る舞うはずであり、F. Manjarrez-Gutierrez氏はこれをa-smallと呼ばれる結び目の場合に検証しました。

赤穂まなぶ氏は、古典的なモース理論からの話題として、境界を持つ多様体上のモース関数に対するモース複体の構成法について論じました。渡邊忠忠氏は、モース理論とチャーン・サイモンズ摂動理論の関連について話しました。

Yasha Saveliev氏は大域的深谷圏とそのホーファー幾何への応用について議論しました。

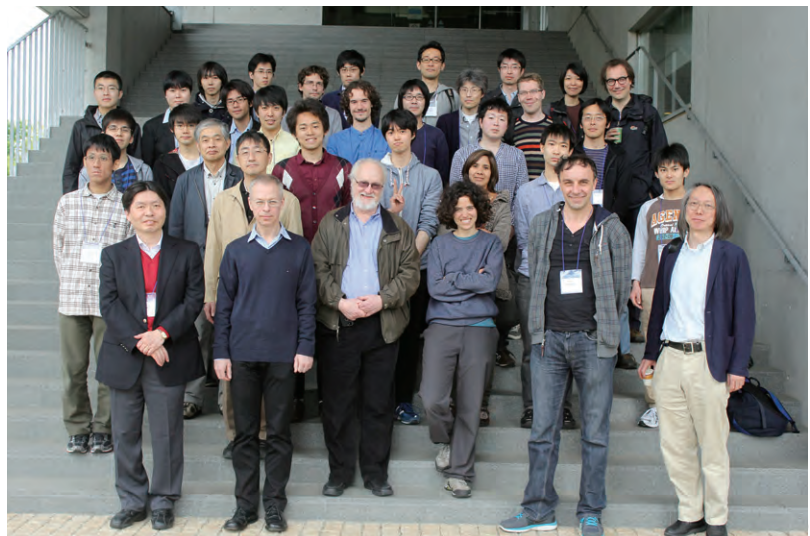
接触トポロジーに関しては、まずRiver Chiang氏が高次元の充填不能接触多様体の例をいくつか紹介しました。伊藤哲也氏は開本 (open book)

葉層について講演し、Otto van Koert氏は接触トポロジーにおける分数的ツイストについて話しました。

S. Sandon氏は接触射の正ループという概念について話し、接触多様体の非圧縮性がどのようにして成り立つのか、あるいは成り立たないのか、および接触射のなす群がどのようにして秩序性 (orderability) を許すのか、あるいは許さないのか、について説明しました。

研究集会はVincent Colin氏による講演で締めくくられました。氏と本田公氏との進行中の共同研究は接触トポロジーとフレアーホモロジーの双方に関連しており、彼は任意の奇数次元をもつ接触多様体に対する、ヒーガード-フレアーホモロジーの“ハット (^) 版”の構成を紹介しました。

今回の研究集会は、世界の各地から集まっていたいただいたシンプレクティックおよび接触トポロジーの専門家から彼らの結果を紹介してもらうことができ、また、互いに親交も深められたという意味で、非常に満足なものでした。



小林俊行主任研究員、2014年度紫綬褒章受章

2014年4月28日に春の褒章受章者が発表されましたが、東京大学大学院数理科学研究科教授で Kavli IPMU主任研究員の小林俊行教授が、数学の分野において紫綬褒章を受章されました。紫綬褒章は、学術・芸術・スポーツで著しい業績を上げた人に贈られます。



小林俊行さん

小林教授の研究は、「対称性」をキーワードとして、代数、幾何、解析にまたがる壮大なものであり、数学全体へ影響を及ぼしています。特に、「リーマン幾何学の枠組みを超えた均質空間における不連続群の理論の創始」、「無限次元における対称性の破れを代数的に記述する理論の創始」、「極小表現の大域解析学の創始」、「可視的作用の概念による無重複表現の統一理論の創始」は国際的に高く評価されており、数学における本質的なブレイクスルーを実現しました。

大栗博司主任研究員、ウォルター・パーク理論物理学研究所の初代所長に

2014年5月14日、カリフォルニア工科大学 (Caltech) は新たに設置されたウォルター・パーク理論物理学研究所の初代所長に同大学教授の大栗博司さんが就任したと発表しました。大栗さんは Kavli IPMUの主任研究員でもあります。この研究所は理論物理学研

究の発展と次世代の教育を推し進めることを目的として、ウォルター・パーク氏が35年間理事長を務めたシャーマン・フェアチャイルド基金からの寄付をはじめとした7500万ドル(約75億円)の基金をもとにして、開設されました。

第7回外部諮問委員会開催

2014年6月30日に Kavli IPMUの第7回外部諮問委員会が開催され、全委員が出席されました。今回は、特にWPI拠点として日本政府からの10年間の支援に続く5年延長の申請書提出を半月後に控え、申請内容等について多くの有益な示唆をいただきました。



委員は向こう側から Nigel Smith さん (SNOLAB)、John Ellis さん (King's College London)、Steve Kahn さん (委員長、Stanford 大学/SLAC)、David Morrison さん (California 大学 Santa Barbara 校)、岡村定矩さん (法政大学)、Young-Kee Kim さん (Chicago 大学)、小島定吉さん (東京工業大学)。

「宇宙のダークサイド(浜松ホトニクス)寄付研究部門」を設置

東京大学国際高等研究所 Kavli IPMU は2014年4月1日、光センサーの世界トップメーカー、浜松ホトニクス株式会社からの寄付による「宇宙のダークサイド(浜松ホトニクス)寄付研究部門」を設置しました。基礎科学である素粒子物理学や宇宙物理学に関する寄付研究部門は、東京大学では初めてのことです。

本寄付研究部門には、超新星の研究で世界的に知られる優れた業績を上げ、学士院賞を受賞した Kavli IPMU主任研究員の野本憲一特任教授が着任しました。欧米では寄付講座や寄付研究部門を担当する教授職は、寄付者の名前を付けた、いわゆる「冠プロフェ

ッサー」と呼ばれる習慣があります。野本教授は「浜松プロフェッサー」としてダークエネルギーや超新星に関連した様々な研究を行います。

30倍に増光した超新星 PS1-10afxの手に重力レンズ源の銀河を発見

星が一生を終えるときに爆発して明るく輝く「超新星」のうち、Ia型と呼ばれる種類はピーク時の明るさがよく揃っていて、「宇宙の標準光源」として宇宙論的な距離の測定に利用されています。ところが、地球から約90億光年の遠方で発見された超新星 PS1-10afx は、Ia型の特徴をもちながら明るすぎるのが謎でした。

本誌No.22(2013年6月号)のNews欄 p.67で紹介されたように、昨年、Kavli IPMU 博士研究員のロバート・クインビーさんとマーカス・ワナーさんら Kavli IPMU の研究チームは、PS1-10afx と地球との間に大質量の銀河(レンズ銀河)が存在し、その周囲の空間をゆがめて超新星の光を集める重力レンズ効果で30倍明るく見えていることを突き止め、発表しました。

しかし、超新星が現れた銀河(ホスト銀河)とレンズ銀河は地球から見るとちょうど重なっているため、これまでの観測データでは区別できず、レンズ銀河はどこにあるか?という残された問題がありました。

PS1-10afx が十分に暗くなった後の2013年9月、クインビーさんらのチームはハワイの Keck-I 望遠鏡の低解像度イメージング分光器を使い、遠方の明るいホスト銀河の光の中から、手前にある銀河の光を分離することに成功しました。この結果、ホスト銀河と私



記者会見の様子。

たちの間に重力レンズ現象を作り出す銀河が確かに存在していることが示され、米国科学振興協会(AAAS)の刊行する著名な学術誌、*Science*の2014年4月25日号に発表するとともに、東京大学本郷キャンパスの山上会館でAAAS / *Science*側が司会進行を行う方式の記者会見を行い、世界的に大きく取り上げられました。

フリーマン・ダイソンさん、Kavli IPMUを訪問

2014年4月15日 - 19日にプリンストン高等研究所名誉教授で量子電磁力学をはじめ、科学の様々な分野での優れた業績で知られ、90歳を超えてなお研究を続けるフリーマン・ダイソンさんが Kavli IPMU を訪問されました。ダイソンさんは、その後4月21日と22日に宇宙線研究所神岡観測所/Kavli IPMU 神岡分室を訪れ、スーパーカミオカンデなどを視察されました。

*Kavli IPMU News*の月号58 - 66ページにKavli IPMUの福来正孝教授によるインタビュー (Q&Aセッションのまとめを含む) が掲載されています。



セミナーで講演するフリーマン・ダイソンさん (Kavli IPMU 研究棟大講義室)。

ICRRとの合同一般講演会「宇宙を読み解く」開催

2014年4月12日 (土) に千葉県柏市のアミューゼ柏において、Kavli IPMUと東京大学宇宙線研究所 (ICRR) の共催による第10回合同一般講演会「宇宙を読み解く」が開催されました。

Kavli IPMUからは、東京大学大学院数理科学研究科教授でKavli IPMU主任研究員を兼ねる河野俊文さんが『宇宙のかたち～数学からのチャレンジ』と題し、数学を用いて、観測データと合

うような「宇宙のかたち」のモデルを提起することについて話しました。また、ICRRからは、副所長の寺澤敏夫教授が、『ショッキング・ユニバース～衝撃波に満ちた宇宙』と題し、太陽フレア、超新星、ガンマ線バーストなど、宇宙の様々な場所で起きる爆発現象により発生する強い衝撃波が宇宙で果たす役割について話しました。



講演する河野俊文さん。

藤原交流広場でKavli IPMU教職員の音楽とアートの夕べ

2014年4月25日 (金) に、Kavli IPMU教職員の親睦団体、室内管弦楽団とArts Society による初の合同イベントIPMusic+arts night が催されました。当日は、研究棟3階の藤原交流広場で“Repetition, Scale, Duration”をテーマにした教職員からの投稿写真35点が展示された壁面を背景に、同じく教職員により室内管弦楽団の演奏から、ピアノソロ、琴、カラオケ、ギターの弾き語りまでバラエティに富んだ10演目が、途中休憩を挟んで約3時間に渡り披露されました。会場には教職員およびその家族・友人が数多く集まり、春山事務部門長、その他の寄付によるワインと軽食も用意され、音楽とアートの夕べを楽しみました。教員職員、



藤原交流広場のIPMusic+arts night。

国籍、専門分野など様々な垣根を越え、普段の仕事ぶりからは窺い知れない意外な「技術」を話題に会話が弾みました。

人事異動

再任

東京大学で2012年度から実施されたクロスアポイントメント制度を利用し、2008年9月1日から2012年3月31日までKavli IPMU 准教授だった理学系研究科物理学専攻の吉田直紀教授が、2014年4月1日より勤務時間の40%をKavli IPMU教授として充てる形で復帰しました。吉田さんは次のように抱負を語っています。「新たな形でKavli IPMUのメンバーになったことをうれしく思います。私は宇宙物理学に興味をもち、特にコンピューターシミュレーションを用いた天体の形成やダークマターに関する研究を行ってきました。Kavli IPMUでは、すばるHSCサーベイのデータを用いた宇宙論や遠方超新星の探索の研究を進めたいと思っています。」



吉田直紀さん

転出

西澤 淳さんが Kavli IPMU 博士研究員から名古屋大学高等研究院特任講師に転出しました。在任期間は2010年9月1日から2014年4月30日でした。

また、Malte Schramm さんが Kavli IPMU 博士研究員を任期満了で退職しました。在任期間は2011年5月1日から2014年4月30日及び2014年5月16日から2014年6月30日でした。



宇宙のインフレーションと原始重力波

佐藤勝彦 自然科学研究機構長、Kavli IPMU客員上級科学研究员

2014年3月17日、南極点に設置された電波望遠鏡BICEP2のグループが宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の偏光測定によって原始重力波を間接的に発見、と発表しました。世界のマスコミはこの発見によって、ビッグバン宇宙創生のパラダイム、インフレーション理論が実証されたと報じました。インフレーション理論は小さな量子時空が加速度的に膨張を起し、その急激な膨張が終わるとき宇宙は激しく加熱され火の玉宇宙となったこと、またこの加速時代の量子揺らぎが大きく引き延ばされ、後に銀河や銀河団に成長する密度揺らぎが生まれたことなどを予言します。米国NASAのCMB観測衛星COBEやWMAPは宇宙が生まれて38万年しか経っていない宇宙の姿を描き出し、インフレーション理論の予言する密度揺らぎを発見、この理論を裏付けました。一方、量子揺らぎは物質エネルギーの密度揺らぎだけでなく、時空の揺らぎ、重力波も同時に作り出します。この重力波はCMBの偏光のパターンが渦巻き状になるB-modeを作り出すので、これが本当に見つかったのであれば、インフレーション理論をさらに裏付けることとなります。しかし、銀河系の星間に漂うダストの効果により同じようなパターンが作られる可能性もあり、その評価が甘いと批判を受けています。ESAのCMB観測衛星、Planckが10月に偏光観測の結果を発表します。またKEKの羽澄らが参加するPOLARBEARなど、世界で多くのグループが南極や、チリーのアタカマ砂漠などで観測を行っています。観測の結果が楽しみです。

