

KAVLI IPMU NEWS



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

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

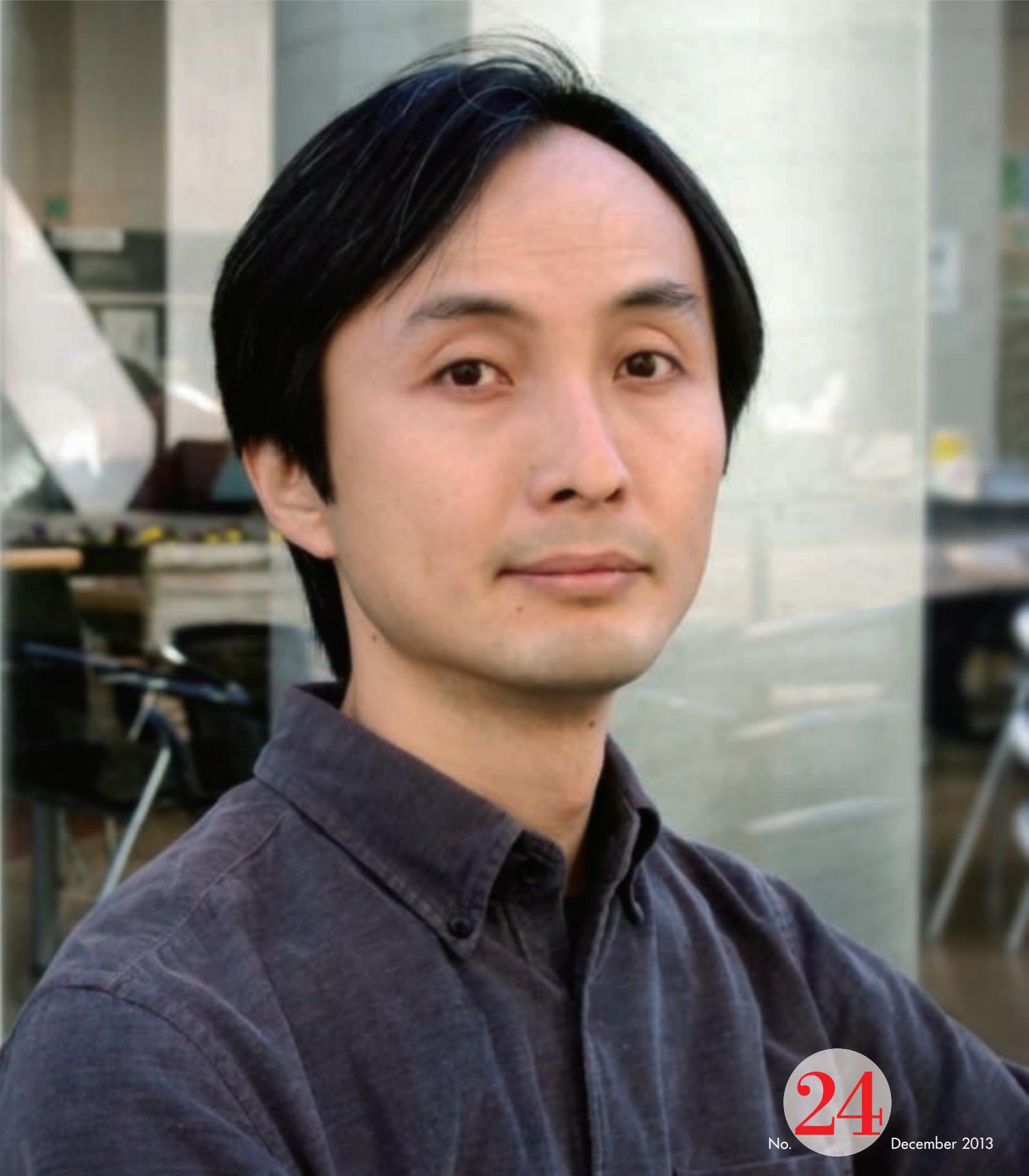


Todai Institutes for Advanced Study



The University of Tokyo
東京大学国際高等研究所

Feature Proton, Neutron, and D-brane
Interview with Fabiola Gianotti



24

No.

December 2013

Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Making a Case for Basic Science
- 4 **Feature**
Proton, Neutron, and D-brane
Shigeki Sugimoto
- 10 **Our Team**
Ilya Karzhemanov
Myeonghun Park
Andreas Schulze
Yue-Lin Sming Tsai
- 12 **Interview** with Fabiola Gianotti
- 20 **Workshop Report**
European Union's UNIFY Workshop
Hirosi Ooguri
- 21 **Workshop Report**
Holography and QCD
— Recent Progress and Challenges —
Shigeki Sugimoto
- 22 **Workshop Report**
Symposium on Gravity and Light
Marcus Werner
- 23 **News**
- 28 **Obituary**
Obituary: Fred Kavli (1927 – 2013)
Hirosi Ooguri
- 30 **The Einstein Equation** Jun'ichi Yokoyama

Japanese

- 31 **Director's Corner** 村山 斉
基礎科学への支持を訴える
- 32 **Feature**
陽子・中性子とDブレーン
杉本 茂樹
- 38 **Our Team**
イリヤ・カルツェマノフ
朴 明勲
アンドレアス・シュルツ
蔡 岳霖・駟名
- 40 **Interview** ファビオラ・ジャンノッティ博士に聞く
- 48 **Workshop Report**
欧州連合UNIFYプログラムのワークショップ
大栗 博司
- 49 **Workshop Report**
Holography and QCD
— Recent Progress and Challenges —
杉本 茂樹
- 50 **Workshop Report**
Symposium on Gravity and Light
マーカス・ワーナー
- 51 **News**
- 54 **Obituary**
フレッド・カブリ氏 (1927 – 2013) を悼む
大栗 博司
- 56 **アインシュタイン方程式** 横山 順一



Shigeki Sugimoto is a Professor at the Kavli IPMU. He graduated from Kyoto University in 1994. He received a Doctorate in Physics from Kyoto University in 1999. He became a JSPS (the Japan Society for the Promotion of Science) postdoctoral fellow in 1999, postdoctoral fellow at CIT-USC Center for Theoretical Physics in 2000, Assistant Research Professor at the Niels Bohr Institute in 2002, Assistant Professor at the Yukawa Institute, Kyoto University in 2003, and Associate Professor at Nagoya University in 2006. Since April 2008, he has been an IPMU Professor. He received Toshiie Kimura Theoretical Physics Prize (2008), Yukawa-Tomonaga Memorial Prize (2009), and Japan Physical Society Award for Academic Papers on Physics (2002, 2008, and 2011).

杉本茂樹：Kavli IPMU教授。1994年3月京都大学理学部卒業。1999年3月京都大学大学院理学研究科博士課程修了、博士の学位を取得。同年4月より日本学術振興会特別研究員、2000年CIT-USC理論物理学センター博士研究員、2002年ニールス・ボーア研究所Assistant Research Professor、2003年京都大学基礎物理学研究所助手、2006年名古屋大学大学院理学研究科助教授（2007年4月より准教授に呼称変更）、2008年4月よりIPMU教授。木村利栄理論物理学賞（2008年）、湯川・朝永奨励賞（2009年）、日本物理学会論文賞（2002年、2008年、2011年）受賞。

Making a Case for Basic Science

Director of Kavli IPMU
Hitoshi Murayama

The year 2013 closed with a bang. On December 17, I had an incredible opportunity. I could discuss progress of Kavli IPMU and the SuMIRe project in front of Prime Minister Abe, Minister of Finance Aso, Minister of State for Science and Technology Policy Yamamoto, and other members of the Council for Science and Technology Policy (CSTP), the highest body in Japan on this matter. They all appeared very happy to hear about the way we draw excellent people from around the world, built a research center with high global visibility, and lead a large international collaboration.

But I had an additional point to make in the last one minute. In the worldwide trend of focusing government funding on applied research, Japan has been very good in sustaining funding for basic research, and it should stay so for her own benefits. Many of the technological breakthroughs, such as Maglev, worldwide web, imaging techniques for cancer diagnosis, or GPS, started with basic curiosity-driven research and their needs. In addition, the future position of the country requires educated talents, who can be trained through global environment typical in basic research. This point seems obvious to many of us scientists, but needs to be emphasized repeatedly and widely, especially to policymakers. Prime Minister applauded right after my eight-minute presentation, apparently the first time on CSTP, and I was greatly encouraged.

Mr. Fred Kavli was a true cheerleader for basic science. We were all greatly saddened by the news that he passed away on Nov 21. It was only a year

and half earlier when he gave a passionate speech at our naming ceremony. He said *"I support science because of curiosity and because I believe in its long-range benefit to humanity. Science helps us lead healthier lives. Practically everything we touch in our daily lives has been improved or developed through basic research. The progress of our entire standard of living is tied closely to the fruits of science and research."* He left a great legacy and we will miss him dearly.

To keep the momentum going on our basic quests for the secrets of the Universe, it takes effort on all fronts. Our staff has been exemplary in supporting all our absent-minded academics all along. On Dec 20, some of our staff members were awarded President's prize for improving business practice because they produced a wonderful safety video for online training. It is funny, witty, yet conveys all crucial information for our newcomers to watch. This is the second time for us to receive this prize, demonstrating that we are leading the University not only in science but also in the way to do business.



Proton, Neutron, and D-brane

1. Prologue

One day, we were chatting about how to explain the importance of the recent research in string theory to the general public. Somebody asked about the “D-brane,” which has played crucial roles in the recent development of string theory, saying, “For example, what is a good way to explain the reason why the research on D-branes is important?” My answer was, “That’s easy. Because, we are made of D-branes.” You may think that I was just kidding. But, I was fairly serious. Yet, I exaggerated a bit. More precisely, I should have said, “Particles like protons and neutrons in atoms, which are the basic ingredients of our body, can be described as D-branes in string theory.” What is D-brane? How can that be possible? I’d like to talk about these topics here.

2. Quarks and QCD

I suppose you have learned in middle school or high school that an atom consists of a tiny lump called a nucleus made of protons and neutrons, and electrons circulating around it. If you take physics courses in college, you probably learn that protons and neutrons are composite particles made of three smaller particles, called “quarks.”¹

¹ Up to now, six kinds of quarks are found in the experiments, and they are called up, down, strange, charm, bottom, and top. In this article, we mainly focus on light quarks, in particular, up quarks and down quarks.

In addition, particles called “pions” flit about in the nucleus. The pion was introduced by Professor Hideki Yukawa to explain the force among protons and neutrons, and confirmed by the later experiments. It is now known that the pion is a composite particle made of a quark and an antiquark. Here, the antiquark is a partner of the quark, whose properties are almost the same as a quark except that its charge has the opposite sign.

The particles made of quarks and antiquarks are called “hadrons,” and there are many kinds of hadrons. Actually, the number of species of hadrons confirmed in the experiments is more than hundreds. And almost all of them, except for some rare exotic ones, are made of three quarks or a pair of a quark and an antiquark. A hadron made of three quarks, such as the proton and the neutron, is called a “baryon,” and that made of a quark-antiquark pair, such as the pion, is called a “meson” (Figure 1).

Quarks want to be confined in a trio (baryon) or a couple (meson), and in particular, nobody has ever succeeded in extracting an isolated quark in the experiments. The reason is that there is an extremely strong force called “strong force” among quarks and antiquarks, created by the exchange of another particle called the “gluon.” The theory of strong force including quarks and gluons is called “QCD.”²

QCD is a surprisingly simple and beautiful theory—something that I really admire. But, it is known to

² QCD is an acronym of “Quantum Chromodynamics.”

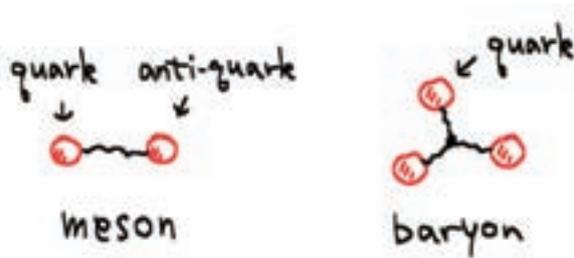


Figure 1. Meson and baryon in the quark model

be very difficult to analyze. It is almost impossible to calculate by hand the properties of hadrons, such as masses, radius, strength of the interaction, etc., and people have developed efficient methods to calculate them using supercomputers. As a result, it was shown that the predictions of QCD agree well with the experimental data, and nowadays QCD is considered to be the fundamental theory of hadrons. I am very much impressed by the fact that mankind has reached QCD, even though no experiments have ever found isolated quarks and gluons, and the theoretical calculations are extremely difficult.

3. Particle or String

As explained in the previous section, protons and neutrons are particles made of three quarks. You might wonder, then, whether there is a possibility that quarks are also made by even smaller particles. This is an interesting question, but there is no experimental evidence that suggests it to be the case. This kind of particle—considered to be a point particle without any further smaller structure—is called the elementary particle. Examples of elementary particles include quarks, gluons, electrons, photons (particles of light), etc.

So far, various kinds of elementary particles are found in the experiments. The reason why there are many different kinds of elementary particles is one of the big mysteries that remain to be solved. As

history tells us, significant progress in physics will be made when complicated objects are found to be made of more fundamental and simple ingredients. This happened, for example, when people realized that all ordinary matter is made of atoms (atomism); all the atoms are made of protons, neutrons and electrons (atomic model); hadrons are made of quarks (quark model). Physicists are dreaming of finding a simple principle that deduces all the elementary particles in a unified way.

“String Theory” is a theory that is expected to solve this mystery. It is based on the assumption that the elementary particle is not a point particle but an extremely tiny string (Figure 2).

The fundamental object in string theory is only one species of string. This string can oscillate and spin, and it behaves as a particle with different properties when the state of the string is different. It poses the interesting possibility that all the different kinds of elementary particles are represented by the same string. Furthermore, surprisingly, it turned out that the spectrum of particles created by the string contains the “graviton,” which is the elementary particle that mediates gravity. Unlike the other elementary particles, the graviton has a special property that makes it difficult to be incorporated in the theory of elementary particles, and constructing a consistent theory of gravity was a long-standing dream of physicists. String theory unexpectedly turned out to be an elegant solution to this problem.

One of the most surprising predictions of string theory is that space-time is ten dimensional (one time and nine spatial dimensions). In our daily life, we can only recognize four dimensions (one time and three spatial dimensions), but string theory predicts that there are six additional spatial directions that we cannot see.³

³ The number of space-time dimensions corresponds to the number of coordinates we have to specify to meet somebody precisely. When we say, “Let’s meet at the position 100 m north and 50 m east of here, 30 m above the ground, 10 minutes from now,” for example, we specify four numbers (100, 50, 30, 10). In this case, we say the space-time is four dimensional. In string theory, four numbers are not enough and ten numbers are needed to specify the location in space-time.

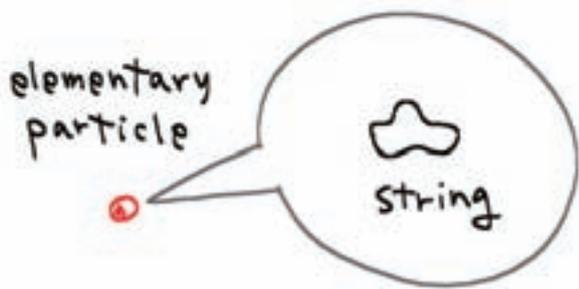


Figure 2. Elementary particle and string

The hidden six dimensions are called “extra dimensions.” The particles realized in string theory depend on the shape of the extra dimensions. In other words, the complicated structure of elementary particles can be realized thanks to the existence of the extra dimensions. Although we have unfortunately not yet reached a consensus on how the shape of the extra dimensions should be selected, it has been shown that particle contents very close to those found in the experiments can be realized with some choices of the extra dimensions. In string theory, it is not allowed to include the particles we want in the theory by hand because of severe consistency conditions. It appears to be a miracle that such theory includes the graviton naturally and reproduces the elementary particles found in the experiments. For these reasons, string theory attracted a great deal of attention among physicists, and it was called a promising candidate of “the ultimate unified theory,” or, “the theory of everything.” These developments were made around the middle of the 1980s. There were a number of surprising discoveries at that time, and people refer to this era as the first string revolution.

Even now string theory remains to be an attractive possibility as the ultimate unified theory, and many physicists are trying to make it complete. It is, however, still under construction. Since I don't want to disappoint you later, I'd like to state clearly here that I'm not going to discuss the ultimate unified theory below. The main goal of this article is to

explain recent attempts to describe QCD or hadron physics discussed in section 2 using string theory. It is now possible to describe hadrons in string theory and calculate various physical quantities that can be compared with the experimental data. In order to achieve such technology, we had to wait for another string revolution.

4. Gauge/String Duality

In the latter half of the 1990s, string theory again encountered an era of great development called the second string revolution. The development was mainly more theoretical, such as the non-perturbative effects in string theory, and it may not sound as glorious as the ultimate theory. The researchers are very much excited, however, because the development has drastically overturned some of the basic concepts in physics such as “dimensions of space-time,” or “elementary particle.” In particular, the “gauge/string duality” was one of the most striking discoveries during the second string revolution.

The main claim of the gauge/string duality is that gauge theory and string theory are equivalent in certain situations. Here, the gauge theory is a theory with an elementary particle mediating force, like the gluon in QCD, introduced by imposing certain symmetry. It is known that the theory of strong force, weak force, and electromagnetic force are all described by gauge theory. QCD is a typical example of gauge theory.

The surprising features of the gauge/string duality are as follows. Gauge theory is a theory of elementary particles living in a four dimensional space-time, while string theory is a theory of strings living in a ten dimensional (curved) space-time. The fundamental degrees of freedom and even space-time dimensions are different. Apparently, they look completely different, but, nevertheless, the duality suggests that they can be equivalent. Everyone was

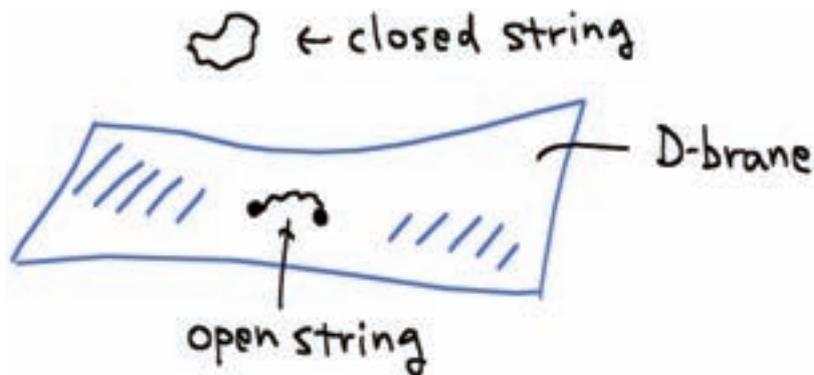


Figure 3. D-brane, open string, and closed string

surprised when Maldacena conjectured this duality in 1997, because it was totally unexpected.

How can gauge theory and string theory be equivalent? In order to explain this, we have to introduce the “D-brane.” A D-brane is an extended object in string theory. There are various types of D-branes. If it is extended along the time direction and p dimensional spatial directions, it is called a Dp -brane. For example, the D2-brane is a membrane embedded in ten-dimensional space-time. It can take various shapes, e.g., a spherical one as a soap bubble, or an infinitely extended planar D-brane can also exist. The characteristic property of the D-brane is that the end points of strings can be attached to it. There are two possible types of strings in string theory. One of them is called a “closed string,” which looks like a rubber band without end points, and the other is called an “open string,” which has two end points like a rubber band cut by scissors. As depicted in Figure 3, closed strings can be separated from the D-brane, while open strings cannot, since the end points are attached on the D-brane.

Though this D-brane might look strange, it is now well established that such objects exist in string theory. The importance of the D-brane was recognized in the mid 1990s, and it played crucial roles in the second string revolution. One of the reasons was that the D-brane provided an easy way to realize gauge theories in string theory. It can be shown that the open strings attached on the

D-brane contain particles that mediate forces and a gauge theory is realized on the D-brane. At this stage, this is still a theory of strings, but it is possible to tune a parameter of the theory to make the length of the strings to zero and then, the theory becomes a theory of point particles. For example, in the case of a D3-brane, which is extended in three spatial dimensions, we obtain a gauge theory in a four dimensional space-time.

On the other hand, according to Einstein’s theory of general relativity, when there is a D-brane, the space-time around it will be curved. Let us briefly explain what it means for those who are not familiar with the notion of curved space-time. Imagine a soft rubber sheet with horizontal and vertical lines like a graph paper. The vertical line corresponds to the time axis and the horizontal line corresponds to a spatial axis, and a free particle moving with a constant speed corresponds to a straight line on it. When the rubber sheet is bent out of shape, the straight line will be curved. The idea of Einstein’s general relativity is to interpret this curved line as the track of a particle moving under the influence of gravity. In some cases, the gravitational effect of D-branes can be captured in a good approximation by replacing the D-branes with the corresponding curved background. It can then be shown that the parameter tuning considered above does not lead to zero string length limit, and the system we obtain is a theory of strings living in a certain curved space-time.

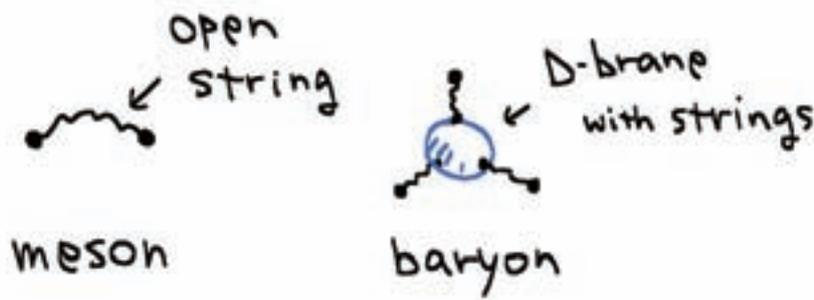


Figure 4. Meson and baryon in string theory

In this way, two descriptions of the system are obtained, one of them is a four dimensional gauge theory, and the other one is string theory in a curved space-time. Since they are obtained from the same D-brane system, it is natural to expect that they are physically equivalent. This is the basic idea of the gauge/string duality. Although this argument motivates us to believe that the duality holds, it does not mean that the duality is proven in a satisfactory way. Therefore, it is important to investigate concrete examples in detail and check whether the predictions of the duality are satisfied. After a lot of works done in this direction, a huge number of non-trivial evidences supporting the duality have been found and now the gauge/string duality is widely believed to be true.

5. Holographic QCD

What can we learn from the gauge/string duality, if it is applied to QCD? The string theory description equivalent to QCD under the gauge/string duality is called “holographic QCD.”⁴

Up to now, a string theory description completely equivalent to QCD has not been found yet. But, there is a string theory set up equivalent to a gauge theory that agrees with QCD at low energies in a good approximation. The following discussion is based on this string theory description. It can be

⁴ This name came from holography which is a technology to record three dimensional images in a film, since the duality predicts the equivalence of four dimensional QCD and ten-dimensional string theory.

shown that hadrons like protons, neutrons, and pions discussed in section 2 are successfully realized in the holographic QCD. I’d like to provide a glance at the main points here.

Following the discussion given in the previous section, the holographic QCD is obtained by first constructing a D-brane system that realizes QCD, and then, by replacing part of the D-branes with the corresponding curved space-time. As a result, we obtain a system with a D8-brane embedded in a curved ten-dimensional space-time. How can hadrons be realized in this set up?

Since there is a D8-brane in the system, open strings with end points attached on it can exist. These open strings are interpreted as mesons. If you compare Figure 4 with Figure 1, you will see that the pictures of the open string and the meson look similar.

In section 3, I explained the possibility that various elementary particles can be obtained from just one string. Applying exactly the same idea to this open string, it is natural to expect that various kinds of mesons can be obtained from the open string. In fact, it can be shown that the meson spectrum predicted from this open string reproduces not only the pion, but also a lot of other mesons found in the experiments. Furthermore, it is possible to estimate the masses and strength of interactions of the mesons, and the predictions of holographic QCD turned out to be in reasonable agreement with the experimental data, although the approximation

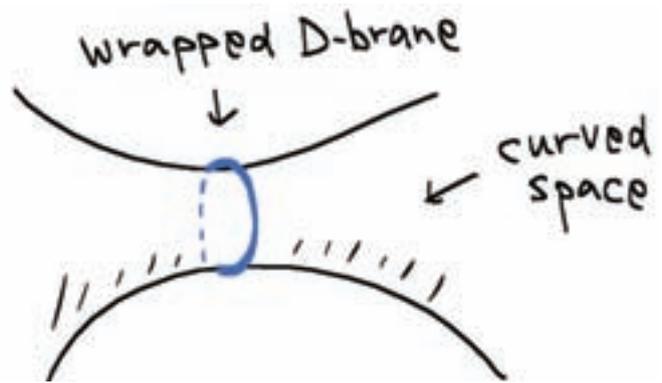


Figure 5. D-brane wrapped on the extra dimensions

made for the calculation is still crude.

Note that the role of strings in holographic QCD is a bit different from what we saw in section 3, in which elementary particles are made of tiny strings. Here, an open string corresponds to a meson, which is a composite particle made of a quark and an antiquark. In addition, this string theory description is not meant to be a theory that is more fundamental than the theory of elementary particles. Under the gauge/string duality, gauge theory and string theory are considered to be equivalent and both of them are on an equal footing. These are new viewpoints that gauge/string duality brought us.

What about baryons? As I already told you at the beginning, baryons are identified as D-branes. There exists a D4-brane wrapped on a four dimensional space along the extra dimensions and trapped as depicted in Figure 5.

The D4-brane is an object extended along one time direction and four spatial directions. Now, since all the four spatial directions on this D4-brane are along the extra dimensions, it behaves as a particle extended only in the time direction in the four dimensional space-time in which we are living. This particle is interpreted as a baryon. Interestingly, it can be shown that this D4-brane necessarily have three open strings attached on it, due to an effect of a field called RR field in the background. As you can see comparing Figure 1 and Figure 4, a baryon made of three quarks resembles a D4-brane with three strings.

By analyzing the spectrum of the states obtained from this D4-brane, it has been shown that the states identified as protons and neutrons are found as expected. Moreover, a lot of other baryons, such as excited states of nucleons, are reproduced. More detailed analyses have revealed that various properties of protons and neutrons such as the magnetic moment, electric charge distribution, etc., calculated in the holographic QCD agree with the experimental data quite well.

6. Epilogue

We have learned that the hadrons living in nuclei can be described by string theory, and mesons and baryons correspond to open strings and D-branes, respectively. In this description, the world looks a bit different from the traditional view. In particular, since protons and neutrons account for more than 99.9% of our weight, I was tempted to say “We are made of D-branes.” Don’t you think it is a bit amusing to step on the scales, if you know that you are measuring the weight of the D-branes in your body?

Actually, the topic I have discussed so far is only a small piece of the charm of the D-brane. The D-brane appears in various situations in string theory. It can describe black holes, or even the entire universe in some scenarios. I hope there will be other occasions to discuss these topics.

Our Team

Ilya Karzhemanov

Research Area: **Mathematics**

Postdoc



My research interests are in algebraic, especially birational, geometry. I am interested in developing numerical criteria, which should be typical for rational, or more specifically, homogeneous/toric varieties. Among such invariants are (asymptotic) multiplicity-type functions, constructed with respect to a given line bundle L on an algebraic variety X , i.e. to any point p on X the function (say m) in question associates (appropriately averaged) multiplicity $m(p)$ at p of various (maybe not all) global sections of L . In case m is a sort of a distribution on X (e.g. m

is constant), one might expect X to be “close to homogeneous space,” in particular stable (for one of the (or any) kinds of known differential-geometric versions of stability). On the other hand, the “non-homogeneous” behavior of m should give an obstruction for X to be rational.

Myeonghun Park

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc



The primary area of my research is the collider and dark matter phenomenology of physics beyond the standard model (BSM), including, but not limited to, theories with supersymmetry, extra dimensions, and various models motivated by experimental observations. For BSM searches at the LHC, I have been preparing systematic ways for the LHC inverse problem. One of my interests in BSM

collider phenomenology is related to the current developments on the computational simulations.



Kavli IPMU researchers gathered on the occasion of its 6th anniversary.

Andreas Schulze

Research Area: **Astronomy**

Postdoc

Every massive galaxy harbours a supermassive black hole in its center, with masses from a few million to several billion solar masses. Their growth seems to be linked to the evolution of their host galaxies. We need to explain this connection and understand the growth history of black holes. The questions I am addressing in my research are: How are black holes growing? What is their growth



history? How is their growth triggered? How is their activity connected to the evolution of their host galaxies?

Yue-Lin Sming Tsai

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

My research interests cover a wide range of complementary topics in the field of dark matter physics, including particle physics, astrophysics, cosmology, and statistics. DM searches incorporate three experimental approaches: i) direct detection (DD), ii) indirect detection (ID), and iii) collider signatures.

Using a dark matter Lagrangian and experimental data sets, particle physicists can constrain the particle



model parameter space. In contrast, by utilizing other astrophysical data sets in analyses of ID and DD data, astrophysicists can model-independently constrain the properties of dark matter.

Our Team



Interview

with Fabiola Gianotti

Interviewer: Hitoshi Murayama

An Intense Month toward Announcement of the Historic Discovery

Murayama: You announced the historic discovery of the Higgs boson at the CERN LHC last July 4th. I watched that over the web and that was really a moving moment. But how were you feeling just before the announcement—before the seminar?

Gianotti: I think the prevailing feelings were satisfaction, concentration and... exhaustion. We had been working night and day over the previous 4 to 6 weeks. We

Fabiola Gianotti received her Ph.D. from the University of Milan in 1989 and became CERN Staff Member in 1996. She has been working in the ATLAS experiment since the beginning of the project (early '90s) contributing to detector design and construction and to detailed studies of the physics potential. She served as ATLAS Spokesperson from 2009 to March 2013. In 2012 she was awarded the title of "Grande Ufficiale al merito della Repubblica" by the Italian President and the Special Fundamental Physics Prize of the Milner Foundation. In 2013 she was awarded the Enrico Fermi Prize of the Italian Physical Society and the Niels Bohr Institute Medal of Honor. She has honorary doctoral degrees from the University of Uppsala and the Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) and she is Honorary Professor in the School of Physics & Astronomy, the University of Edinburgh. She is member of the Italian Academy of Sciences ("Accademia Nazionale dei Lincei").

unblinded our analyses of the 2012 data at the beginning of June and the announcement was made at the beginning of July.

Murayama: July 4th, right?

Gianotti: Exactly. So, 4 weeks in total from our first look at the "signal region" with the 2012 data and the announcement. Do you remember that by the end of 2011 we had some little hints, 3σ ?

Murayama: I was there at the December meeting (of the CERN SPC¹).

Gianotti: We had a 3σ excess around 125-126 GeV. But, of course, excesses at the level of 3σ are mainly fluctuations, and so they come and go. The December 2011 hints were not at all conclusive nor convincing. After the winter shutdown, the accelerator resumed operation at the beginning of 2012 ramping up in energy to 8 TeV (in 2011 the centre-of-mass energy was 7 TeV). That additional TeV was one of the crucial elements for the discovery. Although data-taking started

¹The SPC (Scientific Policy Committee) is one of two subsidiary bodies to the CERN Council. Hitoshi Murayama has been a member of the CERN SPC since 2010.

in April 2012, following good scientific practice we did not look at the data in the region of mass not yet excluded by previous results (the so-called “signal region”) until we had optimized our analyses on simulated events. On the other hand we studied the main background processes very carefully with data, and validated the simulation against data in the background regions. It was only at the beginning of June, after recording about 1 - 1.5 fb⁻¹ (inverse femtobarn) of integrated luminosity, that we unblinded the signal region. We had two main analyses, Higgs → $\gamma\gamma$ and Higgs → 4-leptons, and I remember that the first analysis to be unblinded was Higgs → $\gamma\gamma$.

Murayama: The best places to look.

Gianotti: When we unblinded the Higgs → $\gamma\gamma$ analysis, around June 10, I was at Fermilab to take part in a symposium celebrating the history of the Tevatron Collider. When I saw the results I made a jump on my chair. There was an excess around 125-126 GeV, i.e., at the same mass as the 3 σ excess observed in the 2011

data, and with an independent data set.

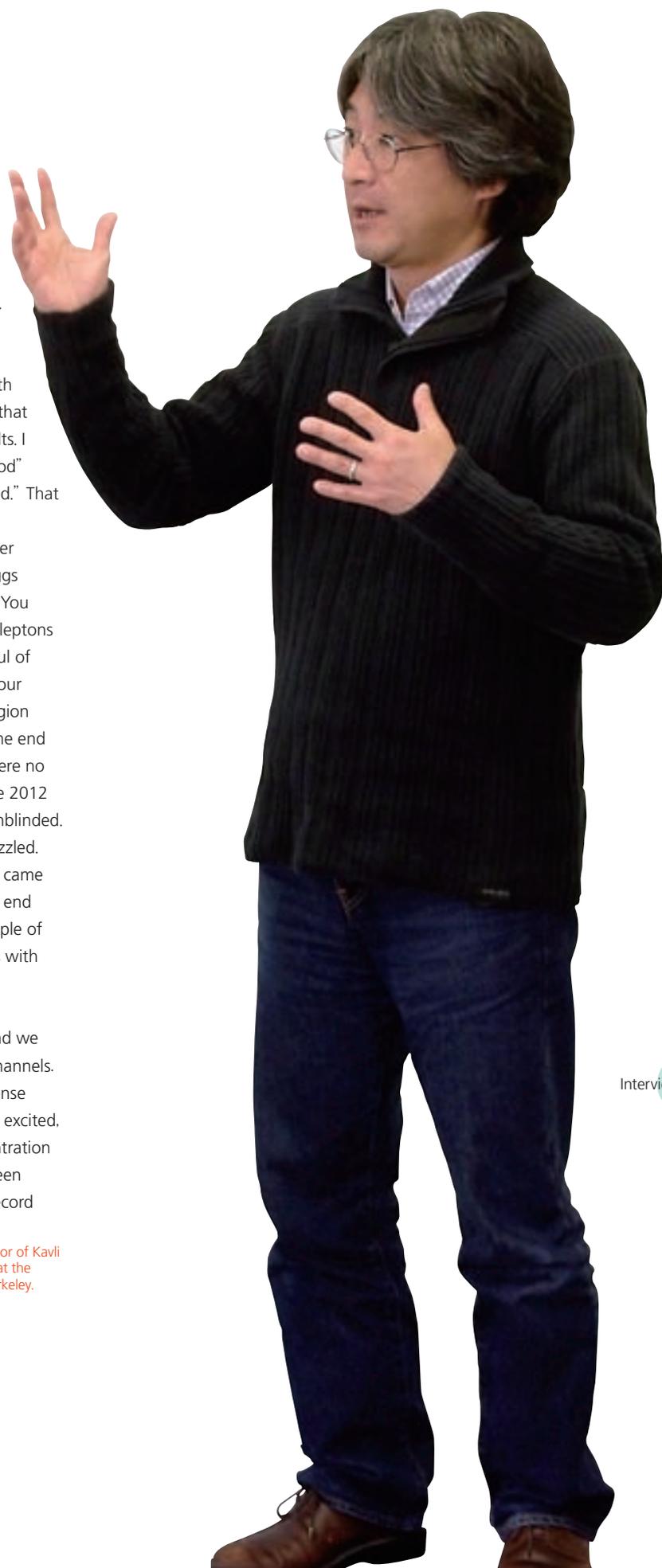
I remember a particularly “crisp” exchange of mails with the ATLAS colleague that had sent me the results. I wrote him “Oh my God” and he replied “Indeed.” That was it.

One-two weeks later we unblinded the Higgs → 4-leptons analysis. You know, for Higgs → 4-leptons we expected a handful of candidates. We had four events in the mass region around 125 GeV at the end of 2011. But, there were no new candidates in the 2012 data when we first unblinded. So, we were quite puzzled. Then nine candidates came all of a sudden at the end of June, a good example of statistical fluctuations with small numbers.

Murayama: Wow.

Gianotti: So in the end we had signals in both channels. It was a very very intense month. We were very excited, but focus and concentration prevailed. We have been working so hard to record

Hitoshi Murayama is Director of Kavli IPMU. He is also Professor at the University of California, Berkeley.



the highest-quality data, to improve the reconstruction efficiency and detector performance for electrons, muons, and photons, and to understand all possible issues of the analysis. Every detail was scrutinized; we made all sorts of checks in time for the seminar. When I entered the auditorium...there were so many people there—many of my ATLAS colleagues (and I knew that many more were following from other rooms or from Melbourne² where the ICHEP Conference was taking place), many summer students, and many of the scientists who have made the history of the LHC, like Lyn Evans and Giorgio Brianti. There were also many of the key people from the LHC infrastructure and operation teams, with Steve Myers, the head of the Accelerators. And there were previous CERN Directors General, including Chris Llewellyn-Smith, Luciano Maiani, and Robert Aymard, and CERN Management, obviously.

Murayama: So you were kind of tense and nervous?

² The 36th International Conference on High Energy Physics was held in Melbourne on July 4-11, 2012.

Gianotti: I was not really nervous...it was rather...an intense moment.

Murayama: Certainly you looked very relaxed and confident.

Gianotti: I was very motivated...beyond the exceptional result, I was so proud to show how well ATLAS, I mean the whole experiment, had been functioning in all its components (detector, data-taking, software, computing, analysis), thanks to the hard and competent work of hundreds of talented, dedicated people, among which were many young people. The contribution of every individual was crucial, and at the same time the ensemble worked as a perfectly synchronized orchestra.

Murayama: That is wonderful.

Gianotti: A great time...and the accomplishment of more than 20 years of efforts of thousands of people.

Told by CERN Director General to Postpone Travel to Melbourne

Murayama: When did you actually learn that CMS also had a comparable signal?

Gianotti: The CMS spokesperson, Joe Incandela, and I had been in touch all the time. We were not discussing the results in detail, but we knew more or less how things were progressing in the other experiment. We had agreed that we would not disclose any information about the other experiment to our Collaboration.

Murayama: How much information did you share at that stage?

Gianotti: We knew that the other experiment had an excess in the mass region around 125 GeV also in the 2012 data. We knew that the excess was growing with time and that it was there in the two main channels ($\gamma\gamma$ and 4-leptons). This was the kind of information we shared. We also kept the Director General (DG) informed. I think you were at CERN for the June SPC week?

Murayama: Yes, I was.

Gianotti: That week was really something...it was a Council week and I remember on June 23rd, at the Council dinner, the DG took Joe and me aside and told us, "Guys postpone your trip to Melbourne. The council wants

a seminar here at CERN." We then discussed the date and agreed tentatively for July 4th.

Murayama: There was actually a discussion at the SPC at that time, that the announcement should be done on site, rather than at Melbourne.

Gianotti: Exactly. On the Friday before the seminar, June 29th, the DG called Joe and me in his office and said "Now I want to have the numbers of σ ." We put the numbers on the table. It was 5.1 for ATLAS.

Murayama: CMS, I remember, had 4.9. I am sure that was really exciting.

Gianotti: I will never forget those days.

Murayama: So, until that moment Rolf (CERN Director General, Rolf-Dieter Heuer) didn't know how significant the signal was?

Gianotti: Actually on June 23rd, when it was decided to hold a seminar at CERN, he knew that by combining the results from both experiments the signal would be above 5σ , but he didn't know exactly how much we had individually.

Murayama: Interesting. When did he invite Peter Higgs, François Englert, and Tom

Kibble?

Gianotti: I don't know exactly, I think he invited them a few days before the seminar.

Murayama: I see. So he was really confident about that, wasn't he?

Gianotti: I think he was confident that it would be above 5σ by combining both experiments. So, enough to announce a discovery.

Murayama: Individually you had 5σ . That was amazing. I wasn't expecting that.

Gianotti: We had convincing signals in both channels. When at the beginning of June the 2012 ATLAS data were showing an excess in the Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$ channel, but we had no new Higgs $\rightarrow 4$ -lepton candidates, I told myself, "We will not go public if we don't see it in the two main decay channels." Then, gradually, with more data, the signal built up in both channels. I would like to stress that the accelerator really performed in a superb way that month of June, the best month of operation of all 3 years.

Without that performance, we would have not discovered the Higgs boson so quickly.

Murayama: Fantastic, I am sure it was a really, really

exciting moment.

Gianotti: We owed it to team work and team spirit. We worked all together, experiments and accelerator groups, in a very harmonized and efficient way.

Murayama: I was watching the announcement over the web from my home in Berkeley. That was after midnight, but I couldn't sleep at all. It was so exciting, and your last slide said 5σ ...and I wept. I literally wept. It was so moving.

Gianotti: The excitement is also due to the mass of the new particle. Nature has been very kind to us because a Higgs boson of 125 GeV decays into many different final states ($\gamma\gamma$, ZZ, WW, bb, $\tau\tau$) and so we can study it in a variety of topologies both at the LHC and future accelerators. If it had been heavier, only WW and ZZ decay modes would have been experimentally accessible, thereby reducing dramatically the opportunities of measuring its properties.

Murayama: We are so lucky that we can actually study all of them.

All the ATLAS Members Worked in Full Synchronization

Gianotti: Another reason I was very proud on that 4th of July was our accomplishment as an experiment. ATLAS worked in a superb manner over the past years, and in particular in the weeks preceding the discovery and the announcement. The data included in the results shown by ATLAS and CMS on July 4th were recorded until June 18th. June 18th was a Monday, and on Sunday, June 24th, we already had the preliminary results based on the full data set that we would show on July 4th. It means that the data taken up to 6 p.m. on June 18th had been calibrated, processed, reconstructed, distributed all over the world, analyzed, and gone through the statistical combination of the various Higgs boson decay channels.

Murayama: That is so fast.

Gianotti: Amazing. So, on June 24th, I already had the complete results on my laptop...not final, there were still...

Murayama: Some refinement.

Gianotti: ...some refinements and cross-checks to be done,

but actually they didn't change much. So, this really shows that all the people working at the various steps of the chain—and it's a very long chain from the detector to the final plots and numbers—had done their work in the best way, impressively fast, and fully synchronized with the others. Really fantastic. I was very much impressed.

Murayama: Then right after you finished the last slide there was a standing ovation, right?

Gianotti: That was a very touching moment...the awareness that the LHC, and by LHC I mean the experiments, the accelerator, the international collaborations, and CERN, had accomplished something great and memorable.

Murayama: There is a famous picture of you and Mr. Peter Higgs together and he is blessing you for this incredible achievement. That was probably the first time you met him?

Gianotti: It was. I congratulated him on his brilliant idea.

Murayama: He was right.

Gianotti: Yes he was right. Peter Higgs is a very modest,



nice person. I was really impressed by him, not only for his scientific stature but also for his human qualities. He congratulated ATLAS on the great achievement. I gave credit to him, and he gave credit to the experiments.

Murayama: That's fantastic.

Gianotti: An unforgettable moment.

Murayama: A word on François Englert?

Gianotti: I had met François Englert before. He has a completely different personality, very sparkling... "flamboyant" you would say in French.

Murayama: Then you moved to the press conference.

Returned to Business as Usual Right after the Press Conference

Gianotti: The press conference was very interesting with a lot

of stimulating questions. There I had some presentiment, for the first time, of the impact our discovery would have on people's minds. We finished at 1 p.m. Then I went to the LHC Machine Committee meeting (LMC), which takes place every Wednesday afternoon. The LMC is a meeting where the accelerator experts—including the operation, and infrastructure teams—and representatives from the experiments get together to review achievements and problems of the previous week and to plan for the following week. That Wednesday, July 4th, was no exception, and I attended the LMC meeting as every Wednesday.

Murayama: Wow. Business as usual!

Gianotti: Business as usual—and that meeting was something special, with a kind

of surreal atmosphere—no one mentioned the morning's events; no special celebration; we did not congratulate each other. Nothing. Business as usual, back to normal life.

Murayama: Really? That's amazing.

Gianotti: Steve Myers started the meeting as every Wednesday: minutes of previous meeting, action items, etc. The only allusion to the discovery was on the first slide of the status report given by Mike Lamont, the head of the LHC operation team. The title was "Report from the Higgs factory operation" instead of the usual "Report from the LHC operation." British humour....That was it.

Murayama: That's a nice touch, though.

Gianotti: It was. At some point during the LMC meeting I realized that I had

switched off my cell phone during the press conference and had forgotten to switch it on again. Immediately I received a call from Paola Catapano (from the CERN communication group) who asked: "Where are you hiding? The journalists are looking for you." I replied I was at the LMC meeting.

She shouted at me "Are you craaaaaazy? You are going to the LMC meeting the day of the Higgs discovery, when the press from all over the world is on site?" I replied, "Paola, we discovered a new particle, that's fantastic, but now let's move on."

Murayama: Back to business.

Gianotti: After the LMC I went home to prepare my luggage for the trip to Melbourne. I failed to forget that it was winter in the southern hemisphere...

Murayama: No champagne that day?

Gianotti: There was a little champagne party in building 40, but it was during the press conference.

Murayama: So you missed it.

Gianotti: I missed it. I was told that it was a nice moment, and an informal one. People had gathered together

spontaneously.

Murayama: Now that you have discovered the Higgs boson, and you stepped down as the spokesperson, what's next for you?

Gianotti: After stepping down as spokesperson, and completing some tails of my previous job, I have been contributing (as main editor) to the ATLAS article describing the measurements of the Higgs boson couplings. It was submitted for publication on 4th July 2013 (exactly one year after the announcement of the discovery!), together with the “twin” paper on the determination of the Higgs boson spin.

Murayama: They are beautiful papers.

Gianotti: The work on the Higgs boson paper was a lot of fun. I had the chance to work with many young people and to dig into the details of the analysis. By the way, Hitoshi, in several cases the experimental uncertainties on these measurements are becoming comparable to the theoretical uncertainties. This calls for some additional work from theorists...

Murayama: I know. The data are calling for lots of



improvement in theory.

Gianotti: Now I am here in Japan for a completely different reason. I am involved in a review of the Japanese participation in the LHC upgrade—both the accelerator and ATLAS. Japan has made very strong contributions to the LHC, from construction of high-tech detector and accelerator components to physics analyses (including Higgs boson searches in the Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$ channel). Giving lectures, mostly in the US, has been another intense activity over the past months. I like teaching very much, but I had to neglect it while I was Spokesperson.

Murayama: You are also involved in P5 in the US.

Gianotti: Yes, and this is another commitment requiring traveling and quite

some work. As you know P5 (Particle Physics Program Prioritization Panel) is a committee set up by the US Department of Energy (DOE) to propose the roadmap for US high energy physics for the 10-20 years to come. It's a very interesting and stimulating panel, covering the full spectrum of topics and facilities in our discipline, including cosmic surveys, neutrino physics, underground experiments looking for dark matter, colliders, etc. This is making my life a bit busy at the moment, but I plan to ramp up my ATLAS activity again soon, to prepare for the second LHC run. Indeed, in 2015 the LHC energy will be raised by a factor larger than 1.5,³ so that the potential for both discovering new physics and performing precise measurements of the known

particles (including the new “entry,” the Higgs boson) will improve significantly.

Murayama: Good, I am sure you will enjoy that.

Studied Humanities in High School and Piano in Parallel

Murayama: Now back a little bit to your own story. You actually majored in music right? You got a degree at the conservatory.

Gianotti: I got a 10-year piano degree, but in parallel I have also been studying humanities at high school, so Latin, ancient Greek, literature, history of art, philosophy... and very little math and physics.

One good thing of the

³The ongoing LHC upgrade is to increase the energy of each proton beam from 4 TeV to 6.5 TeV (center-of-mass energy from 8 TeV to 13 TeV). It is expected to be completed by early 2015.

Italian education system is that no matter what you study in high school, you have access to the full spectrum of disciplines at the University level. So even if you have studied humanities, you can move to science. This is very good, because at the beginning of high school, when you are 13 years old or so, you don't really know what you want to do in life. And the years between say 13 and 18 are crucial for kids to mature. So it's very important to have flexibility in the education system, and not to be forced to take final decisions about your professional life when you are not even a teenager.

Murayama: What made you do that switch?

Gianotti: Many reasons. First of all, I have always been a very curious kid, asking all kinds of questions. Why don't stars fall from their height? Why do they stick to the sky? At that time there was no Web, so I could not find information easily and quickly. I used to ask adults and often replies were unsatisfactory. So I wanted to find the answers myself, or at least contribute to finding them. That was one

motivation.

Murayama: You wanted to know more.

Gianotti: Yes. Then, when I was 16 or 17, I read a beautiful biography of Marie Curie. I was stunned. I was particularly impressed by her "domestic" way of doing research. Her small and rudimentary laboratory was a room in her house, close to the kitchen, and she could check the radioactive samples while she was preparing the soup for dinner. I found this simple and familiar way of doing science very attractive. Of course, what I ended up doing is completely different...I could not move ATLAS to my kitchen!

Murayama: And you can't have a kitchen right next to it.

Gianotti: Well, actually we do have a small kitchen at the ATLAS experimental site. But that's not what I meant. Another event that pushed me into physics occurred in my last year of high school, when our professor of physics talked about the photoelectric effect. Of course, we didn't have enough mathematical grounds to understand quantum mechanics and the details of the underlying

physics. But I was very much impressed by the explanation provided by Einstein of this phenomenon: he understood that electrons are emitted from a metal only when the sample is hit by light of the right wavelength (hence photons with quantized energy equal or larger than the electrons' binding energy in the material). I found this explanation so obvious, so compelling, so elegant, and so simple...that I said to myself, "Physics is what I want to do!"

Murayama: You were not puzzled by this wave-particle duality?

Gianotti: Not much at that time because I was not really exposed to it. I am more puzzled now...but we know that quantum mechanics can be very little intuitive.

Murayama: Anyways, that really sank into your mind.

Gianotti: The three elements I mentioned were very instrumental to bring me into physics. I liked philosophy as well, because it also tries to identify and address the big questions. But, I had the impression that physics is more direct, as it really strives to answer the

questions one by one through experiments, observations, and measurements. So I decided to study physics. I was of course not sure that this would be my...

Murayama: Lifetime passion?

Gianotti: Yes. But the hesitation didn't last long...as soon as I started to study mathematics, mechanics, thermodynamics, and later on quantum mechanics and quantum field theory, I understood that was really my way.

What Next for Particle Physics?

Murayama: Great! Now looking further into the future, what's next for particle physics?

Gianotti: It's really amazing that this question comes from you. You are a theoretical physicist, so you should guide us experimentalists! Seriously, I think there are three main results from the first LHC run. First, we have consolidated the Standard Model with a huge amount of measurements in a new energy regime. It works beautifully. Second, we have completed the Standard Model with the discovery of a Higgs boson. One of the

fingerprints of a Higgs boson is that it is a scalar particle, i.e., it has zero spin. All our observations are in very good agreement with this hypothesis. We don't know yet if the new particle is THE Higgs boson of the minimal Standard Model or an object belonging to a more complex theory. It looks very much like the Standard Model Higgs boson, but the present measurements by ATLAS and CMS are affected by large uncertainties (at the level of typically 20%). Anyway, all particles predicted by the Standard Model have now been observed experimentally.

The third important result from the first LHC run is that we have no evidence so far for physics beyond the Standard Model. It doesn't mean that new physics does not exist. It may well be accessible at the LHC in 2015 or later, when running at 13 TeV. It may even be that new physics is in our present data and we haven't find it yet because it manifests itself in a less obvious way than expected, hence requiring more work and more time to be identified.

Murayama: Like a degenerate

spectrum.

Gianotti: Exactly. Or very exotic signatures. Obviously, we have already scrutinized our data extensively and looked at as many topologies as we could. And the most obvious scenarios have been ruled out. But we cannot completely exclude that new physics is hiding in some difficult corners of the parameter space. For sure operation at 13 TeV will be extremely beneficial for searches (and not only for searches).

What can we expect to see? Well, we know that the Standard Model is not able to address in a satisfactory way all questions in fundamental physics. We don't know the composition of dark matter and what is the origin of the matter-antimatter asymmetry in the universe. Dark energy is an even bigger question, for which we have no clue. Is the accelerated expansion of the universe due to a modification of gravity or to an unknown form of energy? Actually the Higgs field exacerbates the problem.

Murayama: It's part of dark energy.

Gianotti: Moreover, we

are not able to formulate quantum theory of gravity, and therefore to reconcile gravity with the three other forces. For these and other reasons, we know the Standard Model is not a complete theory and there must be new physics. The question is: "Where is this new physics?" Is it at an energy scale accessible to the LHC or to a future higher energy collider? Or is this scale far too high to be explored by any conceivable accelerator built by mankind?

In any case, it's very nice that we now have a new particle, a Higgs boson, which requires detailed studies and measurements. It might be a door into new physics, as the latter could modify some properties of this particle (production and decays modes, strength of the interactions with the other particles, etc.). For instance, the LHC can reach an ultimate precision on the measurement of the Higgs boson couplings at the level of 2-5% (based on some assumptions). This would allow some scenarios of new physics to be excluded. To do better, a precision of a few percent is needed, which

can only be provided by an e^+e^- accelerator, like the ILC. Also, only an e^+e^- collider allows measurements of the absolute Higgs couplings to be made in a model-independent way.

Another crucial study in the years to come, an essential "closure test" of the Standard Model, is related to WW scattering at high mass..

Murayama: Demonstrating unitarity of scattering.

Gianotti: Does the Higgs boson fix the bad behavior of the Standard Model for large masses of the WW system? Or is there a new dynamics coming into play? This is a very interesting territory to study, which again calls for full LHC energy because..

Murayama: The cross section is so low.

Gianotti: Right. So, interesting times ahead.

Murayama: Let's hope for the best.

Gianotti: Yes, let's hope for the best, *Kanpai* to new physics!

Murayama: That is right, thank you Fabiola.

Gianotti: Many thanks to you, Hitoshi.

European Union's UNIFY Workshop

Hirosi Ooguri

Kavli IPMU Principal Investigator

Since 2011, the Kavli IPMU has been participating in the research program entitled, "Unification of Fundamental Forces and Applications (UNIFY)," under the International Research Staff Exchange Scheme of the Marie Curie Actions of the European Union (EU). There are three nodes in the UNIFY network in Europe: the Berlin node consisting of Humboldt University and the Max-Planck Institute for Gravitation Physics, the Paris node with the École Normale Supérieure, the University of Paris VI, and the Centre de Saclay of the French Atomic Energy Commission, and the Portuguese node with the University of Porto. Non-EU nodes in the network are at the California Institute of Technology and the Stony Brook University in the United States and the Perimeter Institute of Canada, as well as the Kavli IPMU. The purpose of the program is to enhance exchanges and collaborations among researchers in the UNIFY network. The Marie Curie Programs cover the travel expenses of EU researchers when they visit non-EU nodes. The research objectives of the programs are fundamental aspects of superstring theory and quantum field theory toward understanding the unification of forces in nature. Hirosi Ooguri represents the Kavli IPMU as a member of the executive board of the

UNIFY network.

Over the past 3 years, several collaborations have emerged within the UNIFY network. Every summer, the network hosts its main conference. The first main conference was held at the University of Porto in 2011, followed by the second main conference in Berlin in 2012. This summer, the third meeting was held at the Kavli IPMU. For two weeks from August 26 to September 6, the Kavli IPMU hosted the UNIFY workshop entitled, the "Kavli IPMU Workshop on Gauge and String Theory."

Unlike regular research conferences, we only scheduled a two hour talk for each morning, leaving afternoons for informal discussions and collaborations, to enhance exchanges and collaborations within the UNIFY network. This followed the successful style of workshops practiced at the Aspen Center for Physics for more than 50 years. In fact, several

research results have emerged from collaborations during the workshop.

The first week of the workshop was dedicated to the integrability structure of the AdS/CFT correspondence, and the second week, to exact techniques such as localization in supersymmetric gauge theories.

Approximately 50 researchers from Europe came to participate in the workshop, some of whom stayed at the Kavli IPMU for a few months and contributed to its research activities. Most of the researchers from abroad were supported by EU's Marie Curie Action, and the total cost for the Kavli IPMU was about half of its regular Focus Week.

Though the workshop turned out to be larger than we originally anticipated, it was very successful. We are grateful to the administrative staff members of IPMU for their dedicated service.



Holography and QCD –Recent Progress and Challenges–

Shigeki Sugimoto

Kavli IPMU Professor

In the late 1990's, a mysterious duality called the “gauge/string duality” was discovered out of the research in string theory. The claim is that a gauge theory and string theory in a certain curved space-time can be physically equivalent. This duality is also called the “holographic dual,” because it is a duality relating two theories in different space-time dimensions. From about 10 years ago, the application of this idea to QCD, which is the theory of strong interaction, has been discussed extensively. This workshop, held on September 24 - 28, is mainly focused on topics related to the research in this direction.

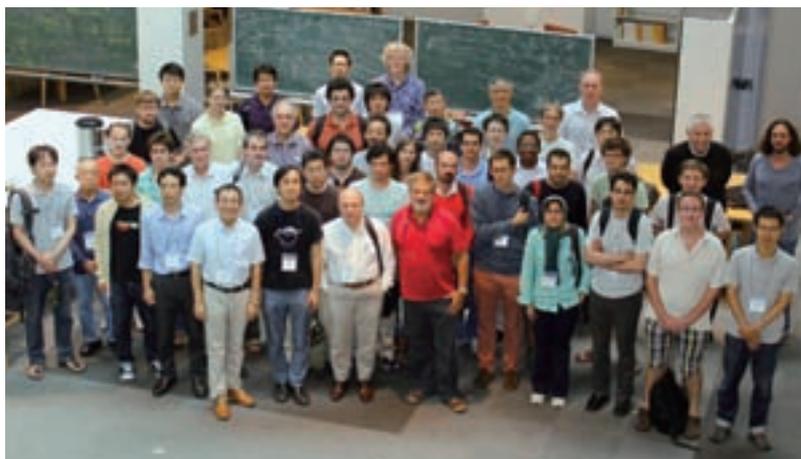
It has been shown that this new technology to analyze QCD using the holographic dual provides very useful and powerful tools to analyze the properties of hadrons and QCD, such as spectrum and interactions of hadrons, QCD phase structure, properties of quark gluon plasma realized at high temperature, and so on. In particular, one of the advantages of this approach is that it can be applied to the systems with time evolution and/or chemical potential, for which other non-perturbative methods like lattice QCD are not useful enough. In fact, it has attracted

the attention of hadron physicists as well as string theorists and there have been fruitful interdisciplinary collaborations between string theorists and hadron physicists. One of the successes of the workshop was that we were able to gather together experts of both fields around the world, providing a good opportunity to interact with each other. There were many string theorists showing results in hadron physics and hadron theorists using holography and string theory. It was impressive to see that they were discussing and debating together toward common goals without a serious language barrier.

The topics discussed in the workshop include, calculations of hadron masses including the effects of electro-magnetic interactions, analysis in the Veneziano limit of QCD, descriptions of heavy hadrons,

research on the systems with time evolutions that are aimed toward the application to the experiments of heavy ion collisions in RHIC and LHC, study of quark gluon plasma, various phenomena in the presence of strong electric and magnetic fields, phase structure with finite temperature and chemical potential, and so on. There were 25 talks in 5 days, and a lot of new interesting results on various topics related to holography and QCD were reported.

This workshop was supported by the European Science Foundation (Holograv network) and a Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas 2303, MEXT, in addition to the WPI research funds at Kavli IPMU. Finally, I would like to thank Ms. Ujita for the administrative support, which was crucial to make this workshop possible.



Symposium on Gravity and Light

Marcus Werner

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

An international workshop called “Symposium on Gravity and Light” was held at Kavli IPMU for four days, September 30 to October 3, 2013.

Light is our main source of information about the distant, early universe — indeed, until gravitational waves and extragalactic neutrinos can be observed directly and routinely, it is the only source. So in order to study the origin and evolution of the universe, it is fundamentally important to understand light propagation in spacetime under the influence of gravity alone, even before taking into account other astrophysical effects such as absorption. Hence, this workshop was dedicated to gravitational optics in a broad sense.

Black hole spacetimes were a major theme since the influence of gravity on light is, of course, seen most clearly when it is strong. Starting with optical geometry and the Gauss-Bonnet method (Marcus Werner), we discussed stable photon orbits, which are analogous to “whispering galleries” (Gary Gibbons), extreme trapping horizons of black holes (Tetsuya Shiromizu), and the properties and observability of black hole shadows (Kei-ichi Maeda and Volker Perlick).

Since the optical geometry of rotating Kerr black holes has Randers-

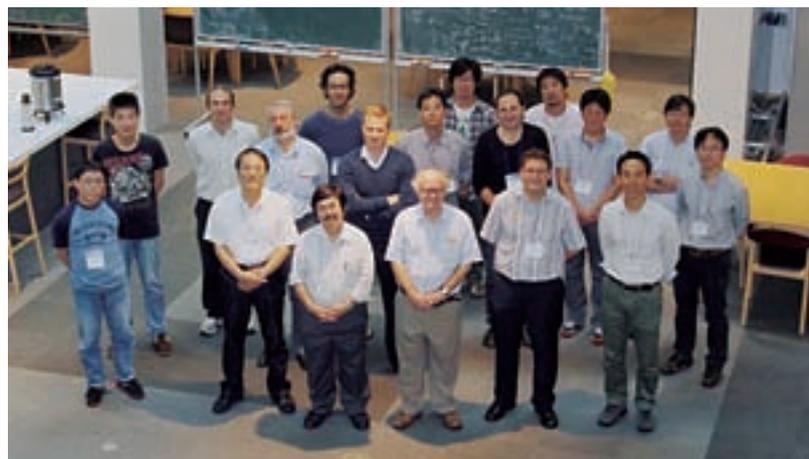
Finsler structure, more general mathematical results on geodesics (Erasmus Caponio and Ricardo Gallego Torromé) and Killing vectors (Takayoshi Otsuka) in Finsler geometry were presented as well. Mathematical aspects of gravitational lensing theory were also considered, in particular universal magnification invariants for ADE singularities (Amir Aazami), and magnification relations for perturbed singular isothermal quadrupole lenses (Zhe Chu).

Testing cosmology with gravitational lensing was another major theme and included a review of the recent controversy about the rôle of the cosmological constant in light bending (Masumi Kasai), lenses with negative convergence, which may be used as effective models for cosmic voids (Hideki Asada), as well as tests of the homogeneity postulate and observational prospects (Jean-

Philippe Uzan). We also discussed the underlying gravity theory, in particular inflation (Misao Sasaki), and a new geometrodynamical framework to derive gravity actions, in which light dispersion relations are fundamental (Frederic Schuller).

Thus, in keeping with the interdisciplinary spirit of Kavli IPMU, our workshop brought together astronomers, theoretical physicists and mathematicians, which did in fact result in rather lively and sometimes controversial discussions.

Finally, I would like to thank the other organizers of this workshop, Amir Aazami, Frederic Schuller and especially Shinji Mukohyama for leading the conclusion session, and also our staff members, in particular Rie Ujita and Rie Kohama, for their administrative support.



News

On the Passing of Fred Kavli, Founder and Chairman of The Kavli Foundation

On November 21, 2013, Fred Kavli, Founder and Chairman of The Kavli Foundation passed away at the age of 86.

In 2012, the IPMU joined the Kavli family as the first Kavli Institute in Japan and the 16th in the world, and renamed as the Kavli IPMU, following an endowment from The Kavli Foundation. We wish to thank Mr. Fred Kavli again for his generous support and wish to express our condolences.

We also refer to the Obituary on pp. 28 – 29 in this issue of the Kavli IPMU News, by Kavli IPMU Principal Investigator Hiroshi Ooguri.

Public Lecture by Fabiola Gianotti “Higgs Boson and Our Life”

Dr. Fabiola Gianotti, former spokesperson of the ATLAS experiment that discovered the Higgs boson at CERN, gave a public lecture entitled “Higgs Boson and Our Life” at the Hama-Rikyu Asahi Hall on November 20, 2013. It was hosted by the Kavli IPMU and co-hosted by the Asahi Shimbun Company.

This public lecture received much interest because of the announcement of the 2013 Nobel Prize in Physics to be awarded to theorists who

predicted the Higgs boson in the preceding month, and the Hall was filled to capacity. The lecture was also broadcast live, with an audience of nearly 1,000. Dr. Gianotti’s talk on the experiment at CERN, the Higgs boson, and the like, was interpreted by Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama in Japanese at short intervals. In the latter half of the lecture, Mariko Takahashi, Senior Staff Writer of the Asahi Shimbun Company, acted as moderator. She asked Dr. Gianotti frank questions, which highlighted her personality, and along with Murayama’s nice interpretation, pleased the audience very much.

Those who are further interested in this topic, please read Director Murayama’s interview with Fabiola Gianotti on pp. 12 – 19 in this issue of the Kavli IPMU News.



From left to right: Hitoshi Murayama, Fabiola Gianotti, and Mariko Takahashi

Minister of State for S&T Policy Ichita Yamamoto Visited Kavli IPMU

On November 20, 2013, Minister of State for Science and Technology Policy Ichita Yamamoto visited the Kavli IPMU at the University of Tokyo’s Kashiwa campus. Mr. Yamamoto heard an overview from Kavli IPMU Director Murayama and other researchers about the SuMIRe (Subaru Measurement of Images and Redshifts) Project. This project has been supported by the Funding Program for World-Leading Innovative R&D on Science and Technology (FIRST) and led by Director Murayama as the core researcher. Mr. Yamamoto then heard progress reports from

SuMIRe collaborators at Princeton University and NASA’s Jet Propulsion Laboratory via videoconference. Mr. Yamamoto also observed activities at the Kavli IPMU, such as Fabiola Gianotti’s seminar, which was held on that day, laboratory work for an experimental apparatus, and joining tea time for researchers.



(Center) Mr. Yamamoto, Minister of State for S&T Policy, having a pleasant chat with Kavli IPMU foreign researchers at tea time

Kavli IPMU Director Murayama Gave a Presentation at CSTP

Kavli IPMU Director Murayama was invited to the 116th session of the Council for Science and Technology Policy (CSTP) held at the Prime Minister’s official residence on December 17, 2013 to give a presentation in the latter half of the session where “The Trend of Science & Technology” was discussed. In his presentation, he explained the Kavli IPMU’s research to look into the origin and fate of the Universe.



Kavli IPMU Director Murayama, giving presentation at CSTP



Chairperson (Prime Minister Abe) and Members of the CSTP hearing Director Murayama’s presentation

Kavli IPMU and RIKEN's iTHES Signed Collaboration Agreement

On December 2013, Kavli IPMU signed a collaboration agreement with iTHES (Interdisciplinary Theoretical Science team) of RIKEN (the Institute of Physical and Chemical Research). The signing ceremony was held at RIKEN's Wako campus. iTHES is a new group launched in 2013 at RIKEN with Chief Scientist Tetsuo Hatsuda designated as Director, aiming at interdisciplinary collaborations of theoretical sciences in different fields such as physics, material science, and biology. This is the beginning of collaboration between the Kavli IPMU and iTHES for the development of theoretical sciences. We note that Dr. Hatsuda is also Visiting Senior Scientist at Kavli IPMU since October 2010.



From left to right, Tetsuo Hatsuda, Maki Kawai (Executive Director of RIKEN), Hitoshi Murayama, and Shigeki Sugimoto (Kavli IPMU Professor)

Subaru's FMOS Reveals the Growth of Massive Galaxies in the Early Universe

An international team of astronomers participating in the Cosmological Evolution Survey (COSMOS), including Kavli IPMU Assistant Professor John Silverman, Professor at Nagoya University and Kavli IPMU Principal Investigator Naoshi Sugiyama, and a graduate student at Nagoya University Daichi Kashino, has found the birth of new stars at remarkable rates in galaxies over nine billion years ago, using the Fiber-Multi-Object Spectrograph (FMOS) mounted on the Subaru Telescope. Also, it has been confirmed

that the gases surrounding massive galaxies were relatively dusty and enriched by heavier elements. This means that even at these early times, massive galaxies showed signs of maturation. These results provide us with a clue to address an important question, "What was the Universe like when it was young."

Part of the results from this research has been published on November 1, 2013 in *Astrophysical Journal Letters* 777 (2013) L8.

Julius Wess Award Goes to Takaaki Kajita

Takaaki Kajita, Director of the Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo, and Principal Investigator at the Kavli IPMU received the 2013 Juius Wess Award.



The Julius Wess award was created in 2008 to commemorate the outstanding work of Professor Julius Wess in theoretical physics, and it is granted to elementary particle or astroparticle physicists for outstanding achievements by the Karlsruhe Institute of Technology (KIT). Professor Kajita received this award for his "significant role in the discovery of atmospheric neutrino oscillations with the Super-Kamiokande Experiment." The award ceremony took place on December 19, 2013 at the KIT Elementary Particle and Astroparticle Physics Center (KCETA).

2013 President's Award for Operational Improvement to Kavli IPMU Working Group

A working group made up of twelve Kavli IPMU Administrative Division staff members has received the 2013 President's Award for

Operational Improvement. (The group has actually received the highest award with ¥1M support for overseas study tour as a supplementary prize.) The award has been given in recognition of the group's creation of a safety training video in English and construction of an online system to test for the training contents, which resulted in comprehensive safety training for newly arriving foreign researchers with no exception and no delay and reduction of administrative burden for such training, and which are expected to be adopted university-wide and thus to contribute for further developing globalization of the University of Tokyo. The award was presented by President of the University of Tokyo Junichi Hamada at an awards ceremony held on December 19, 2013 at the Ito Hall on the University of Tokyo's Hongo campus. Representing the working group, Rieko Tamura received a testimonial.



Working group of the Kavli IPMU Administrative Division receiving a testimonial from President Hamada

2013 Open House at UT Kashiwa Campus

An open house on the Kashiwa campus of the University of Tokyo was held on Friday, October 25, 2013. Though a two-day open house was planned as usual, the second day was cancelled because of an approaching typhoon. Even so, the Kavli IPMU's attractive program was very popular. Director Murayama presented "Ask a Scientist Live! Special," where a

mascot character of Chiba Prefecture, *Chiba-kun*, had a surprise appearance. Also, Kavli IPMU Professor Shigeki Sugimoto presented another “Ask a Scientist Live!” In addition, Digital Space Theater program, Japanese *Kyogen* performance by Kavli IPMU foreign researchers, guided building tours, and an experiential program of making a spectrograph by hand were presented.



Unable to speak, *Chiba-kun* made questions to Director Murayama by showing questionnaire posters.

WPI Centers Jointly Participated in SCIENCE AGORA 2013, and Received a SCIENCE AGORA Award

Science Agora 2013 was held on November 9 and 10 at the National Museum of Emerging Science and Innovation (*Miraikan*) in the Tokyo waterfront region of Odaiba, and all the nine WPI (World Premier International Research Center Initiative) centers participated jointly. Science Agora is an event hosted by the Cabinet Office, Government of Japan and other bodies, aiming at deepening interests in science and technology of the public, especially of the young generations, and consisting of presentations and exhibitions about the forefront researches and their outcomes. During the two-day event, more than 6,000 people visited. At the “WPI Science Live!” booth where all the WPI centers presented their scientific activities in rotation, the Kavli IPMU presented a lecture by Associate Director Nobuhiko Katayama and a talk session by two Assistant Professors in mathematics, Satoshi

Kondo and Tomoyuki Abe. This “WPI Science Live!” booth presentation was selected as one of 11 programs that received the Science Agora Award. The award ceremony was held on December 26 at *Miraikan*.



Kavli IPMU Associate Director Nobuhiko Katayama giving a lecture on the cosmology forefront and accelerator experiments



Kavli IPMU Assistant Professors Kondo (right) and Abe (left) explaining mathematics researches, using a blackboard

“The 9th Workshop to Aim at Spreading Astronomy” Held at Kavli IPMU

“The 9th Workshop to Aim at Spreading Astronomy” was held at the Kavli IPMU lecture hall for three days, November 17 - 19, 2013, co-hosted by the Kavli IPMU and the Astronomy Data Center of the NAOJ (National Astronomical Observatory of Japan). This Workshop has been annually held by NAOJ and others for those who are involved in spreading astronomy at science museums, planetariums, and educational institutions. This time, three-day intensive course was given to them aiming at conveying the latest knowledge of cosmology research to many people through them. The following researchers from the Kavli IPMU contributed to the Workshop. Professor Masahiro Takada served as a coordinator and also

gave a lecture. In addition, lectures were given by Principal Investigators Naoshi Sugiyama (also Professor at Nagoya University) and Mihoko Nojiri (also Professor at KEK), Associate Professor Shinji Mukohyama, affiliate members Eiichiro Komatsu (Director at the Max Planck Institute), Naoki Yoshida (Professor at the University of Tokyo), and Keiichi Maeda (Associate Professor at Kyoto University). Participants expressed comments such as “I wish to create a planetarium program that will convey the contents of the lectures,” and “I want to talk to students about how the Universe is attractive.”



A scene of the Workshop

The Ninth Joint Kavli IPMU-ICRR Public Lecture

On December 1, 2013, the Ninth Kavli IPMU-ICRR (Institute for Cosmic Ray Research) joint public lecture entitled, “Decoding the Universe,” was held at the Koshiba Hall on the University of Tokyo’s Hongo campus. The first lecture was given by Masahiro Ibe, an ICRR Associate Professor as well as a Kavli IPMU Scientist, on “The Standard Model of Elementary Particles and the Higgs Boson,” and the second lecture by Ken’ichi Nomoto, Principal Investigator at the Kavli IPMU, on “Evolution of the Universe Probed by Means of Supernovae.” After the lectures, there was a science-café style discussion time. The lecturers nicely responded to the questions from many people surrounding them.



Ken'ichi Nomoto explaining the supernova explosion

The Third WPI Joint Symposium Held in Sendai

On December 14, 2013, the Third Joint Symposium of the WPI (World Premier International Research Center Initiative) centers entitled, "Science Talk Live!" was held at the Sendai International Center with participation of all the nine WPI centers. About 600 high-school students were invited from Miyagi Prefecture as well as various places in the Tohoku region. As this Joint Symposium was the first one held after the number of WPI centers had increased to nine, lectures were given by researchers at Tohoku University's AIMR (The Advanced Institute for Materials Research) and Directors of three new WPI centers launched in 2012, and, in addition, all the nine WPI centers respectively ran a booth. At the Kavli IPMU booth, Director Murayama's video presentation about the Higgs Boson was shown and also it was demonstrated how spectroscopic observations are useful in astronomy by observing an actual light source with a small hand-made model of spectroscope. This way, we conveyed



High-school students gathering at the Kavli IPMU booth

to many high-school students how the Kavli IPMU's research of the Universe is attractive.

Science Camp for High School Students "Open the Door to the Universe"

A winter science camp for high school students, "Open the Door to the Universe" was held at the Kavli IPMU for three days, December 25 - 27, 2013, and twenty students selected among applicants from all over Japan took part. The science camp is one of the projects supported by JST (Japan S&T Agency), providing hands-on experience to high school students. JST selects programs for subsidization from applications, and three-day camps on approved topics are held at universities or research institutes, which include discussions with frontier scientists and among the participating high school students. This was the third science camp held at the Kavli IPMU. The participating high school students heard lectures from Kavli IPMU Professor Shigeki Sugimoto and other researchers on forefront topics in theoretical physics and mathematics, and, in addition, experimental physics. They also attended Kavli IPMU researchers' teatime at 3 p.m., where they actively asked questions of foreign researchers in English. A closing ceremony was held on the last day, with Kavli IPMU Director Murayama and other researchers in attendance.



Students, lecturers, and Kavli IPMU staff

Kavli IPMU Seminars

1. "Noncommutative Deformations of curves and spherical twists"
Speaker: Michael Wemyss (U Edinburgh)
Date: Sep 30, 2013
2. "Holographic Quantum Effective Actions"
Speaker: Francesco Nitti (APC, Paris 7)
Date: Oct 01, 2013
3. "Large Scale Structure – Cosmic Flows"
Speaker: Marc Davis (Berkeley)
Date: Oct 02, 2013
4. "Introductory course on functional renormalization group I"
Speaker: Roberto Percacci (SISSA)
Date: Oct 04, 2013
5. "Science with CMB spectral distortions: a new window to the early Universe"
Speaker: Jens Chluba (Johns Hopkins U)
Date: Oct 04, 2013
6. "Photons from a QCD phase transition in neutron star mergers"
Speaker: Lance Labun (LeCosPa)
Date: Oct 04, 2013
7. "Theories of Natural Supersymmetry"
Speaker: Nathaniel Craig (Rutgers U)
Date: Oct 07, 2013
8. "Tilting theory on Geigle-Lenzing weighted projective spaces"
Speaker: Osamu Iyama (Nagoya U)
Date: Oct 07, 2013
9. "Vector Beta Function"
Speaker: Yu Nakayama (IPMU/ Caltech)
Date: Oct 08, 2013
10. "Introductory course on functional renormalization group II"
Speaker: Roberto Percacci (SISSA)
Date: Oct 09, 2013
11. "An implication of 126 GeV Higgs boson for Planck scale physics –

- naturalness and the stability of the vacuum –”
Speaker: Satoshi Iso (KEK)
Date: Oct 09, 2013
12. “Introductory course on functional renormalization group III”
Speaker: Roberto Percacci (SISSA)
Date: Oct 10, 2013
13. “Gravitational Lensing of the CMB: Mass Maps, Power Spectra, and B-modes with the South Pole Telescope”
Speaker: Gil Holder (McGill U)
Date: Oct 10, 2013
14. “Index Theory in Algebraic K-Theory and Algebraic Geometry”
Speaker: Jesse Wolfson (Northwestern U)
Date: Oct 10, 2013
15. “Asymptotic safety: motivations and results”
Speaker: Roberto Percacci (SISSA)
Date: Oct 11, 2013
16. “CDMSlite: A Search for Light WIMPs”
Speaker: Ritoban Thakur (U of Illinois Urbana Champaign)
Date: Oct 11, 2013
17. “Correlation Functions in N=4 SYM from Integrability”
Speaker: Yunfeng Jiang (Saclay)
Date: Oct 15, 2013
18. “How we can learn and use languages freely? —study of human faculty of languages and mathematics—”
Speaker: Gyo Takeda (Tohoku U)
Date: Oct 16, 2013
19. “Signatures of a companion star in type Ia supernovae”
Speaker: Keiichi Maeda (Kyoto U)
Date: Oct 17, 2013
20. “Heavy modes and the oscillatory features in the curvature power spectrum”
Speaker: Xian Gao (Titech)
Date: Oct 18, 2013
21. “Lecture 1: Progress Towards the Core-Collapse Supernova Mechanism”
Speaker: Adam Burrows (Princeton U)
Date: Oct 22, 2013
22. “Lecture 2: Core-Collapse Supernovae and Diagnostics: Some Observables and Diagnostics”
Speaker: Adam Burrows (Princeton U)
Date: Oct 22, 2013
23. “Spectra and Photometry: Windows into Exoplanet Atmospheres”
Speaker: Adam Burrows (Princeton U)
Date: Oct 23, 2013
24. “Lecture 3: Brown Dwarfs: 20 Years Later”
Speaker: Adam Burrows (Princeton U)
Date: Oct 24, 2013
25. “Galaxy Clusters from Inside to Out: Thermal Instability and Non-thermal Pressure Support”
Speaker: Ian Parrish (CITA)
Date: Oct 24, 2013
26. “Stable homotopy type of Seiberg-Witten monopole Floer homology”
Speaker: Tirasan Khandhawit (Kavli IPMU)
Date: Oct 24, 2013
27. “Orbifold Quasimap Theory”
Speaker: Bumsig Kim (KIAS)
Date: Oct 28, 2013
28. “Instanton Effects in ABJM Theory”
Speaker: Sanefumi Moriyama (KMI, Nagoya U)
Date: Oct 29, 2013
29. “Equiangular Lines in Real Euclidean Spaces and Seidel Matrices with Three Distinct Eigenvalues”
Speaker: Ferenc Szollosi (Tohoku U)
Date: Oct 29, 2013
30. “Derivative interactions in dRGT massive gravity”
Speaker: Rampei Kimura (RESCEU)
Date: Oct 29, 2013
31. “Gamma-ray bursts as the sources of the ultra-high energy cosmic rays?”
Speaker: Walter Winter (U Wuerzburg)
Date: Oct 30, 2013
32. “Why do super-massive black holes accrete?”
Speaker: Knud Jahnke (MPIA)
Date: Oct 30, 2013
33. “MSSM Neutralino signature”
Speaker: Yue-Lin Sming Tsai (Kavli IPMU)
Date: Nov 01, 2013
34. “Minicourse on the Madsen-Weiss Theorem [Part 1]”
Speaker: Charles Siegel (Kavli IPMU)
Date: Nov 05, 2013
35. “A physical introduction to conformal blocks”
Speaker: Jonathan Maltz (Kavli IPMU)
Date: Nov 05, 2013
36. “Evolution of electron capture supernova progenitors: new models, improved nuclear physics and hydrodynamic mixing uncertainties”
Speaker: Samuel Jones (Keele U)
Date: Nov 05, 2013
37. “Minicourse on the Madsen-Weiss Theorem [Part 2]”
Speaker: Charles Siegel (Kavli IPMU)
Date: Nov 06, 2013

Personnel Changes

Moving Out

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Yi Wang moved to Cambridge University as a Postdoctoral Fellow. He was at the Kavli IPMU from September 1, 2012 to October 31, 2013.

Simon Wood moved to the Australian National University as a Postdoctoral Fellow. He stayed at the IPMU as a Swiss National Science Foundation Postdoctoral Fellow from December 1, 2010 to November 30, 2011, and then he stayed at the Kavli IPMU supported by the JSPS Postdoctoral Fellowship Program for Foreign Researchers from November 30, 2011 to November 29, 2013.

Obituary: Fred Kavli (1927 – 2013)

Hiroshi Ooguri

Kavli IPMU Principal Investigator

On November 21, 2013, we received the sad news that Fred Kavli, Founder and Chairman of The Kavli Foundation, had passed away at the age of 86. He was an extraordinary man, and with his passing we feel the loss of one of the strongest advocates of basic science.

Fred Kavli was born on August 20, 1927 and grew up on a family farm in the Norwegian village of Eresfjord. After studying physics at the Norwegian Institute of Technology (now known as the Norwegian University of Science and Technology in Trondheim), he moved to the United States and founded the Kavlico Corporation, which became one of the world's largest suppliers of sensors for aeronautic, automotive, and industrial applications. Its products have been used in such landmark projects as the Lockheed SR-71 "Blackbird" (Mach 3+ strategic reconnaissance aircraft) and the Space Shuttle.

In 2000, Fred Kavli divested his interest in the company and established The Kavli Foundation to advance science for the benefit of humanity, to promote public understanding of scientific research, and to support scientists and their work. The Kavli Foundation currently supports seventeen Kavli Institutes of Science, seven university endowed chairs, and many other programs such as symposia,



Credit: Dan Dry; Photo Courtesy of The Kavli Foundation

workshops, and science outreach. In 2008, The Kavli Foundation launched the Kavli Prizes in partnership with the Norwegian Academy of Science and Letters and the Norwegian Ministry of Education and Research to recognize scientists for their seminal advances in astrophysics, nanoscience, and neuroscience.

Fred Kavli was a Fellow of the American Academy of Arts and Sciences, a member of the Norwegian Academy of Technological Sciences, and a member of the U.S. President's Council of Advisors on Science and Technology. He received many honors including the Royal Norwegian Order of Merit for Outstanding Service and honorary doctorates from the Norwegian University of Science and Technology, Northwestern University, and the University of Oslo. In 2011, he received the Bower Award for Business Leadership from the Franklin Institute, one of the oldest science education centers in the United States, and the Carnegie Medal of Philanthropy.

I am honored to be part of the vision of Fred Kavli,

as the inaugural Fred Kavli Professor of Theoretical Physics and Mathematics at the California Institute of Technology and a Principal Investigator of the Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli IPMU) at the University of Tokyo. His enthusiasm for basic science was infectious. I vividly remember his passionate speech at the 2012 Kavli Prize ceremony in Oslo describing his interest in the latest advances in astrophysics, nanoscience, and neuroscience, and his speaking eloquently on the joy of life enhanced by the scientific understanding of nature.

In 2012, the IPMU joined the Kavli family of institutes and changed its name to the Kavli IPMU. This was the first time for a national university in Japan to receive a donation from a foundation abroad to create an endowment to support research. The perpetual funding from the endowment provides a secure foundation for the Kavli IPMU and ensures that the institute will remain at the forefront of its field in the future.

Let me quote from a remark by Fred Kavli at the Kavli IPMU Naming Ceremony, which took place on May 10, 2012 at the Kavli IPMU building on the Kashiwa campus of the University of Tokyo:

“I grew up on the other side of the planet earth in a green valley in Western Norway, flanked by tall mountains — where I would experience the power and beauty of nature as thunder and lightning would shake the valley from mountainside to mountainside. And at times the whole sky was aflame with the northern lights shifting and dancing across the sky, down to the white clad mountaintops. In the stillness and loneliness of the white mountains, I would so clearly see the Milky Way and the stars and the immenseness of the universe — so big beyond imagination. I pondered the universe, the planet, nature and the wonders of man. I’m still pondering.”

“It has been a long road from the white mountaintops of Norway. After studying physics at the Norwegian Technical University, I came to America and settled down in southern California where I had a long journey through the business world. My interests are now back full circle to where I started — to the Universe — from the smallest building blocks to the vastness and incredible wonders of space and to the emerging master of nature, the human brain.”

“We support science worldwide through our philanthropic effort. Philanthropy is a great tradition in the United States of giving back to society and I am very pleased to be able to share our philanthropic tradition with Japan — a great friend of America. It is a privilege to partner with IPMU in our quest to support excellence in science through cooperation across national borders worldwide.”

Rockell Hankin, Vice Chairman of the Board of The Kavli Foundation, and Robert Conn, the President of The Kavli Foundation, wrote to us:

“Fred always looked to the future, which is why he had a special appreciation for the critical importance of the scientific enterprise. He understood that basic research rarely brings immediate rewards, but he also understood that future generations would come to depend on the discoveries of science to create a better world.”

“Fred always believed his greatest legacy would be the scientific accomplishments of the community of scientists working at Kavli Institutes and at great institutions to make the world a better place for us all. This is what always brought him the greatest joy.”

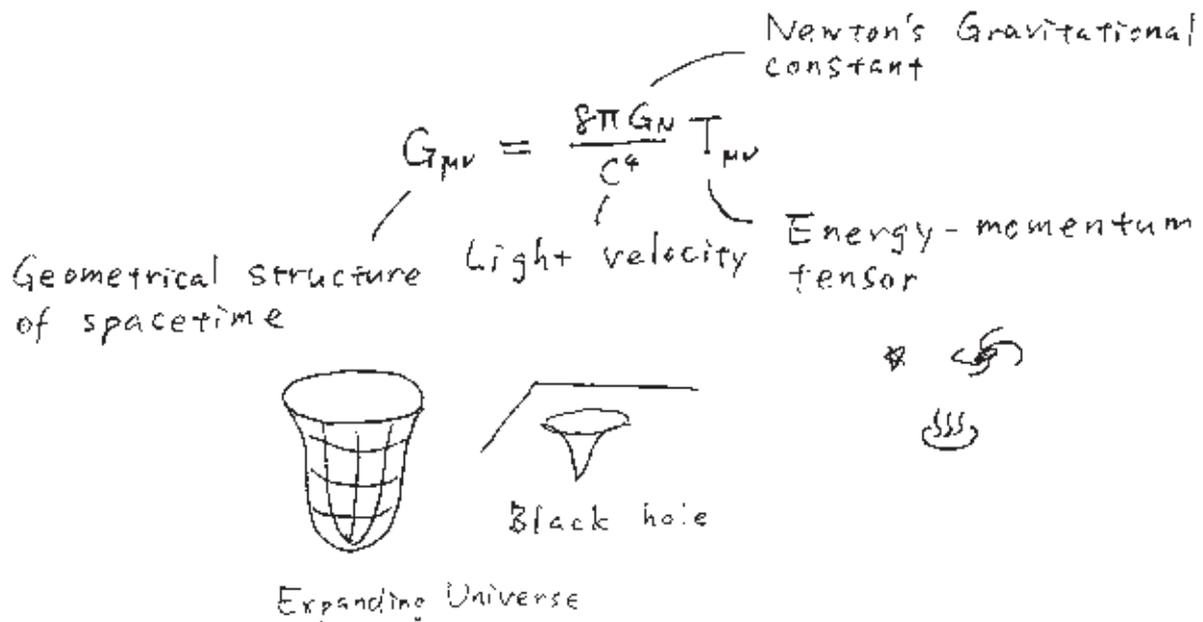
As we pause to reflect on the meaning that Fred Kavli gave to our lives, we find ourselves enriched by his commitment and dedication to the advancement of science. We will endeavor to honor his legacy.

The Einstein Equation

Jun'ichi Yokoyama

Professor, Research Center for the Early Universe, the University of Tokyo
and Kavli IPMU Senior Scientist

Newton, who established the theory of classical mechanics, considered the space simply as an unchangeable container of massive bodies. According to the Einstein equation discovered in 1915, however, the status of spacetime is characterized by materials and energy existent there—more properly speaking, the state of spacetime and the condition of matter and energy there, are mutually related by the Einstein equation in an inseparable manner. Once upon a time, it was said that “there are only three people who fully understand the Einstein theory.” (Although it was not identified who they were.) Nowadays, a number of researchers enjoy the benefit of the equation.



基礎科学への支持を訴える

Kavli IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし

2013年は大きな出来事で幕を閉じました。12月17日、私は素晴らしい機会に恵まれました。安倍総理大臣、麻生財務大臣、山本科学技術政策担当大臣、その他総合科学技術会議議員、つまり日本における科学技術政策についての最高機関の前で、Kavli IPMUとSuMIRe計画の進捗状況について議論できたのです。私たちがどうやって世界中から優れた人材を惹きつけ、世界的に高いレジリエンスをもつ研究センターを築き上げ、大規模な国際研究協力を主導しているのかを聞いて、全員が大満足のようでした。

しかし、私は最後の1分でもう一つの点を力説しました。政府の出資を応用研究に集中するという世界的な趨勢の中で、日本は基礎科学に対する出資を実に良く維持しており、今後も自国の利益のためにそうであり続けるべきであるということです。磁気浮上式高速鉄道やインターネット、がん診断用のイメージング技術、GPSなどの技術的なブレイクスルーの多くは、好奇心に駆られた基礎研究およびそこでのニーズに端を発したものです。加えて、将来の我が国の地位を保つには、基礎研究において典型的なグローバルな環境を通じて訓練することができる知識人を必要とします。この点は、私たち科学者の多くには当然のように見えるのですが、繰り返し、また広範囲に、特に政策立案者に対して強調されなければなりません。私の8分間のプレゼン終了直後、総理大臣が拍手してくれましたが、どうやら総合科学技術会議では初めてのことのようです。私は大いに励まされました。

フレッド・カブリさんは基礎科学に対する真のチアリーダーでした。11月21日に死去されたとの知らせに私たちは皆大きな悲しみを覚えました。私たちの機構がKavli IPMUとなった記念式典でカブリさんが熱のこもったスピーチをされたのは、たった1年半前のことでした。カブリさんはこう言われました。「私が科学を支援するのは、好

奇心と科学が長期にわたり人類の役に立つことを信ずるからであります。科学により人間はより健康な生活を送ることができるようになります。事実上、私たちが日常接するあらゆるものが基礎科学によって改良され、あるいは進歩します。私たちの生活水準全体の進歩は、科学研究の成果と密接に結びついています。」カブリさんは大いなる遺産を残されました。心からお悔やみ申し上げます。

基礎科学により宇宙の謎を探る勢いを保つためには、全方面での努力を要します。Kavli IPMUの事務スタッフは、研究以外のことに上の空の研究者全員に対して終始面倒をみてきてくれました。これは賞賛に値します。彼らの一部が、オンラインで安全訓練を行うための素晴らしいビデオを制作し、12月20日に東京大学業務改善総長賞を受賞しました。新たに着任した人たちが見れば、面白くて気が利いていて、それでいて重要な情報が漏れなく伝わります。Kavli IPMUがこの賞を受賞するのは今回が2回目で、私たちが科学だけでなく業務上でも東京大学をリードしていることがわかります。

Director's
Corner

陽子・中性子とDブレイン

1. はじめに

ある日のこと、近頃の弦理論の研究が重要であることを一般の人々にも分かりやすく説明するにはどうするのが良いか、ということが話題になりました。誰かが弦理論の研究で非常に重要な役割を果たしてきた「Dブレイン」を例にとって、「例えば、Dブレインの研究がどうして重要なのかをどうやって説明したら良いだろう?」という質問を投げかけました。私の答えは「そんなのは簡単だ。我々はDブレインでできているのだから。」あまりにも突飛と思われるかも知れませんが、かなりまじめです。ただ、ちょっと言い過ぎました。より正確には、「我々の体を構成している原子の中に含まれる陽子や中性子のような粒子が弦理論の中のDブレインとして理解できる。」と言うべきでした。Dブレインとは何か? どうしてそんなことが言えるのか? 今回はこのことに関する話題をお話しましょう。

2. クォークとQCD

中学か高校の理科の時間に、原子は原子核という陽子や中性子がいくつか堅く結びついてできた小さな塊とその周りをぐるぐる回っている電子からなるということを知ったと思います。さらに大学に入って物理を専攻すると、陽子や中性子は、「クォーク」というもっと小さな粒子が3つ集まってできた複合粒子であるこ

とを習います。¹

これだけではありません。原子核の中にはパイオンと呼ばれる粒子が飛び交っています。これは陽子や中性子を堅く結びつける力を説明するために湯川秀樹博士が理論的に存在を予言し、後に実験で確認された粒子です。このパイオンも複合粒子で、クォークと反クォークがくっついてできたものであると考えられています。ここで、反クォークというのはクォークの相棒で、電荷の符号が逆であることを除くとクォークとほとんど同じ性質を持つ粒子です。

このようにクォークや反クォークがいくつか集まってできた粒子のことを「ハドロン」と呼びます。実はハドロンにはたくさんの種類があって、実験で存在がはっきりと確認されているものに限ってもなんと数百種類以上もあります。そして、いくつかの例外を除いてそのほとんどが、クォーク3つか、あるいはクォークと反クォークがくっついてできています。陽子や中性子のようにクォークが3つ集まってできた粒子を「バリオン」と呼び、パイオンのようにクォークと反クォークがくっついてできたものを「メソン」と呼びます(図1)。

クォークはこのように3人組(バリオン)かカップル(メソン)になりたがる性質があり、単体で取り出すことに成功した実験は未だにありません。その理由

¹ 現在のところ6種類のクォークが実験で確認されており、アップ、ダウン、ストレンジ、チャーム、ボトム、トップという名前がついています。この記事では、軽いクォークに注目するので、クォークと言ったらアップクォークとダウンクォークを指すと考えてください。

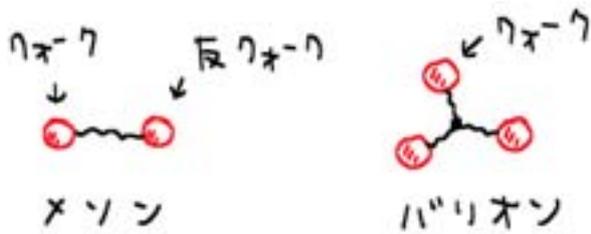


図1 クォークモデルにおけるメソンとバリオン

は、「グルーオン」と呼ばれるまた別の粒子があって、その粒子の作用でクォークや反クォークの間に「強い力」と呼ばれる非常に強い力が働くからです。このクォークとグルーオンが登場する強い力の理論は「QCD」²と呼ばれています。

QCDは驚くほどシンプルで大変美しい理論です。見ていてうっとりします。しかし、その反面、解析が非常に難しい理論であることも知られています。この理論を使ってハドロンの質量、大きさ、相互作用の強さなどの諸々の性質を理論的に計算するのは大変なことで、手計算ではとても歯が立ちません。そのため、スーパーコンピュータを駆使してガリガリ計算する手法などが開発されてきました。その結果、QCDは実験事実をととても良く再現することが示され、ハドロンの性質を正しく記述する理論としての揺ぎない地位を確立しました。このように、クォークやグルーオンを単体で取り出して見せた実験もなく、解析も非常に困難な理論であるにも関わらず、人類がQCDに達することができたのはすごいことだと感心させられます。

3. 粒子かひもか

前節で、陽子や中性子はクォークが3つ集まってできた粒子だと言いました。では、クォークはもっと小さな粒子が集まってできたものだったりするでしょうか？

² 正式名称は「量子色力学」で、その英語名Quantum Chromodynamicsから頭文字を取ってQCDと呼ばれるようになりました。

これは面白い考え方ですが、今のところそれを支持する実験事実はありません。このように、それ以上内部構造がない点粒子と考えられる粒子のことを「素粒子」と言います。上で出てきたクォークやグルーオンの他に、電子や光の粒である光子なども素粒子の仲間です。

このように素粒子にはいろいろな種類のものがあるのですが、どうしてそのようにいろいろな種類の素粒子が存在するのかはまだ良く分かっていない謎です。あらゆる物質が原子からなるとした原子論、100種類以上ある原子が電子と陽子と中性子からなるとした原子模型の理論、数百種類もあるハドロンがいくつかのクォークを考えることで説明できるとしたクォークモデルなど、複雑なものがよりシンプルなもので構成できることが分かった時に、物理学は大きく進歩します。素粒子の研究者は、いろいろな素粒子をよりシンプルな原理から導くことはできないものかといつも思いを巡らせているのです。

その謎を解決する可能性があるとき期待されている理論の一つが「弦理論」です。弦理論は現在のところ点粒子と考えられている素粒子を大きく拡大して見てみると、実はひも状をしているという仮説に基づく理論です(図2)。

弦理論の構成要素はたった1種類のひもなのですが、このひもは振動したり、回転したりすることができ、その状態が異なれば、異なる性質の粒子のように振る舞います。それによって種類の異なる素粒子を同じひもから導くことができる可能性があるのです。それだけではありません。実際に許されるひもの状態を解析してみると、驚くべきことに「重力子」と呼ばれる重力を伝える働きをする素粒子に対応する状態が存在することが示されました。実は重力子は他の素粒子と性質がずいぶん異なり、これを含んだ矛盾のない理論を作ることは長年の物理学者の夢でもありました。弦理論は図らずもその夢を叶えてくれる理論になっていたのです。

弦理論の最も驚くべき予言の一つは時空の次元が10次元(時間1次元と空間9次元)であるというこ

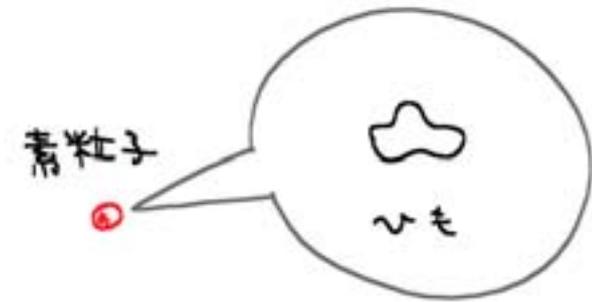


図2 素粒子とひも

とです。普段私たちが実感できる時空の次元は4次元（時間1次元と空間3次元）ですが、さらに6次元の隠れた空間の方向があるということです。³

この隠れた6次元のことを余剰次元と呼びます。余剰次元の方向がどのような形をしているかによって、4次元の世界に実現される素粒子の種類が異なります。この世に存在する多様な素粒子の構造は余剰次元が存在するお陰で実現可能になるとも言えます。その余剰次元の形を決定する方法はまだ良く分かっておらず、そこが弦理論の悩みの一つなのですが、ある場合には、実験で見ついている素粒子に近いものを導くことができることが示されています。弦理論は理論の制約がとても強いので、好き勝手に必要な素粒子を見繕って理論に組み込むということができません。そんな理論が、自然に重力子を含み、さらに実験で見ついている他の素粒子も再現するというのは偶然とはなかなか考えられない奇跡的なことだと思います。そのため、弦理論は多くの研究者を魅了し、「究極の統一理論」や「万物の理論」の候補とまで言われました。このようなことが分かってきたのは80年代中頃のことです、この時期に驚くべき発見が相次いだことから弦理論の第一次革命と呼ばれています。

このような究極の統一理論としての弦理論の可能

³ 時空の次元というのは、正確に待ち合わせをするときに指定することが必要な数字の数のことです。例えば、北に100メートル、東に50メートル進んだところの高さ30メートルの地点で10分後に待ち合わせよう、という（100, 50, 30, 10）という4つの数字を指定する必要があるのです、時空の次元は4次元である、という言い方をします。弦理論ではこの4つでは足りず、10個の数字を指定する必要があるというわけです。

性は今でもその魅力を失っておらず、多くの研究者が研究を続けているのですが、残念ながらまだ完成には至っていません。後でがっかりさせると困るので、今のうちに断わっておきますが、これからの話は究極の理論についての話ではありません。2節で述べたようなQCDやハドロンに関わる部分に特化して、その部分の物理を弦理論によって記述する試みについてお話ししたいと思います。弦理論を使ってハドロンを記述し、曲がりなりにも実験と比較し得るさまざまな物理量を計算することができるのです。そのようなことが可能になるためには、弦理論がもう一度進化を遂げる必要がありました。

4. ゲージ・ストリング双対性

90年代後半になって弦理論の第二次革命と呼ばれる大発展の時期が再び訪れました。その発展は主として弦理論の非摂動的効果のような理論的なもので、究極の理論のような華々しい印象はないかも知れません。しかし、その中で見いだされた発見の中には「時空の次元」や「素粒子」といった、それまで当たり前のように思われていたいくつかの基本的な概念に対する見方を根底から覆すようなものがいくつもあり、研究者たちは大いに興奮しているのです。その中でも、特に人々を驚かせたのが「ゲージ・ストリング双対性」の発見でした。

このゲージ・ストリング双対性は、一言で言うと、「ゲージ理論と弦理論がある場合に等価になる」ということを主張しています。まだゲージ理論が何かを説明していませんでしたが、QCDにおけるグルーオンのように、素粒子の間に働く力を媒介する素粒子をある種の対称性を課すことで導入する理論のことです。素粒子の間に働く基本的な力として知られる強い力、弱い力、電磁気力はどれもゲージ理論で記述されることが知られています。特に、2節で出てきたQCDはゲージ理論の代表例です。

このゲージ・ストリング双対性の驚くべき点は以下のようなところなのです。ゲージ理論は4次元時空に定義

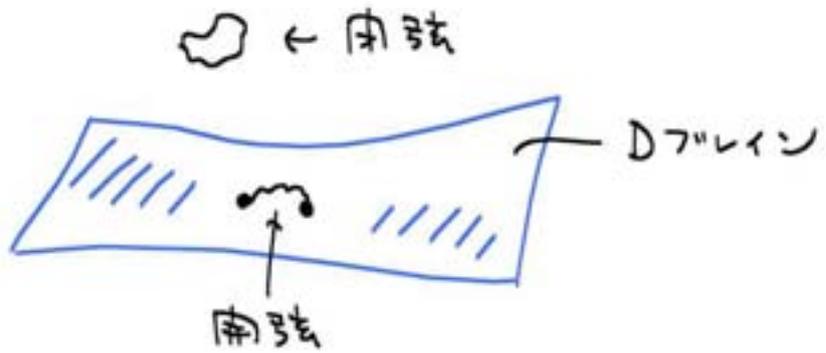


図3 Dブレーン、開弦、閉弦

された素粒子の理論であるのに対して、弦理論は10次元の(曲がった)時空に定義されたひもの理論です。理論の基本的な構成要素も異なるし、時空の次元すら異なります。このように見かけ上、全く異なるように見える理論が、ある場合には物理の理論として完全に等価になり得るといいます。こんなことがあるとは、1997年にマルダセナが予想するまで誰も思いもよらなかったことで、世界中の研究者がびっくりしました。

では、なぜゲージ理論と弦理論が等価になりうるのでしょうか。それを説明するには「Dブレーン」を導入する必要があります。Dブレーンというのは弦理論の中に存在することが知られている広がりを持った物体です。その広がり方にはいろいろなものがあります。時間方向と p 次元の空間方向に広がっているDブレーンのことを Dp ブレーンと呼びます。例えばD2ブレーンは10次元の時空の中に漂う膜上の物体です。シャボン玉のように丸いものや、無限に広がった平面状のものなど、いろいろな形のことを考えることができます。このDブレーンの特徴は、ひもの端点に乗ることができるということです。弦理論に出てくるひもには、輪ゴムのように輪っかになった「閉弦」と輪ゴムをはさみで切ったような形をした「開弦」の2種類があります。図3のように閉弦はDブレーンから離れることができますのですが、開弦は端点がDブレーンの上に乗っていないといけないので離れることができません。

一見、とても奇妙な印象を受けるかもしれませんが、弦理論にはこのような物体が存在するのです。そして、

90年代の後半になって、その重要性が認識され、弦理論の第二次革命において決定的な役割を果たしました。Dブレーンが重要だった一つの理由は、弦理論の枠内にゲージ理論を実現する方法を与えることにあります。Dブレーンにくっついた開弦が表すいろいろな素粒子の中にグルーオンのような力を伝える働きをする素粒子が存在し、Dブレーンの上にゲージ理論が実現されることを示すことができます。この段階ではまだひもの理論ですが、弦理論に含まれるパラメータを調整して、ひもの長さがゼロになる極限を取ると、大きさがゼロの点粒子からなる素粒子の理論になります。例えば、3次元空間に無限に広がったD3ブレーンを考えると4次元時空の上に定義されたゲージ理論を得ることができます。

一方、Dブレーンがあると、アインシュタインの一般相対性理論の教えに従って、周りの時空が曲がります。時空が曲がるというのは、少し分かりにくいかも知れませんが、次のような感じです。柔らかいゴム板に縦軸を時間方向、横軸を空間方向として方眼紙のようにマス目を描いた後にこのゴム板をぐにゃぐにゃに曲げた状態を想像してください。もとのマス目で直線で表される粒子の軌跡はゴム板を曲げると曲がった軌跡を描くようになります。重力の作用で粒子の軌跡が曲がる現象をこのように時空の曲がりで説明するのがアインシュタインの一般相対性理論の考え方です。さらに、ある状況では、Dブレーンをそれに対応する曲がった時空で置き換えてしまった方が良い近似になる場合があります。このとき、上で考えた極限を取って

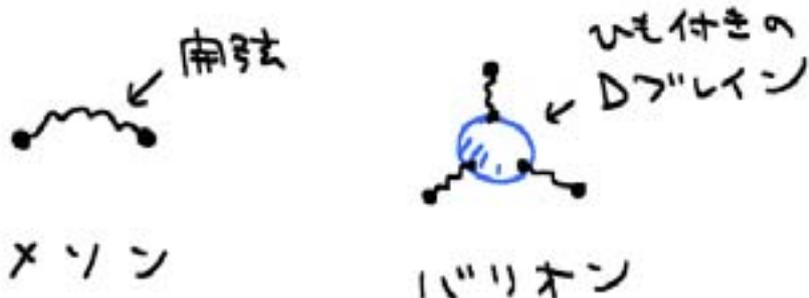


図4 弦理論におけるメソンとバリオン

もひもの長さがはゼロにはならず、ある曲がった時空における弦理論が得られます。

このようにして、Dブレーンから出発してゲージ理論と曲がった時空における弦理論という2つの記述が得られました。どちらも同じDブレーンから出発して得られるので、物理的な内容は同じであるはずだというのがゲージ・ストリング双対性の基本的なアイデアです。ただ、このように、ゲージ・ストリング双対性が成り立つ根拠となる議論は一応あるものの、精密に証明がなされた訳ではありません。本当にこの双対性が成り立っているのかどうかは個々の例に当たって調べて行く必要があります。その後の研究により、この双対性が成立することを示す膨大な数の非自明な証拠が挙がり、この双対性の正しさが広く信じられるようになりました。

5. ホログラフィックQCD

前節で説明したゲージ・ストリング双対性をゲージ理論の代表格であるQCDに応用したら何が言えるでしょうか？ QCDと等価になるような曲がった時空における弦理論のことをホログラフィックQCDと呼びます。⁴

今のところ、まだ完全にQCDと等価になる弦理論の記述は見つかっていませんが、エネルギーが低い現象に関してはQCDと良い近似で一致するような弦理

⁴ 4次元のQCDと10次元の弦理論が等価になることから、立体の情報を平面に記録する技術であるホログラフィーをもじってこう呼ばれています。

論の記述は得られているので、それに基づいて議論を進めることにします。2節で登場した陽子、中性子、パイオンといったハドロンはこのホログラフィックQCDにちゃんと含まれていることが示されます。ここでは結果だけですが、かいつまんで要点を説明してみましょう。

このホログラフィックQCDは前節で説明したような要領で、まずQCDを実現するようなDブレーンの配置の仕方を見つけ、その中の一部のDブレーンをそれに対応する曲がった時空に置き換えて構成されます。その結果、得られる弦理論の記述はある曲がった10次元時空にD8ブレーンが埋め込まれたような状況になっています。こんな設定で、どのようにしてハドロンが表されるのでしょうか？

まず、上記のようにD8ブレーンが存在するので、そこに端を持つ開弦が存在します。この開弦がメソンと解釈されるのです。図4と図1を見比べると、開弦とメソンは絵的にも良く似ていることが分かると思います。

3節で一つのひもからいろいろな素粒子を導けることを説明しましたが、これと全く同じ考え方を今の場合に適用すると、このD8ブレーンに乗った開弦から様々な種類のメソンを表すことができると期待されます。実際、このようにして弦理論から予言されるメソンを調べるとパイオンだけではなく、実験で確認されている数多くのメソンが再現されることが示されます。さらに、そうしたメソンの質量や相互作用の強さなどを計算してみると、荒い近似計算であるにも関わらず、かなり良く実験値を再現することが見て取れます。

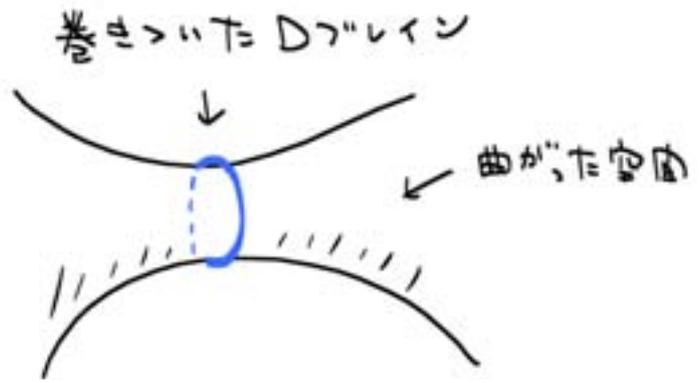


図5 巻き付いたDブレイン

3節では、クォークなどの素粒子を大きく拡大してみるとひも状をしているという仮説に基づく理論が弦理論であると言いましたが、ここではそうになっていないことに注意して下さい。クォークと反クォークからなる複合粒子と考えられているメソンがひもと同定されます。また、素粒子の理論が弦理論に取って代わられるのではなく、両者が同じ物理を表しているのです。これがゲージ・ストリング双対性のもたらした新しい見方です。

では、バリオンはどうでしょうか。冒頭で述べたように、バリオンはDブレインと同定されます。今、考えている曲がった時空には、図5のように余剰次元のうちの4つの方向に引っかかるような形で巻き付いたD4ブレインを考えることができます。

このD4ブレインは時間1次元と空間4次元に広がった物体ですが、この空間4次元の方向が全て余剰次元の方向に巻き付いているため、我々の感知できる4次元時空の中で見ると時間方向にしか広がりを持たない粒子として振る舞います。この粒子がバリオンと解釈されるのです。しかも、面白いことに、今の曲がった時空に含まれるRR場と呼ばれる場の影響で、このD4ブレインには開弦が必ず3本くっついていなければならないという条件が導かれます。図1と図4を見比べると、クォークが3つくっついてできたバリオンとひもが3本くっついたD4ブレインは絵的にも良く似ていることに気づくでしょう。

このようにして得られたバリオンからどのような性質の粒子が出てくるのかを調べると、陽子、中性子

と同定できる粒子がちゃんと含まれていることが分かります。それだけではなく、核子の励起状態など、実験で確認されているいろいろなバリオンが再現されます。また、より詳しい解析によって、陽子、中性子の持つ磁力の強さや電荷の分布などの性質の観測データをうまく再現することも示されます。

6. おわりに

こうして、原子核の中にひそむハドロンの世界を弦理論で記述することができ、メソンやバリオンがひもやDブレインとして表されることが分かりました。このような見方をすると、世界が少し違って見えてきます。特に陽子や中性子は私たちの体重の99.9%以上を占めている部分ですので、「我々はDブレインでできている」と言ってみたくもなるわけです。体重計に乗って量られるのはほとんどDブレインの重さだと思うと、体重計に乗るのも少し楽しくなってきませんか？

今回お話したことは、Dブレインの魅力のほんの一端にすぎません。Dブレインはあるときにはブラックホールを表したり、あるときには宇宙そのものを表したり、いろいろな場面に登場します。それについては、またの機会に。

Our Team

イリヤ・カルツェマノフ Ilya Karzhevanov 専門分野: 数学

博士研究員

私の研究対象は代数幾何学、特に双有理幾何学で、有理多様体、詳しくは、等質多様体やトーリック多様体に特有な数値判定法をみつけないと思っています。このような不変量には、例えば、代数多様体 X 上の与えられた線束 L から構成される (漸近的) 重複度型関数があります。この関数を m とすると、これは X 上の任意の点 p に対して、 p における L の (全てとは限らない) 大域切断の (適当に平均した) 重複度 $m(p)$ を対応させるものです。 m が X 上のある種の超関数 (例えば定数)



の場合、 X が等質空間に「近く」、微分幾何学的に知られているある種の安定性条件の下で安定であると期待できます。一方、 m の「非等質的」な振る舞いは X が有理的であるための障害を与えるはずで

朴 明勲 パーク・ミョンフン 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私の主たる研究分野はコライダー実験やダークマターの現象論で、超対称性、余剰次元、実験事実に触発された種々のモデルなど (また、それに限らず他にも色々) の標準模型を超える物理の理論的研究を行っています。LHCでの標準模型を超える現象の探索については、LHC逆問題*に対して系統的にアプローチしようと準備を進めています。コライダー実験の標準模型を超える現象論について、私はいろいろ興味がありますが、その一つは、現在の計算機シミュレーションの進



歩に関係するものです。

* LHCで標準模型では説明できない信号が観測された場合、その信号から背後に潜む新しい物理の理論模型のパラメーターをどのようにして決定できるかという問題。



Kavli IPNU 6周年を記念して撮影した研究者の集合写真。

アンドレアス・シュルツ Andreas Schulze 専門分野: **天文学**

博士研究員

巨大銀河にはそれぞれ中心に太陽質量の数百万倍から数十億倍の質量をもつ超巨大ブラックホールが隠れています。その成長は母銀河の進化とリンクしているように見えます。この関係を説明し、ブラックホールの成長の歴史を理解することが必要です。私が明らかにしようとしている問題は次のようなものです。「ブラックホールはどのように成長するのだろうか?」、「その成長の歴史は?」、「その成長が始まったきっかけは何だ



ろうか?」、「その活動は母銀河の進化とどのように結びついているのだろうか?」

蔡岳霖・駟名 ツァイ・ユエリン・スミン 専門分野: **理論物理学**

博士研究員

私の研究はダークマターの物理に関する分野で、幅広く相補的なトピックス、素粒子物理、天体物理、宇宙論、統計学などをカバーしています。ダークマターの実験的探索は、次の3つのアプローチ、i)直接的測定、ii)間接的測定、iii)コライダー実験での信号測定、を含んでいます。

素粒子物理の立場からはダークマターのラグランジアンと実験のデータセットを用いて、素粒子モデルのパラメーター空間での制約条件を得ることができます。



Our Team

対照的に、天体物理学の立場からは間接測定と直接測定の解析に、他の天体物理学的なデータセットを用いることにより、模型に依存せずにダークマターの性質についての制約条件を得ることができます。



Interview

ファビオラ・ジャンノッティ博士 に聞く

聞き手: 村山 斉

歴史的発見の発表まで、目の回るような1ヶ月

村山 今年7月4日にCERNのLHCにおける歴史的なヒッグス粒子発見を発表されましたね。私はインターネットを通じて見ていましたが、実に感動的な瞬間でした。あのセミナーで発表する直前はどんな気分でした？

ジャンノッティ とても強く感じていたのは満足感ととても集中したこと、それから…「疲れた」という気分だったと思います。それ以前の4週間から6週間というのは、昼も夜も働いていましたから。2012年のデータの解析は本物のデータを見ないブラインドで進めていましたが、ブラインドを解除したのは6月の初めてで、結果を発表したのが7月の初めてでした。

村山 7月4日でしたね。

ジャンノッティ その通りです。

ファビオラ・ジャンノッティさんは1989年にミラノ大学から博士の学位を取得、1996年にCERNの研究員になりました。ATLAS実験に1990年代初期のプロジェクト開始時から参加し、測定器の設計、建設及び物理能力予測の詳細スタディーに貢献、2009年から2013年3月まで同実験代表を務めました。2012年にイタリアの大統領からイタリア共和国功労勲章グランデ・ウッフィチャーレを受章、またミルナー財団から基礎物理学特別賞を受賞、2013年にイタリア物理学会のエンリコ・フェルミ賞、ニールス・ボーア研究所荣誉メダルを受賞。ウプサラ大学およびスイス連邦工科大学ローザンヌ校から名誉博士号を贈られ、英国エジンバラ大学物理・天文学部から荣誉教授に任命されています。またイタリア科学アカデミー会員です。

ですから、初めて2012年のデータの「信号領域」を調べてから発表まで、全部で4週間でしたね。2011年の末までに私たちが 3σ のヒントと言えるものを得ていたことを覚えてますか？

村山 12月の会議(CERNのSPC¹)に出席してましたよ。

ジャンノッティ 125から126 GeVあたりに 3σ のピークがありました。勿論 3σ 程度のピークはデータの統計的な揺らぎによることが多く、その場合は現れたり消えてしまったりします。2011年12月のヒントは全然決定的とか確実とか言えるようなものではありませんでした。冬の停止期間の後、2012年の始めに加速器が運転を再開し、エネルギーが8 TeVに上がりました。(2011年は重心系エネルギー7 TeVでの運転でした。) 発見に至った決定的要素の一つがその1 TeVの違いでした。データを取り始めたのは2012年の4月でしたが、科学者の取るべき慣行に従って、私たちはこれまでの実験結果でまだ排除されていない(「信号領域」といわれる)質量領域ではシミュレーションイベントを使った解析を最適化するまでデータを見ていませんでした。一方、主なバックグラウンドの過程についてはデータ

¹ SPC (科学政策委員会) はCERN理事会の2つの下部組織の一つ。村山機構長は2010年以来SPC委員を務めている。

を非常に注意深く調べ、バックグラウンド領域のデータを用いてシミュレーションの検証を行っていました。6月初めに積分ルミノシティ $1 \sim 1.5 \text{ fb}^{-1}$ (インバース・フェントバーン)程度を記録してから初めて信号領域のデータをブラインド解除しました。私たちは主にHiggs $\rightarrow \gamma\gamma$ と Higgs $\rightarrow 4$ レプトンの2つの過程を解析しましたが、最初にデータを用いて解析すべき過程としたのはHiggs $\rightarrow \gamma\gamma$ だったと記憶しています。

村山 その2つが一番探しやすい過程ですね。

ジャノッティ 6月の10日前後ですが、Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$ の解析でブラインドを解除したとき、私はテバトロン衝突ビーム加速器の歴史を語るシンポジウムに出席するため米国のフェルミラボにいました。そこでATLASの解析結果を見て、私は椅子に座ったまま跳び上がりました。125 GeVから126 GeVにピークがあったのです。それは2011年のデータで 3σ のピークが見えたのと同じ質量の所であり、独立なデータセットで同じ所に見えたのです。

その結果を私に送ってくれたATLASの同僚と短いメールをてきぱきとやりとりをしたことを覚えています。私が「大変だ!」と送り、彼が「まったく!」と返事してきました。そんな様子でした。

それから1~2週間後にHiggs $\rightarrow 4$ レプトンの解析もブラインド解除しました。私たちはこのHiggs $\rightarrow 4$ レプトンでは幾つか候補があると予想していました。2011年の末には、125 GeV 付近の質量領域に4個のイベントがありました。しかし、2012年のデータには、最初にブラインド解除した時、新たなイベントの候補が一つもなかったのです。それで、とても困惑しました。その後、6月下旬に突然9個のイベント候補が現れたのです。少数統計での統計的変動の格好の例というわけです。

村山 なんと!

ジャノッティ そういうわけで、結局は両方の過程で信号が得られました。実に目の回るような1ヶ月でした。私たちはすごく興奮していましたが、ある意味、集中する気持が支配的でした。最高のデータを記録するため、電子とミュオン粒子と光子に対するイベント再構成の効率と測定器の性能を上げるため、また解析で一寸でも問題となる可能性があるものは全て理解するため、それは一生懸命動きました。どんな細かいことも徹底的に調べ、セミナーに間に合うようにあらゆる種類のチェックを

村山 齊さんはKavli IPMUの機構長で、カリフォルニア大学バークレー校の教授を兼務しています。



行いました。講堂に足を踏み入れると、聴衆で一杯でした。多くのATLASの共同研究者（別の部屋から、あるいは高エネルギー物理学国際会議が開催されているメルボルン²から、もっと多くの共同研究者が見守っていることを私は知っていました）、夏だったものでサマースチューデントも大勢、また、リン・エヴァンスやジョルジオ・ブリアンティのように加速器を建設してLHCの歴史を作った多くの科学者たちがいました。それから、LHCの装置や運転を受け持つチームの中心的な人たちも加速器責任者のスティーブ・マイヤーズと共にほとんどその場にいました。クリス・ルウェリン＝スミスとルチアノー・マイアニとロバート・エイマーなど、歴代の所長もいました。当然、CERNの現執行部もいました。

村山 では、緊張したり、神経質になったりしたんですか？

ジャノッティ そんなに神経質にはなりません。むしろ、とても楽しい時間でした。

村山 実際、とてもリラックスして自信たっぷりに見えましたよ。

ジャノッティ 私はやる気満々でした。結果が特別なものであるということ以上に、私は

ATLAS実験全体が如何に素晴らしく機能してきたか、またどの部分（つまり測定器、データ取得、ソフトウェア、計算機、解析）をとっても熱心で有能な何百人もの人たち—若い人たちも沢山います—が一生涯懸命働き、確実な仕事をしてくれたおかげで、如何に素晴らしく役割を果たしてきたかを示すことをとても誇りに思っていました。一人一人の貢献が極めて重要であると同時に、全体が完璧に揃ったオーケストラのように働いたのです。

村山 素晴らしいですね。

ジャノッティ とても素晴らしい時間でした…何千人もの人たちの20年以上にわたる努力の成果だったのです。

メルボルンへの出発延期を命じた
CERN所長

村山 CMS実験も同程度の信号をもっていることを知ったのはいつですか？

ジャノッティ CMS実験の代表者のジョー・インカンデラと私はいつも連絡を取り合っていました。お互いの結果の詳細は話していませんでしたが、多かれ少なかれ相手がどういう状況かは知っていました。私たちは、自分の共同研究者に相手の実験については何も言わないことを了解していました。

村山 その段階でどの程度の情報を共有していたのですか？

ジャノッティ 互いの実験で2012年のデータにも125 GeV付近でピークがあるということを知っていました。そのピークが時間と共に増えていることと、2つの主要な過程（ $\gamma\gamma$ と4レプトン）にピークがあることは知っていました。私たちが共有した情報はそういった類です。また、私たちは、CERNの所長にも常に情報を伝えていました。あなたは6月のSPCに出していましたよね？

村山 ええ、いました。

ジャノッティ その週はすごいことになりました。理事会のあった週です。その6月23日に理事会主催の夕食会で所長が私とジョーをそばに呼んで、「君たち、メルボルン行きを延期しなさい。理事会はCERNでセミナーを開催して欲しいと希望している。」と言ったことを覚えています。そこで私たちは日取りを相談して、とりあえず7月4日にすることで一致しました。

村山 実際、その時のSPCで、発表はメルボルンよりも現場のCERNで行うべきだと議論しました。

ジャノッティ その通りです。セミナーの前の6月29日、金曜日に私とジョーは所長室に呼ばれ、こう言われました。「さて、何 σ か教えて欲しい。」私たちはテーブルの上で書きました。ATLASは5.1でした。

村山 CMSは4.9だったと覚え

ています。本当にエキサイティングだったに違いないと思います。

ジャノッティ あの頃のことを決して忘れないでしょう。

村山 ということは、その瞬間までロルフ（CERN所長のロルフ＝ディーター・ホイヤー）は信号がどの程度有意なのか知らなかったのですか？

ジャノッティ 実際にはCERNでセミナーをすることに決めた6月23日には、所長は両方の実験の結果を併せれば信号が5 σ を超えるであろうということは知っていました。しかし、個々の実験の信号が何 σ なのか、正確には知りませんでした。

村山 それは面白い。では、彼はいつピーター・ヒッグスとフランソワ・アングレールとトム・キップルを招待したのですか？

ジャノッティ 正確には知りませんが、セミナーの数日前に招待したのではないかと思います。

村山 なるほど。では、彼は本当に自信があったのですか？

ジャノッティ 両方の実験を併せれば5 σ を超えるであろうということは自信があったと思います。発見したと公表するのには十分ですから。

村山 実際は個別に5 σ だった訳で、本当に素晴らしい。私は予想していませんでした。

ジャノッティ 私たちは解析した過程の両方で明らかな信号を

² メルボルンで2012年7月4日から11日まで第36回高エネルギー物理学国際会議が開催された。

得ていました。6月初めに2012年のATLASのデータにHiggs → $\gamma\gamma$ 過程ではピークが見えていましたが、Higgs → 4レプトンの新たなイベント候補はありませんでした。その時、私は自分にこう言い聞かせました。「もし2つの主要な崩壊過程の両方で共に信号が見えなかったら公表するのはやめよう。」その後データが増えると共に両方の過程で徐々に信号が増えていきました。強調しておきたいと思いますが、その6月はLHC加速器の調子が実に素晴らしく、それまでの3年間で最高の月間運転記録を達成した月でした。この性能が出なかったら、こんなに速くヒッグス粒子を発見することはできなかったでしょう。

村山 見事でしたね。実に、実にエキサイティングな瞬間だったと思います。

ジャノッティ チームワークとチームスピリットのおかげでした。実験グループと加速器グループ全員と一緒に、協動的に、効率的に働きました。

村山 私は発表の様子をパークレーの自宅でインターネットを通じて見ていました。真夜中を過ぎていましたが、全く眠れませんでした。すごく興奮させられて、あなたの最後のスライドで 5σ と聞いて…涙が出ました。本当に涙が出ました。すごい感動でした。

ジャノッティ 新粒子の質量に

も感激しました。自然はとても親切でした。125 GeVのヒッグス粒子は $\gamma\gamma$ 、ZZ、WW、bb、 $\tau\tau$ など多くの異なる終状態に崩壊します。ですから私たちはLHCと将来建設されるであろう加速器の両方で色々な崩壊様式を調べることができます。もしもっと重かったらヒッグス粒子が見られるのはWWとZZだけになって、ヒッグス粒子の性質を調べられる機会が圧倒的に減ってしまったことでしょう。

村山 本当にそういう終状態全部を調べることができるということは、とても幸運です。

ATLAS全メンバーが一糸乱れずに

ジャノッティ あの7月4日のことを私がとても誇りに思うもう一つの理由は、私たちが実験チームとして成し遂げたことです。ATLAS実験グループはそれまで何年も、また特に発見とその公表に先立つ数週間、素晴らしい働きを見せました。7月4日にATLASとCMSが示した結果に含まれるデータは、6月18日まで記録されたものでした。6月18日は月曜日で、次の日曜日、6月24日には私たちは既に7月4日に見せることになる全データセットに基づく予備的な結果を手にしていました。それはこういうことを意味しています。つまり、6月18日の午後6時まで取ったデータが、既にキ

ャリレーションが済み、生データの処理が終わり、運動学的に再構成され、世界中の共同研究者に分配され、解析され、ヒッグス粒子の各種の崩壊過程で統計的足し合わせを完了していたのです。

村山 それはすごく速い。

ジャノッティ 驚くほどです。そして6月24日にはもう私は自分のラップトップに完全な結果を…いえ、まだ最終ではなくやることが…

村山 何かちょっとした手直しとか。

ジャノッティ ええ、些細な手直しとかクロスチェックとか、することが…でも実際はほとんど変わることはありませんでした。ですから、これは一人一人が一連の、測定器から最終的なプロットや数値を得るまでのものすごく長い色々なステップのそれぞれの場所でベストを尽くし、目覚ましい速さで、全員が一糸乱れず働いたことを示しているのです。本当に素晴らしいことでした。大きな感銘を受けました。

村山 そして最後のスライドを終えた直後、聴衆から総立ちの拍手かっさいを浴びましたね。

ジャノッティ はい、すごく感動しました。LHCが一それに関わる実験、加速器、国際協力、CERNの意味ですが一非常に重要で記念すべき業績を上げたことを実感させられました。

村山 ピーター・ヒッグスさんと一緒に有名な写真があります。彼がこの驚くべき研究成果を祝福しているところです。あなたは、多分その時初めて彼に会ったのではないですか？

ジャノッティ その通りです。私は偉大な輝かしいアイデアを讃えて、おめでとうございましたと言いました。

村山 彼は正しかった。

ジャノッティ ええ、彼は正しかったです。ヒッグスさんはとても謙虚で感じの良い人です。私は、彼の科学上の偉業だけでなく、人間的な面でもとても感銘を受けました。彼からはATLASの偉大な業績にお祝いの言葉をいただきました。私は彼の功績を讃え、彼は実験の功績を讃えてくれました。

村山 素晴らしいですね。

ジャノッティ 忘れられない瞬間でした。

村山 フランソワ・アングレルさんについても一言お願いします。

ジャノッティ 私はアングレルさんとは以前にお会いしています。彼は全く異なる個性の持ち主で、とても才気煥発な人です。

村山 それから記者会見に移動したのでしたね。

記者会見直後、日常業務に戻る

ジャノッティ 記者会見は1時間



でしたが、刺激的な質問が沢山あって、とても興味深いものでした。そこで私たちの発見が人々の心に与える衝撃について、私は初めて多少の予感を覚えました。午後1時に終わって、私は毎週水曜日の午後の開かれるLMCと呼ばれる「LHC装置委員会」のミーティングに行きました。LMCミーティングでは運転チームと装置を受け持つチームを含む加速器の専門家と各実験の代表者達が集まって、前の一週間の実績と問題点をレビューし、次の週の予定を決めるのです。7月4日の水曜日も例外ではなく、私はいつもの水曜日のようにLMCミーティングに出席したのです。

村山 なんと、いつも通りに業務を!

ジャンノッティ いつも通りの業務でしたが、その日のミーティングは超現実的とでもいう雰囲気、一寸何か特別の感じがしました。誰も午前中のことは触

れず、特にお祝いしたりすることもなく、出席者同士がおめでとうと言うこともありませんでした。全く何も無しでした。通常通りの業務、日常に戻ったのです。

村山 本当ですか? それはすごいです。

ジャンノッティ スティーブ・マイヤーズがいつもの水曜日のようにミーティングを始めました。前回の議事録、実施項目、その他。唯一、LHC運転チームリーダーのマイク・ラーモントが示した運転状況報告の最初のスライドに発見を暗示するものがありました。表題がいつもの「LHC運転報告」ではなく「ヒッグス・ファクトリー運転報告」だったのです。英国流のユーモア。そんな具合でした。

村山 とても洒落てますね。

ジャンノッティ その通りですね。LMCミーティングの途中で私は携帯の電源を記者会見中にオフにしてそのままオンにするの

を忘れていたことに気がつきました。オンにした途端、パオラ・カタパノ（CERNの広報チーム所属）が「どこに隠れてるの? ジャーナリストが探し回っているわよ」と聞いてきました。私が「LMCミーティングに出ているの」と答えたら、「どうかしてるんじゃない、ヒッグス粒子を発見した日に、世界中から報道陣が来ているというのにLMCミーティングに行くなんて」と叫んだんです。それで、こう返事しました。「パオラ、私たちは新粒子を発見したわ。それは素晴らしいこと。でも、さあ、続きを始めましょう。」

村山 仕事に戻る。

ジャンノッティ LMCが終わってから私はメルボルン行きの荷物をスーツケースに詰め込むため、家に戻りました。南半球は冬だということを忘れるわけにはいきませんでした。

村山 その日はシャンパンで乾杯しなかったのですか?

ジャンノッティ ビルディング40（ATLAS およびCMS実験チームのオフィスがある）で簡単なシャンパンパーティーがありましたが、記者会見の最中でした。

村山 では、参加できなかったのですね。

ジャンノッティ ええ、できませんでした。後で、とても良かったことと、非公式だったことを聞きました。自然に人が集まってきたそうです。

村山 さて、あなたはヒッグス粒子を発見してATLASの代表者を退いたわけですが、これから何をしますか?

ジャンノッティ 代表者を退いた後、まだ幾つか片付けなければならないことを終えてから、私はヒッグス粒子の結合定数の測定についてのATLASの論文の主編集者を務めてきました。その論文は、2013年7月4日（発見を公表した日から丁度1年後!）に、ヒッグス粒子のスピン決定に関する論文と一緒に「双子の論文」として投稿しました。

村山 どちらも見事な論文です。

ジャンノッティ ヒッグス粒子の論文を仕上げる仕事はとても楽しいものでした。何人もの若手研究者と一緒に働き、解析の詳細を調べる機会が得られました。ところで、村山さん、ヒッグス粒子のこういった測定の実験誤差は、幾つかの場合、理論的不定性と同程度になりつつあ

ります。これは理論の側からの何らかの進展を要求するものとなっています。

村山 知っています。理論にはかなりの改良の余地があるということがデータから要求されています。

ジャンノッティ 今、日本に来ているのは、全く違う理由で、LHC加速器とATLAS実験の両方の増強計画への日本の参加を評価することに関わっています。日本はLHCに対して、測定器及び加速器のハイテク部品の製作からHiggs → $\gamma\gamma$ 過程でのヒッグス粒子探索を含む物理解析まで、強力に貢献してきました。この数か月はもう一つ多忙にしていることがあって、講演なのですが、主としてアメリカで行っています。私は教えることがとても好きなのですが、代表者の任期中はそういうことをする余裕がありませんでした。

村山 P5にも関わっていますね。

ジャンノッティ ええ、それが旅行と相当の作業を要するもう一つの引き受け仕事なのです。P5 (Particle Physics Project Prioritization Panel、素粒子物理学プロジェクト優先付けパネル) は、ご存知のようにアメリカの今後10年から20年の素粒子研究のロードマップを提案するためにエネルギー省によって設置された委員会です。非常に興味深く、また刺激的な委員会



で、宇宙のサーベイ観測、ニュートリノ物理、ダークマター探索の地下実験、衝突加速器等々を含む私たちの学問分野のトピックスと施設・設備全体をカバーしています。今、それで少し忙しくなっていますが、私はLHCの第2ラウンドに備えて、もうすぐATLASでの活動を再度立ち上げようと計画しています。実際、2015年にはLHCのエネルギーが1.5倍以上に上がり、³「新しい物理」発見と、新しく加わったヒッグス粒子を含む既知の素粒子の精密測定を行う両方の能力が著しく改善するからです。

村山 それは良いですね。間違いないく楽しめるでしょう。

高校では文科系を勉強し、並行してピアノを学ぶ

村山 ここで一寸話題を変えて、あなたご自身のことを伺いたいと思います。実は音楽を専攻したのですか？ ミラノ音楽院

の修了証書を持っていますね。

ジャンノッティ 10年間ピアノを習い、修了証書ももらいました。でも、並行して高校で文科系の勉強をしました。ラテン語、古代ギリシャ語、文学、芸術史、哲学など、それと数学と物理をほんの少しです。

イタリアの教育システムの良い点の一つは、高校で何を学んだかによらず、大学レベルではどんな専門でも選べることです。高校で文科系を勉強したとしても大学で理科系に移れるのです。それはとても良いことで、なぜなら13歳かそこらで高校に入るころ、人生で何をやりたいのか、はっきりは分かりません。それから、例えば13歳から18歳というのは子供から大人に精神的にも大きく成長するとても重要な時期です。ですから、教育システムに柔軟性をもたせて、ティーンエイジャーにもならないうちに将来の職業を決めてしまうことを強制されな

いようにすることは非常に重要なことです。

村山 あなたはどのような訳で専攻を変えたのですか？

ジャンノッティ 色々理由がありました。まず第1に、私はいつもとても好奇心の強い子どもで、ありとあらゆることを質問しました。どうして高い所にある星が落ちてこないの？ どうして星は空にくっついているの？ 当時、インターネットはありませんでしたから、今みたいに手軽で即座に情報を得ることはできませんでした。私はいつも大人に質問しましたが、その答には満足できないことがしばしばありました。それで、私は自分で答を見つけたい、少なくとも答を見つけるために何らかの役割を果たしたいと思っていました。それが一つの動機です。

³ 進行中のLHCの増強では、それぞれの陽子ビームのエネルギーを4 TeVから6.5 TeVへ(重心系エネルギーで8 TeVから13 TeVへ)増強するもので、2015年初期に完成予定。

村山 もっと知りたいと思ったのですね。

ジャノッティ ええ、そうです。それから16か17の時でした。私はマリー・キュリーのとても素晴らしい伝記を読んで衝撃を受けました。とりわけ、家事の傍ら研究するようなやり方に強い印象を受けました。彼女は自宅のキッチンのおぼの部屋を小さな実験室らしきものにしていたので、夕食のスープを用意しながら放射性物質を観察できました。私には、この簡単で家庭的な科学のやり方がとても魅力的に見えました。勿論、私がすることになったことは大違いますが…私のキッチンにATLAS実験は持ってこられません!

村山 ATLASのすぐ隣にもキッチンは持ってませんね。

ジャノッティ 実はATLAS実験の現場にも小さなキッチンがありますよ。ま、私の言っているのとは違いますが。私を物理に進ませることになったもう一つは、高校の最後の年に物理の先生が光電効果について説明してくれたことです。勿論私たちは量子力学や基本的な物理学の詳細を理解するための十分な数学的基礎は持ち合わせていませんでした。しかし、私はアインシュタインによって与えられた光電効果についての説明、適切な周波数の光子が金属サンプルに当たった時だけ(つまり、光子の量子化されたエネルギーが金

属中の電子の束縛エネルギーに等しいか、それより大きい場合)電子が放出されるということにとっても強い印象を受けました。私にはその説明がすごく分かり易く、すごく説得力があり、すごくエレガントで、すごく簡単に見えました。それで私は「物理学こそ私のやりたいことだ!」と思いました。

村山 あなたは波動と粒子の2重性には戸惑ったりしなかったのですか?

ジャノッティ それほど戸惑うことはありませんでした。なぜなら、その時はまだその概念に本当に触れていなかったからです。量子力学がほとんど直観と相いれないことは知っています。私…今の方がもっと戸惑っています。

村山 とにかく、感銘を受けたのですね。

ジャノッティ 今言ったこの3つの要素にとっても強い影響を受けて私は物理学に進みました。哲学も大きな問題を見出してそれに取り組もうとするわけですから、私は哲学も好きでした。でも、私は物理学の方がもっと直接的だという印象を持ちました。なぜなら、物理学では問題を実験と観測と測定によって一つ一つ解決しようと本当に努力します。それで私は物理を勉強することに決めました。勿論、私は確信していたわけではありません。これが本当に私の…

村山 生涯情熱を燃やすことになるもの?

ジャノッティ ええ。でも、それほど長く躊躇していたわけではありません。数学や力学や熱力学、その後量子力学と量子場の理論を勉強し始めてすぐに、これが本当に私の進むべき道だと思いました。

素粒子物理学の次の課題は?

村山 素晴らしい! さて、もっと将来を展望することにして、素粒子物理の次の課題は何だと思えますか?

ジャノッティ あなたからそういう質問が出るとはびっくりです。あなたは理論物理学者ですから、私たち実験物理学者を導いてくれるはずでしょう! 冗談はさておき、LHCの第1ラウンドからの主だった結果が3つあると思います。第1に、新たなエネルギー領域での膨大な測定により、標準模型を揺るぎないものとししました。標準模型は見事に成り立っています。第2にヒッグス粒子を発見して標準模型を完結させました。ヒッグス粒子の証拠となる特徴の一つはスピンが0のスカラー粒子であるということです。私たちの測定結果はすべてこの仮定と極めて良い一致を示しました。しかし、この新粒子がミニマルな(最小の)標準模型のたった一つのヒッグス粒子なのか、ある

いはもっと複雑な理論が予想する素粒子群に属するのか、それは未だ分かっていません。かなりの程度標準模型のヒッグス粒子のようにも見えますが、しかし、現在のATLAS実験とCMS実験による測定には(典型的には20%のレベルの)大きな誤差があります。とにかく、標準模型の予想する素粒子は今や全て実験的に観測されました。

LHCの第1ラウンドからの第3の重要な結果は、これまでのところ標準模型を超える物理の証拠が何も見られないことです。ただし、これは新しい物理の存在を否定するものではありません。LHCが13 TeVで運転されるようになる2015年に、あるいはそれ以降に、新しい物理に迫ることができるかもしれないのです。ひょっとすると、予想されたほどはっきりは見えないけれども、既にこれまで取ったデータに潜んでいることだってあるかもしれないのです。そうだとすれば、それを特定するにはもっと時間をかけてもっと一生懸命働くことが必要になります。

村山 例えばスペクトルが縮退しているとか。

ジャノッティ その通りです。あるいは、非常に変な信号であるとか。明らかなように、既に私たちはデータを徹底的に調べ、また調べられる限りのイベント・トポロジーを調べ、多く

の簡単にわかるシナリオは排除しました。しかし、データを色々な角度からもっと詳しく調べると、とても分かり難いところで何か見つかることだってあるかもしれません。そういったものの探索のためには（勿論、それだけではありませんが）、LHCの13 TeVでの運転がすごい御利益があることは間違いありません。

何が分かるかと期待できるでしょうか？標準模型が、基礎的物理学の問題の全てには満足できる形で対処できないことが知られています。ダークマターの組成は分かっていますし、宇宙の物質・反物質非対称の起源が何かも分かっています。ダークエネルギーはもっと大きな問題で、何も手がかりがありません。宇宙の加速膨張は重力を修正すれば説明がつくのか、あるいは未知の形態のエネルギーによるものか？実はヒッグス場は、問題をさらに大きくします。

村山 ヒッグス場はダークエネルギーの一部です。

ジャノッティ さらに、量子重力理論を定式化できず、そのため重力と他の3つの力との折り合いをつけられません。こういった理由や、その他の理由により、標準模型は完全な理論ではなく、新しい物理が必要なことが知られています。問題は「それがどこにあるのか？」ということです。LHCあるいは将来の

より高エネルギーの加速器で到達可能なエネルギースケールにあるのか？あるいは、そのスケールは高すぎて、人類により建設されると想像される加速器では決して到達できないのか？

いずれにせよ、素晴らしいことは、私たちには今や詳細な研究と測定が必要とされるヒッグス粒子という新粒子があることです。それは新しい物理への入り口かもしれません。というのは、新しい物理はこの粒子の性質（生成過程と崩壊過程、他の粒子との相互作用の強さ等）を修正するかもしれないからです。例えば、LHCはヒッグス粒子の結合定数の測定精度として、最終的には（ある仮定のもとに）2～5%のレベルに到達できます。その結果、新しい物理のシナリオの幾つかを排除できるでしょう。もっとよく調べるには0.1%の数倍程度の測定精度が必要で、これが可能なのはILCのような電子・陽電子衝突加速器だけです。また、電子・陽電子衝突加速器によってのみ、模型に依存せずにヒッグス粒子の絶対的な結合定数の測定を行うことが可能です。

今後のもう一つの重要な研究は、標準模型は本質的に閉じていなければなりません、そのテスト（closure test）で、高質量でのWW散乱に関連しています。

村山 散乱のユニタリ性を示す

こと。

ジャノッティ ヒッグス粒子が高質量のWWシステムの悪い振る舞いを修正するのか？あるいは新しいダイナミクスが存在しているのか？これは非常に興味深い研究領域で、その研究にはまたLHCの最高エネルギーが必要とされます。その理由は…

村山 断面積がとても小さいからです。

ジャノッティ そうです。ですから、この先は興味深い時が待っています。

村山 最高の結果を期待しましょう。

ジャノッティ その通り、最高の結果を期待しましょう。新しい物理に乾杯！

村山 賛成。どうもありがとう。

ジャノッティ ありがとうございます。ありがとうございました。

欧州連合UNIFYプログラムのワークショップ

大栗博司 おおぐり・ひろし

Kavli IPMU主任研究員

Kavli IPMU は、2011年度から欧州連合(EU)のマリー・キュリー・プログラムの国際研究員交換計画“Unification of Fundamental Forces and Application (略称: UNIFY)”のネットワークに参加しています。ヨーロッパでは、ベルリンのフンボルト大学やマックスプランク重力研究所、パリの高等師範学校、第6大学やサクレイ研究所、ポルトガルのポルト大学が中心となっており、ヨーロッパ外では、Kavli IPMU以外に、米国のカリフォルニア工科大学とストーニーブルック大学、カナダのペリメータ研究所が参加しています。ヨーロッパ内外の研究機関の交流を促進するためのもので、ヨーロッパ内の研究機関の研究者が、UNIFYのネットワークに参加しているヨーロッパ外の研究機関を訪問する際には、マリー・キュリー・プログラムから経費が支給される仕組みになっています。UNIFYの研究課題は、超弦理論や場の量子論の基礎的研究を統一理論の理解に結びつけるというものです。大栗は、UNIFYネットワークの執行理事として、Kavli IPMUを代表しています。

過去3年の間にUNIFYのネットワークの中から、様々な共同研究が生まれてきました。また、毎夏、ネットワーク全体の会議を開催しており、第1回の2011年はポルト大学で、第2回はベルリンで全体会議が開かれました。第3回の今年、Kavli IPMUがホスト研究機関となり、8月26日から9月

6日までの2週間にわたって、“Kavli IPMU Workshop on Gauge and String Theory”と題したワークショップが開かれました。

通常の研究会とは異なり、UNIFYネットワーク内での研究交流や共同研究の促進を目的にするものだったので、講演は毎朝2時間のみ。午後は議論と共同研究に充てました。これは、米国のアスペン物理学センターで半世紀にわたって行われている長期滞在型プログラムのスタイルを踏襲したもので、実際にいくつかの共同研究が実を結びました。

2週間のプログラムのうちで、第1週はAdS/CFT対応に現れる可積分構造に、第2週は超対称性をもつゲージ理論の局所化などを使った厳密な計算方

法に、焦点を当てました。

ヨーロッパを中心にして50名ほどの研究者が来日しました。その中には、ワークショップの前後数ヶ月滞在する研究者もあり、Kavli IPMUの研究アクティビティーにも貢献しました。このような海外からの参加者の大部分は、EUのマリー・キュリー・プログラムの資金援助を受けていたので、Kavli IPMUの負担は通常のフォーカス・ウィークの半額程度に収めることができました。

当初の予定より大きな規模のワークショップになりましたが、Kavli IPMU 事務部門の皆さんの並々ならぬ努力のおかげで、成功に終わりました。この場を借りて感謝の意を表します。



Holography and QCD

–Recent Progress and Challenges–

杉本茂樹 すぎもと・しげき

Kavli IPMU 教授

1990年代終わりごろに、弦理論の研究からゲージ・ストリング双対性という不思議な双対性が発見されました。これはゲージ理論とある曲った時空中における弦理論という、一見すると全く異なるように見える2つの理論がある場合に等価になるという驚くべき性質です。特に時空の次元の異なる2つの理論が等価になるという特徴があることから、ホログラフィック双対とも言われています。このアイデアを強い相互作用の理論である量子色力学(QCD)に応用して、ハドロンに関する解析を行う研究が、10年ほど前から盛んに行われてきました。この研究会はこのテーマに関する話題に焦点を当てたもので、9月24日–28日に開催されました。

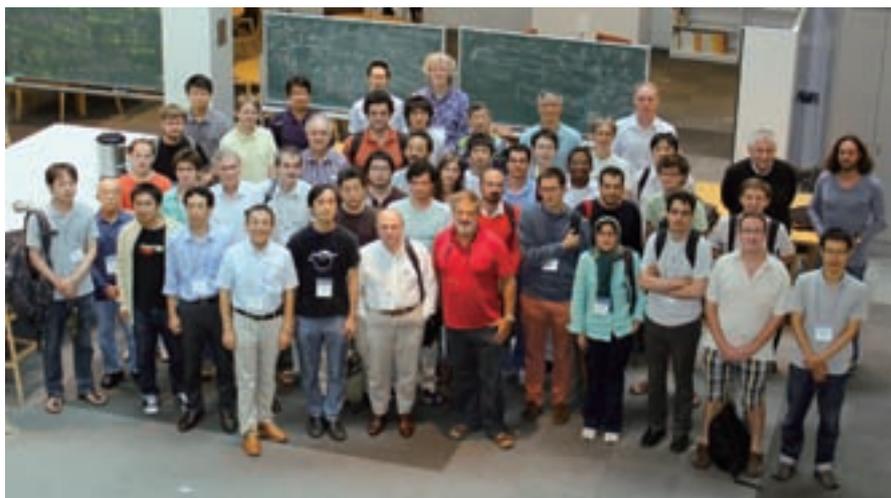
これまでの研究により、ホログラフィック双対を用いたQCDの新しい解析法は、現実のハドロンの質量や相互作用の強さを計算したり、量子色力学の相構造を調べたり、温度が高いと

きに実現されるクォーク・グルーオン・プラズマと呼ばれる状態に関する様々な性質を解析するのに、大変有用で強力な方法を提供することが分かっています。特に、時間発展を伴う過程や化学ポテンシャルがある場合など、格子QCDなどの他の非摂動的な解析方法があまり有効ではない状況にも適用可能であるところが一つの強みです。実際、このような方法は、弦理論の研究者のみならず、ハドロン物理の研究者の間でも注目され、弦理論の研究者とハドロンの研究者の間の分野を越えた協力関係がとても良い形で行われています。この研究会の成功の一つは、世界中からハドロンや弦理論の専門家が集まり、お互いに交流する良い機会になったことです。多くの弦理論の研究者がハドロンに関する研究を発表し、ハドロンの研究者が弦理論やホログラフィック双対を駆使した議論を展開しました。両者が特に言葉の壁を感じることなく共通のゴールに向か

って討論する姿が印象的でした。

今回の研究会で議論された話題をいくつか挙げてみると、電磁相互作用を含めたハドロンの質量の評価、ヴェネツィアノ極限における解析、重いハドロンの記述に関する研究、RHICやLHCで行われている重イオン衝突実験を想定した時間発展を伴う過程の解析、クォーク・グルーオン・プラズマの研究、強い電場や磁場がある場合に起こる現象、温度や化学ポテンシャルがある場合の相構造などが挙げられます。5日間で25の講演があり、ホログラフィーとQCDに関する様々な話題における最新の興味深い研究成果が発表されました。

なお、この研究会は Kavli IPMUのWPI 経費に加えて、European Science Foundation (Holograv network) や科研費(新学術領域)からの援助を受けて行われました。また、研究会の運営に関する仕事を一手に引き受けて下さった宇治田さんに感謝したいと思います。



Symposium on Gravity and Light

マーカス・ワーナー Marcus Werner

Kavli IPMU 博士研究員

2013年9月30日から10月3日までの4日間にわたり Kavli IPMU で “Symposium on Gravity and Light (重力と光に関するシンポジウム)” と題する国際研究集会が開催されました。

光は遠方、即ち宇宙の初期に関する主な情報源です。それどころか、重力波と銀河外ニュートリノが直接かつ日常的に観測可能になるまでは、光が唯一の情報源です。ですから、宇宙の起源と進化を研究するには、他の天文学的効果一例えば吸収などを考慮に入れる前に、重力だけの影響を受けて光がどのように時空を伝播するかを理解することが本質的に重要です。従って、この研究集会では専ら広い意味での「重力幾何光学」が取り上げられました。

光に対する重力の影響が一番はっきりと見えるのは、勿論、重力が強い場合であり、それ故、ブラックホールの時空は主要なテーマでした。Marcus Werner による「幾何光学と Gauss-Bonnet の方法」で始まり、Gary Gibbons が「ささやきの回廊」*に似た安定な光子軌道について、白水徹也がブラックホールの臨界捕獲地平線について、前田啓一と Volker Perlick が「ブラックホールの影」の性質と観測可能性について、議論しました。

回転しているカー・ブラックホールの幾何光学はランダース・フィンスラ

*「ささやきの回廊 (whispering gallery)」は、人の囁き声が距離の離れたところで聞こえる建築物、またその現象自体を指す言葉である。(出典: Weblio 英和対訳辞書)

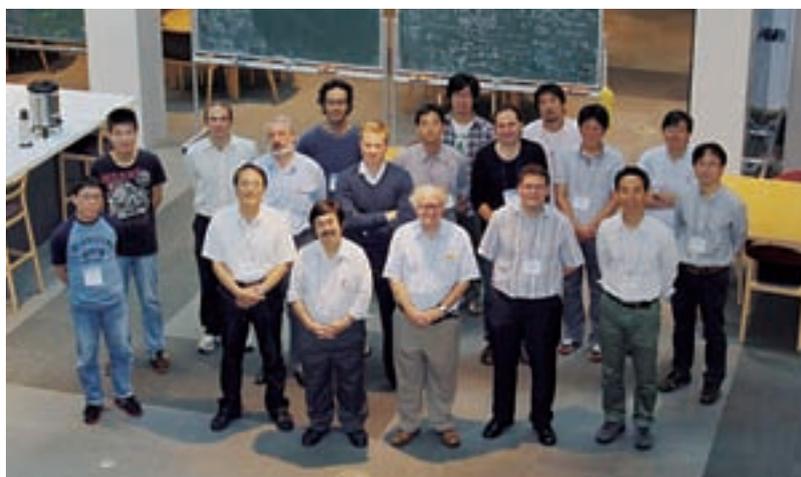
一構造をもつため、フィンスラ幾何学での測地線に関するより一般的な数学的結果についても Erasmo Caponio と Ricardo Gallego Torromé が、キング・ベクトルについても大塚隆巧(おおつか たかよし)が講演しました。重力レンズ理論の数学的側面についても考察され、特に ADE 型特異点に対する普遍的な増光不変量について Amir Aazami が、摂動を受けた特異等温 4 重極レンズについて Zhe Chu が取り上げました。

重力レンズを用いる宇宙論のテストはもう一つの主要なテーマであり、葛西真寿(かさい ますみ)が光の曲がりに対する宇宙定数の役割についての最近の論争についてレビューし、浅田秀樹が宇宙でほとんど物質が存在しない「ポイド(空洞)」に対する実効的なモデルとして用いられるかもしれない負の収束率をもつ重力レンズについて、

Jean-Philippe Uzan が一様性のテストと観測の展望について、講演しました。また、佐々木節(ささき みさお)が基礎的な重力理論、特にインフレーションについて、Frederic Schuller が重力作用を導くための、光の分散関係が本質的である新たな幾何学的力学の枠組みについて議論しました。

このように Kavli IPMU の学際的な精神を踏まえて、この研究集会では天文学者、理論物理学者、及び数学者が一堂に会し、実に活発な、そして時に論争を呼ぶ議論が交わされました。

最後に、この研究集会を共に組織した Amir Aazami、Frederic Schuller、向山信治の皆さんに感謝します。特に向山さんは締めくくりのセッションをリードしてくれました。また、研究集会の運営を引き受けていただいた事務部門のスタッフ、特に宇治田理恵さんと小濱理恵さんに感謝します。



フレッド・カプリ氏逝去

米国カプリ財団会長で創設者のフレッド・カプリ氏（享年86歳）が2013年11月21日逝去されました。

カプリ数物連携宇宙研究機構は2012年4月にカプリ財団の支援を受け、日本で初めて、また世界で16番目のカプリ冠の研究機関となりました。生前のカプリ氏からのご厚情に改めて感謝を捧げるとともに、ここに謹んで哀悼の意を表します。

なお、大栗博司主任研究員による追悼記事(54-55ページ)もお読み下さい。

ファビオラ・ジャンノッティ博士、ヒッグス粒子の発見を語る

欧州原子核研究機構(CERN)でヒッグス粒子を発見したATLAS実験グループの前代表、女性物理学者のファビオラ・ジャンノッティ博士を招き、2013年11月20日に、浜離宮朝日ホールでKavli IPMU主催、朝日新聞社共催による一般講演会「素粒子から宇宙へーヒッグス粒子と私たちの生活ー」を開催しました。

2013年のノーベル物理学賞発表直後と時宜を得たこともあって会場は満席となり、同時に行ったインターネットの生中継も1,000人近くの視聴数を数えました。CERNでの実験やヒッグス粒子についてのジャンノッティ博士の講演は、村山機構長が逐次通訳を行いました。講演会後半では高橋真理子朝日新聞編集委員が進行役として登壇、率直な質問でジャンノッティ博士の人柄

を引き出すと共に村山機構長の名通訳もあり、会場からは何度も笑いが沸き起こりました。

本誌40-47ページの村山機構長によるジャンノッティ博士のインタビュー記事も併せてご覧下さい。



左から村山機構長、ファビオラ・ジャンノッティ博士、高橋朝日新聞編集委員

山本一太科学技術政策担当大臣、Kavli IPMUを視察

2013年11月20日に山本一太科学技術政策担当大臣が東京大学柏キャンパスのKavli IPMUを視察されました。大臣は村山機構長が中心研究者を務めるFIRST(最先端研究開発支援プログラム)のSuMIRe(Subaru Measurement of Images and Redshifts)プロジェクトについて、機構長らから概要説明、引き続きテレビ会議を通じて同プロジェクトに参加しているプリンストン大学およびNASAのJPL(ジェット推進研究所)の研究者から進捗状況の説明を受けられました。また、その日行われていたファビオラ・ジャンノッティ博士による研究者向けのセミナーや実験室を見学され、ティータイムに参加されるなどKavli IPMUの活動を幅広く視察されました。

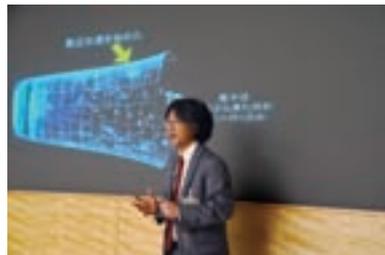


外国人研究者と談笑する山本科学技術政策担当大臣(中央)

村山機構長、総合科学技術会議でプレゼンテーション

村山機構長は、2013年12月17日、総理大臣官邸において開催された第116回総合科学技術会議に「最近の科

学技術の動向」の講師として招かれ、「宇宙の起源と運命を探るKavli IPMU」についてプレゼンテーションを行いました。



総合科学技術会議でプレゼンテーションを行う村山機構長



安倍総理大臣はじめ、村山機構長のプレゼンテーションを聞く総合科学技術会議議員

理化学研究所 iTHESと研究協力協定を締結

Kavli IPMUは理化学研究所(理研)理論科学連携研究推進グループ(iTHES)と研究協力協定を締結し、2013年12月4日に理研和光キャンパスにおいて調印式を行いました。iTHESは物理学・物質科学・生命科学などの分野を越えた理論科学の連携を図るため、理化学研究所に初田哲男主任研究員をディレクターとして2013年度に発足したグループです。これを機にKavli IPMUとiTHESは理論研究の発展のため協力して研究を進めます。なお、初田さんは2010年10月よりKavli IPMUの客員上級科学的研究員でもあります。



左から理研初田主任研究員、川合眞紀理事、Kavli IPMU村山機構長、杉本茂樹特任教授

宇宙初期の大質量銀河の成長が明らかに

Kavli PMUのジョン・シルバーマン助教、名古屋大学大学院理学研究科教授でKavli IPMU主任研究員を兼ねる杉山直さん、同大学大学院生の柏野(かしの)大地さんらを含む国際研究チームは、国立天文台のすばる望遠鏡に搭載されたファイバー多天体分光器FMOSを用いて深宇宙を観測し、90億年以上前の銀河で新しい星々が非常に活発に形成されている様子を捉えました。また、大質量銀河を取り巻くガスは重元素やダスト(星間固体微粒子)を豊富に含んでいることが確かめられました。これは大質量銀河がこの時代にすでに十分に成熟していることを示唆しています。今回の研究成果は、宇宙の若い頃の姿がどのようなものだったか、という重要な問いに迫るものです。

この研究成果の一部は、2013年11月1日に発行された米国の『アストロフィジカル・ジャーナル・レターズ』誌777巻、L8ページに掲載されました。

梶田主任研究員、ユリウス・ヴェス受賞

東京大学宇宙線研究所長でKavli IPMU主任研究員を併任する梶田隆章さんが2013年のユリウス・ヴェス賞(Julius Wess Award)を受賞しました。



同賞は理論物理学者ユリウス・ヴェス教授の功績を記念して2008年に設立された賞で、カールスルーエ工科大学が素粒子物理及び天体素粒子分野で優れた成果を残した物理学者を表彰、授与します。梶田さんの受賞理由は、ニュートリノ物理学の分野での功績、特にスーパーカミオカンデ実験によるニュートリノ振動の発見です。12月19日に同大学にて授賞式が行われました。

Kavli IPMUが東京大学業務改善総長賞を受賞

Kavli IPMU事務部門教職員12名のワ

ーキンググループが2013年度東京大学業務改善総長賞(副賞海外研修つきの最高賞)を受賞しました。英語による安全教育ビデオを制作、その確認テストをオンライン上で行うシステムを構築し、新任やビジターの外国人研究者への安全教育の徹底と事務職員の業務負担を軽減した成果と、その成果の全学展開が期待でき、東京大学の国際化の推進に貢献するものであることが高く評価されました。12月20日の表彰式では特任専門職員の田村理恵さんがワーキンググループを代表し、濱田総長から表彰状を受け取りました。



濱田総長から表彰を受けるKavli IPMU事務部門のワーキンググループ

東京大学柏キャンパス一般公開2013

2013年10月25日に東京大学柏キャンパス一般公開が行われました。例年同様、金土の2日間開催予定でしたが、今年は台風接近により金曜日のみとなりました。しかし、千葉県の「ゆるキャラ」チーバくんが特別出演した村山機構長の「はてな宇宙 Live! Special」講演、杉本茂樹特任教授の「はてな宇宙 Live!」講演、デジタル宇宙シアター、外国人研究者による狂言などに加え、研究棟見学ツアーおよび手作りで分光器を作れるコーナーの体験型企画も人気を集めました。



しゃべれないチーバくんは村山機構長に質問状で質問

サイエンスアゴラ2013にWPI拠点合同出展、サイエンスアゴラ賞受賞

2013年11月9日、10日の2日間、東京お台場の日本科学未来館で「サイエンスアゴラ2013」が開催され、WPI(世界トップレベル研究拠点プログラム)の全9拠点が合同出展しました。サイエンスアゴラは内閣府などが主催し、若い世代を中心に科学・技術に対する関心を深めてもらうことを目的として最先端の研究やその成果に関する講演、展示などが行われる催しで、2日間で来場者約6000名を数えました。WPI拠点合同で研究成果の発表を行った「WPI Science Live!」ブースでは、Kavli IPMUからは片山伸彦副機構長が講演、近藤智助教及び阿部知行助教がトークセッションを行いました。この「WPI Science Live!」ブース企画はサイエンスアゴラ全出展者の中からサイエンスアゴラ賞に選ばれ、12月26日に日本科学未来館で授賞式が行われました。



宇宙論の最前線と加速器実験について講演する片山副機構長



黒板を使い数学研究の姿を解説する近藤助教(右)と阿部助教(左)

「第9回最新の天文学普及をめざすワークショップ」開催

2013年11月17日から19日の3日間、Kavli IPMUと国立天文台天文情報セン

ターの共催により、Kavli IPMU大講義室を会場とする「第9回最新の天文学普及をめざすワークショップ」が開催されました。このワークショップは、国立天文台などが科学館やプラネタリウム、教育機関で天文学の普及に関わっている方々を対象に毎年開催しているものです。今回は、普及員を通じて最新の宇宙論研究を多くの人々に届けることを目的として3日間の集中講義が行われました。Kavli IPMUからは高田昌広教授がコーディネーターを務め、また講義を行ったほか、主任研究員の杉山直名古屋大学教授、野尻美保子高エネルギー加速器研究機構教授、特任准教授の向山信治さん、併任の小松英一郎マックスプランク研究所ディレクター、吉田直紀東京大学教授、前田啓一京都大学准教授が講義を行いました。参加者からは「今回の講義内容が伝わるプラネタリウムのプログラムを考えたい」、「生徒に宇宙の魅力を伝えたい」などの感想が聞かれました。



会場風景

ICRRとの第9回合同一般講演会開催

2013年12月1日に東京大学本郷キャンパスの小柴ホールにおいて、今回で9回目となった東京大学宇宙線研究所(ICRR)とKavli IPMUの合同一般講演会「宇宙をひもとく」が開催され、最初にICRR准教授でKavli IPMUの科学研究員を兼ねる井部昌広さんが「素粒子標準模型とヒッグス粒子」、次にKavli IPMU主任研究員の野本憲一さんが「超新星で探る宇宙の進化」と題して講演を行いました。講演後は懇談会が行われ、丁寧に質問に答える2人の講師の周りを多くの参加者が取り巻

ていました。



超新星爆発について説明する野本さん

第3回WPI合同シンポジウム開催

2013年12月14日、仙台国際センターを会場としてWPI(世界トップレベル研究拠点プログラム)9拠点の合同シンポジウム『Science Talk Live!』が開催され、宮城県内を中心に東北地方各地から約600人の高校生が来場しました。今回の合同シンポジウムはWPI拠点が9拠点になって初めて開催されたものであるため、ホスト機関の東北大学AIMRの研究者と2012年度に新たに加わった3拠点の各拠点長が講師として登壇した講演会に加え、全9拠点がブース出展を行いました。Kavli IPMUのブースでは、村山機構長のヒッグス粒子解説ビデオの上映や、手のひらサイズの分光器で実際に光源を見ながら天文学分野で分光観測がどのように活用されているかを解説するなど、多くの高校生にKavli IPMUが取り組む宇宙の研究の魅力を伝えました。



Kavli IPMUブースに集まった高校生

高校生のためのサイエンスキャンプ「ひらけ宇宙の扉～数学と物理学の挑戦」

2013年12月25日から27日までの3日間、ウィンターサイエンスキャンプ「ひらけ宇宙の扉～数学と物理学の挑

戦」がKavli IPMUで開催され、選考を通過した20名の高校生が全国から集まりました。サイエンスキャンプは日本科学技術振興財団(JST)に採択された研究機関において、第一線の研究者が高校生に対して直接指導を行うことを通じて科学への関心を深めてもらうことを目的とした体験合宿型プログラムで、Kavli IPMUでは今回が3回目の開催でした。参加者の高校生は杉本茂樹特任教授を中心とした研究者による理論物理学や数学、さらに実験物理学など最先端の研究の講義を受けると共に、午後3時のティータイムにも参加し外国人研究者にも英語で質問をするなど積極的に取り組む様子が見られました。最終日には村山機構長を始め、Kavli IPMUの研究者に見守られる中で閉講式が行われました。



サイエンスキャンプ参加者とKavli IPMUの講師およびスタッフ

人事異動

転出

Yi WangさんがKavli IPMU博士研究員からケンブリッジ大学博士研究員へ。Kavli IPMU在任期間は2012年9月1日-2013年10月31日でした。

Simon Woodさんがオーストラリア国立大学の博士研究員へ。Kavli IPMUには2010年12月1日-2011年11月30日にスイス国立科学財団の博士研究員として、その後2011年11月30日-2013年11月29日に日本学術振興会外国人特別研究員として滞在しました。

フレッド・カブリ氏（1927–2013）を悼む

大栗博司 おおくり・ひろし

Kavli IPMU主任研究員

2013年11月21日に、カブリ財団の創設者で会長のフレッド・カブリ氏が亡くなったという悲しい知らせを受け取りました。86歳でした。カブリ氏は基礎科学の支援に大きな業績を残されました。

カブリ氏はノルウェーの小さな村エレスフィヨルドの農園に育ちました。ノルウェー工科大学（現在ノルウェー科学技術大学）で物理学を修めた後、米国に移住して、カブリコ株式会社を設立し、航空、自動車、各種産業の検知器の世界最大の製造業者に育て上げました。同社の製品は、ロッキードの戦略偵察機SR-71「ブラックバード」やスペースシャトルにも使われました。

2000年に経営から退き、人類全体のために科学を振興し、科学研究の一般の理解を高め、科学者とその研究を支援するために、持ち株を譲渡した利益を投じて、カブリ財団を立ち上げました。カブリ財団は、これまでに17のカブリ科学研究所と7つのカブリ教授職を設立し、シンポジウムやワークショップ、科学アウトリーチなど様々な活動を行っています。また、ノルウェー科学人文アカデミーとノルウェー文部省と共同で、2008年にカブリ賞を創設しました。天文物理学、ナノ科学、神経科学の3分野の顕著な功績が、カブリ財団と独立した委員会によって選ばれ、2年毎に授与されています。

カブリ氏はアメリカ芸術科学アカデミーのフェロー、ノルウェー科学技術アカデミーの会員、米国大統領科学技術諮問委員会の委員でもありました。また、ノルウェー有功勲章を受章し、ノルウェー科学技術大学、ノースウェスタン大学、オスロ大学から名誉博士号を



Credit: Dan Dry; Photo Courtesy of The Kavli Foundation

授与されています。2011年には、米国最古の科学教育機関であるフランクリン・インスティテュートからボウワー賞を、また慈善活動のノーベル賞とも呼ばれるカーネギー慈善賞を受賞しています。

私は、カリフォルニア工科大学初代フレッド・カブリ教授として、またカブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）の主任研究員として、カブリ氏の科学支援のビジョンを遂行する立場にあったことを、光栄に思います。カブリ氏の科学への情熱は心に通じるものがありました。私は、2012年のカブリ賞授賞式でのカブリ氏のスピーチをよく憶えています。宇宙物理学、ナノサイエンス、神経科学の各々の分野の最近の発展を自身の興味に沿って語り、純粋な好奇心に駆られた基礎研究の重要性を情熱を持って訴える、力強いスピーチでした。

IPMUは2012年2月からカブリ研究所のネットワークに加わり、カブリ数物連携宇宙研究機構（カブリIPMU）となりました。これに伴い、カブリ財団からの寄付による基金が設立され、その配当金により研究が助成される仕組みになりました。IPMUは、文部科学省の世

界トップレベル研究拠点プログラム (WPIプログラム) によって10年間という時限付きで設立された研究所ですが、カブリ基金による恒久的な支援により、時限終了後も活動を継続させる基盤ができたのです。

2012年5月に開かれたカブリIPMU記念式典でのカブリ氏のスピーチの一部を、和訳して掲載します。

「私は、地球の反対側にあるノルウェー西部の高い山に囲まれた緑の谷間に育ちました。雷や稲妻が山から山に伝わり、谷を揺るがすときには、自然の力と美しさを感じたものです。オーロラが踊りながら空を横切り、白く雪に包まれた山々に降りていくときには、全天が燃えるように輝きました。雪山の静寂と孤独の中では、天の川銀河や星たちがくっきりと見え、宇宙の大きさ一想像を超える大きさ一を感じました。私は、宇宙、惑星、自然、そして人間の不思議を考えました。そして、今でも考え続けています。」

「ノルウェーの雪山からは長い道のりでした。ノルウェー工科大学で物理学を学んだ後、アメリカに来て南カリフォルニアに落ち着き、ビジネスの世界で多くの経験をしました。」

「そして今、私の興味は大きな円を描いて元のところ一宇宙一に戻ってきました。その最も小さな構成要素から、宇宙の大きさと驚きに、そしてその只中にいる人間の脳に。」

「私たちは、慈善活動によって世界中の科学を支援しています。米国には、社会から得たものを、奉仕や

慈善活動によって社会にお返しをするという素晴らしい伝統があります。私は、この慈善活動の伝統を、アメリカの素晴らしい友人である日本でも、分かち合うことができることをとても嬉しく思います。国境を超え世界中の優秀な科学研究の支援をするために、IPMUと協力できることは光栄です。」

カブリ財団のロックウェル・ハンキン副会長とロバート・コン理事長からの手紙には次のような言葉がありました。

「フレッド (カブリ氏) は常に将来を見つめていました。科学活動が特別に重要だと考えていたのはそのためです。彼は、基礎科学がすぐに役に立つものでないことはわかっていたが、それと同時に将来の世代がこの世界をより良いものにするには科学の発見が必要であることも知っていました。」

「フレッド (カブリ氏) は、自らの最も大きな遺産は、このような科学者のコミュニティから生み出される研究成果であり、それが人類に幸福をもたらすことだと考えていました。」

カブリ氏は、科学の発展を助けることで、世界をより豊かなものにしようと努力してこられました。私たちは彼の遺志を引き継いで、さらに研究に精進していきます。



アインシュタイン方程式

横山 順一 東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター教授、Kavli IPMU上級科学研員

古典力学を完成させたニュートンにとっては、空間は運動する物体の単なる容れ物に過ぎませんでした。1915年に発表されたアインシュタイン方程式によると、時空間のあり方はそこに存在する物質やエネルギーによって規定される——より正確に言うと、時空間の状態と物質・エネルギーの状態はアインシュタイン方程式によって不可分に結びついていることになります。かつては、「アインシュタイン理論を理解している人は世界に3人しかいない。」などと言われたものですが（しかし、その3人が誰のことなのか明示したものは見たことがない）、今では極めて多くの研究者がこの方程式の恩恵にあずかっています。

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G_N}{c^4} T_{\mu\nu}$$

ニュートン重力定数

光速

エネルギー・運動量テンソル

時空の幾何学的構造

膨張宇宙

ブラックホール