

KAVLI IPMU NEWS

wpi 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

TOIAS Today Institutes for Advanced Study

The University of Tokyo
東京大学国際高等研究所

Feature The Why and How of Catching WIMPs
Interview with John Ellis



23

No. September 2013

Kavli IPMU NEWS CONTENTS

English

- 3 **Director's Corner** Hitoshi Murayama
Dawn of Physics of the 21st Century
- 4 **Feature**
The Why and How of Catching WIMPs
Kai Martens
- 10 **Research Report**
Ready to Go for "Cosmic Census" Project with the
World's Most Powerful Camera, Hyper Suprime-Cam
Masahiro Takada
Naoki Yasuda
- 14 **Interview** with John Ellis
- 21 **Our Team** Nao Suzuki
Ran Huo
Tirasan Khandhawit
Jonathan Maltz
Ryo Namba
Nobuhiro Okabe
James Wallbridge
- 24 **Workshop Report**
The Kavli-IPMU focus week workshop on
Cosmology with Small Scale Structure
Alexie Leauthaud
Surhud More
Masahiro Takada
- 26 **Workshop Report**
The Kavli IPMU School on
The Future of Collider Physics
Satyanarayan Mukhopadhyay
- 28 **News**
- 32 **Solar Neutrinos** Masayuki Nakahata

Japanese

- 33 **Director's Corner** 村山 斉
21世紀の物理学の幕開け
- 34 **Feature**
なぜWIMPを探するのか、どうやって捕らえるのか
カイ・マルテンス
- 40 **Research Report**
世界最強のカメラ、Hyper Suprime-Camによる
「宇宙の国勢調査」プロジェクトの開始へ
高田 昌広
安田 直樹
- 44 **Interview** ジョン・エリス教授に聞く
- 51 **Our Team** 鈴木 尚孝
霍 然
ティラサン・カンタウィット
ジョナサン・マルツ
難波 亮
岡部 信広
ジェームズ・ウォルブリッジ
- 54 **Workshop Report**
カブリIPMUフォーカスウィークワークショップ
小規模スケールの宇宙構造による宇宙論
アレクシー・レオト
スルド・モレ
高田 昌広
- 56 **Workshop Report**
カブリIPMUスクール
コライダー物理の将来
サティアナラヤン・ムコパッティアイ
- 58 **News**
- 60 **太陽ニュートリノ** 中畑雅行



Kai Martens is an Associate Professor at the Kavli IPMU. He received a Doctorate in Physics from the University of Heidelberg in 1994. After working at the Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo and then the State University of New York at Stony Brook, as a researcher, he became an Assistant Professor at the University of Utah in 2000, and a Research Associate Professor in 2008. Since October 2008, he has been an IPMU Associate Professor.

カイ・マルテンス：Kavli IPMU准教授。1994年にハイデルベルク大学から博士の学位を取得。東京大学宇宙線研究所、その後ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校の研究員を経て2000年より米国ユタ大学助教授。2008年同大学研究准教授、2008年10月よりIPMU准教授。

Dawn of Physics of the 21st Century

Director of Kavli IPMU

Hitoshi Murayama

It was announced that the Nobel Prize in Physics this year will be awarded to Profs. Peter Higgs and François Englert. The citation is unusually long: “*for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider.*” The discovery of the particle they predicted, aka Higgs boson, is the completion of physics of the 20th century, and also the dawn of physics of the 21st century.

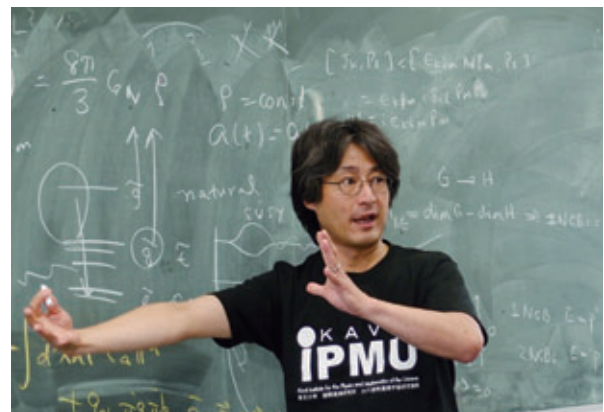
Higgs boson is frozen into the entire Universe, and is stuck very tightly. Without it, electrons would shoot out at light speed, and our body would evaporate in a billionth of a second. It does an incredibly important job, *taming* the electrons, allowing for atoms to form, and creating an *order* in the Universe. Now that this particle is discovered as predicted, the standard model of elementary particles that was built over seventy years since the beginning of the 20th century appears complete.

However, the discovered Higgs boson is *faceless*, unlike any other elementary particle we have seen before. Namely it does not have spin. It is hard to believe that there is only one such elementary particle. We don’t know why it got frozen into the Universe either. Most likely it has siblings and relatives, and it should have very peculiar properties. It may well have deep connections to dark matter and dark energy. The Nobel award is only the

beginning of this research.

I had an honor to interview my old friend and famous theoretical physics, John Ellis for the current issue of the Kavli IPMU News. It took place in June, four months before the Nobel announcement. It was right after ATLAS and CMS experiments released their latest result in March; CERN announced “Having analysed two and a half times more data than was available for the discovery announcement in July, they find that the new particle is looking more and more like a Higgs boson, the particle linked to the mechanism that gives mass to elementary particles. It remains an open question, however, whether this is the Higgs boson of the Standard Model of particle physics, or possibly the lightest of several bosons predicted in some theories that go beyond the Standard Model. Finding the answer to this question will take time.” Also in this issue, our Associate Professor Kai Martens describes the latest development of the XMASS experiment, his own hunt for dark matter. Enjoy!

(Manuscript received 22 October 2013)



The Why and How of Catching WIMPs

Introduction

The Kamioka Observatory is located under mount Ikeno between the cities of Toyama and Takayama here in Japan. It is not the kind of observatory that Dark Matter was discovered at, but it may be the kind of observatory that the nature of Dark Matter is revealed at. And XMASS is one of the experiments that try to accomplish this. The why and the how are what we will be discussing over the next few pages. You will have to forgive me though: It is a vast subject and I will take the liberty to cherry pick examples and feature choices that are designed to motivate the path we took with XMASS.

We are the Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe. Let us start with that Universe.

Dark Matter and the Universe

One of the great scientific success stories is how particle physics and astronomy were integrated to provide a self-consistent narrative for the history of our Universe. The Lambda Cold Dark Matter paradigm and the Big Bang are at its core, and the Standard Model of elementary particle physics is one of the foundations on which this scientific edifice is erected. Together they make sense of a vast

catalogue of astronomical observations. This is the first time in the history of humankind that such a narrative is purely based on science.

Our narrative successfully tracks astronomical observations through this history of the visible Universe. We can watch this history unfold as our telescopes zoom out from ever older objects at ever higher redshifts. Our narrative even reaches beyond the earliest moment of which electromagnetic radiation keeps a record when it explains the relative abundance of the chemical elements as well as the rich structure we see in the distribution of galaxies across the sky.

That is not to say that there are no more problems to be solved. There are misfits: The abundance of ${}^7\text{Li}$ is off by at least a factor three. And while the large scale structure of the matter distribution in the universe is very well reproduced in our models, its small scale structure seems to deviate from expectations. But by and large our narrative meaningfully and successfully relates the relative abundance of chemical elements as it persisted till the first stars were born to the patterns imprinted on the afterglow of the moment when light in the Universe first broke free and the distribution of galaxies today. A stunning success and a towering achievement.

There were a couple of real surprises embedded

in the understanding that came with this successful narrative. The biggest one concerns the future more than the past: Since Edwin Hubble we know that the Universe is expanding in some way. That in and of itself is not too surprising: Since the discovery of the cosmic microwave background radiation we have to assume that it was borne in a Big Bang. What we did not expect is that its expansion is accelerating. Our narrative attributes this feature to a component of the Universe that we call Dark Energy - the Lambda in our paradigm. At present Dark Energy contributes about two thirds of all the content of the Universe.

But we shall not concern ourselves with Dark Energy here. XMASS is looking for the second largest contributor to the contents of the Universe: Dark Matter. It weighs in at slightly over a quarter of everything. Only about a mere twentieth of the Universe is like the stuff we know, like the Sun that shines on us, the friend whose hand we shake, or the computer we run our simulations on. That twentieth is the stuff that we see through our telescopes: the tip of the iceberg as far as matter is concerned. This twentieth is also the stuff that we particle physicists think we know quite a bit about: it is the stuff that is described by our Standard Model of particle physics. Despite much energy and treasure spent we have yet to find any significant deviation from the predictions of this Standard Model.

Yet theorists do not consider the Standard Model to be without blemish. To ensure its success it requires a plethora of input parameters and some careful balancing acts that seem too good to just be accidental. Thus theorists are vying to design the next big thing, a theory that encompasses the Standard Model and provides some mechanism to at least reduce the perceived arbitrariness in its internal workings. These theories typically contain new particles that help alleviate one or more of the shortcomings the Standard Model has in the eyes of our theorists.

The Nature of Dark Matter

The assumption that Dark Matter should also be particulate matter seems natural - at least to particle physicists. From astronomical observations and model calculations involving Dark Matter we can extract some constraints on the properties of Dark Matter particles. None of the Standard Model particles fit this bill of requirements. Now that is exciting news: Dark Matter exists in our Universe, and theorists see strong reasons to expect new particles - some of which could fit the bill. In fact there are two main experimental efforts that were spawned by this complicity of cosmological necessity and theoretical aspiration. Axions are a theorist's elegant way of solving what we call the strong CP problem. If axions exist and depending on their specific properties they could be the Dark Matter particle. They are searched for through their possible conversion to real photons. WIMPs are another sort of candidate and generically are just some unknown massive particle that partakes in no interaction stronger than the weak one: Weakly Interacting Massive Particles. Since observations clearly show that Dark Matter does not interact with normal matter through the strong or electromagnetic interaction the familiar weak interaction is indeed the strongest of the known interactions that it could have with either normal matter or itself. If on the other hand a Dark Matter particle had some form of weak interaction, that means that it should reveal its presence through weak interaction with the normal matter around us. Looking for signs of this happening in dedicated experiments is called making a direct detection experiment. XMASS in its current form is designed to be such a direct detection experiment for WIMPs.

Motivation for thinking of Dark Matter particles as WIMPs comes from a calculation that shows that a particle annihilating with its own antiparticle at a rate determined by the weak interaction scale would naturally result in the Dark Matter density that we



The XMASS hall with its water shield tank

observe in today's Universe. Intriguing indeed. This quantitative coincidence is known as the "WIMP miracle".

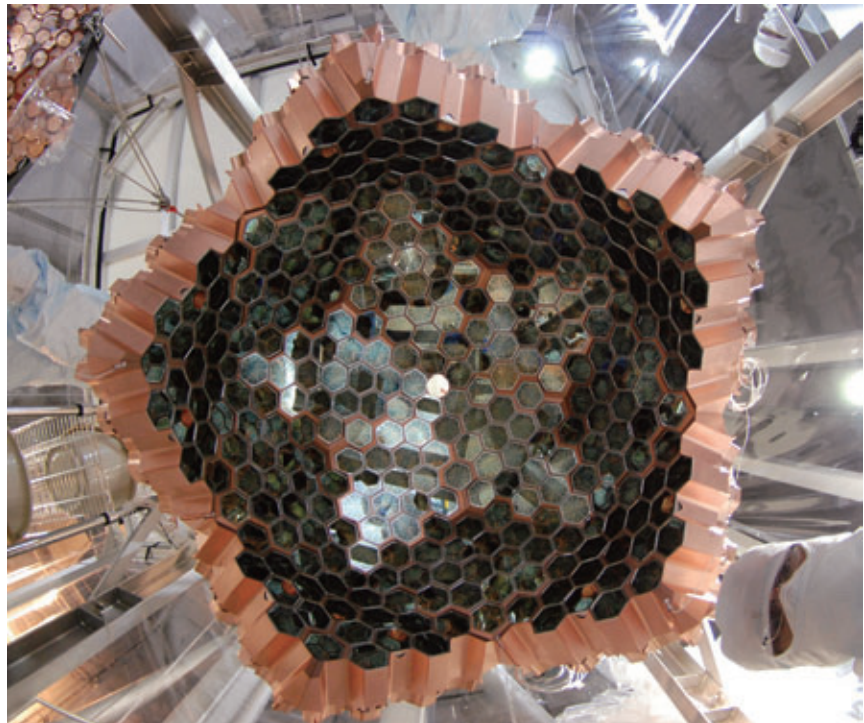
For completeness I should mention that there are of course attempts to explain the Universe we see without Dark Matter. None of them has come anywhere near the success the cold Dark Matter paradigm has in explaining the many different aspects of our observations. Typically such attempts are addressing on particular problem (like galaxy rotation), but unlike cold Dark Matter fail to simultaneously solve the other problems they were not specifically designed to solve.

Before I delve into the specifics of what we are doing here in Kamioka let me also comment on the fact that there are now a few experimental signatures that have been attributed to WIMP interactions in direct detection experiments. As most

experimentalists warily argue about the closeness to experimental thresholds (where backgrounds take over) of these alleged Dark Matter signatures, some theorists are already vying to provide a scenario that accommodates all those supposed observations (plus the reported non-observations). It will take time and strenuous effort to discover the truth about Dark Matter. Ultimately we will not believe any WIMP signal until we get consistent results on a variety of different target materials. The weak interaction acting on matter is after all well understood, and theorists can calculate the expected interaction rate on a different target material once a cross section is inferred from even a single positive measurement.

Our Kamioka Experiment

XMASS stands for an experimental program that



XMASS 800kg detector inner surface: photocathodes and copper

is built around a unique detector concept as well as a unique target material. The program was first laid out in 2000 by Kavli-IPMU's deputy director Yoichiro Suzuki presenting at the LowNu workshop in Sudbury, Canada. As an acronym XMASS can be read as Xenon detector for weakly interacting MASSive particles, Xenon MASSive neutrino detector, or Xenon neutrino MASS detector. This variety points to the versatility of the experimental program: In its current incarnation with a total mass of 835kg of xenon in its active detector volume it was designed to be a discovery machine for WIMPs in the sense of the first reading of the acronym. In its final version XMASS will have a fiducial mass of ten tons, ten times the target mass of the next generation of detectors that the community is currently preparing for. At that point the detector's physics reach will cover the search for neutrinoless double beta decay

in ^{136}Xe , as referred to in the neutrino mass detector reading. At the same time such a massive detector will detect solar pp and ^7Be neutrinos from the sun, acting as a massive neutrino detector. In that final version of XMASS the solar neutrino signal will actually become the limiting background for the detector's WIMP detection capabilities.

Background is the main concern in all rare event searches—not only the WIMP part of the program. To avoid cosmogenic activation of our detector materials (from penetrating high energy muons created in the atmosphere) we have to go underground; as deep as possible. The Kamioka laboratory allows easy 24/7 access to its experiments for researchers, and provides substantial overburden to shield against those muons. XMASS is the first Dark Matter detector to use an active water shield to flag and veto cosmic ray muons. Passively this



XMASS collaborators and their sphere

water shield also absorbs external gamma radiation and thermalizes fast neutrons emerging from the surrounding rocks. The experiment thus has a deeply layered defense against external sources of background. Its experimental hall is lined with a radon retardant and flushed with outside air to suppress radon, a common scourge in underground environments. As in Super-Kamiokande the air volume at the top of XMASS' sealed water tank is supplied with specially prepared radon free air.

Inside the active volume of our detector the high density of liquid xenon itself provides the innermost layer of defense against external background. If in our data analysis we use data only from a reduced innermost volume near the center of all the xenon contained inside the detector, the "unused" outer shell of liquid xenon absorbs external gamma rays and further reduces the background in that

innermost volume, which we call the fiducial volume. In that sense the active volume of our detector is self-shielding, an important aspect of our detector design.

The central idea of our XMASS detector concept is to maximally exploit the scintillation signal from recoiling charges in a radiochemically very clean environment. Liquid xenon with its high scintillation light yield and high mass number is the active target material of choice. Unlike argon and krypton it has no long lived isotopes that would contribute intrinsic backgrounds in the active volume. Yet even trace amounts of krypton mixed into our xenon would be detrimental to the experiment. XMASS developed a highly efficient distillation system that reduced the remaining krypton in our xenon to the parts per trillion level. Contaminants that are not chemically inert noble gases can easily be removed

with commercially available “getter” units. We found that we could maintain optimal detector conditions even without continually passing the xenon through those getters. We have succeeded in building a detector that can operate very stably with optimal performance yet without the need for any active circulation. Once it is operating and initial cleaning procedures are completed, all our detector needs is some refrigeration to balance the various sources of heat entering the liquid xenon. This is a remarkable achievement and an important endorsement of our strategy.

The largest sources of background found in the commissioning phase of our current XMASS 800 kg detector were beta-emitting radioactive isotopes on or near the inner surface of our detector. The specific sources were identified and are being addressed in a refurbishment effort which is now coming to its conclusion. Yet despite this background we have published limits on low mass WIMP interactions and axions from the Sun during our commissioning phase for the detector. We are looking forward to much improved background conditions in the refurbished detector.

Our focus on scintillation light is reflected in the symmetry of our detector geometry and the highly optimized lining of its inner surface with the

photocathodes of 642 high quantum efficiency photomultiplier tubes (PMTs): their photocathodes constitute 60% of this inner surface. Indeed our current detector’s hallmark is its superior signal yield for scintillation light. Electrons with a kinetic energy of 122 keV on average produce 14.7 photoelectrons per keV of electron energy in our PMTs. This is the best performance among xenon based Dark Matter experiments.

XMASS relies solely on the scintillation signal generated by recoiling charges in its inner volume. The pentakis-dodecahedral geometry of our detector reflects the spherical symmetry of scintillation light emission. Scalability of this straightforward geometry is a big advantage resulting from our choices. As our competitors are moving towards ton scale detectors we too expect to take the next step in the XMASS experimental program with another Dark Matter detector at the one ton scale: we call it XMASS 1.5. A total liquid xenon mass of 5 tons will be filling that detector, and we want to start building it next year. Our experimental hall in the Kamioka Observatory and our water shield inside that hall are already big enough even for the final step in our experimental program, the experiment with a ten ton fiducial mass. To get there, work is to be done and physics is to be extracted along the way - let’s get to it.

Ready to Go for “Cosmic Census” Project with the World’s Most Powerful Camera, Hyper Suprime-Cam

Masahiro Takada

Kavli IPMU Professor

Naoki Yasuda

Kavli IPMU Professor

The HSC international collaboration released stunning images of the Andromeda Galaxy (M31) which are among the first to emerge from a new wide-field prime-focus camera installed on the 8.2 m Subaru Telescope at the 4,200 m summit of Mt. Mauna Kea in Hawaii. The camera is called the Hyper Suprime-Cam (HSC), which has been promoted by an international collaboration between NAOJ, Kavli IPMU, other Japanese institutes, Princeton University, and Taiwanese institutes. The HSC camera is designed to take advantage of the full accessible field-of-view of the Subaru Telescope, 1.5 degrees in diameter, which is about 7 times wider than the current camera Suprime-Cam. The HSC is 3 meters tall, weighs 3 tons, and has about 9 billion pixels—the largest camera in the world. The combination of the HSC with the Subaru Telescope's sharp imaging, wide field-of-view, and large mirror represents a giant step into a new era of observational cosmology and astronomy.

The HSC team is planning to conduct a “cosmic census” of hundreds of millions of galaxies over a wide solid angle of the sky in sufficient depth

to probe the distant Universe. By measuring the distortions in the shapes of distant galaxies due to the gravitational pull of dark matter, we can reconstruct the distribution of dark matter, the invisible material that makes up about a quarter of the mass and energy of the Universe. In turn, we will study how the distribution of dark matter has evolved with cosmic time in an expanding universe, enabling us to explore the nature of dark energy that is thought to cause the cosmic acceleration expansion. The HSC capabilities allow the galaxy survey (cosmic census) project to be carried out for a 5-year duration, starting from early 2014. This survey is the largest-ever galaxy survey carried out with the Subaru Telescope, and it is only possible with HSC within a timescale of 5 years, because it otherwise requires more than 35 or 1,000 years for the current Subaru camera or the Hubble Space Telescope, respectively.

The Andromeda images are truly exciting. The sharp images of stars across the entire region of the field of view demonstrate the HSC's outstanding power. The Andromeda Galaxy, also known as



The 8.2m Subaru Telescope and the HSC camera. The image on the left shows the position of HSC (without the filter exchange unit or FEU) when mounted on the inner, top ring of the Subaru Telescope. This location is at prime focus, and HSC is 15 meters above the primary mirror. (Credit: NAOJ). The image on the right is the 3m tall HSC camera. (Credit: NAOJ)



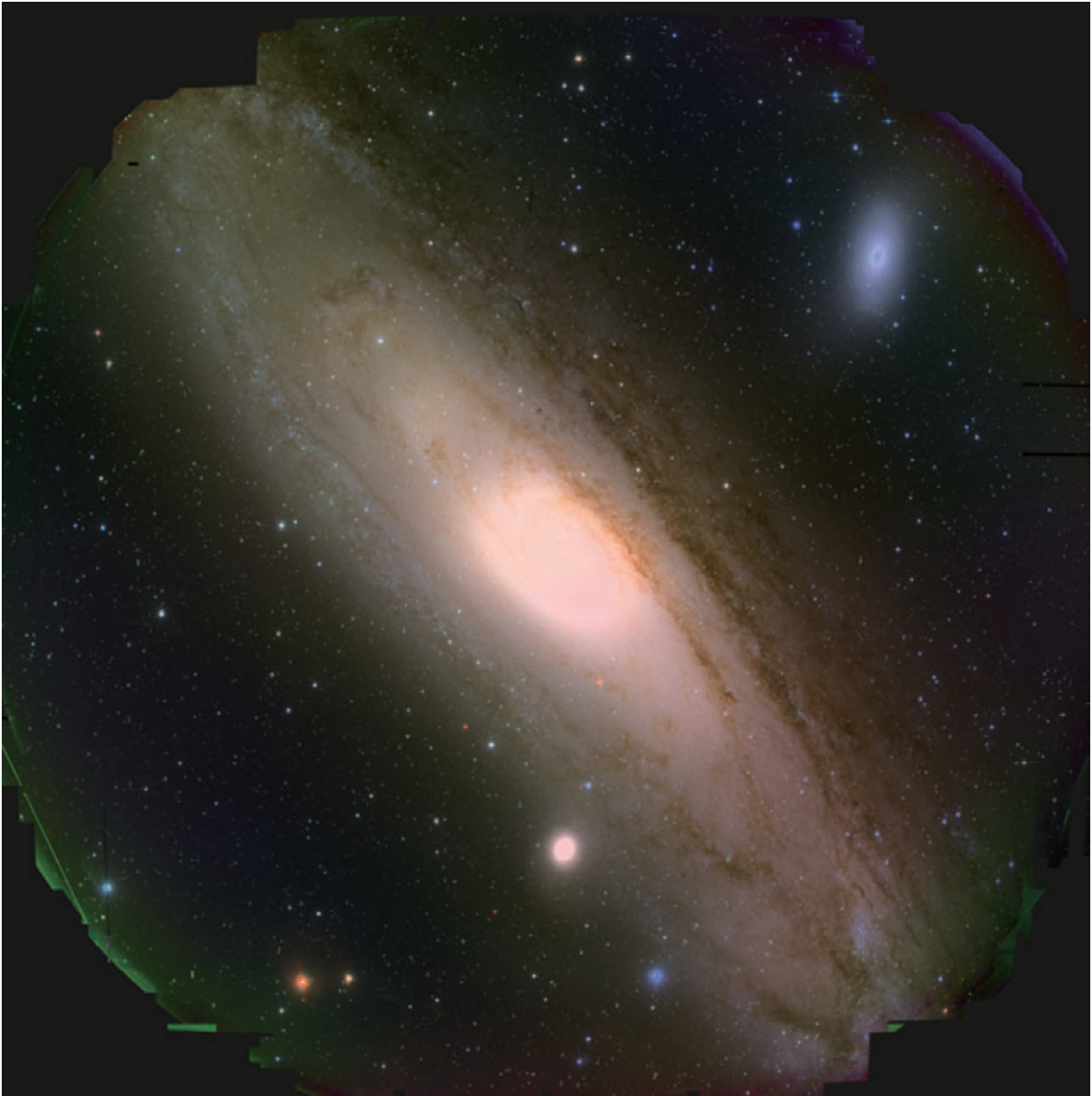
Messier 31 (therefore called M31 in short), is 2.5 million light years from Earth and is the spiral galaxy nearest to our own Milky Way Galaxy. It is visible to the naked eye on moonless nights, even in areas with moderate light pollution. Astronomers find it interesting because it is similar to the Milky Way and can provide valuable information about how our own galaxy formed. Since the entire galaxy is visible in the new images, it is possible to determine from the color of the galaxy's stars how those star populations change from the interior to the edge of the galaxy. The image was reduced with the sophisticated data processing software pipeline that has been developed in preparation for the HSC galaxy survey project, under the initiatives of

researchers at Princeton University, Kavli IPMU, and NAOJ. The exposure times for g, r, and i-band filters — each of which selectively transmits light in a particular range of wavelengths—were 10, 12, and 16 minutes, respectively; and these three colors have been allocated to blue, green, and red, to make the color image.

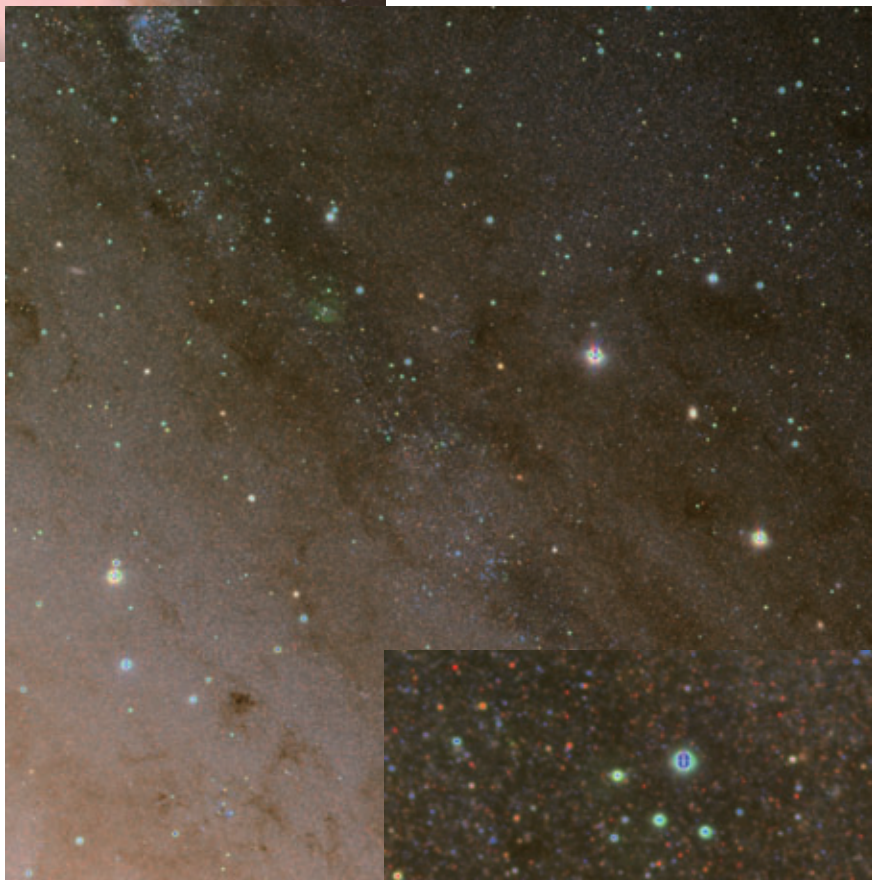
HSC is also the first step of the Subaru Measurements of Images and Redshifts (SuMIRe) project, where our Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama is the Principal Investigator. Another component of SuMIRe is a multi-object spectrograph, the Prime Focus Spectrograph (PFS), which is currently in the process of development and instrumentation. The PFS will share the wide field corrector of HSC,

and plan to make a spectroscopic observation for a few millions of galaxies selected from the galaxy catalog provided by the HSC survey, where the spectroscopic data can determine distances to the galaxies and study the physical properties of stellar and gas compositions in each galaxy. The

combination of imaging and spectroscopic galaxy data for the same region of the sky is extremely powerful to study mysterious nature of dark matter and dark energy. We are finally about to start our long journey of the massive Subaru cosmic census project.



The full view of the Andromeda Galaxy taken by HSC. The HSC mounted on the Subaru Telescope can observe an extremely wide field of view, equal to 9 times the area of the full moon. The color image was made by combining the data of three filters (g, r, and i), each of which selectively transmits light in a particular range of wavelengths. Note that some parts at the edge region appear to be strange color since the boundary area of the image circle is hard to process and observed area is not perfectly coinciding between the 3 bands. (Credit: HSC Collaboration / Kavli IPMU)



2, 8, and 32 magnified images, respectively. Individual stars in the Andromeda Galaxy can be identified, and galaxies behind the Andromeda are also identified. (Credit: HSC Collaboration / Kavli IPMU)



Interview with John Ellis

Interviewer: Hitoshi Murayama

“A” Higgs Boson or “the” Higgs Boson?

Murayama: Great to see you three times in a month. It was in Berkeley, the BrunoFest,¹ then the Nobel Symposium,² and now here.

Ellis: Yeah. It’s great to be here at Kavli IPMU. It’s been a really exciting time in particle physics recently. It’s great to catch up on a few things. At Berkeley, obviously, the focus was on supersymmetry which is one of our best hopes in physics beyond the Standard Model. At the Nobel Symposium, the focus was on the Higgs boson.

Murayama: Right.

Ellis: We should be a little bit careful – on ‘a’ Higgs boson.

John Ellis is Clerk Maxwell Professor of Theoretical Physics at King’s College London since 2010. He was Staff Member at CERN from 1974, and served as Division Leader of the theory (“TH”) division in 1988–1994. He received his Ph.D. from Cambridge University in 1971. He was awarded the Maxwell Medal and the Paul Dirac Prize by the Institute of Physics in 1982 and 2005 respectively. He is Fellow of the Royal Society of London (FRS) since 1985 and of the Institute of Physics since 1991. He was appointed Commander of the Order of the British Empire (CBE) in 2012 for services to science and technology. He has been serving as a member of the External Advisory Committee of Kavli IPMU since March 2008.

Murayama: Okay. That’s right, according to the official statement...

Ellis: ...they discovered at the LHC.

Murayama: Yeah, so let us actually follow on that. Now that ‘a’ Higgs boson is discovered, what is the future for the field? What shall we be working on?

Ellis: I think one thing obviously we want to understand is whether this is just ‘a’ Higgs boson or whether it really is ‘the’ Higgs boson as predicted in the Standard Model. There’re a number of theories that suggested that something, some sort of scalar particle might appear in the LHC but with properties rather different from the Standard Model Higgs boson; some composite models for example.

I think one can say that all those possibilities are ruled out, unless you adjust the parameters of your composite models to be rather similar to the Standard Model. I

¹BrunoFest 2013, Celebrating Bruno Zumino’s 90th Birthday, Berkeley, May 2-4, 2013

²Nobel Symposium on LHC results, Krusenberg Herrgård, Sweden May 13-17, 2013

mentioned supersymmetry earlier. Well, supersymmetry is an example of a theory that says that there would not just be one Higgs boson but actually more than five of them in total and one of them would look very much like the Higgs boson of the Standard Model, but not exactly the same. I think that the differences between some characteristic supersymmetric predictions and the Standard Model are too small to have been seen in the data so far. So, we want to refine the measurements at the LHC, maybe other accelerators, and try to figure out how closely this resembles the Higgs boson of a Standard Model, or whether there's some difference.

Murayama: What are the hopes for supersymmetry being discovered at the LHC, in your mind?

Ellis: I think that some of my friends get a little bit discouraged but it's always coldest just before the dawn. The LHC is currently in a shutdown period. The energy is going to be increased by almost a factor of 2. The collision rate will go up as well. I think there're good prospects for discovering supersymmetry there. There are all sorts of reasons for thinking that supersymmetry might show up in the LHC energy range.

One of them, for example, is dark matter. There are many theories according to which dark matter is some sort

of stable particle that was originally in equilibrium with all the regular particles in the universe. In such a theory, you would expect that dark matter particles themselves would weigh less than about a TeV, less than about a 1000 times the proton mass, and hence should be within the range of the LHC.

Supersymmetry is one example. There have been other examples as well. I think that in order to really probe this possibility, we need to go to the maximum LHC energy, and ramp up the collision rate, increase the luminosity, and see what we find.

Murayama: A lot of people are curious about this question. What if the LHC wouldn't find anything other than what looks like the Standard Model of Higgs boson? What are the paths for the field beyond that?

Ellis: I think in that case clearly one would like to build an accelerator which would study the Higgs boson in more detail than it's possible with the LHC. I should hasten to say that I think, in my opinion, it's premature to decide on this because we need to see what the LHC finds at maximum energy. But if indeed it didn't find anything at maximum energy, then clearly I think a lot of priority would go to building an accelerator that could study the Higgs boson in

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



more detail than the LHC.

But remembering that the LHC has lots more capabilities for exploring a Higgs boson than have been done so far – as the energy goes up, also the production rate goes up, the collision rate goes up, and there's many other decay modes of the Higgs boson that would come within reach, and the ones that have been seen so far could be measured more accurately – one shouldn't forget that, in some sense, we already have a Higgs factory in the form of the LHC.

Murayama: Some people even argue that maybe the accelerator particle physics is coming towards the end. We have to think of something totally different to probe physics beyond the Standard Model, dark matter and other things. What is your take of this question?

Ellis: I think that that's premature. How many times have physicists said that the end of theoretical physics or experimental physics is within sight?

Murayama: Like even in the 19th century by Lord Kelvin.

Ellis: Right. One or two minor little details could be figured out which, of course, led to quantum mechanics and relativity.

Murayama: Exactly.

Ellis: I am sorry. I don't buy that argument. I actually think, in contrast, this is now a very exciting period because the LHC already, in its initial operation, has revealed a new

particle that is completely different from anything else you've ever seen before. It's a boson, but it is the first boson without spin.

Murayama: Right.

Ellis: All the other bosons have a unit of spin. This Higgs boson is certainly unique in that respect, and that way it has all sorts of theoretical issues, theoretical problems. Also, the Higgs boson could be linked to some of the solutions of some of our cosmological problems. So, I think this is opening up an entirely new era in both theoretical and experimental particle physics.

Murayama: So, speaking of the theoretical side, I know that couple of young people may be sort of disappointed these days that there's no signal of new physics yet, and all the progress you really talked about are pointing to more experimental activities trying to measure the properties of this 'a' Higgs boson and something beyond. What are the theorists' roles at this stage in the development of the field?

Ellis: I think that previously people could have had reasonable doubts as to whether such a thing as an elementary scalar particle existed.

Murayama: Right, myself included.

Ellis: Of course when we say elementary, it's always provisional. It's something that looks like that down to

some scale. Now, something has been discovered which looks like a point-like scalar particle, at the level that has been probed so far. I think this really focuses attention. So, many of these composite models, one could now put on one side. I think it just focuses much more clearly the question many of us have been worrying about, including you, the problem of naturalness. It also offers perhaps the prospect as I mentioned of the connections with cosmological issues, inflation for example, and it's a very challenging suggestion that actually cosmological inflation might be due to 'the' Higgs boson; I don't think that works.

Murayama: Right, that's very ambitious.

Ellis: It's very ambitious but, nevertheless, you know, one has to be ambitious in order to get anything done. I think that just in probing that outrageous suggestion, I think we may learn a lot more both about scalar boson physics and also about cosmology.

Murayama: You do think that theory has a role to play in here.

Ellis: It's certainly keeping me busy!

Flavor is one of the Big Issues in Particle Physics

Murayama: Oh yeah, that's good. That's very important. Another thing we're getting involved in now actually – based on your

recommendation actually that we have to be involved in accelerator-based particle physics. We are actually taking part in Belle II, that's the forthcoming B-factory experiment. What is your view on this direction in accelerator-based particle physics?

Ellis: One of the big issues in particle physics is what we call the problem of flavor. Why it is that there're so many different types of quarks and leptons and why they mix in the ways that they do. The Belle II project is very definitely aimed at trying to understand that better. There's also work being done on that at the LHC. I think that Belle II and what can be done at the LHC complement each other very, very nicely.

There are some experimental measurements that you can make at the LHC that you can't make at Belle II and vice versa. I think it's great that Belle II is going ahead. It's worth mentioning that, perhaps, the second most important discovery at the LHC in the first phase of its operation was actually in the area of flavor physics and that is the rare decay of bottom strange mesons into $\mu^+\mu^-$, which is expected in the Standard Model. Evidence for that has now emerged from the LHC, which is quite conclusive. It's roughly in agreement with the Standard Model. I think that's something that we have to push on to see whether it

really does agree at the level of theoretical accuracy that we can make a prediction or whether there's some discrepancy.

Murayama: Right. I was also very impressed by the B_s oscillation study by the LHCb. It's such beautiful data that clearly shows the oscillatory behavior of the B-mesons. That's fantastic.

Ellis: Right. I think that the decay of the B_s meson into $\mu^+\mu^-$ is a success, so far. Well, certainly a success for the experimentalists, but also so far a success for the Standard Model. But, there were a number of other puzzles. There may be matter-antimatter asymmetry in charm meson decays above the level which might be expected in the Standard Model, although both the theory and the experiment are unclear on that point. There're a number of other sort of anomalies in the physics of b quarks and charm quarks, which Belle II can address.

Murayama: One of the criticisms that had been in the community is that we have been making actually a huge stride in understanding forces, in symmetries, by going to energy frontier, but on the flavor side we actually have gained relatively little new grounds in our understanding because we still don't know the origin of the patterns of the quark/lepton mass and mixings. Do you think this would lead to a

sort of a breakthrough down the line or what do you think is the future in the flavor physics era?

Ellis: I think it's certainly clear that our experimental friends are, in some sense, well ahead of us. First, I don't think we have good ideas about flavor. We got lots of ideas, but there's nothing which is very convincing. I think it's true in the quark sector. I think it's in a way even more true in the neutrino sector because neutrinos seem to mix in a way which is completely different from quarks. Well, you've got ideas about what might be going on but...

Murayama: Which you didn't like.

Ellis: Which I don't like because basically your model is to say there's no model.

Murayama: Right, exactly. Well, I am testing the hypothesis that some very peculiar type of model is really needed to understand the data. So far the data don't show any sign of that. That's how I am using this idea of random matrices.

Ellis: Yeah. I think that we really need more clues. You might have thought we got enough clues by now because lots of flavor mixing parameters have been measured. But, we feel it's apparently too stupid apart from you to come up with.

Murayama: Especially me, I guess...

Ellis: To come up with models for what's going on, I think the way to go is to look to

see whether the paradigm for mixing that we have in the moment really works at the next level. I think this is where on the one hand LHCb, the LHC is taking this, and on the other hand Belle II will take this.

Murayama: One sort of a frontier on the side is the lepton flavor violation, which you worked quite extensively on in the past—like $\mu \rightarrow e\gamma$, $\mu \rightarrow e$ conversion. Do you think that it's also a fruitful direction to pursue?

Ellis: Yeah, well, I think that's in some sense the unexplored frontier in flavor physics. We've seen the flavor mixing amongst the quarks, we've seen flavor mixing amongst neutrinos. In fact, we've seen flavor mixing amongst different types of quarks—those with charge two-thirds and those with charge minus one-third— we've seen mixing and flavor effects everywhere except for the charged leptons.

Murayama: Right.

Ellis: The lepton, the μ , and the τ . It is clear to me that this is something that one has to push to the very limit of what one can. That's a place where Belle II could have something to say because SuperKEKB will produce, you know, enormous numbers of τ leptons, for example.

Murayama: Right.

Ellis: There's also possibilities that at J-PARC in a fixed target experiments of using muons, to offer muon flavor violation. Yeah, those are

things that I am excited about.

Connection between Particle Physics and Cosmology

Murayama: Now, you also mentioned the connection between particle physics and cosmology. Clearly, dark matter is the prime topic of discussions in trying to connect these areas. How do these fields go together? Is dark matter the only thing? Is there anything else? What is the future of this intersection?

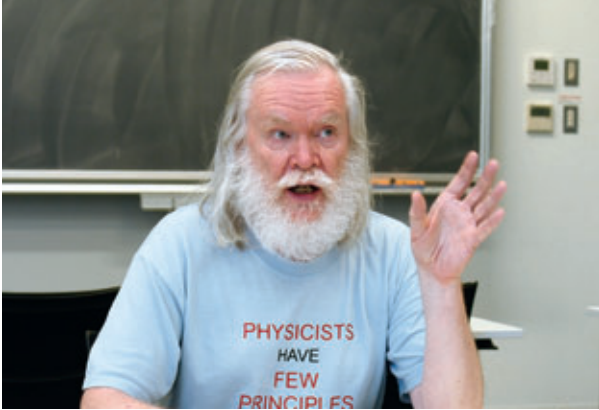
Ellis: I think that to really resolve the dark matter issue is going to involve a collaboration between accelerator physicists and non-accelerator physicists. I can well imagine that non-accelerator experiments might find some sort of signal for some sort of dark matter particle. But depending on its nature, I think that you'll need to study it in the laboratory. That's where the accelerator experiment comes in. Conversely, I can imagine that some accelerator experiment might observe events with an anomalous amount of missing energy.

Murayama: That'll be exciting.

Ellis: That will be exciting. It would be exciting anyway.

Murayama: Right.

Ellis: But if you really wanted to identify that as dark matter, then you'd need to pin down that this is a very long lived particle which is obviously not possible in an accelerator experiment.



Murayama: That's right.

Ellis: You know, 50 nanoseconds and it's gone right and you can't tell whether it lives for a 100 nanoseconds or 10 billion years.

Murayama: Right.

Ellis: You really need to correlate what you see in the accelerator experiment with what you see in the dark matter experiments. In the dark matter experiments, there're different types. One of them is looking directly for scattering in an underground laboratory. Then, there's looking for annihilations of these dark matter particles that are supposed to be flying around the galaxy. Maybe, some will get stuck inside the Sun or the Earth and they annihilate. They form particles that you can perhaps see. There's a whole range of different non-accelerator experiments. As I say, they really have to work in tandem with the accelerator ones.

Murayama: Speaking of that kind of signal, AMS has reported a tantalizing, actually beautiful piece of data, looking at the positron fraction in the cosmic rays. What is your take on this piece of data?

Ellis: I think it's really very

difficult to think that it has a dark matter interpretation. You could get a spectrum that has that sort of shape in some dark matter annihilation models. The trouble is that the signal is just very, very big. A signal had been seen by previous experiments. The AMS experiment has done a fantastic measurement which really pins down the shape of the spectrum and tells you that some of those dark matter models are ruled out just on that ground. But, the magnitude is I think very difficult to understand.

If you take the very general arguments about how big the annihilation cross section could be, and if you take the conventional estimate of what the density of these dark matter particles is you cannot reproduce the data. I think the only way to do it would be to postulate that these dark matter particles are clumped, but clumped to an unbelievably big extent.

Murayama: Right, like packs of 100.

Ellis: A pack of 1,000, 10,000... So, I think that's really tough. I think that probably it's due to some sort of astrophysical source. I guess there're two schools of thought on that. One school of thought is that

there may be some sort of a nearby astrophysical source that is pumping in additional positrons that are not taken into account in conventional models of cosmic rays. The other possibility is that those conventional models of cosmic rays are somehow inadequate and the number of positrons that you see is due to some interplay between how they diffuse out of the galaxy and how rapidly they lose their energy. It may be that one should tweak those parameters and in that way, one could perhaps get a spectrum that rises in the way that's seen. I think the jury is out on that.

Murayama: One thing that's not clear about this question is when or how we can actually settle these potential interpretations because relatively very little we know about the cosmic ray propagation, the origin of the positrons and pulsars and so on. What exactly can we do?

Ellis: One thing that clearly could be done looking at the positrons is to look for some sort of anisotropy. I think that if you had nearby sources then, at some level, you would expect the arrival directions of these positrons to remember that. As they wander around through the galaxy they forget from where they came from, but there should be some sort of statistical memory. AMS and other experiments so far don't see any sort of anisotropy.

Murayama: That's right.

Ellis: But that's something which should be pushed on. I think that's a potentially interesting signature.

Another thing, obviously, is to look for other types of particles that might come from astrophysical sources or dark matter sources. One obvious thing is antiprotons. And in fact many models of the AMS signal—even if you forgot about the fact that the rate is very, very big—predict that there should also be antiprotons, which have not been seen.

Murayama: That's right.

Ellis: AMS will presumably sometime in the relatively near future come out with a new measurement of the antiproton spectrum. That may give us more information. Another possibility which some people have suggested is looking for anti-deuterons in the cosmic rays. There, the signal from dark-matter annihilations, if there is one, might be easier to pick up from the background from normal cosmic rays. That's another thing which we'll be looking out for.

Murayama: Obviously, another big major puzzle in cosmology is dark energy. What do you think we might learn by studying dark energy?

Ellis: Difficult to tell. Clearly, there's the density of dark energy itself and then there's a question of how that density might have varied as a function of time. I think that we're getting—and you are

getting through the activities here at Kavli IPMU—tools which could measure the dependence of that energy density over a large range of cosmological time, extending from the present day back to when the red shift was similar to one—maybe even more. It could be that the dark energy density is absolutely constant. Then that really would be cosmological constant that will be somehow—well, I was going to say the most boring possibility. From the experimental point of view, it's maybe boring but from a theoretical point of view, it's maybe the most challenging. I mean a number for that...

Murayama: Right, featureless number.

Ellis: How could you explain that? Right. I think many theorists like the idea that this dark energy density is actually varying slowly. Maybe eventually, it's going to relax away to zero and that's a very seductive idea. I think the ongoing experiments should tell us whether that really works or not.

How Can We Make Secure the Future of Kavli IPMU?

Murayama: Excellent. Now switching to gear to why you are here this time, and you come for the External Advisory Committee for Kavli IPMU, and you've actually been on this committee already from the very beginning, and you saw how this institute has got started and evolved and where

we are today. What is your impression about this?

Ellis: There's a technical term for that which is gangbuster. I think that Kavli IPMU certainly established a very enviable brand. I think that people recognize that it's indeed a worldwide center of excellence which was your mission that was given to you by the Japanese government.

Murayama: That's right.

Ellis: I think that Kavli IPMU is driving many of the interesting theoretical and experimental developments, and not just here in Japan but also in international collaboration. I think that the Japanese government should be pretty happy. They got quite a lot of bang for their yen.

Murayama: Okay. That's great to hear. Of course, one thing we are still worried about is how we can make secure the future of this institute when the WPI funding may ramp down, possibly, in 4 years from now, maybe with a 5 year extension. What can we do actually to strengthen our position to the government and what should we be working on?

Ellis: What should you be working on? At the purely scientific level, I think that Kavli IPMU has a very good program of being in the most exciting developments in particle theory and also particle experiment, both in accelerators and non-accelerator experiments. In addition to the things



that are already happening, it's also getting involved in other things like we already mentioned, Belle II, improvements to Super-Kamiokande, and the dark energy experiments.

It's not clear to me at the moment what more you could do in terms of the science. But, there's another aspect of our work and of your work; I think that we need to convince governments and other funding authorities that fundamental science is not something that you can dip your toe in for 5 minutes and then go off and do something else.

Murayama: That's right.

Ellis: Fundamental science is something that has payoffs on the timescale of decades.

Murayama: Maybe even centuries.

Ellis: Well, maybe even centuries but I mean if you look at 20th century physics, so quantum mechanics, there is some anecdote out there on the internet that over 30% of the US economy at the beginning of the 21st century was based on 20th century physics.

Murayama: Interesting.

Ellis: I don't know whether it's true or not and I am sure you can get a big fight about

it, but it is certainly true that all of electronics, lasers, etcetera, etcetera, you could make a big incredibly long list depends on 20th century physics and, in particular, quantum mechanics. Even relativity is now used in satellite navigational systems, GPS, and so on. Antimatter, a very abstruse discovery, postulated by theorists in the late 1920s, discovered in cosmic rays, and now is used routinely in medical diagnosis. Thousands of people every year have PET scans.

I think these examples show that advances in fundamental physics do benefit society in general and the economy but on a timescale of decades. I think it's the role of government to support that. I think it's unreasonable to expect an industrial company to do so. I think the Japanese industrial companies are maybe further sighted than European or American industrial companies. But, you can't expect them to be looking much further than a decade in terms of their R&D program.

You have to look to governments to take the longer view. The fact that the payoff takes a longer time

also means that the research programs are not things that are done in 5 minutes or 5 months or 5 years. Right. They take longer.

Murayama: Right.

Ellis: I mean we're talking a lot about the LHC. The LHC was first conceived in 1984, and it's probably going to go on for at least one, maybe two more decades. All these other projects that we're mentioning, these also have long time scales. I think that the Japanese government like any other government has to come up with a mechanism for funding long-term forefront research in fundamental science. Physics is not unique. We're talking about physics but it's not the only example. Government has to understand that it's not something that you can leave. It's not like a quickie divorce. It's something that you're in for the long run.

Engaging with the Public Is an Essential Part of a Scientist's Work

Murayama: So, we have to communicate these benefits of basic research and, as you say, not just in physics, but in all areas as a long term benefit to the society and human kind which needs to be supported by the government. How effectively can we communicate these points to higher levels, politicians, governments, and the general public? How do we do that?

Ellis: I think one thing is

the message, and we just discussed what I think the message is. But then I think that we have to get out the message. I think it's an absolutely essential part of a physicist's or a scientist's work to engage with the public. We can't just all sit in our ivory tower and expect yen to rain down. We have to explain what it is that we're doing, and we have to learn to explain it in terms that the person in the street can understand.

Sometimes it happens. I think that in Europe and at CERN, we've been very fortunate that the person in the street has noticed about the Higgs boson. I think we've got the ear of governments. They are basically sympathetic. But, I am sure that in Japan that's the case to some extent also.

Murayama: Yeah, absolutely.

Ellis: I know that you, personally, have been very much engaged in that. I think we just have to, perhaps, also convince our colleagues that they have to – some of them, maybe work harder on this.

Murayama: That's true.

You spend a lot of time communicating the importance of science as sort of scientific ambassador to the general public. I'm sure that has a huge impact. Somebody told me that enrollment for young students in science, in mathematics in Europe, overall have been improving like 20% or so, partly thanks to this impact of

CERN, showing up in media and being very visible.

Ellis: I think that there probably is an LHC effect. In fact, it was interesting that a few years ago, the UK science minister came to CERN, and he said that he thought that LHC startup could have an impact similar to the Apollo moon landings.

Murayama: Wow!

Ellis: Then I thought this is bullshit. But, now I think he was right. I think history has proven him to be more or less correct. I mean, I certainly know that in the UK enrollment in physics generally has gone up.

Murayama: Wonderful.

Ellis: The quality of the students has gone up. In fact, I was just talking with one of my colleagues at King's College London. He was marking exam scripts earlier on this week. I walked into his office. He said, "These kids are too good." Not only are their numbers but also that the quality is going up. Certainly at King's, we have decided to increase the threshold for students to come in to study physics.

Murayama: Good. Sounds like that your advice to us is basically the same, namely, "Do great science and get the word out."

Ellis: Yeah, but I think that you and I have to, like I said, convince our colleagues to participate in this.

Murayama: That's tricky actually.

Ellis: Yeah, you can't just rely

on one or two "ambassadors" to do the job. I think it's particularly important that the young people get involved. The young people obviously have a lot of credibility with other young people. Well, after all it's people that we're trying to influence. I mean one of the things that—one of the deliverables, I think, that we have is an increased interest of young people in science, technology, engineering, and mathematics. Are you talking to a bunch of young people? That's one thing. But, I got a lot of gray hair. You're beginning to have some grays...

Murayama: Yes, I do.

Ellis: It'd be good if we could find some young people who don't have so much grey hair, who also are naturally very energetic to join in this effort.

Murayama: Right. That's something we should be working on. Great. Any sort of last message you would like to give to us?

Ellis: I don't think so. I think that Kavli IPMU is doing a great job. I think that you should have confidence in what you're doing. You, personally, certainly have confidence in what you're doing. I think that let's go out and communicate our excitement to the rest of the society.

Murayama: Okay, let's do that. Thank you, John.

Ellis: My pleasure.

Our Team

Nao Suzuki

Research Area: **Astrophysics**

Kavli IPMU Assistant Professor

How does the scenery look like beyond that mountain? What kind of world may we encounter beyond the horizon? Our adventurous nature and curious mind has led us to observe the universe since ancient times. I am one of the drifters setting out to discover a new world in this long history of exploration. At the University of California, I have been studying the cosmological parameters that shape the universe today. We measured the baryon to photon ratio at one second after the Big Bang using the latest instrument on the 10-m Keck Telescope. With the Supernova Cosmology Project team, I studied dark energy using distant supernovae with the Hubble Space Telescope. We observationally proved the existence of non-zero dark energy with a 99.999% confidence level and probed the expansion history of the universe; its expansion



turned into the acceleration from the deceleration about 7 billion years ago. At Kavli IPMU, I would like to study the mysteries of dark energy and explore the deepest universe, which no one has seen before using the new instruments on the Subaru telescope. I am fascinated by the fact that all of the genius minds around the world come together as one mind and attempt to unlock the mysteries of the universe, and I find that the future of mankind is full of hope. I do believe that the next generation telescope will find a life form in the universe that would change the world in the near future.

Our Team

Ran Huo

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

My research interest is in particle physics beyond the standard model. Supersymmetry that roughly doubles the particle content is by far the most promising extension of the standard model, which predicts physics up to a fundamental scale where all three interactions are unified into a single one. Dark matter should have a particle physics origin, and it can be interpreted in many models. Also the



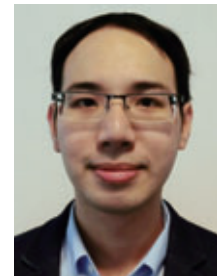
matter/anti-matter asymmetry in the universe can be interpreted through particle physics mechanisms such as electroweak baryogenesis and leptogenesis.

Tirasan Khandhawit

Research Area: **Mathematics**

Postdoc

My research interests are in low-dimensional topology and geometric topology. Especially, my research has been focused on the Seiberg-Witten Floer theory of 3-manifolds and 4-manifolds. My current work is to extend Manolescu's and Kronheimer-Manolescu's construction of the Floer homotopy type, a stable homotopy object whose appropriate homology gives back monopole Floer



homology, to general 3-manifolds. Furthermore, I try to extend Bauer-Furuta's stable homotopy invariants to general 4-manifolds with boundary.

Jonathan Maltz

Research Area: **Theoretical Physics**

Postdoc

My work has focused on formulations of de Sitter space and early universe cosmology, through FRW-CFT and dS-CFT. My interests include Mathematical physics, Liouville theory, and Non-Critical String Theory as well as extending the formulations of M-theory and the web of Dualities that tie the various String Theories together. I am also working on Vasiliev Higher Spin Gravity as well as its relation probing new limits of the AdS-CFT correspondence and various aspects of Matrix Models. I also have



an interest in the non perturbative aspects of field theories and M theory.

I think the IPMU is the perfect place for my first postdoc as it continues the interdisciplinary and multi varied research experience that I had in my graduate studies at Stanford.

Ryo Namba

Research Area: **Cosmology**

Postdoc

My major research interests have been the effects from particle interactions during inflation. Couplings between different fields can lead to particle production, and the produced quanta can in turn interact with cosmological perturbations, leaving visible imprints on the non-Gaussianity and gravitational-wave (GW) signals. In some cases, GW signals from this mechanism can be large enough to be detectable even at the terrestrial GW detectors.



I also studied models of vector fields that break the rotational invariance of space, which can result in broken statistical isotropy in the cosmic microwave background and large-scale structure.

Nobuhiro Okabe

Research Area: **Astronomy**

Postdoc

A statistical weak-lensing study for clusters, based on the exquisite Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC) lensing data, measures properties of the dark matter distribution in clusters in great detail, such as spherically averaged radial profiles, halo shapes, subhalo masses, and their redshift evolutions. It enables us to make a stringent test of the CDM structure formation scenarios on small scales. I am



very interested in these lensing studies as well as the interplay between dark matter and baryons based on multiwavelength data-sets.

James Wallbridge

Research Area: **Mathematics**

Postdoc

My current research is focused on understanding more about physical field theories using tools from derived algebraic geometry and higher category theory. In particular, I am studying what it means to geometrically quantise a classical field theory in order to construct its associated extended quantum field theory. Understanding quantisation from a higher categorical point of view is expected not only to illuminate parts of known physical systems



at a quantum level but address some problems with theories that have so far resisted a meaningful quantisation.

Our Team

The Kavli-IPMU focus week workshop on Cosmology with Small Scale Structure

Alexie Leauthaud

Kavli IPMU Assistant Professor

Surhud More

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

Masahiro Takada

Kavli IPMU Professor

The Kavli IPMU focus week workshop on “Cosmology with Small Scale Structure” was held from July 22 to July 26 and brought together participants from all over the world interested in probing cosmological parameters of the Universe and modifications to gravity from small scale astrophysical observations of weak lensing, galaxy clustering, redshift space distortions, and galaxy clusters.

The main challenge in realizing the true potential of these probes is our limited understanding of galaxy formation. The focus of the workshop was to discuss ways to best marginalize over these uncertainties and tease out the cosmologically interesting information from these observables.

The workshop was held as a moderated round table discussion on the current developments in the field and challenges that lie ahead. The discussion on the first day revolved around designing sensitivity tests to identify a combination of observables that could be used to learn about galaxy formation phenomenologically, and simultaneously learn about the cosmological parameters. Numerical simulations of cold dark matter are the workhorse for cosmological studies from small-scale structure. The second day focused on the accuracy and large volume requirements on numerical simulations. The

third day was devoted to the topic of redshift space distortions, which reflect our inability to measure the exact positions of galaxies due to their motions. There was a discussion on the progress in modelling these distortions. The fourth day examined how baryonic processes can cause a back-reaction on the dark matter and understanding parameters that can capture these processes. This is essential to exploit the statistical power of measurements of cosmic shear which several ongoing and large upcoming surveys will provide. There was also a discussion on modifications to gravity, novel probes on large scales, and the ensemble of simulations of specific modifications to gravity currently available. The last day was devoted to identification of galaxy clusters in large imaging surveys, and their use as probes of cosmological parameters.

The last day also featured two summaries of the workshop, an optimist’s summary delivered by Frank van den Bosch and a skeptic’s summary delivered by Martin White. The optimist’s summary presented some of the difficulties in modeling of small scale structure that were discussed during the workshop, but also showed that these small scale probes are significantly constraining even after marginalization over a large number of galaxy formation and

modeling uncertainties. It also highlighted the current tension between cosmological parameters obtained from the cosmic microwave background experiment Planck, and a number of small-scale structure probes on the matter density and the amplitude of density fluctuations in the Universe. The skeptic's summary included a parallel to collider experiments in particle physics. The suggestion was that precision measurements of cosmological parameter should perhaps be left to clean probes such as baryon acoustic oscillation experiments or CMB experiments (analogous to electron machines in particle physics), while small scale structure probes (analogous to

proton machines) are excellent tools for discovery than precision. It highlighted the importance of demonstrating the resilience of small scale probes to uncertainties in galaxy formation physics. It also suggested the need to perform sensitivity studies (some ideas discussed during the workshop), to help design observational campaigns in the future.

The topics discussed during the workshop are central to guide the research directions necessary to exploit the potentials of the upcoming Hyper Suprime-Cam survey and the Prime Focus Spectrograph survey.



The Kavli IPMU School on The Future of Collider Physics

Satyanarayan Mukhopadhyay

Kavli IPMU Postdoctoral Fellow

The Kavli IPMU School on the Future of Collider Physics was successfully conducted during July 16-19, 2013. Having a school dedicated to the future prospects of collider physics was a very timely idea for three main reasons: the recent discovery of a Higgs-like boson at the CERN Large Hadron Collider (LHC) and the subsequent measurement of some of its properties in the early LHC run, the promise of gathering a wealth of new information on the Higgs in the next runs of the upgraded LHC, and finally, the prospects of having an International Linear Collider (ILC) in the near future as a Higgs factory and a precision machine. All of the three broad areas were covered at great depth in the school, which included 12 lectures by leading experts in the field, one poster presentation session by the participants and a panel discussion session on the big questions and promising directions in this subject.

It was no surprise that most of the lecturers focused on different aspects of Higgs physics, with topics ranging from an effective field theory framework



to parametrize the deviations of Higgs properties from the Standard Model and the current status of its measurements, to important concepts in statistics necessary to properly interpret the data presented by the ATLAS and CMS collaborations. The current status of theoretical calculation of Higgs cross-sections, the next-to-leading order event generators and future goals in improving the higher order QCD calculations and parton distribution functions were also reviewed. New techniques in top quark physics were discussed as well, which might prove to be crucial in new physics search at the LHC.

The school was kick-started by an opening lecture

by Kavli IPMU Director Hitoshi Murayama, where he gave a broad overview of the physics behind a high-precision machine like the proposed ILC with its associated challenges, and the accuracy with which it can determine the properties of new particles at the weak scale including the Higgs boson. Hitoshi also informed us about the current status of Japan hosting the ILC in the near future. This was followed up in the subsequent days with very thorough talks

by experimentalists on the high-luminosity LHC programme and details on the ILC accelerator and detector developments and physics goals.

The participants included around 45 graduate students and postdocs from all over Asia, most of them being from Japan, India, South Korea, Taiwan and China. They also presented their recent work in a poster session, during which very intense and lively discussions took place.



FY2013 WPI Site Visit

A FY2013 WPI site visit was conducted on September 5 and 6 at the Kavli IPMU on the Kashiwa campus (the first day) and Ito Hall on the Hongo campus (the second day). In addition to the usual observation of the state of progress as a WPI center, this time the delegation discussed with the University of Tokyo's Executive Vice President for Research Yoichiro Matsumoto and the Kavli IPMU administration on how the University of Tokyo, which hosts the Kavli IPMU, considers to perpetuate this institute after the expiration of the supporting period by the government. Partly because of this, the delegation of observers consisted of as many as 25 members; WPI Program Director (PD) Toshio Kuroki, Program Officer (PO) in charge of the Kavli IPMU Ichiro Sanda, newly appointed Deputy PD Akira Ukawa, members of the Working Group in charge of the Kavli IPMU, some of the WPI Program Committee members (Hiroo Imura, chair, Hiroto Ishida, Robert Aymar, Richard Dasher, and Ian Halliday), MEXT officers from the Research Promotion Bureau (Yoshiaki Ando, Director, Basic Research Promotion Division, Hideki Iwabuchi, Director, Office for the Promotion of Basic Research, the Basic Research

Promotion Division, and others), JSPS officers, and other scientists.



On the first day of site visit, PO Ichiro Sanda giving an introductory talk to the delegates and Kavli IPMU researchers.

Sixth Meeting of the Kavli IPMU External Advisory Committee

The sixth meeting of the Kavli IPMU External Advisory Committee was held on June 6, 2013. From this meeting, Steve Kahn (Stanford/SLAC) chaired the Committee, taking over Roberto Peccei who had stepped down as a committee member. John Ellis (King's College London), Sadayoshi Kojima (Tokyo Tech), David Morrison (UC Santa Barbara), Sadanori Okamura (Hosei), and Nigel Smith (SNOLAB) were in attendance.

This time, the Committee was specifically asked advice on how the Kavli IPMU as a WPI center can secure a five year extension of the support from the government after the initial 10 years, and on how it can plan its continuity as a permanent entity in the University of Tokyo. The committee gave valuable suggestions for its future.



Director Murayama reporting to the Committee members, (from left to right) S. Kojima, N. Smith, J. Ellis, S. Kahn (chair), S. Okamura, and D. Morrison.

Toshitake Kohno Awarded the MSJ 2013 Geometry Prize

Toshitake Kohno, Professor at the Graduate School of Mathematical Sciences, the University of Tokyo, and Principal Investigator at the



Toshitake Kohno

Kavli IPMU, won the Mathematical Society of Japan's 2013 Geometry Prize for "A Series of Works in Geometric Representation Theory for Quantum Groups." The award ceremony was held on September 25, 2013 at the MSJ autumn meeting at Ehime University, and Professor Kohno presented a special lecture.

It is noteworthy that Kavli IPMU mathematicians had won the MSJ Geometry Prize also in 2011 (Kyoji Saito, see IPMU News No. 15, p. 22) and in 2012 (Yukinobu Toda, see Kavli IPMU News No. 19, p. 26).

Science Café 2013 "Approaching the Mystery of the Universe with Mathematics and Physics"

The Science Café 2013 "Approaching the Mystery of the Universe with Mathematics and Physics," fifth in this series, was held at the Tamarokuto Science Center (TSC) in Nishi-Tokyo City, jointly sponsored by the Kavli IPMU and the TSC.

This year, Tetsuo Hatsuda (Chief Scientist at RIKEN and Visiting Senior Scientist at Kavli IPMU) gave the first lecture, entitled "Structure of Matter: The World of Quarks," on June 15. In the lecture room, which was filled to capacity, he started his lecture by discussing fundamental concepts like "What is physics?" and "What is matter?" He then explained the Standard Model of particle physics using colored balls that represent

the quarks. His lively talk occasionally made the audience laugh. This lecture was video recorded and it is open to the public on the web site of the Japan Science and Technology Agency (JST) at <http://sc-smn.jst.go.jp/playprg/index/M130011063>.



Tetsuo Hatsuda giving a lecture.

The second lecture, entitled “Geometry and Symmetry of the Universe,” was delivered by Kavli IPMU Associate Professor in mathematics, Yukinobu Toda, on June 22. He started with an explanation of the basics of geometry, and the latter half of his lecture touched on the role that geometry plays in theoretical physics, such as superstring theory. He conveyed how the research at Kavli IPMU is conducted through the cooperation of mathematicians and physicists aiming to elucidate the mystery of the universe. Many of the audience were taking notes with a serious look, which was impressive.



Yukinobu Toda giving a lecture.

Since the last lecture was delivered in the evening of July 6, the day before the Star Festival (Tanabata), the venue was specially chosen as the TSC’s planetarium dome, known as the “Science Egg,” and Kavli IPMU Associate Professor Keiichi Maeda (who is now associate Professor

at Kyoto University) talked on “Supernovae – Gigantic Explosion Connecting Stellar Evolution and Cosmological Evolution.” He explained the important role of the supernova explosion in the history of the universe, with the use of images, such as an impressive simulation of a supernova explosion, projected onto the planetarium dome. After the lecture, a Q&A session was held with all people moved to the TSC’s café corner. Even after the Q&A session, many people were standing in line to ask questions till the closing time of TSC.

The first and second lectures were delivered in a room with a capacity of 80 people, while in the third lecture the number of people admitted into the planetarium dome was 100. Many junior high school and high school students attended each time. This seems to indicate their keen interest in mathematics, physics, and astronomy.



Keiichi Maeda in a Q&A session.

Kavli IPMU Researchers Talked at the SSH Students Fair 2013

Kavli IPMU ran a booth, exhibiting its research activities, at the Super Science High School Students Fair 2013 held on August 7 and 8, 2013 at Pacifico Yokohama. Also, two young researchers working on the SuMIRe Project (FIRST Murayama Project, see IPMU News No. 10, p. 20), Kavli IPMU Assistant Professor Masamune Oguri (now Assistant Professor at the School of Science, the University of Tokyo) and Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Jun Nishizawa, jointly presented a

mini lecture, entitled “Dark Universe ‘Seen’ with the Subaru Telescope” in “FIRST/WPI Researchers Live! Young×Young” Program, on the second day.

Their mini lecture was well attended by as many as 230 students, with many of them standing. There were many questions from the audience, such as on the future prospects of research using the Subaru Telescope and HSC (see, pp. 10 – 13), and the lecturers’ motivations for becoming researchers as well as their high-school days. It was a great success.



A student of the high school, from which Oguri graduated, asking a question to the lecturers, Masamune Oguri (left) and Jun Nishizawa (right).

Kavli IPMU Seminars

1. “Gravitational collapse in Horava-Lifshitz theory of Gravity”
Speaker: Anzhong Wang (Baylor U)
Date: Jun 19, 2013
2. “Killing-Yano symmetry of higher-dimensional black holes”
Speaker: Tsuyoshi Houri (Rikkyo U)
Date: Jun 20, 2013
3. “On the higher Chow group of product of curves”
Speaker: Satoshi Kondo (Kavli IPMU)
Date: Jun 20, 2013
4. “Counting disks in toric varieties”
Speaker: Hsian-Hua Tseng (Ohio State U)
Date: Jun 24, 2013
5. “High Energy Scattering in AdS/CFT – Applications to $N = 4$ SYM and to low-x QCD”
Speaker: Miguel S. Costa (U Porto)
Date: Jun 25, 2013
6. “Progenitors of Type Ibc supernovae”

- Speaker: Sung-Chul Yoon (Seoul National U)
Date: Jun 26, 2013
7. "New applications of de-Sitter geometry in astrophysics II"
Speaker: Marcus Werner (Kavli IPMU)
Date: Jun 27, 2013
 8. "Natural GUT scale mass ratios"
Speaker: Martin Spinrath (SISSA)
Date: Jun 27, 2013
 9. "The Andromeda Galaxy: Hierarchical Galaxy Formation, Stellar Populations, and the Interstellar Medium"
Speaker: Puragra Guhathakurta (UC Santa Cruz)
Date: Jun 27, 2013
 10. "Orientation data and quantization"
Speaker: Zheng Hua (U Hong Kong)
Date: Jul 01, 2013
 11. "Cellular structure on the Hecke-Clifford superalgebras"
Speaker: Masaki Mori (U Tokyo)
Date: Jul 02, 2013
 12. "Evolution of the most massive asymptotic giant branch star as a progenitor for electron capture supernovae"
Speaker: Koh Takahashi (U Tokyo)
Date: Jul 04, 2013
 13. "Embedded contact homology of circle bundles"
Speaker: David Farris (Indian Inst of Science)
Date: Jul 04, 2013
 14. "CP and Flavor Symmetries: Ideas and Models"
Speaker: Claudia Hagedorn (U Padua)
Date: Jul 08, 2013
 15. "New Views of Galaxy Evolution: The Young and The Dusty"
Speaker: Matt Malkan (UCLA)
Date: Jul 08, 2013
 16. "Universal hydrodynamic description of quantum critical points with Lifshitz scaling"
Speaker: Bomsoo Kim (Tel Aviv U)
Date: Jul 09, 2013
 17. "Higher Spin 3d Gravity: Beyond AdS"
Speaker: Michael Gary (TU Wien)
Date: Jul 10, 2013
 18. "Dimer models and homological mirror symmetry"
Speaker: Kazushi Ueda (Osaka U)
Date: Jul 11, 2013
 19. "SYZ for local mirror symmetry"
Speaker: Kwok-Wai Chan (CUHK)
Date: Jul 12, 2013
 20. "Topological defects and generalised orbifolds"
Speaker: Nils Carqueville (Simons Center)
Date: Jul 16, 2013
 21. "Gauss-Bonnet braneworld redux: A novel scenario for the bouncing universe"
Speaker: Hideki Maeda (Rikkyo U, CECs)
Date: Jul 16, 2013
 22. "Mass hierarchy and physics beyond the Standard Model"
Speaker: Ignatios Antoniadis (CERN)
Date: Jul 17, 2013
 23. "Cosmic sound, near and far"
Speaker: Martin White (UC Berkeley)
Date: Jul 17, 2013
 24. "How Galaxies are Made, from $z=0$ to $z=8$ "
Speaker: Peter Behroozi (Stanford U)
Date: Jul 18, 2013
 25. "Phase structures of Chern-Simons matter theory on $S^1 \times S^2$ "
Speaker: Tomohisa Takimi (Tata)
Date: Jul 18, 2013
 26. "B-twisted sigma-model and Calabi-Yau geometry"
Speaker: Si Li (Boston U)
Date: Jul 22, 2013
 27. "Symplectic cohomology and duality for the wrapped Fukaya category"
Speaker: Sheel Ganatra (Stanford U)
Date: Jul 23, 2013
 28. "Higgs characterisation framework"
Speaker: Kentaro Mawatari (Vrije U Brussel)
Date: Jul 24, 2013
 29. "Non-abelian theta functions and unitarity of the hitchin connection"
Speaker: Joergen E. Andersen (Aarhus U)
Date: Jul 24, 2013
 30. "Floer theory on Lefschetz fibrations and empty symplectic manifolds"
Speaker: Maksim Maydanskiy (Stanford U)
Date: Jul 25, 2013
 31. "Nonabelian Hodge theory in positive characteristic"
Speaker: Mao Sheng (USTC)
Date: Jul 25, 2013
 32. "New Insights regarding the Stellar Mass Assembly of Galaxies across Cosmic Time"
Speaker: Frank Vandenbosch (Yale U)
Date: Aug 01, 2013
 33. "A master solution of the quantum Yang-Baxter equation and classical discrete integrable equation"
Speaker: Vladimir Bazhanov (ANU)
Date: Aug 05, 2013
 34. "Inhomogeneous Holography"
Speaker: Moshe Rozali (U British Columbia)
Date: Aug 05, 2013
 35. "Primitive forms for affine cusp polynomials"
Speaker: Yuuki Shiraishi (Osaka U)
Date: Aug 06, 2013
 36. "Black Holes and the Generalized Uncertainty Principle"
Speaker: Bernard Carr (Queen Mary, U of London)
Date: Aug 07, 2013
 37. "A uniqueness theorem for Frobenius manifolds and Gromov-Witten theory for orbifold projective lines"
Speaker: Yuuki Shiraishi (Osaka U)
Date: Aug 08, 2013
 38. "Branching laws for discretely decomposable restrictions"
Speaker: Yoshiki Oshima (Kavli IPMU)

- Date: Aug 15, 2013
39. "Triangulated surfaces in triangulated categories"
Speaker: Mikhail Kapranov (Yale U)
Date: Aug 23, 2013
40. "Dunkl operators"
Speaker: Anatol Kirillov (RIMS, Kavli IPMU)
Date: Aug 26, 2013
41. "Young-Baxter algebras and Quantum Cohomology"
Speaker: Vassily Gorbounov (U Aberdeen)
Date: Aug 27, 2013
42. "Nucleosynthesis beyond iron: supernovae vs. neutron star mergers"
Speaker: Shinya Wanajo (NAOJ)
Date: Aug 27, 2013
43. "How Does Galaxy Environment Influence AGN Activity?"
Speaker: Emil Khabiboulline (Caltech)
Date: Aug 28, 2013
44. "The Evolution of Star-Forming Galaxies over Cosmic Time"
Speaker: Josh Speagle (Harvard U)
Date: Aug 28, 2013
45. "BPS spectrum of Argyres-Douglas theory via spectral network"
Speaker: Chan Y. Park (Caltech)
Date: Sep 10, 2013
46. "SUSY searches based on long-lived particle signatures at the LHC"
Speaker: Shimpei Yamamoto (ICEPP/CERN)
Date: Sep 11, 2013
47. "Affine Artin groups"
Speaker: Todor Eliseev Milanov (Kavli IPMU)
Date: Sep 12, 2013
48. "Spectra of coset sigma models"
Speaker: Vladimir Mitev (Humboldt U)
Date: Sep 17, 2013
49. "Calabi-Yau 3-folds with infinite fundamental group and mirror symmetry"
Speaker: Atsushi Kanazawa (U of British Columbia)
Date: Sep 24, 2013

50. "Electroweak Baryogenesis beyond the high temperature expansion"
Speaker: Ran Huo (Kavli IPMU)
Date: Sep 25, 2013
51. "Reconstruction and convergence results in quantum K-theory"
Speaker: Valentin Tonita (Kavli IPMU)
Date: Sep 26, 2013

Kavli IPMU Komaba Seminars

1. "Elliptic genera and two dimensional gauge theories"
Speaker: Richard Eager (Kavli IPMU)
Date: Jul 08, 2013
2. "Homological Mirror Symmetry for toric Calabi-Yau varieties"
Speaker: Daniel Pomerleano (Kavli IPMU)
Date: Jul 17, 2013

Personnel Changes

Reappointment

Former Kavli IPMU Postdoctoral Fellow Yu Nakayama was reappointed on February 1, 2013. He told "I've returned to Kavli IPMU after



Yu Nakayama

my one-year leave at Caltech. My recent research interest is the renormalization group and the structure of space-time. I'm also an editor for IJMPA and MPLA. I welcome your submission for publication from Kavli IPMU."

Moving Out

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

Chang-Kee Jung [January 16, 2013 – August 31, 2013] has been on a leave of absence from Stony Brook University, and has served as a Kavli

IPMU Professor during this period.

Kavli IPMU Associate Professor Keiichi Maeda [December 16, 2007 – December 15, 2012 as an IPMU Assistant Professor, and then – August 31, 2013 as a Kavli IPMU Associate Professor] moved to the Graduate School of Science, Kyoto University as an Associate Professor.

Kavli IPMU Assistant Professor Masamune Oguri [April 16, 2011 – August 15, 2013] moved to the Department Physics, the University of Tokyo as an Assistant Professor.

Kavli IPMU Assistant Professor Masahito Yamazaki [June 1, 2013 – August 31, 2013] moved to the Institute for Advanced Study as a postdoctoral member. (He will be reappointed as a Kavli IPMU Assistant Professor in a year.)

Kavli IPMU postdoctoral fellow Yoshiaki Oshima [April 1, 2013 – August 31, 2013] moved to the Institute for Advanced Study as a postdoctoral member. (He will be reappointed as a Kavli IPMU postdoctoral fellow in a year.)

Kavli IPMU postdoctoral fellow Hanindyong Kuncarayakti [April 1, 2013 – July 30, 2013] moved to the University of Chile as a postdoctoral fellow.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Charles Steinhardt [September 1, 2010 – August 31, 2013] moved to California Institute of Technology as a postdoctoral scholar.

Kavli IPMU postdoctoral fellow Emir Gumrukcuoglu [September 10, 2010 – September 30, 2013] moved to the University of Nottingham as a postdoctoral researcher.

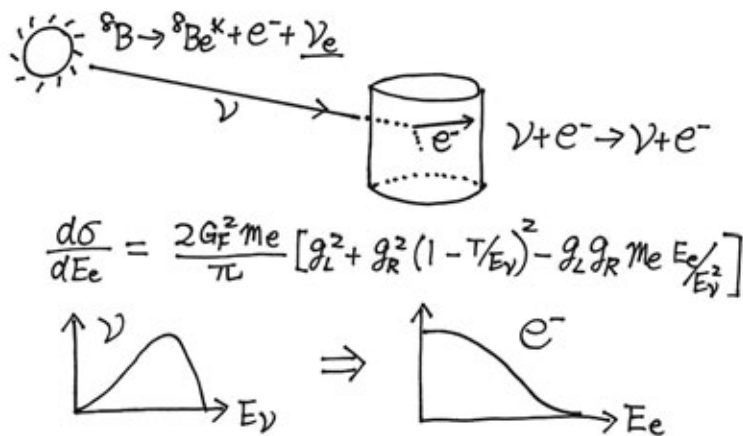
Kavli IPMU postdoctoral fellow Brian Feldstein [September 1, 2010 – September 30, 2013] moved to the University of Cambridge as a postdoctoral fellow.

Solar Neutrinos

Masayuki Nakahata

Principal Investigator of Kavli IPMU

Around 1970, the Homestake experiment conducted by R. Davis et al. suggested that the observed solar neutrino flux is smaller than that expected from the standard solar model, which had been called “the solar neutrino problem”. In 1988, the Kamiokande experiment confirmed the problem using neutrino-electron scattering with the real time experiment. The solar neutrino problem was eventually solved in July 2001 by comparing the fluxes measured by the SNO experiment at Canada and the Super-Kamiokande(SK). It was found that the solution to the problem is neutrino oscillations. Precise observation of solar neutrinos has been continuously running at SK. Recently, it was observed that the nighttime flux is a few percent larger than the daytime flux because of the matter effect of the earth. And SK is now trying to observe the energy spectrum distortion due to the matter effect in the sun.



21世紀の物理学の幕開け

Kavli IPMU 機構長

村山 斉 むらやま・ひとし

今年のノーベル物理学賞は、「素粒子の質量の起源に関する機構を理論的に発見したこと」により、ピーター・ヒッグス氏とフランソワ・エングレール氏に与えられと発表されました。受賞理由は、更に「その機構は、予言された素粒子が最近CERNのLHCにおけるATLAS実験とCMS実験で発見されたことにより確認された」と続く、異例に長いものです。予言された素粒子、つまりヒッグス粒子の発見は、20世紀の物理学の集大成であると同時に、21世紀の物理学の幕開けでもあります。

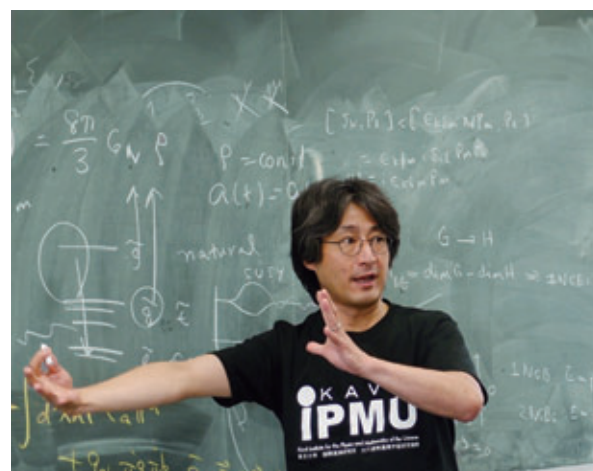
ヒッグス粒子は宇宙全体に凍り付き、ギュッと詰まっていると考えられています。これがないと電子が光速で飛び出し、私達の体は10億分の1秒で蒸発してしまいます。電子を押さえ込み、原子を形作り、宇宙に秩序を生み出したとても大事な粒子です。この粒子が予想された通りに発見されたことで、20世紀初頭からかれこれ70年がかりで打ち立てられた素粒子の標準模型がひとまず完成しました。

一方、ヒッグス粒子は今まで誰も見たことのない様な「顔無し」、つまりスピンを持たない素粒子で、そんな粒子が一つだけ存在するのはあまりにも不自然ですし、そもそもなぜ宇宙に凍り付いたのかもわかっていません。恐らく兄弟・親戚がいると思われますし、その性質にも特徴があるはずで、また暗黒物質・暗黒エネルギーとも深い関係があるのではないかとされています。今回のノーベル賞はこの研究の幕開けです。

今号のKavli IPMU Newsでは、私の友人で高名な理論物理学者のジョン・エリス氏に私がインタビューしました。ノーベル賞発表4ヶ月前の6月でしたが、

CERNがATLAS実験とCMS実験の結果について今年3月に発表した「昨年7月の新粒子発見報告時の約2.5倍のデータをもとに解析した結果、この新粒子は、ますます素粒子に質量を与える機構に関連したヒッグス粒子らしく見えるようになってきた。しかし、これが素粒子の標準理論で予言されるヒッグス粒子なのか、標準理論を超える幾つかの理論で予言されるように複数の新粒子の一番軽いものという可能性もあるのかはまだ分かっていない。この間に答えるにはまだ時間を要する。」に基づいて話をしています。また、今号の表紙はカイ・マルテンス准教授で、彼は神岡で行われている暗黒物質の探索実験、XMASSについて最近の進展を含めて解説しています。楽しんでお読み下さい。

(2013年10月22日原稿受領)



なぜ WIMP を探すのか、どうやって捕らえるのか

はじめに

神岡観測所は富山市と高山市の間、池ノ山の地下に位置しています。この観測所ではダークマターが発見されたわけではないのですが、その性質の一端が明らかにされつつあると言えるでしょう。そこで行われているXMASS実験は、同様の目的で行われている実験の一つです。以下、なぜダークマターを捕らえたいのか、またどうやって捕らえるのか、についてお話ししましょう。しかし、この話題はとても大きな広がりをもっているため、全体を網羅するのは難しく、適当に2、3の話題を取り上げ、また私たちがXMASSに適用した方針をとるに至った選択の特徴的な点を述べるにとどめることをお許しください。

私たちはカブリ数物連携宇宙研究機構の一員ですので、宇宙から話を始めることにします。

ダークマターと宇宙

科学上の偉大な成功談の一つに、私たちの宇宙の歴史について一貫した矛盾のない物語を提供するために、如何にして素粒子物理学と天文学が統一されたのが挙げられます。その中核となるのは、冷たいダークマター (Cold Dark Matter, CDM) モデルに宇宙項 Λ を加えた宇宙モデル (Λ -CDMモデル) のパラダイム

とビッグバンであり、この科学的体系が打ち立てられた基礎の一つが素粒子の標準模型です。それらが相俟って、はじめて天文観測の膨大なカタログが理解できるのです。このような物語が純粋に科学に基づいていることは、人類の歴史上初めてのことなのです。

この物語は、光や電波で観測できる宇宙の歴史全般を通じて天文学的観測結果をうまく描き出しています。望遠鏡により、赤方偏移が大きくなればなるほど遠い過去の対象が観測され、そこからズーム・アウトすることにより、私たちはこの歴史の進展を観ることができます。さらに、化学的要素の相対的存在量や、天球上の銀河の分布に見られる豊富な構造を説明することにより、この物語は電磁波で記録されている最も初期の宇宙よりも過去に遡りさえします。

しかし、もはや解決すべき問題が何も無いわけではありません。一致しない点が色々あります。リチウム7の存在量には、予言と観測量の間になくとも3倍の違いがあります。また、この模型により宇宙に存在する物質の大規模構造は非常に良く再現されますが、小規模構造は予想から外れているように見えます。しかし、全体的には私たちの物語は、最初の星が誕生した時点まで残存した元素の相対的存在量を、宇宙が光が初めて直進できるようになった瞬間 (宇宙の晴れ上がり) の残光に刻印されたパターンおよび現在の銀河の分布と有意に関連づけることに成功を収めています。素晴ら

しい成功であり、高くそびえ立つ成果と言えます。

実は、この成功談に伴う理解の中には、とても驚くべきことが2、3組込まれているのです。最大の驚きは過去よりも未来に関わっています。エドウィン・ハッブル以来、私たちは宇宙が何らかの形で膨張していることを知っています。宇宙マイクロ波背景放射の発見以来、それはビッグバンにより生じたものと仮定することが必要でしたが、それ自体はそれほど驚くことではありません。予想外だったことは、宇宙の膨張が加速していることです。私たちの物語によれば、これは宇宙のダークエネルギー（暗黒エネルギー）と呼ばれる成分が引き起こしているのです。ダークエネルギーは私たちのパラダイムの Λ に当たるもので、現在では宇宙の全成分の約3分の2を占めています。

しかし、本稿ではダークエネルギーについては脇に置いて、宇宙の成分の中で2番目に大きなダークマター（暗黒物質）に注目することにします。それはXMASS実験で探索しているもので、宇宙の全成分の4分の1をやや上回る量が存在します。宇宙のたった20分の1が私たちの知っているもの、例えば輝く太陽のような、あるいは私たちが握手する友達のような、あるいはまた私たちがシミュレーション計算を行っているコンピューターのようなもの、つまり「物質」なのです。私たちが望遠鏡で見ているのは宇宙の成分のうちの20分の1でしかない物質であり、水面に現れている氷山の先端を見ているようなものです。また、この20分の1は私たち素粒子物理学者が良く知っていると考えているもの、つまり素粒子の標準模型によって記述されるものです。標準模型では説明できない現象を発見しようとこれまで多大な努力と資金が注ぎ込まれてきましたが、大きな食い違いはまだ見出されていません。

それにもかかわらず、理論家たちは標準模型には欠点があると考えています。標準模型の成功を保証するには、多くのパラメーターを既知として与えることと、偶然とはとても考えられないような微調整が必要とされます。そこで理論家達は次の大仕事、つまり、標準模型を包含し、標準理論に内在することが認識されて

いる任意性を、少なくとも減少させる何らかの機構を有する理論の構築を競っています。こういった理論は大抵、理論家の目から見て標準模型がもつ欠点を大なり小なり緩和する役割をする新粒子を含むものです。

ダークマターの性質

ダークマターもまた微小な物質（素粒子）であるべきだという仮定は、少なくとも素粒子物理学者にとっては自然に見えます。天文観測とダークマターを含む模型を用いた計算から、ダークマター素粒子の性質についてある制約条件を導くことができます。標準模型に現れる素粒子でこの注文にぴったり当てはまるものはありません。私たちの宇宙にはダークマターが存在し、理論家には新粒子を期待する強い理由があり、そのうちの幾つかは注文にぴったり合うかもしれない、というこのニュースには興奮を禁じ得ません。実際、この宇宙論的な必要性和理論的な願望の相乗効果により引き起こされた実験の努力には2つの大きな流れがあります。一つはアクシオンの探索です。アクシオンは、私たちが強い相互作用のCP（物質と反物質の対称性）問題と呼んでいるものに対して理論家が示したエレガントな解決方法です。もしアクシオンが存在するならば、その性質によってはダークマター素粒子となり得ます。アクシオンは光子に転換する可能性があり、これを利用して探索します。WIMPは別種のダークマター素粒子の候補ですが、Weakly Interacting Massive Particlesを意味し、未知の重い素粒子で弱い相互作用しかしないものの総称です。観測によってはっきり示されていますが、ダークマターは普通の物質と強い相互作用や電磁相互作用をしません。従って、ダークマターが普通の物質やダークマター自身と相互作用するとすれば、知られている相互作用のうちで一番強いのは「弱い相互作用」ということになります。逆に、もしダークマターが何らかの形の弱い相互作用をするならば、私たちの周りにある普通の物質との弱い相互作用を通じて姿を現すはずで、このような事象が起きた



XMASSの実験室ホールと水遮蔽タンク。

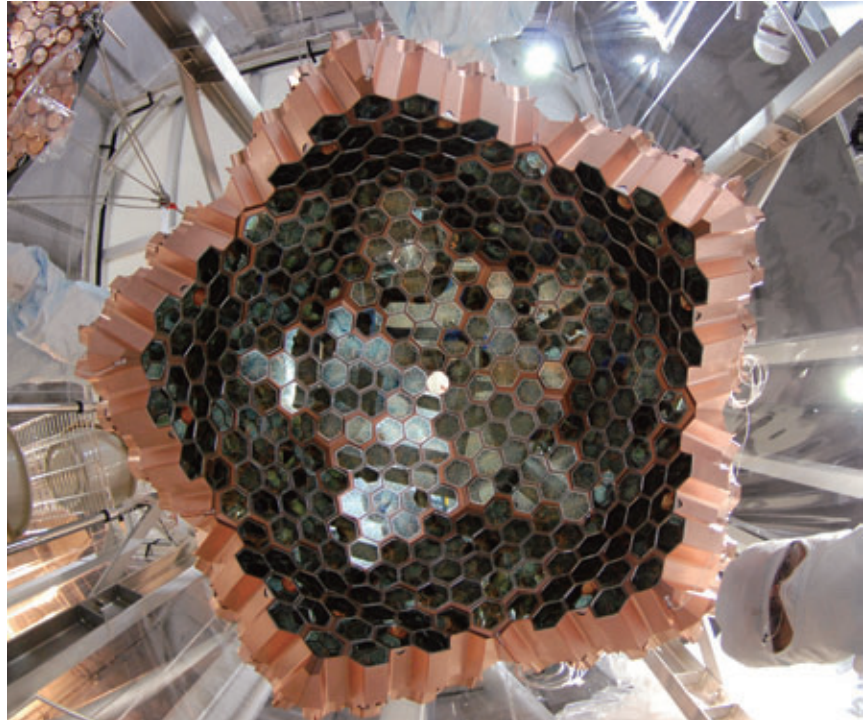
ことを示す信号を探す目的に特化した実験を、「直接測定実験」と呼びます。現状のXMASS実験は、WIMPに対する直接測定実験として計画されたものです。

ダークマター素粒子をWIMPと考える動機は、次の計算によるものです。粒子がそれ自身の反粒子と衝突して消滅する頻度が弱い相互作用のスケールで決まっているとすれば、私たちが現在の宇宙で観測するダークマターの密度が自然に得られることが示されるのです。実に興味深いことです。この定量的な一致は「WIMPの奇跡」として知られています。

片手落ちを避けるため、私たちが見る宇宙をダークマター無しに説明する試みもあることも述べておかなければなりません。冷たいダークマターのパラダイムは観測された数多くの異なる側面を説明することに成功を収めていますが、ダークマター無しではいかなる試みもその段階に及びません。典型的にはこのような試みは特定の（例えば銀河の回転のような）問題の解

決を図るものですが、冷たいダークマターとは違って、特に解決するように設定された問題以外の問題も同時に解決するという事はできていません。

私たちが神岡で行っている実験の各論について詳しく見る前に、もう一つコメントしておきますが、現在、直接測定実験でWIMPの相互作用ではないかとされている信号を得たという実験結果が幾つか報告されています。大部分の実験家は、これらのダークマターの信号だと言われているものが実験的な検出のしきい値（そこではバックグラウンドが優勢になる）に近いということを用意深く指摘していますが、理論家の一部は既にこれらの観測したと想定されているもの全て（それに加えて観測されないと報告された結果）に対応できるシナリオ作りを競い合っています。ダークマターについて、真実を発見するには時間と大変な努力を要するでしょう。詰まるところ、多様な異なる標的物質について首尾一貫した結果を得る迄は、私たちは



組み立て中のXMASS 800kg 測定器の内部。光って見えるのは光電子増倍管の光陰極面。外側は銅の光電子増倍管ホルダー。

WIMPの信号を信じる訳にはいきません。物質に働く弱い相互作用は良く理解されていますから、たった一つでも肯定的な測定があって、それから反応の断面積が推測できれば、異なる標的物質に対して期待される反応率も理論家は計算できるのです。

神岡での実験

XMASS とは、ユニークな測定器の構想とユニークな標的物質を基に構築された実験プログラムを表します。このプログラムについては、2000年にカブリIPMUの鈴木洋一郎副機構長がカナダのサドベリーで開催された LowNu (Low Energy Neutrino Physicsの略) 研究集会で初めてその構想を示しました。XMASS は略称ですが、Xenon detector for weakly interacting MASSive particles (弱い相互作用をする重い粒子検出用のキセノン測定器)、あるいはXenon MASSive

neutrino detector (キセノンを用いた巨大ニュートリノ測定器)、さらに Xenon neutrino MASS detector (キセノンを用いたニュートリノ質量測定器) という具合に英語で3つの読み方が可能です。この色々な読み方は実験プログラムの多様性を示しています。現在実現されている測定器は、有感体積内のキセノン総重量 835 kg ですが、これは WIMP 発見を目的としてデザインされたもので、一番目の読み方に相当します。プログラム最終段階の XMASS は解析に用いられる有効質量10トンとされており、これは世界の同業研究者達が現在準備している次世代測定器の標的質量の10倍に相当します。その段階の測定器の能力は、3番目の読み方が示すようにキセノン136の「ニュートリノを出さない2重ベータ崩壊」探索(発見されればニュートリノの質量について情報が得られる)に手が届くものとなるでしょう。同時に、このような巨大測定器は pp ニュートリノや ${}^7\text{Be}$ ニュートリノと呼ばれる太陽からのニュートリノを検



60面体のXMASS測定器と実験チーム。

出する、2番目の読み方の「巨大ニュートリノ測定器」でもあります。最終段階のXMASSに対して、実際には太陽ニュートリノの信号は測定器のWIMP検出能力を制限するバックグラウンドとなります。

稀な現象の探索全てにおいてバックグラウンドが主要な懸念要素であり、WIMPの探索だけに限った話ではありません。宇宙線により大気中で生成された高エネルギーのミュー粒子が突き抜けることによる測定器の放射化を避けるために、実験はできるだけ深い地下で行う必要があります。神岡の地下実験室は昼夜を問わず研究者がいつでも容易に立ち入ることができ、岩盤の厚みはミュー粒子に対して十分な遮蔽効果を与えてくれます。XMASSは水を能動的遮蔽体（宇宙線ミュー粒子がバックグラウンドとならないように、その通過を示す信号を出す）として用いた最初のダークマター測定器です。また、この水遮蔽体は受動的ではあるが外部から侵入するガンマ線を吸収し、周囲の

岩盤から出てくる速中性子を低速の熱中性子に変えます。このようにXMASS実験は外部からのバックグラウンドに対して何重もの厳重な防御機構を備えています。地下の環境に共通する悩みの種である放射性ラドンガスに対しては、実験室ホールの壁をラドンの透過を防ぐプラスチックで覆い、また外部（地上）から導入した空気を放出して実験室内のラドン濃度を低減させるという対策をとっています。また、XMASSを遮蔽する密閉水タンクの上部空気層には、スーパーカミオカンデで行われているように、特別に用意されたラドン除去空気を供給しています。

私たちの測定器の有感体積中では、外部から入り込むバックグラウンドに対して、高密度の液体キセノン自身が最も内側の防御層となります。この実験のデータ解析で、もし測定器内にあるキセノンの中心近傍から得られるデータだけを使うと、「有効体積」と呼ぶ最も内側の使用できる部分は小さくなりますが、その

外側の「使用されない」液体キセノンが外部から侵入するガンマ線を吸収して、有効体積内のバックグラウンドをさらに減らしてくれます。その意味で、私たちの測定器の有感体積には自己遮蔽機能があります。これは、この測定器のデザイン上の重要な特徴です。

XMASS 測定器の概念における中心的なアイデアは、放射化学的に非常にクリーンな環境を用意し、WIMPとの衝突により電荷を持った原子核がはじき飛ばされて発生するシンチレーション信号を最大限に利用しようというものです。液体キセノンはシンチレーション光を発生し、その発光量が大きいこと、またキセノンの質量数が大きいことから有感標的物質として選ばれました。アルゴン、クリプトンと違い、キセノンには有感領域での固有のバックグラウンドとなる長寿命のアイソトープがありません。しかし、ほんの微量でもクリプトンがキセノンに混入すると私たちの実験にとって有害な影響を与えます。XMASS実験は、キセノン中の残留クリプトンをppt (1兆分の1) レベルまで除去する、非常に効率の高い蒸留システムを開発しました。化学的に不活性な希ガスを除き、不純物は市販の「ゲッター」ユニットで容易に除去できます。私たちは、キセノンを連続的にゲッターに通さなくても測定器を最適な状態に維持できることを見出しました。私たちは、最適性能で非常に安定に稼働できる上、液体キセノンを積極的に循環させる必要が無い測定器の製作に成功したのです。一度稼働して初期の清浄化の過程が完了すれば、液体キセノンに熱を流入させる各種熱源とバランスさせるための冷凍だけが必要なこととなります。これは素晴らしい成果であり、私たちの戦略の重要な裏付けとなるものです。

現在のXMASS 800 kg測定器の調整運転を行った際、最大のバックグラウンド源として、測定器内部の表面あるいはその近傍にベータ崩壊する放射性同位元素が見出されました。個別のバックグラウンド源は特定され、現在、終了間近となっている改良作業で対処しています。このバックグラウンドにもかかわらず、測定器の調整運転の段階で得られた、低質量のWIMP

の相互作用と太陽からのアクションに関する制限について論文を発表しました。私たちは、改良された測定器でバックグラウンドの条件が大きく改善されることを楽しみにしています。

シンチレーション光については特に重要視しており、測定器の対称的な形状と642本の量子効率の高い光電子増倍管を用いて測定器内壁表面の60%を光電陰極でカバーしている点にそれが反映されています。現在の私たちの測定器の性能を証明する指標として、光電子増倍管によってシンチレーション光から得られる信号の大きさが優れていることが挙げられ、実際、運動エネルギー 122 keVの電子によって、1 keV当たり平均14.7個の光電子が発生します。これは、キセノンを用いるダークマターの実験の中で最も良い性能を誇っています。

XMASSで暗黒物質を検出するには、測定器内で暗黒物質との衝突によって電荷を持った原子核がはじき飛ばされて発生するシンチレーション信号だけを用います。私たちの測定器の幾何学的形状は60面体で、シンチレーション光を発生する領域は球対称と言えます。この簡単な幾何学的形状を選択したことから、XMASSは測定器の規模の拡大に柔軟に対応できるという大きな利点があります。競争相手の実験は1トン規模の測定器に移行しつつあるので、私たちも1トン規模のダークマター測定器を用いる次の段階のXMASS実験プログラム(XMASS 1.5と呼びます)に進む積もりです。測定器に使用されるキセノンの全重量は5トンで、来年から建設を開始したいと考えています。神岡観測所内の私たちの実験室ホールとそこに設置されている水遮蔽用のタンクは、解析に用いられる有効質量10トンを予定している私たちの実験の最終段階に対してさえ十分な大きさがあります。そこにたどりつくためには、一生懸命に働き、道中の要所所で物理の成果を上げることが必要です。さあ、張り切って行くことにしましょう。

世界最強のカメラ、Hyper Suprime-Camによる「宇宙の国勢調査」プロジェクトの開始へ

高田昌広 たかだ・まさひろ

Kavli IPMU 教授

安田直樹 やすだ・なおき

Kavli IPMU 教授

HSC国際共同研究チームはアンドロメダ銀河（M31）の目の覚めるような画像を公開しました。この画像は、ハワイ島のマウナケア山頂（4200m）にある口径8.2mのすばる望遠鏡に搭載された新しい広視野主焦点カメラで初めて撮影されたデータの一部です。このカメラはHyper Suprime-Cam（HSC）と呼ばれ、国立天文台、Kavli IPMU、他の日本の研究機関、プリンストン大学、台湾の研究機関からなる国際共同研究チームによって、開発が進められてきました。HSCはすばる望遠鏡の広い視野を十分に生かした設計にすることで、現カメラのSuprime-Camの約7倍に相当する、直径1.5度の視野を実現しています。HSCは高さが3m、3トンの重さがあり、約90億画素の世界最大のデジタルカメラです。HSCを鮮明な画像、広い視野、大きな鏡を持つすばる望遠鏡と組み合わせることで、観測的宇宙論と天文学の新しい時代に大きく踏み出すことができます。

HSCチームは、空の広い領域にわたり、また過去の宇宙を調べるのに十分な深さ（暗さ）で、数億個の銀河をくまなく調べる、いわば「宇宙の国勢調査」プロジェクトを実行する計画です。暗黒物質の重力による遠方の銀河像の形状のゆがみを測定することで、暗黒

物質の分布を調べることができます。暗黒物質は宇宙の全質量・エネルギーの約4分の1を占める目に見えない物質です。また、膨張する宇宙の中で暗黒物質の分布が時間とともにどのように変化してきたかを調べることで、宇宙の加速膨張を引き起こしている暗黒エネルギーの本質に迫ろうと考えています。宇宙の国勢調査となる銀河サーベイは、2014年の初めから5年間にわたって行われます。このサーベイはすばる望遠鏡で実行される、これまでで最大の銀河サーベイになります。また、この規模の銀河サーベイは、現在のカメラでは35年以上、ハッブル宇宙望遠鏡では1000年以上の時間がかかってしまいますが、HSCの能力によって5年という短期間で実行可能です。

アンドロメダ銀河の画像は本当に素晴らしいものです。視野全面にわたる鮮明な星の像はHSCの際立った能力を実証しています。アンドロメダ銀河あるいはM31は地球から250万光年の距離にあり、我々の銀河系の最も近くの渦巻き銀河です。月のない夜には、少し空が明るいところでも、肉眼で見ることができます。アンドロメダ銀河は銀河系に似ていて、銀河系がどのように形成されたかを知る貴重な手



口径8.2mのすばる望遠鏡とHSC。左図はすばる望遠鏡のトップリングに装着したHSC（フィルター交換機構は外してある）の位置を示す。この位置は主焦点と呼ばれ、HSCは主鏡から15mの高さにある（クレジット：国立天文台）。右図は高さ3mのHSC（クレジット：国立天文台）。



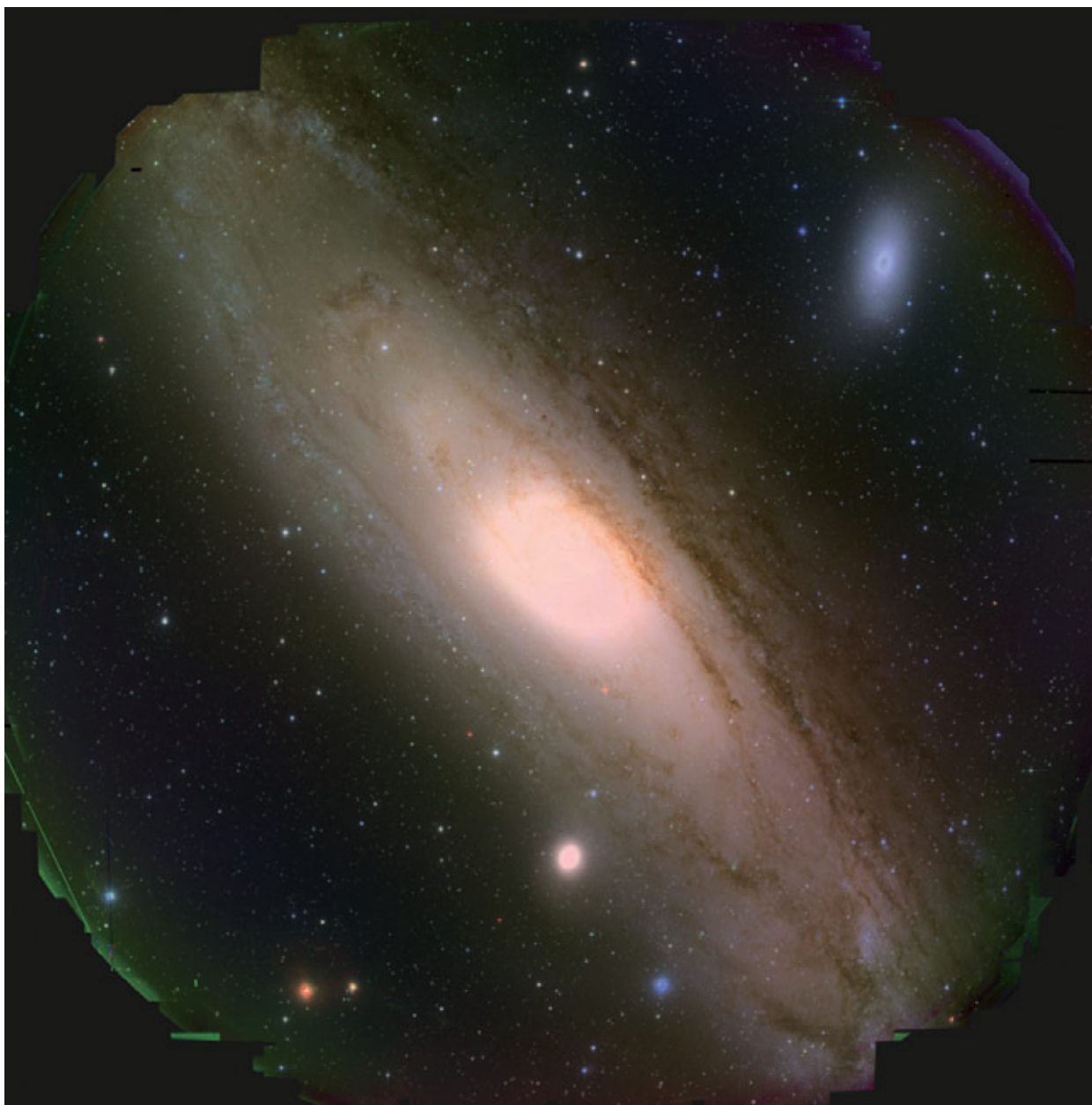
がかりとなるため、天文学者の興味を引いてきました。HSCではアンドロメダ銀河全体が一度に観測できるので、アンドロメダ銀河の星の色から、銀河の内側から外側に向かってそれらの星の種別がどのように変化しているか知ることができます。この画像は、プリンストン大学、Kavli IPMU、国立天文台の研究者を中心にHSC銀河サーベイのために開発されたデータ解析ソフトウェアパイプラインを使って作成されました。g、r、iバンドフィルター（それぞれ、特定の波長範囲の光だけを通すフィルター）での露出時間は、それぞれ、10、

12、16分で、これらの3つのバンドのデータを青、緑、赤に割り当ててカラー画像を作成しています。

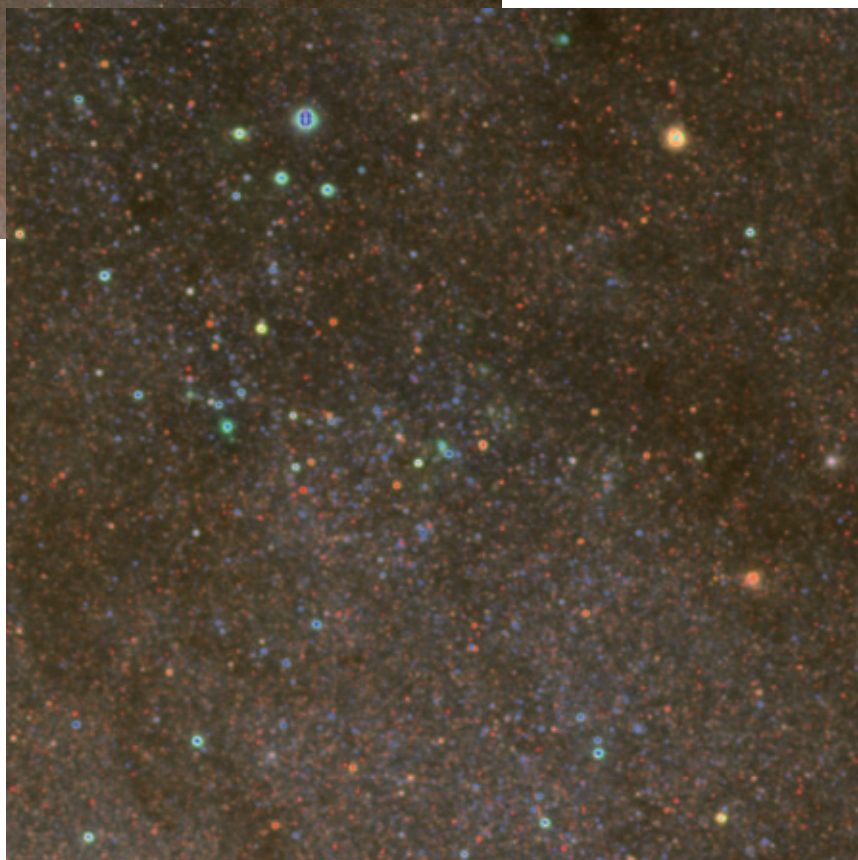
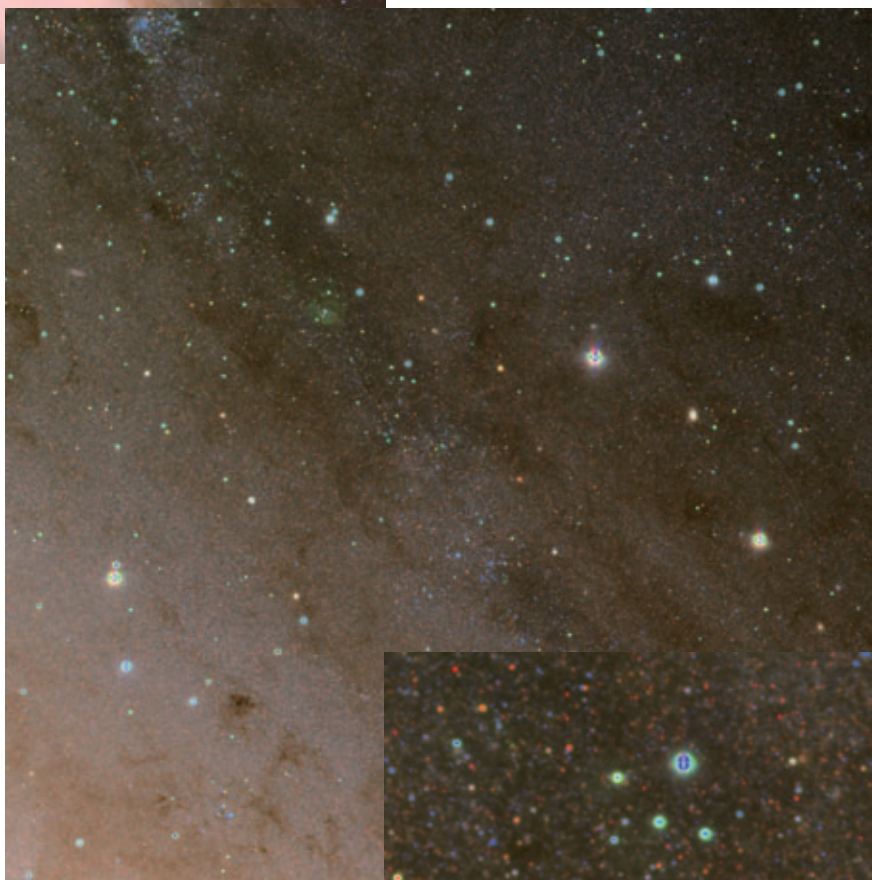
HSCは、Kavli IPMUの機構長である村山齊が研究代表者であるSubaru Measurements of Images and Redshifts (SuMIRe) プロジェクトの第1ステップでもあります。SuMIReのもうひとつの柱は、多天体分光器、Prime Focus Spectrograph (PFS) で、現在設計および開発が進行中です。PFSはHSCの広視野補正光学系を共有し、HSCサーベイで作成される銀河カタログから選択された数百万個の銀河を分光観測します。分光観

測によって、銀河までの距離と銀河内の星とガスの物理状態を調べることができます。銀河の撮像データと分光データを組み合わせることで、さらに詳しく暗黒物質と暗黒エネルギーの性質に迫ることができると考

えています。私たちは、すばる望遠鏡による壮大な宇宙の国勢調査プロジェクトを始めようとしているのです。



HSCで撮影されたアンドロメダ銀河の全体像。すばる望遠鏡に搭載されたHSCの視野は非常に広く、満月9個分に相当する。カラー画像は特定の波長範囲の光だけを通す3つのフィルター (g, r, i) のデータを組み合わせて作成した。視野の端の部分で色がおかしい部分があるが、これは、視野の端は処理が難しく、観測した領域が3つのバンドで完全に一致してはいないためである (クレジット：HSC共同研究チーム/Kavli IPMU)。



2、8、32倍に拡大した画像。アンドロメダ銀河の個々の星が分解して見える。また、アンドロメダ銀河の後ろにある銀河も見られる（クレジット：HSC共同研究チーム/Kavli IPMU）。



Interview

ジョン・エリス教授に聞く

聞き手: 村山 斉

ヒッグス粒子は一つだけか? もっとあるのか?

村山 この一ヶ月でなんと3回も会いましたね。最初はパークレーのBrunoFest,¹ 次がノーベルシンポジウム,² そして今回はここです。

エリス ええ。カブリIPMUにいたのは最高ですね。最近は素粒子物理にとって実にエキサイティングな時代ですが、幾つか遅れを取り戻せたのも良かったですね。パークレーでは言うまでもなく超対称性が話題の中心でした。標準模型を超える物理として一番有望なものの一つです。ノーベルシンポジウムの中心テーマはヒッグス粒子³でした。

村山 そうでした。

エリス ちょっと注意しないといけないですね。「一つの」ヒッグス粒子と言うべきでした。

村山 その通り、公式発表によれば…

ジョン・エリスさんは2010年からキングス・カレッジ・ロンドンのクラーク・マクスウェル理論物理学教授職を務めています。それまで、1974年からはCERNの研究員で、1988年から1994年までは理論部門の責任者を務めました。1971年にケンブリッジ大学から博士の学位を取得しています。1982年にマクスウェル・メダル、2005年にポール・ディラック賞を、共に英国物理学会から受賞しました。1985年以来ロンドン王立協会のフェロー(FRS)、1991年以来英国物理学会のフェローであり、2012年には科学・技術に対する功績により大英帝国勲章コマンドー章(CBE)を授与されました。エリスさんは2008年3月以来、IPMU(現在Kavli IPMU)の外部諮問委員会委員を務めています。

エリス …LHCで「一つの」ヒッグス粒子が発見された。

村山 それに従うことにしましょう。今やヒッグス粒子が一つ発見された訳ですが、この分野の将来はどうなるのでしょうか。研究の進む方向は?

エリス 一つ、言うまでもなく理解したいことは、発見されたヒッグス粒子が幾つかあるうちの一つなのか、あるいは標準模型が予言する唯一のヒッグスなのかということです。LHCでは標準模型のヒッグス粒子とは少々性質の違う、ある種のスカラー粒子が現れるかもしれないと示唆する理論がいろいろあります。たとえば、複合模型です。しかし、複合模型のパラメータを調節してかなり標準模型に近づけない限り、そういう可能性は排除されると言い切れると思います。先ほど超対称性と言いましたが、超対称性はヒッグス粒子がたった一つではないと予言する理論の一例です。全部で5種類以上もあり、そのうちの一つが標準模型のヒッグス粒子に非常に良く似ていますが、完全に同じではありません。私は、超対称性の幾つかの特徴的な予言と標準模型の違いは、小

¹ BrunoFest 2013, Celebrating Bruno Zumino's 90th Birthday, Berkeley, May 2-4, 2013

² Nobel Symposium on LHC results, Krusenberg Herrgård, Sweden May 13-17, 2013

³ 原文ではヒッグス・ボソン。

さ過ぎてまだこれまでのデータには見えてきていないと思います。従って、LHCでの測定、あるいはひょっとすると他の加速器での測定をもっと精密化して、発見されたヒッグス粒子がどれだけ標準模型のヒッグス粒子と似ているか、あるいは違いがあるのか、はっきりさせたいですね。

村山 LHCで超対称性が発見される望みはどのくらいあると考えていますか？

エリス 私の友人たちにはちょっとがっかりした人もいますが、いつでも一番冷え込むのは夜明けの直前です。今、LHCは改良のため運転停止中で、この間にエネルギーをほぼ2倍に増強します。衝突頻度も上がります。そうなれば超対称性発見の見込みも十分あると思います。LHCのエネルギー領域で超対称性がはっきり見えるかもしれないと考える理由が色々ありますからね。

例えばその一つはダークマターです。ダークマターはある種の安定素粒子で、宇宙の始まりの時は通常の素粒子全てと平衡状態にあったとする理論が数多くあります。このような理論では、ダークマターの素粒子は重さがおおよそ1TeV以下、つまり陽子質量の1000倍程度以下であり、従ってLHCのエネルギー領域内にあるはずと期待されます。

超対称性はそういう理論の一

例で、他の例もあります。この可能性を本当に探るには、LHCの最高エネルギーに到達して衝突頻度を高め、ルミノシティを増し、そこで起きることを調べることが必要です。

村山 この問題に強い好奇心をもっている人たちがたくさんいます。もしもLHCで標準模型のヒッグス粒子に似ているもの以外に何も見つからないとしたらどうなるでしょうか？ それを乗り越えて進むにはどんな道があるのでしょうか？

エリス その場合は、明らかにLHCよりもっと詳細にヒッグス粒子を調べられる加速器の建設が望まれると思います。ただ、これは言うておかなければならないのですが、そう決定するには時期尚早であると私は思います。というのは、LHCが最高エネルギーで何を発見するか、調べる必要があるからです。しかし、もしLHCが最高エネルギーで本当に何も発見しなかったとすれば、明らかにLHCよりもっと詳しくヒッグス粒子を調べられる加速器の建設に高い優先度が与えられるだろうと思います。

しかしLHCはヒッグス粒子の研究で今まで成し遂げられたよりもずっと高い能力があることを思い出してみれば、つまりエネルギーが上がると生成頻度も

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。



衝突頻度も上がり、今まで観測されていない多くのヒッグス粒子の崩壊モードにも手が届くようになり、今までに観測された崩壊モードはもっと精密に測定されるようになるので、ある意味我々は既にLHCという形でヒッグス・ファクトリーを持っているのです。このことを忘れるべきではありません。

村山 加速器を用いる素粒子物理学は、恐らく終わりに近づいている、とさえ言う人もいます。標準模型を超える物理、つまりダークマターやその他を調べるには何か全く違うことを考えなければならぬというわけです。この問題について、あなたの意見を聞かせてください。

エリス そう言うにはまだ早いですね。一体、物理学者は理論物理学や実験物理学の終わりが見えてきたと今まで何回言ったことでしょうか？

村山 既に19世紀にケルビン卿が言ったみたいに…

エリス ええ。でも、大して重要でないと思われた2、3の事実が解明されたことから、勿論、量子力学と相対論へと発展しました。

村山 全くその通りですね。

エリス だから私はその種の議論は信じません。実際、私は逆に今は非常にエキサイティングな時代だと思います。なぜなら、LHCは既に初期の運転で、今まで知られているのと完全に異なる新粒子を暴き出したわけですから。それはボゾンだったので、スピンをもたない初めてのボゾンです。

村山 そうですね。

エリス 他のボゾンはすべてスピン1をもっています。ヒッグス粒子はこの点で確実にユニークです。そのため、ヒッグス粒子については様々な理論的問題

があります。また、ヒッグス粒子はいくつかの宇宙論的な問題の解答に関係しているかもしれません。ですから、私は今、理論的にも実験的にも素粒子物理学の全く新しい時代の幕が開いたのだと考えています。

村山 理論の立場で言うと、私が見ついているのは最近若い人たちの一部はがっかりしているかもしれないということです。未だに新しい物理の兆候がなく、進歩があったとはいえ、議論は全て、この「一つ」のヒッグス粒子の性質とその先の何かを測定するため、もっと実験に力を注ぐべきだという方向を示しているからです。この分野が進展している中で、現段階での理論家の役割とは何でしょうか？

エリス 以前はこのような基本的なスカラー粒子が存在するかどうか、合理的な疑いをもって来たかもしれないと思います。

村山 私自身も含めてそうでした。

エリス 勿論「基本的」と言うときは常にとりあえずそう言っているだけで、実際はある小さなスケールまでそう見えるものを指しています。今や、これまで調べたレベルで点状のスカラー粒子に見えるものが発見されたわけです。私は、これは本当に注目すべきものと考えます。多くの複合模型は今や棚上げしてしまえます。そして、あなたも含めて我々の大多数が思い悩んできた問題、すなわちnaturalness（自然らしさ）の問題に、今までよりはるかに鮮明に焦点が絞られたわけです。また、恐らく例えばインフレーションのような宇宙論的問題と関係があり、既に述べたように何らかの展望を与えてくれます。宇宙のインフレーションは実は「唯一の」ヒッグス粒子

が原因かもしれないという提案は、私はうまくいくとは思いませんが、非常にチャレンジングです。

村山 そうですね。あれはものすごく野心的です。

エリス 確かにものすごく野心的ですが、何かを成し遂げようとするなら野心的でなければなりません。そういうとんでもない提案をちょっと調べてみると、スカラーボゾンの物理と宇宙論の両方について結構多くのことがわかるかもしれません。

村山 本気で理論が果たす役割があると考えているのですね。

エリス 間違いなく私はずっと忙しいですね！

素粒子物理の大問題の一つ、フレーバー

村山 いや、それは結構ですね。すごく重要なことです。ここで話題を変えましょう。今や私たちはもう一つのプロジェクトに加わりました。加速器を用いる素粒子物理を手掛けるべきであると外部諮問委員会から勧められた結果です。実際はこれから行われるBファクトリーでの実験、Belle IIに参加しています。加速器を用いる素粒子物理において、この方向をどのようにお考えですか？

エリス 素粒子物理における大問題の一つが、私たちが言うところのフレーバー問題です。なぜクォークとレプトンには多くの異なる種類があるのか、また、なぜ観測されているような混合をするのか。Belle II プロジェクトでは、非常に明確にその理解を深めようという目標が設定されています。LHCでもその目的の研究が行われています。Belle II とLHCでできることは、実に好都合なことに互いに相補的です。

LHCではできるがBelle IIではできない類の測定があり、またその逆もあります。Belle IIの準備が進んでいることは結構なことです。LHCが稼働した最初の段階で2番目に重要な発見は、実はフレーバー物理の分野でなされたということは、多分言及しておく価値があると思います。それは、標準模型で予想される B_s 中間子の $\mu^+\mu^-$ への稀崩壊で、その決定的な証拠がLHCで得られました。概ね標準模型と一致した結果が得られています。今後、私たちが予言できる理論的精度のレベルで本当に一致するのか、あるいは違いがあるのか見極めるまで測定を続けるべきであると思います。

村山 そうですね。私はLHCb実験による B_s 振動の研究にも強い印象を受けました。とても美しいデータで、 B 中間子が振動する様子をはっきりと示しています。実に見事です。

エリス B_s 中間子の $\mu^+\mu^-$ への崩壊は、これまでのところは成功であると思います。確かに実験家にとって成功ですが、それだけでなく標準模型にとってもこれまでのところは成功です。しかし、他にも多くの謎があります。理論も実験もこの点は不明確なのですが、チャーム中間子の崩壊で、標準模型で予想されるかもしれないレベル以上の物質-反物質非対象があるかもしれません。 b クォークとチャームクォークの物理には他にも多くの異常がありますが、Belle IIはそういった問題に取り組むことができます。

村山 素粒子物理学者の間では、エネルギーフロンティアでは相互作用や対称性の理解に大きな進歩を遂げているのに、フレーバーの方では批判があって、その一つはクォークとレプ

トンの質量と混合のパターンの起源が分からないため、エネルギーフロンティアに比べて新しい根拠に基づく理解がほとんど得られていない、というものです。いずれ何らかのブレイクスルーがあると思いますか？言い換えると、フレーバー物理の時代の将来をどう考えますか？

エリス 確かに、ある意味で実験家の方が我々理論家より先を進んでいることは明らかです。第一に、私たち理論家がフレーバーについて良いアイデアを持っているとは思いません。アイデアはたくさんありますが、余り説得力のあるアイデアというものはありませんね。それがクォークセクターの実情ですし、ある意味ではニュートリノセクターではもっとそうだとと言えます。なぜならニュートリノはクォークと全然違う混合の仕方をするからです。あなたは、こうなっているのかもしれないというアイデアを出しましたが…

村山 あなたの好みではありませんでした。

エリス そのモデルは、基本的にモデルは存在しないと言っているのです、私は好きになれませんね。

村山 いや、全くその通りです。データを理解するために実は何か非常に特殊なタイプのモデルが必要だという仮説をテストしているのですが、これまでのところ、データにはそういう兆候はありません。なぜランダム行列のアイデアを使うかという、そういうことなのです。

エリス そうですね、もっと手がかりが必要だと思います。フレーバー混合のパラメーターがたくさん測定されたため、ひょっとすると既にこれまでに十分な手がかりがあると思ったのか

もしれませんが、あなた以外は浅はかだったようで、答えが見つかるとは思えません。

村山 いやいや、特に私がそうだったと思いますが…

エリス 現在進行中の状況を反映するモデルを得るには、今私たちが知っている混合のパラダイムが次の段階で本当にうまくゆくのか、調べるべきであると思います。一方ではLHCでLHCb実験がこれをやっている、他方ではBelle IIがやろうとしています。

村山 その方面のフロンティアの一つは $\mu \rightarrow e\gamma$ や $\mu \rightarrow e$ 転換のようなレプトンのフレーバー非保存で、以前あなたは随分一生懸命研究されていました。それを追究することも成果が上がる方向とお考えですか？

エリス そうですね、ある意味でフレーバー物理の未踏のフロンティアだと思います。クォークの間の混合が観測され、ニュートリノの間の混合が観測されました。クォークの場合、実際は、電荷 $2/3$ のタイプのクォーク同士の混合と電荷 $-1/3$ のタイプのクォーク同士の混合というように違うタイプの混合が観測されています。このようにあらゆる所で混合とフレーバーの効果を発見されているのですが、荷電レプトンではまだ見出されていません。

村山 その通りです。

エリス レプトン、 μ 粒子、 τ 粒子。明らかに、可能な限りの限界まで極めるべきです。それはBelle IIの活躍が期待できる場です。SuperKEKB加速器は、例えば、膨大な数の τ 粒子を生成するのですから。

村山 そうですね。

エリス J-PARCでの μ 粒子を用いる固定標的実験が、 μ 粒子のフレーバー非保存を発見する可

能性もあります。こういったことは私がすごく興味をもっていることです。

素粒子物理と宇宙論の関連

村山 さて、素粒子物理と宇宙論の関連についても話が出ました。ダークマターがこの2つの領域を結びつける議論で最も重要な話題であることは明らかです。今後、この2つの分野が一緒に進むとして、どのように進むのでしょうか。ダークマターが唯一の共通する話題なのか、あるいは他にも何かあるのでしょうか？この2つの分野の共通部分は将来どうなるのでしょうか？

エリス ダークマターの問題を本当に解決するためには、加速器実験と非加速器実験の物理学者が協力することになると思います。非加速器実験で何かダークマターの素粒子の信号らしきものが見出されるかもしれないということは、想像に難くありません。しかし、その性質によっては実験室で調べることが必要になると思います。ここで加速器実験が役割を果たします。逆に加速器実験で異常な欠損エネルギーをもつような事象が観測されるかもしれないと想像できます。

村山 そういものが見つかる面白くなりますね。

エリス そう、見つければ面白くなります。まあ、いずれにせよ面白いのですが。

村山 そうですね。

エリス しかし、見つけたものを本当にダークマターであると同定したいとすると、それが非常に長寿命の素粒子であると突明かに加速器実験では不可能です。

村山 その通りです。

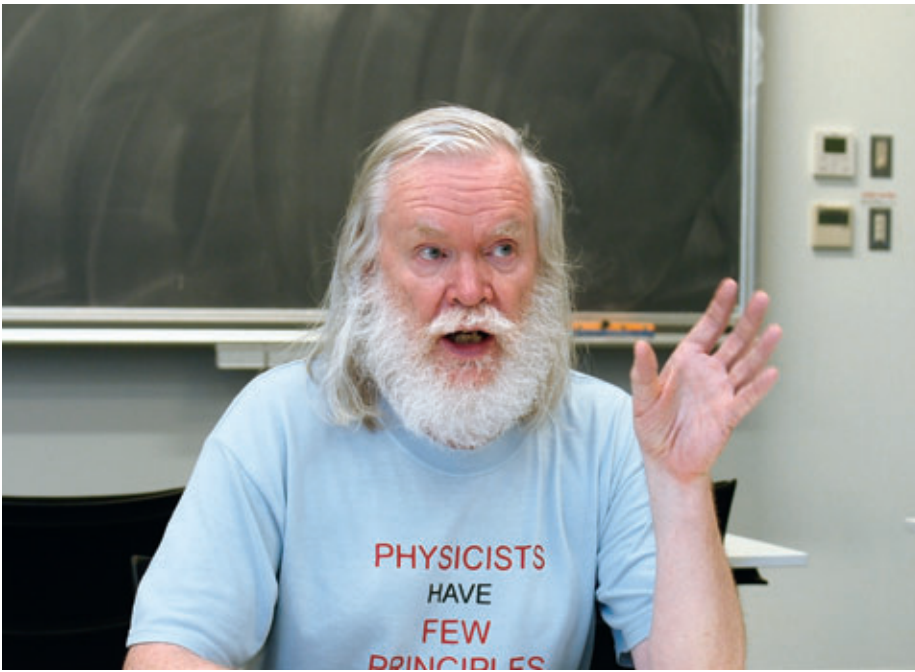
エリス たった50ナノ秒で通り過ぎてしまったら、寿命が100ナノ秒なのか100億年なのか分かりません。

村山 そうですね。

エリス ですから加速器実験で観測したとダークマター実験で観測したことを関係付けることが必要です。ダークマター実験には違う種類のものがあり、その一つは地下の実験室で起きる散乱を直接探すものです。それから、銀河の周りを飛び回っていると思われるダークマター粒子の消滅反応を探すものがあります。恐らく、ダークマターの一部は太陽や地球の内部に捉えられて消滅し、多分、観測できる粒子が発生します。このような非加速実験には色々な種類のものがあります。先ほど言ったように、非加速器実験は実際は加速器実験と協力するべきなのです。

村山 その類の信号について言うと、AMSは宇宙線中の陽電子の割合を観測して、一寸もどかしいような、でも実際は美しいデータを報告しました。あなたはこのデータをどう考えていますか？

エリス そのデータをダークマターと解釈するのはとても無理があると思います。ダークマターの消滅モデルの中にはそういう形のエネルギー分布を示すものもあるかもしれませんが、信号の大きさがとにかく大きすぎるのが難点です。そんなに大きいならば、以前の実験で見えていたはずで、AMS実験の測定は素晴らしく見事で、エネルギー分布の形をはっきり示していて、形だけでダークマターのモデルを幾つか排除してしまっています。しかし、信号の大きさは理解しがたいですね。



もし消滅断面積の大きさについて一般的な議論を採用し、ダークマター粒子の密度について常識的に見積もれば、データは再現できません。唯一の逃げ道はダークマター粒子の凝集を仮定することですが、信じ難いほど大量に凝集させなければなりません。

村山 そうですね。100倍とか…

エリス 1,000倍、10,000倍とか… とにかく、とても難しいですね。多分、何か天文学的な原因があるのだと思います。それについては2つの説があると思われる。一つは、近傍に何か天体物理学的な源があって、従来の宇宙線のモデルで考慮されない余分な陽電子を注ぎ込んでいるというものです。もう一つの可能性は、従来の宇宙線のモデルにはどうも不十分な所があって、観測される陽電子数は、陽電子が銀河からどのように拡散するか、またどのようにエネルギーを失っていくか、

それらの間の何らかの相互作用に原因があるのではないかというものです。そういったものを表すパラメーターをいじくと、観測されたような大きさの分布が得られるということになるかもしれません。まだこの問題の結論は出ていないと思います。

村山 一つこの問題について明確になっていないのは、こういう解釈が正しいかどうかを、いつ、あるいは、どうやって本当に決着できるかということです。なぜなら宇宙線の伝播とか、陽電子の起源とか、パルサーとか、余り良く分かっていないからです。はっきり言って、何ができるのでしょうか。

エリス 陽電子を観測して、一つ確実にできるであろうことは、ある種の異方性を探すことです。もし近傍に陽電子源があれば、ある程度は陽電子の到来方向に痕跡が残ると期待できるでしょう。陽電子は銀河系の中を漂ううちに、どこから来た

のか情報を失ってしまいますが、それでも何らかの統計的情報はあるはずで。これまで、AMSも他の実験も異方性は全く観測していません。

村山 その通りです。

エリス しかし、異方性の観測は進めるべきです。もしかすると興味深い信号かもしれないと思います。もう一つ明らかなことは、天体物理学的な発生源あるいはダークマターが集積している所から到来するかも知れない、他の種類の粒子を探すことです。その一つは明らかに反陽子ですね。実際AMSの陽電子の信号を説明しようとするモデルの多くは、信号の大きさがものすごく大きいという事実は気にしないとしても、実際は観測されていない反陽子も見えるべきだと予言します。

村山 そうですね。

エリス AMSは、多分比較的早い時期に反陽子のエネルギー分布について新しい測定結果を発表するでしょう。そうなればも

っと情報が得られます。宇宙線中で反重水素を探すという別の可能性も示唆されています。ダークマターの消滅反応からの信号があるとすれば、その方法を用いることにより通常の宇宙線によるバックグラウンドから区別して信号を取り出すことがもっと容易になるかもしれません。それがもう一つ探すべきものです。

村山 明らかなことですが、もう一つの大きな難問はダークエネルギーです。ダークエネルギーの研究から何が得られると考えますか？

エリス 答えるのは難しいですね。明らかにダークエネルギーの密度というものは存在しており、問題はその密度が一体、時間とともに変化したかのどうか、変化したとすればどのような時間の関数なのかです。私たちは、現在から赤方偏移が1程度、あるいはそれ以前までさえ遡るような膨大な宇宙論的時間を通じて、そのエネルギー密度がどのように変化したのか測定可能な手段を手に入れようとしていますし、カブリIPMUではあなた達も自前で同じような手段を手に入れようとしています。ダークエネルギー密度が完全に定数である可能性もあります。その場合、それは文字通り「宇宙定数」ですが、何というか… 実は、今、一番つまらない可能性と言おうとしたのですが、実験の観点からは確かにつまらないかもしれませんが、理論の観点からは最も手強いものかもしれません。というのは、その数は…

村山 そう、何の特徴もない数ですね。

エリス どうやったらそれを説明できますか？ だから、多くの理論家はダークエネルギー密度

が実際は緩やかに変化しているという考えを好みます。恐らく、やがてはゼロに緩和するというのは、非常に魅力的な考えです。実際それでうまくいくかどうかは、現在行われている実験が教えてくれるだろうと思います。

どうすればKavli IPMUの将来を確保できるのか？

村山 それは素晴らしい。では、ここで話題を変えましょう。今回あなたはKavli IPMUの外部諮問委員会に出席されるために来られたわけですね。実は当初から委員を務めていただいているので、IPMUとして発足した当時のことや、現在どういう状況か、ご存知です。全般的な印象をお話し頂けますか？

エリス 「非常に成功した」という意味のgangbusterという単語がぴったりですね。Kavli IPMUは、うらやましいくらいのブランドを確立しました。実際、関連研究者から、世界的な中核的研究拠点と認識されています。そうなることが日本政府から託されたあなたの使命でした。

村山 その通りです。

エリス Kavli IPMUは、理論と実験の両方で数多くの興味深い進展の推進力になっていて、それも日本の中だけではなく、国際的な共同研究としても行われています。日本政府は相当喜んでいて違いないと思います。予算を付けたのが大成功だったのですから。

村山 そういって頂いて、すごく嬉しいです。勿論、まだ心配なことがあって、その一つは、WPIの補助金が、仮に5年間の延長があったとしても（当初の10年間で終わる）今から4年後には段々減り始める可能性がある



り、そういう状況でどうやってこの研究機構の将来を確保できるかということです。政府に対して私たちの立場を強めるために、実際、何ができるのでしょうか？どんな取り組みをするべきでしょうか？

エリス どんな取り組みをするべきか、ですか？純粋に科学的なレベルではKavli IPMUは素粒子理論と、素粒子実験では加速器実験、非加速器実験の両方で、最もエキサイティングな進展に関わっており、非常に良い研究プログラムを持っていると思います。それから、既に進んでいるもの以外にも、既に話の出たBelle IIや、スーパーカミオカンデの改良や、ダークエネルギーの実験などに加わっています。

今現在、科学の見地から何かもっとできることがあるのか、ということについては、私は明確な答えを持っていません。しかし、研究には別の側面があります。政府や研究資金配分機関に、基礎科学とは、試しに一寸

だけやってみて、すぐ別のことを始められるようなものではない、ということをお納得させる必要があると思います。

村山 全くその通りです。

エリス 基礎科学とは、役に立つまでに何十年という時間がかかるものです。

村山 何世紀もかかることもあるかもしれません。

エリス まあ、何世紀もかかることがあるかも知れませんが、私が言っているのは20世紀の物理を見れば、つまりは量子力学ですが、インターネット上にこういう話載っているということです。21世紀初頭のアメリカ経済の30%以上は、20世紀の物理に立脚しているそうです。

村山 それは面白いですね。

エリス まあ、本当かどうかは知りませんが、大論争になることは間違いないと思いますが、エレクトロニクスやレーザーや、その他色々、20世紀の物理、特に量子力学に依存するもの

膨大で非常に長いリストを作ることができるのは確かな事実です。現在は、相対論でさえ衛星航法システムやGPSやその他に利用されています。非常に深遠な発見である反物質は、1920年代末に理論家により仮定され、宇宙線中に発見されましたが、今や日常的に医療診断に用いられています。毎年何千人もがPET（陽電子放射断層撮影装置）による精密検査を受けています。

こういった例は、基礎物理学の進歩が正に社会一般や経済に役立つが、それには数十年の時間が必要ということを示していると思います。それを支えるのが政府の役割であり、民間企業にそれを期待するのは不合理です。日本の企業は恐らくヨーロッパやアメリカの企業より長期的な視点をもっていると思いますが、企業が行う研究開発プログラムという観点からは、10年を遙かに超えるような長期的視点は期待できないでしょう。

ですから、政府が長期的視点をもつように注意することが必要です。役に立つまでに長い時間を要するという事は、研究プログラムも5分や5ヶ月、あるいは5年で終わるようなものではないことを意味します。そう、もっと長い時間がかかります。

村山 そうですね。

エリス LHCについて随分話しましたね。初めてLHCが着想されたのは1984年のことですが、今後少なくとも10年、多分20年は稼働するものと思われまます。私たちが話した他のプロジェクトも、全て長い時間スケールを要します。日本政府も外国の政府と同様、基礎科学における長期的な最先端研究に予算を付けるメカニズムを考え出す必要があると思います。物理だけが特別というわけではありません。私たちが物理について話をしましたが、それが唯一の例ということではありません。政府はそういったものは簡単にやめられないものであると認識するべきです。申し立ててすぐに許可される短期離婚のようなものではなく、長期に関わらざるを得ないものです。

科学者にとっての重要な仕事、一般市民との関わり

村山 基礎研究がこんなに役に立つこと、あなたが言われるように、物理だけでなく全分野の基礎研究を、社会や人間に対する長期的な利益となるものであるが政府の支援が必要なものである、と伝えることが必要ですね。こういった点を効率的に政府高官や政治家や一般市民に伝えるにはどうしたらよいのでしょうか？

エリス 一つはメッセージです。私の考えているメッセージ

がどういふものか、今議論しましたね。そのメッセージを発信しなければなりません。市民と関わりをもつことは、物理学者であれ科学者であれ、その仕事の極めて重要な部分です。私たちは象牙の塔に閉じこもってお金が降ってくるなんて期待できません。自分たちがやっているのがどういふことなのか、説明しなければならぬし、それを一般の人の言葉で説明することを身につけなければなりません。

時には期待していないのにそうなることもあります。ヨーロッパで、またCERNで、一般の人たちがヒッグス粒子に注目してくれたことは私たちにとって非常に運が良かったと思います。関係国の政府も動かしたと思います。彼らは基本的に共感してくれています。日本でも間違いなくある程度までは同じだと思います。

村山 全く、その通りです。

エリス あなたは個人的には随分とそういうことに関わっていますね。私たちは同僚にもそうするべきであると納得させなくては…多分もっと一生懸命やっている人もいると思いますが…

村山 本当ですね。あなたは「科学大使」とでもいった感じで、科学の重要性を一般市民に伝えるためにかなりの時間を振り回しています。その影響は間違いなく極めて大きいと思います。こんな話を聞きましたが、ヨーロッパでは若者の科学や数学への進学率が全体的に20%くらい増えていて、メディアに度々登場し、非常に目立っているCERNの影響が一つの理由だということですね。

エリス 多分LHCの効果はあると思います。実際、興味深いことに、数年前イギリスの科学大

臣がCERNを訪問し、LHCの始動はアポロの月面着陸と同様のインパクトを与えるのではないかとと思うと語ったのです。

村山 なんと！

エリス 当時私は「まさか」と思いましたが、今は彼の言った通りだったと思っています。多分なりとも彼が正しかったことを歴史が証明しました。イギリスでは概ね物理の進学率が上がったことは確かです。

村山 素晴らしい。

エリス 学生の質も上がりました。実際、私がキングス・カレッジ・ロンドンで同僚の一人と話していたときの事です。その週の初め、彼は試験の答案を採点していたのですが、私がオフィスに入っていくと「この学生たちはでき過ぎだね」と言うのです。人数が増えただけでなく、質も上がったのです。勿論、キングス・カレッジでは学生が物理に進む時の最低合格点を上げることにしました。

村山 結構なことですね。私たちへのアドバイスは基本的に同じ、つまり「科学で素晴らしい成果を上げよ、そして発信せよ」ということですね。

エリス そうですが、さっき言ったように、あなたも私も同僚を説得して巻き込むことが必要だと思います。

村山 実際は簡単なことではないですね。

エリス そうですね、一人や二人の「大使」だけに頼るわけにはいきません。若い人たちを巻き込むことが特に重要だと思います。明らかに若者は若者から信用されます。結局の所、私たちが影響を及ぼそうとしているのは「人」なのです。私たちが提供できるものとして、一つには科学、技術、数学などへの若者の興味を増進させることが挙げ

られると思います。あなたは若者達に語りかけていますか？それが一つ大事なことです。でも、私は白髪が増えましたし、あなたも白髪が出てきましたね。

村山 ええ。

エリス 一緒にこういうことに努力してくれる若い人達を見つけられると良いのですが。余り白髪はないだろうし、当然とてもエネルギーが豊富です。

村山 やあ、それは良い。そうしましょう。何かまだ私たちにいただけるメッセージがあればお願いします。

エリス いや、特に。Kavli IPMUは良くやっていると思います。自信をもって良いですよ。あなた個人としては、自分のやっていることに自信をもっては明らかです。とにかく、外に出て行って、私たちがとても面白いと思ってやっていることを社会に伝えましょう。

村山 ええ、やりましょう。どうもありがとうございました。

エリス どういたしまして。

Our Team

鈴木 尚孝

すずき・なおたか 専門分野: 宇宙物理学

Kavli IPMU 助教

あの山の向こうには、どんな景色が広がっているのだろう？ あの地平線の先にはどんな世界があるのだろう？ そんな人々の冒険心と好奇心が、古来より私たちを宇宙の観測へと駆り立ててきました。自分もその長い歴史の流れの中を漂泊しながら、新天地を目指す一人です。これまでカリフォルニア大学にて最先端の観測機器を駆使して、この宇宙を形つくっているパラメータを測定する研究を進めてきました。宇宙創成1秒後の光と物質の割合を精確に測定する研究、ハッブル宇宙望遠鏡を使い遠方の超新星を観測し、その距離を精確に求め、暗黒エネルギーの存在を99.999%の確度で観測的に証明し、138億年の宇宙の歴史の中で、70億年前に減速膨張から加速膨張に転ずることを確かめる研究等を行いました。Kavli IPMUでは、世界中の望遠鏡やすばる望遠鏡の新しい装置を使って、みなさんと一緒に私たちがまだまだ知らない世界を探検



し、前人未踏の深宇宙や暗黒エネルギーの謎に取り組みたいと思います。世界中の天才達が、心を合わせ宇宙の謎に真摯に取り組む姿に憧れと人類の未来を感じます。次世代の望遠鏡が宇宙生命を発見し、世界の歴史を変えていく日が必ずやってくると信じています。

Our Team

霍 然

フォーラム 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私の研究対象は標準模型を超える素粒子物理学です。理論に現れる素粒子の種類がほぼ2倍になる超対称は標準模型の拡張として飛びぬけて有望であり、3つの相互作用が一つに統一される基本的スケールまでの物理を予言します。ダークマターは素粒子物理学に起源をもつはずで、超対称性をもつ多くの模型で説明可能です。また、宇宙の物質と反物質の間の非対称性(物質優勢)の起源も、電弱相転移でのバリオン非対



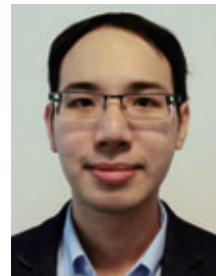
称生成やレプトジェネシス(まず高温でレプトン非対称が生成され、それがバリオン非対称に転化)のような素粒子物理学のメカニズムで説明可能です。

ティラサン・カンタウィット

Tirasan Khandhawit 専門分野: 数学

博士研究員

私は低次元トポロジーと幾何学的トポロジーを研究しています。特に、3次元及び4次元多様体のサイバーグ-ウィッテン・フレア理論を中心に研究を進めています。現在はManolescuおよびKronheimer-Manolescuによるフレアホモトピー型(安定ホモトピー対象で、その適当なホモロジーがモノポールフレアホモロジーを与えるもの)の構成を一般の3次元多様



体に拡張する研究を行っています。さらに、パウアー・古田の安定ホモトピー不変量を、一般の境界付き4次元多様体に拡張しようと試みています。

ジョナサン・マルツ

Jonathan Maltz 専門分野: 理論物理学

博士研究員

私はFRW-CFTおよびdS-CFTによるド・ジッター空間と初期宇宙に関する宇宙論の定式化を中心に研究を行っています。私が興味をもっているものには、数理論物理学、リューヴィルの定理、非臨界弦の理論、それから種々の超弦理論を統合するM理論と全ての超弦理論を互いに結びつける双対性の定式化の拡張などがあります。また、私はヴァシリエフの高いスピンの拡張された重力理論とそれがAdS-CFT対応の新しい極限および行列模型の種々の側面を探る上でどのように関係しているかについても研究を進めています。私は場の



理論とM理論の非摂動的側面にも興味があります。

私はこれまでスタンフォード大学の大学院生として行ってきた学際的、多面的な研究の経験を初めてポスドクとして継続する訳ですが、その目的にはKavli IPMUは完璧な場と言えます。

難波 亮 なんば・りょう 専門分野:宇宙論

博士研究員

初期宇宙のインフレーション期における粒子の相互作用が現在の観測にどのような影響をもたらしているのか、といったことをこれまで主に研究してきました。異なる粒子同士の相互作用は粒子（量子）の生成を誘発し、今度はこの生成された量子が宇宙論的摂動と相互作用を起こし、この作用がインフレーション期において顕著になれば、非ガウス性や重力波といったものとして観測できるようになるのです。場合によっては、このメカニズムで生み出された重力波は地上の重力波



検出器によっても観測できるほど大きな値にもなり得ます。また、宇宙背景放射や宇宙の大規模構造の統計的性質に関して、ベクトル場により空間の回転不変性が破られ、その結果、統計的等方性の破れとして観測し得るモデルについても研究してきました。

岡部 信広 おかべ・のぶひろ 専門分野:天文学

博士研究員

すばる次期主焦点カメラ、ハイパーシュプリームカム（HSC）の非常に素晴らしいレンズデータによる、銀河団の統計的弱い重力レンズ研究は、平均的球対称動径プロファイルや、ハローの形状、サブハロー質量、それらの赤方偏移進化といった、銀河団内の暗黒物質分布の特徴を詳細に調べることができます。これによって、小さなスケールでの冷たい暗黒物質に基づく構



造形成モデルの検証が可能になります。私は、これらの研究や、多波長データセットに基づく暗黒物質とバリオンの相互作用にとっても興味があります。

ジェイムズ・ウォルブリッジ James Wallbridge 専門分野:数学

博士研究員

現在、私は、導来代数幾何と高次圏論から得られたツールを用いて物理学の場の理論についての理解を深める研究を行っています。特に、古典的な場の理論を拡張して量子場の理論を構成するため、幾何学的に量子化することの意味を研究しています。高次圏論的観点から量子化を理解することは、既知の物理系の一部を量子レベルで解明するだけでなく、これまでは意味



のある量子化を拒んできた理論に伴う幾つかの問題に取り組むことになるかと期待されます。

Our Team

カブリIPMUフォーカスウィークワークショップ

小規模スケールの宇宙構造による宇宙論

アレクシー・レオト [Alexie Leauthaud](#)

Kavli IPMU 助教

スルド・モレ [Surhud More](#)

Kavli IPMU 博士研究員

高田昌広 [たかだ・まさひろ](#)

Kavli IPMU 教授

7月22日から26日まで「小規模スケールの宇宙構造による宇宙論」に関するカブリIPMUフォーカスウィークワークショップが開催され、世界中から弱い重力レンズ、銀河のクラスタリング（空間集積度）統計量、（銀河の固有運動による）赤方偏移歪み効果、および銀河団などの小規模スケールの宇宙構造の天文観測から宇宙パラメータ、あるいは修正重力理論の可能性を調べることに興味をもっている研究者が集まりました。（ここで小規模スケールとは、数Mpc（数10万光年）より小さい距離スケールのことです。）

この小スケールの観測手段の情報を宇宙論に使う上での困難は、私たちの銀河形成に関する物理の理解がまだ十分ではないことです。ワークショップでは、如何に銀河形成に付随する不定性、およびその影響を考慮しながら、観測量から興味ある宇宙論的情報のみを引き出せるかについての方法を議論することが焦点の一つでした。

ワークショップはこの分野の進展の現状と今後の課題について、ディスカッション・リーダーの司会による座談会形式で行われました。初日の議論は、如何に様々な観測量を組み合わせるにより、現象論的に銀河形成について理解できるか、また同時に宇宙論パラメータを知ることができるかという問題について、どのようなアプローチが有効か議論しました。このとき、冷たいダークマターモデル（CDM）の数値シミュレーションは、小規模構造から宇宙論研究を行う

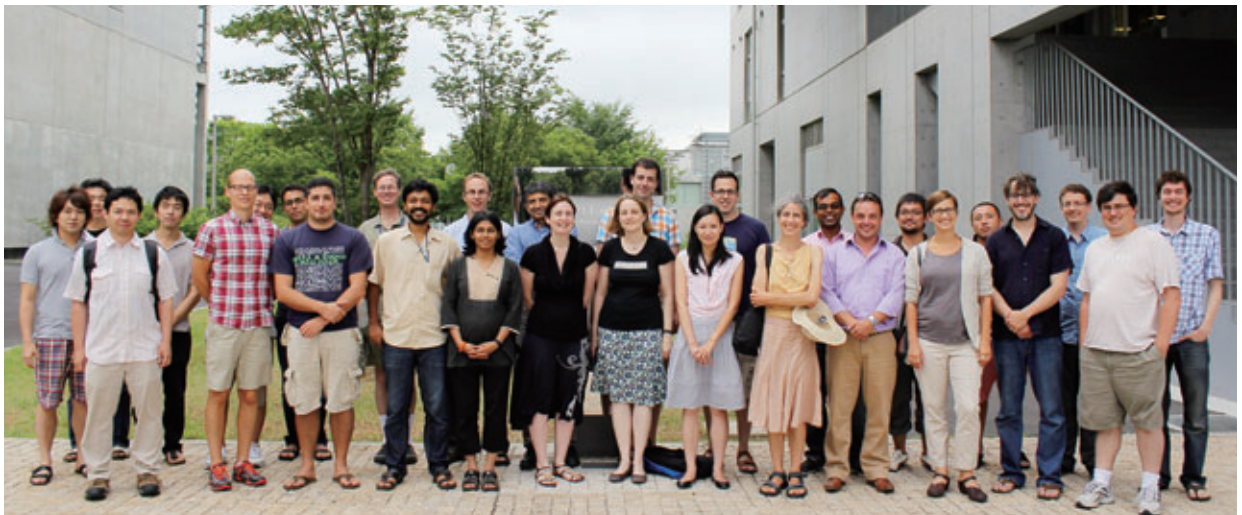
ための主力となる手段です。2日目には、そのような研究にどのような精度かつ統計データサイズの数値シミュレーションが必要かを議論しました。3日目は、固有運動のために銀河の正確な位置を測定できないことによる赤方偏移歪み効果の議論に専念し、この歪み効果をモデル化する方法の最近の進展について議論がありました。4日目には、バリオン（ガス物理）に伴う物理がダークマターの空間分布に及ぼす影響、またそのバリオンの影響を現象論的にパラメータ化できるか、について議論しました。これは現在進行中あるいは計画中の大規模銀河サーベイから得られる宇宙論的重力レンズ効果から、最大限の宇宙論的情報を引き出すために重要な課題です。また、重力理論の修正について議論し、大規模構造の観測量から重力理論をテストする方法、さらに修正重力理論のモデルに基づくシミュレーションの現状について議論しました。最終日は、大規模な銀河撮像サーベイから銀河団を見つけ出す方法とその銀河団カタログで可能になる宇宙論について議論しました。

また、最終日にはこのワークショップの2つのまとめが呼び物でした。一つはフランク・ヴァンデンボッシュ氏による「楽観主義者」のまとめ、もう一つはマーティン・ホワイト氏による「懐疑主義者」のまとめです。楽観主義者のまとめは、ワークショップで議論された、小規模スケールの宇宙構造をモデル化する際に困難があるものの、モデルの不定性および銀河形成

に関するパラメータの不定性を考慮した後でさえ、これら小規模構造の観測量は宇宙論に有用であるという良い結果を強調しました。また、現在の宇宙の物質量（密度パラメータ）と物質分布の非一様性（揺らぎ）の振幅パラメータに関して、最新の宇宙マイクロ波背景放射観測衛星Planckと小規模構造の観測量から得られた結果が一致しないことが指摘されました。一方、懐疑主義者のまとめは素粒子物理のコライダー実験と対比して示されました。宇宙論パラメータの精密測定は恐らくバリオン音響振動実験や宇宙マイクロ波背景放射実験のような（素粒子物理の電子加速器に似た）クリーンな観測手段に任せるべきで、他方、小規模構造の観測手段は（陽子加速器に似て）精密測定よりも発見のための優れた手段ではないか、という指摘があ

りました。また、小規模構造の観測手段が銀河形成の物理の不定性に対して余り影響されない柔軟性を有していることを示唆している結果も重要であると強調しました。さらに、将来の観測キャンペーンを計画する上で役立たせるために、各手法の宇宙論への依存性のテスト（研究ワークショップで議論された幾つかのアイデア）を実施する必要性を指摘しました。

ワークショップで議論されたトピックスは今後のハイパー・シュプリームカム（Hyper Suprime-Cam）やプライム・フォーカス・スペクトログラフ（Prime Focus Spectrograph）による銀河サーベイを宇宙論に最大限活用するために必要な研究の方向性を見いだす上で極めて重要なものでした。



Workshop

カブリIPMUスクール コライダー物理の将来

サティアナラヤン・ムコパティアイ Satyanarayan Mukhopadhyay
Kavli IPMU 博士研究員

2013年7月16日から19日までカブリIPMUスクール「コライダー物理の将来」が開催され、成功裏に終了しました。専ら将来のコライダー物理の展望に力を注ぐスクールを開催するアイデアは、第1に最近のCERNのLHCにおけるヒッグス粒子らしいボゾンの発見と、引き続きLHCで行われたその性質測定の初期的な結果、第2にLHCの性能改善後の実験で見込まれるヒッグス粒子に関する豊富な新しい情報、第3に近い将来ヒッグス工場、あるいは精密測定用加速器としての国際リニアコライダー（ILC）が建設される見通し、の3つの理由により非常にタイムリーなものでした。これら3つの話題はそれぞれ幅広いものですが、スクールではこの分野をリードする専門家の12の講義と参加者によるポスターセッション、およびこのテーマに関する大きな問題とその解決に向けて有望な方向についてのパネルディスカッションがあり、全部の話題が十分深く取り上げられました。

ほとんどの講師がヒッグス粒子の物理の異なる側面に焦点を当てたことは当然と言えます。そのトピックスは、有効場の理論の枠組みによるヒッグス粒子の性質の標準模型からのずれのパラメーター化とその測



定の現状からATLAS実験とCMS実験が発表したデータを適切に解釈するために必要な統計の重要な概念に及びました。ヒッグス粒子生成断面積の理論的計算の現状、next-to-leading order（摂動の最低次の次の次数の微小量）まで補正した計算による高エネルギー衝突事象のモンテカルロ生成プログラム、および高次のQCD計算とパートン分布関数の改良に関する将来の目標についてもレビューが行われました。トップクォークの物理における新しい手法についても議論されましたが、これはLHCにおける新しい物理の探索で非常に重要であることになるかもしれません。

スクールはカブリIPMUの村山斉機構長のオープニングレクチャーで開始されました。その講義は、提案されているILCのような高精度実験用加速器の背後に

ある物理について広く概要を示すと共に、ILCに伴う難しい課題とILCがヒッグスポゾンを含む弱い相互作用スケールでの新粒子の性質をどれだけの精度で決定できるかについても触れるものでした。また村山さんは、ILCの誘致に関して日本の現状についても話してくれました。その後連日、実験家たちがLHCの高ルミノシティ実験プログラムとILCの加速器及び測定器

の開発状況と物理の目標についての詳細を、徹底的に講義しました。

アジア全域から約45人の大学院生と博士研究員が参加しましたが、大半は日本、インド、韓国、台湾、及び中国からの参加者でした。また、彼らは最近の研究をポスターセッションで発表しましたが、非常に熱心で活発な議論が展開されました。



WPI 平成25年度現地視察

2013年9月5日、6日の2日間、Kavli IPMU 研究棟(初日)と本郷キャンパスの伊藤ホール(2日目)を会場としてWPIの平成25年度現地視察が行われました。今回は従来通りのWPI拠点としての進捗状況視察に加え、政府からの支援期間終了後、ホスト機関の東京大学がKavli IPMUの恒久化をどのように考えているかについての視察者側と東京大学及びKavli IPMU側の議論も行われました。このため、視察団は黒木登志夫プログラムディレクター、三田一郎プログラムオフィサー(Kavli IPMU担当)、新任の宇川 彰副プログラムディレクター、Kavli IPMU担当作業部会委員、WPIプログラム委員会から井村裕夫委員長、石田寛人委員、Robert Aymar委員、Richard Dasher委員、Ian Halliday委員、さらに安藤慶明文部科学省研究振興局基礎研究振興課長、岩淵秀樹同基礎研究振興課基礎研究推進室長ら文部科学省及び日本学術振興会WPI事務局からの同行者に加え、その他専門家など、総勢25名を数えました。



現地視察初日。司会をする三田一郎プログラムオフィサーと話を聞く視察団及びKavli IPMU研究者。

第6回Kavli IPMU 外部諮問委員会開催

2013年6月6日にKavli IPMUの第6回外部諮問委員会が開催されました。前回まで委員長を務めたRoberto Pecceiさんが退任されて、今回からはSteve Kahnさん(Stanford/SLAC)が委員長を務められ、他の出席委員はJohn Ellisさん(King's College London)、小島定吉さん(東京工大)、David Morrisonさん(UC Santa Barbara)、岡村定矩さん(法政大学)、Nigel Smithさん(SNOLAB)でした。

今回は、特にWPI拠点として日本政府からの10年間の支援に続く5年延長を得るための方策、さらにその後東京大学内で恒久的な組織として存続を図るための方策等について外部諮問委員会の助言を求め、これに対して各委員から多くの有益な示唆をいただきました。



村山機構長の概要説明を聞く小島委員、Smith委員、Ellis委員、Kahn委員長、岡村委員、Morrison委員(左から)。

河野俊丈主任研究員、2013年度日本数学会幾何学賞受賞

東京大学大学院数理科学研究科教授でKavli IPMUの主任研究員を併任する河野俊丈さんが「幾何学的量子表現に関する一連の研究」により日本数学会2013年度幾何学賞を受賞し、愛媛大学で開催された日本数学会2013年度秋季総合分科会において、9月25日に授賞式および受賞特別講演が行われました。



河野俊丈さん

Kavli IPMUの数学研究者からは2011年度に斎藤恭司主任研究員(IPMU News No. 15、46ページ参照)、2012年度に戸田幸伸特任准教授(Kavli

IPMU News No. 19、54ページ参照)が同賞を受賞しており、3年連続の受賞となりました。

サイエンスカフェ2013『数学と物理で迫る宇宙の謎』開催

Kavli IPMUが多摩六都科学館との共催で毎年同科学館を会場として行ってきたサイエンスカフェが今年で5年目を迎え、『数学と物理で迫る宇宙の謎』を主題として3回に分けて開催されました。

第1回は、6月15日に理化学研究所主任研究員でKavli IPMU客員上級科学研究員を兼ねる初田哲男さんが「物質の構造：クォークの世界」と題して講演しました。満席となった会場で、初田さんの講演は物理学とはどのような学問なのか、そして物質とは何なのか、という根源的な説明から始まりました。クォークを模したカラーボールを使い素粒子の標準模型を説明するなど、初田さんの軽快なトークに会場は時折笑いに包まれました。この日のサイエンスカフェの様子は『クォークの最前線』として科学技術振興機構(JST)ホームページの動画ニュース <http://sc-smn.jst.go.jp/playprg/index/M130011063>でも紹介されています。



初田哲男さんの講演風景

第2回は6月22日にKavli IPMU 准教授の数学者、戸田幸伸さんが『宇宙の幾何学と対称性』と題して、幾何学の基本の説明から始め、後半は超弦理論などの理論物理学において幾何学が果たす役割について解説しました。数学と物理学の連携が宇宙の謎の解明に繋がっているKavli IPMUの研究の様子が伝わる内容で、真剣なまなざしでメモをとる参加者の姿が印象的でした。



黒板の前に解説する戸田幸伸さん

今年の最終回は7月6日に行われ、七夕前日ということもあり、多摩六都科学館のプラネタリウムドーム「サイエンスエッグ」を会場として、Kavli IPMU 准教授の前田啓一さん（現在、京都大学大学院理学研究科准教授）が「超新星一星の進化と宇宙の進化をつなぐ大爆発」と題して講演しました。前田さんは、迫力のある超新星爆発の再現アニメーションなどプラネタリウムドームに映し出される映像も交え、超新星爆発が宇宙のなりたち果たす重要な役割について語りました。また後半はカフェコーナーに会場を移しての質疑応答で、閉館時間直前まで途切れることなく質問する参加者の列が続きました。



白板を使って高校生の質問に答える前田啓一さん

サイエンスカフェ 2013の第1回と第2回は定員80名、第3回は定員100名でしたが、毎回多くの中学生、高校生の参加があり、若い世代の数学、物理学、天文学への関心の高さがうかがわれました。

平成25年度SSH生徒研究発表会に出展—SuMIRe研究者による講演が好評—

Kavli IPMUは2013年8月7日と8日に神奈川県のパシフィコ横浜を会場として開催された「スーパーサイエンス

ハイスクール(SSH)生徒研究発表会」に展示ブースを出展し、また同発表会で8日に行われた『FIRST/WPI 研究者ライブ! Young×Young』でFIRST(最先端研究開発支援プログラム)SuMIReプロジェクト(IPMU News No. 10、42ページ参照)の若手研究者から、Kavli IPMU 助教の大栗真宗さん（現在、東京大学大学院理学系研究科助教）と博士研究員の西澤 淳さんが「すばる望遠鏡で『見る』暗黒宇宙」と題したミニレクチャーに登壇しました。

参加者230名という盛況で、講演開始前から用意された座席が早々に満席となり多くの立ち見が出るなか、会場に詰めかけた高校生からはすばる望遠鏡やHSC（本誌、40-43ページ参照）を使った今後の研究の展開についての質問に加え、大栗さんや西澤さんが研究者を志したきっかけや高校時代についてなどの質問も飛び出し、大盛況のうちに終了しました。



大栗さんの出身高校の生徒からの質問を聞く大栗真宗さんと西澤 淳さん（左から）

人事異動

再任

元Kavli IPMU 博士研究員の中山 優さんが2013年9月1日付けでKavli IPMU 博士研究員に再任され、次のように語りました。「一年ぶりにカルテッ



中山 優さん

クから Kavli IPMU に戻ってきました。最近では繰り込み群と時空の構造に興味があります。ちなみに、IJMPA と MPLA のエディターもしています。是非、Kavli IPMU からの論文の投稿を

お待ちしております。」

転出

次の方々が転出しました。[括弧内はKavli IPMU在任期間です。]

Chang Kee Jungさん [2013年1月16日-2013年8月31日]、米国Stony Brook大学 (SUNY) から賜暇を得てKavli IPMU教授を務めていましたが、任期満了で同大学に復職。

前田啓一さん [2007年12月16日-2012年12月15日、IPMU助教、その後-2013年8月31日、Kavli IPMU 准教授]、京都大学大学院理学研究科准教授へ。

大栗真宗さん [2011年4月16日-2013年8月15日]、Kavli IPMU助教から東京大学大学院理学系研究科物理学専攻助教へ。

山崎雅人さん [2013年6月1日-2013年8月31日]、Kavli IPMU助教からプリンストン高等研究所博士研究員へ（なお、1年後にKavli IPMU助教に再任予定）。

大島芳樹さん [2013年4月1日-2013年8月31日]、Kavli IPMU博士研究員からプリンストン高等研究所博士研究員へ（なお、1年後にKavli IPMU博士研究員に再任予定）。

Hanindyong Kuncarayaktiさん [2013年4月1日-2013年7月31日]、Kavli IPMU博士研究員からチリ大学天文学科博士研究員へ。

Charles Steinhardtさん [2010年9月1日-2013年8月31日]、Kavli IPMU博士研究員からカリフォルニア工科大学博士研究員へ。

Emir Gumrukcuogluさん [2010年9月16日-2013年9月30日]、Kavli IPMU博士研究員からイギリスのノッティンガム大学博士研究員へ。

Brian Feldsteinさん [2010年9月1日-2013年9月30日]、Kavli IPMU博士研究員からオックスフォード大学博士研究員へ。



太陽ニュートリノ

中畑雅行 Kavli IPMU主任研究員

1970年頃、デービスらが行ったホームステイク実験は、太陽ニュートリノの強度が太陽モデルからの予想に比べて小さいという問題（「太陽ニュートリノ問題」）を提起しました。1988年にカミオカンデ実験は、太陽ニュートリノと電子との散乱をリアルタイム検出器によって捉え、太陽ニュートリノ問題を確認しました。そして、2001年7月にはカナダのSNO実験の結果とスーパーカミオカンデ(SK)実験の結果を比較することによって、太陽ニュートリノ問題の原因はニュートリノ振動であるということが分かりました。その後もSKでは、精密な太陽ニュートリノ観測が続けられており、最近では地球の物質がニュートリノ振動に与える影響によって、夜間の方が昼間よりも数%強度が大きくなることを観測しました。また、太陽の物質の影響によるエネルギースペクトルの変化も捉えようと努力しています。

