#### 東京大学宇宙線研究所

Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo

The same that have the

- 9 住所
- 住所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 Adress 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8582 Japan
- TEL 04-7136-3102(代表) / +81-4-7136-3102 (Main)
- FAX 04-7136-3115 / +81-4-7136-3115
- 🗞 URL www.icrr.u-tokyo.ac.jp

発行:2016年9月9日 東京大学宇宙線研究所 Pablished on 00 Sep. 2016 by Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo

編集:東京大学宇宙線研究所 広報室 Edited by Public Relations Office, Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo

# 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research

東京大学





#### **RESEARCH PROJECT**

9	Neutrino and Astroparticle Research Division
	Super-Kamiokande Group
	T2K Experiment Group
	XMASS Group
<u></u> ያ የ	High Energy Cosmic Ray Research Division
ープ	Cherenkov Cosmic Gamma Ray Group
	Telescope Array Group
	Tibet AS γ Group
	High Energy Astrophysics Group
	Astrophysics and Gravity Research Division
	Gravitational Waves Group

Gravitational Waves Group Observational Cosmology Group Theory Group

#### FACILITIES

Kamioka Observatory KAGRA Observatory – Research Center for Cosmic Neutrinos Norikura Observatory Akeno Observatory Chacaltaya Observatory

#### INFORMATION

History Timeline Organization Committees Staff Research Budget and Facilities Inter-University Research and Education International Exchange Achievement Reports Awards Access

## 所長あいさつ



## ニュートリノは 極小の素粒子の世界と 極大の宇宙を結ぶ 掛け橋 <sup>東京大学宇宙線 研究所</sup> 梶田隆章

宇宙線が発見されたのはほぼ1世紀前の 1912 年頃でした。 Victor F. Hess は当時知られていた地上での放射線が地中から 来ているのか確認するために、気球に乗り、高度と共に放射線 の強度の変化を調べました。この結果は驚いたことに、高度が 上がると放射線強度が上がるということを示しており、この観 測が宇宙から飛来する放射線「宇宙線」の発見となりました。 この観測によって、宇宙には我々が目で見える光以外に、高エ ネルギーの放射があることが示されました。すなわち高エネル ギー宇宙の発見です。

その後この宇宙線がどのようなものであるかを探る研究が続 きます。それと共に20世紀半ばまでにこれらの研究を通して、 ミューオン、パイ、K中間子などが発見され、現在で言う素粒 子物理学の発展にも大きく寄与しました。しかしその後加速器 の技術が発達して、素粒子の研究の中心舞台は加速器を用いた 実験に移りました。一方、宇宙線がどこで生成され、どのよう に地球まで飛来するのかも重要な問題で多くの研究がなされま した。宇宙線がどこで生成されたかを知るには宇宙線粒子の飛 来方向を測定すればよいかというと、そうはいかないことがわ かります。つまり、宇宙線は電荷をもっており、また宇宙には 磁場があるため、宇宙線は生成されたところから地球に飛来す るまでに曲げられてもともとの生成場所と到来方向には全く関 係がなくなってしまうのです。このような理由のため、宇宙線 がどこで生成されるのかなどの天文学的問題の解決には長い間 大きな進展がありませんでした。

しかし、近年の観測技術の急速な進歩によって、宇宙線の研 究は飛躍的に発展し、宇宙線研究は黄金期と言っても過言でな いと思われます。宇宙線の起源を探る手段として、電荷を持た ない高エネルギーガンマ線や宇宙ニュートリノの観測が非常に 大切ですが、近年のガンマ線観測の進展は本当に目を見張るも のがあります。また、高エネルギー宇宙ニュートリノもその証 拠が発見されました。これらの研究と共に、宇宙を見る新しい 目として、重力波の検出も世界中で感度向上の努力が続けられ、 2016年2月11日(日本時間で12日)にアメリカのLIGOプロジェ クトで重力波の初観測が報告され、いよいよ新たな重力波天文 学時代の幕が開くと思われます。それとともに、広い意味の宇 宙線を用いて素粒子の世界を探る研究も近年再び大きな注目を 集めるようになってきました。ニュートリノ振動すなわち ニュートリノの質量が宇宙線によって生成されたニュートリノ の観測で発見されたこと、また、太陽ニュートリノの研究でも 別な種類のニュートリノ間のニュートリノ振動が確認されたこ とは 2015 年のノーベル物理学賞に結びつき、近年の成果のハ イライトと言えましょう。宇宙にはその総重量が我々の知って いる物質の数倍にもなるにも関わらずその正体が全くわからな いダークマターが存在しています。その正体が何であるかとい

う問題は非常に興味深く、ダークマターの正体を探る研究も活 発に進められています。

宇宙線研究所の歴史は 1950 年に朝日新聞学術奨励金で乗鞍 岳に建てられた宇宙線観測用の「朝日の小屋」に始まります。 その後 1953 年に東京大学宇宙線観測所(通称、乗鞍観測所) となりました。この観測所は、わが国初の全国共同利用の施設 でした。そして 1976 年に乗鞍観測所と原子核研究所の宇宙線 関連部門をベースに現在の東京大学宇宙線研究所となり、全国 共同利用の研究所として宇宙線の研究を進めてきました。そし て 2010 年には共同利用・共同研究拠点として認定され、新た な制度のもとで宇宙線に関連した共同利用研究の推進を推進し ています。

宇宙線研究所の使命はこれらの宇宙線研究で世界をリードし ていくことです。世界最大のニュートリノ測定器スーパーカミ オカンデはニュートリノ振動の発見とその後の研究で大きな成 果を上げています。スーパーカミオカンデは今後も世界最高性 能のニュートリノ検出器として重要な研究成果をあげて行くも のと期待されています。一方で世界の研究は急速に進歩してお り、宇宙線研究所でも新たな魅力ある研究を進める不断の努力 が必要です。例えば、宇宙線研究所では最高エネルギー宇宙線 観測装置(TA)が 2008 年に完成し、現在この装置を用いた研 究が精力的に進められています。特に、1020eV という超高エ ネルギーになれば宇宙線が銀河系内を飛行する際に磁場で曲が る角度は数度以内になります。TA 実験による観測によって、 最高エネルギー宇宙線がある特定の方向から多く飛来している 証拠が観測され、最高エネルギー宇宙線天文学というような新 たな研究分野が開拓されつつあると予感させます。神岡の地下 でダークマターの正体を探る実験(XMASS)も 2010 年に観測 が始まりました。また 2010 年に装置建設が開始された重力波 望遠鏡(KAGRA)は 2015 年度末の最初の干渉計運転を経て、 2017 年度中には低温鏡を用いた運転を開始する予定です。この 装置からの重力波の観測と重力波天文学の推進を期待したいと 思います。更には、現在世界的な規模の国際共同で準備が進む 高エネルギーガンマ線天文台の CTA プロジェクトにも積極的 に取り組んでいます。

宇宙線研究所にとって重要な科学的研究成果を出すことが一 番大切であることは誰もが認めることと思います。しかし、そ れと共に我々の研究成果をより広い研究者コミュニティーや一 般社会の方々に知ってもらうことも非常に重要と思われます。 本冊子では宇宙線研究所の現在の活動をまとめ、皆様に研究所 の研究活動を理解していただくことを主な目的として作成した ものです。 Cosmic ray was discovered around 1912. By the early 1900s, it was already known that there were radiations at the Earth' s surface. To investigate if all radiations came from the ground or there were other sources, Victor F. Hess took a balloon flight and studied the change of the radiation intensity with respect to the altitude. Surprisingly, the result showed that radiation intensity went up at high altitudes. The observation brought about the discovery of "cosmic ray" radiation. This was the discovery that the universe is "shining" not only with the visible light, but also with high energy particles.

Various experiments followed to understand the nature of cosmic rays. Muons,  $\pi$  and K mesons were discovered through these activities by the middle of the 20th century. They contributed to the development of the elementary particle physics. However, due to the advancement of accelerator technologies, main research activities in the elementary particle physics shifted from the studies of cosmic rays to experiments with accelerators. On the other hand, there remained important questions in cosmic ray physics; such as, where the cosmic rays are generated, and how they reach to the Earth. Since the cosmic ray particles have electric charges, the directional information of a cosmic ray at the origin is completely lost when it arrives at the Earth. Hence, there has been little progress in understanding the astrophysical puzzles of cosmic rays such as the acceleration mechanism of cosmic ray particles.

However, because of the rapid advancement of the experimental technologies in recent years, cosmic ray research has also progressed rapidly. It is indeed the golden age for cosmic ray researchers. Observation of high energy gamma rays and cosmic neutrinos, carrying no electrical charges, are very important probes to explore the origin of cosmic rays. The progresses that the gamma ray observation experiments have made in recent years are truly astonishing. Recently, the evidence for high energy cosmic neutrinos has been found as well. Furthermore, there has been a significant improvement in the sensitivity in the gravitational wave detection. On Feb. 11, 2016, the LIGO collaboration announced the observation of gravitational waves. The gravitational wave astronomy is about to begin. Recently, studies of cosmic rays have contributed to the field of elementary particle physics again. For example, the studies of neutrinos produced by cosmic ray interactions in the atmosphere have led to the discovery of neutrino oscillations between muon-neutrinos and tau-neutrinos, namely establishing the non-zero masses of neutrinos. Solar neutrino experiments have solved the long-standing solar neutrino problem attributing it to neutrino oscillations between electron-neutrino and other neutrino flavors. These studies were recognized by the 2015 Nobel Prize in physics. It is well known that the total mass of "dark matter" is several times larger than that of the normal matter. However, the natures of dark matter particles are unknown. Dark matters are searched for and studied actively by various means.

## **From the Director**

The history of the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) began with an experimental hut in Mt. Norikura at the altitude of 2,770m, called Asahi hut, built in 1950 with the Asahi Bounty for Science. This small hut developed into the Cosmic Ray Observatory (commonly called Norikura Observatory) of the University of Tokyo in 1953. It was the first inter-university research facility in Japan. The Cosmic Ray Observatory, together with cosmic ray divisions of the Institute for Nuclear Study, was reorganized to the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) of the University of Tokyo in 1976. Since then, ICRR has carried out various research activities on cosmic rays as an inter-university research institute. In 2010, ICRR has been selected as one of the Japanese government' s new "Joint Usage/Research Center". ICRR is continuing inter-university research activities under the new system.

The mission of Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) is to lead the world community of cosmic ray researches. The world's largest neutrino detector Super-Kamiokande has discovered neutrino oscillations and been contributing to the studies of oscillations. It is expected that Super-Kamiokande will continue to get important scientific results. However, the research activities in the world advance quickly. Therefore, continuing and lasting efforts to create new attractive fields of research are required at ICRR. For example, the highest energy cosmic rays called Telescope Array (TA), completed in 2008, has been conducting various studies on the highest energy cosmic rays. The highest energy cosmic rays of energy at 1020eV deviate by only a few degrees from their original paths when they travel through the Milky Way galaxy. TA has observed indication that the highest energy cosmic rays arrive from a particular direction of the sky. The data may suggest the birth of a new research field, the highest energy cosmic ray astronomy. A dark matter experiment called XMASS started experiment at Kamioka in 2010, whose objective is the direct detection of dark matter. In addition, the construction of the gravitational wave telescope (KAGRA) began in 2010. KAGRA had the initial interferometer operation in March-April 2016 and plan to begin operating the advanced interferometer in JFY 2017. We are looking forward to seeing the signals of gravitational waves and promoting the gravitational wave astronomy. Finally, constructing CTA (Cherenkov Telescope Array) for high-energy gamma-ray astronomy as a key partner of the global project is also one of the very important missions for ICBB

Not to mention, delivering scientific results of high standards is an important mission to ICRR. However, it is also very important to share our scientific achievements with the scientific community and the general public. This booklet summarizes the present activities at ICRR for readers of such backgrounds. We hope that it serves its purpose.

## 宇宙線とは?



 気球にのって放射線を測定する実験のようす aaaaa
 © VF Hess Society, Schloss Pöllau

## 宇宙から降り注ぐミクロな粒子

1912 年、オーストリアの科学者へスは、気球に乗っ て大空に飛び立ちました。当時、高いエネルギーで飛び 交う粒である放射線は、地球の内部からやってくると考 えられていました。しかし、ヘスの実験では気球の高度 が上がるにつれて、放射線の強度が高くなっていったの です。放射線は宇宙からも降り注いでいるのではないだ ろうか——。宇宙線の研究が幕を開けた瞬間です。

宇宙線とは、宇宙空間を高エネルギーで飛び交ってい るとても小さな粒です。地球にも多くの宇宙線がやって きており、大気と衝突して大量の粒子が生み出され、地 表に降り注いでいます。私たちは、毎日このような粒を 浴びています。粒は私たちの体や地球の岩石をするりと 通り抜けて、地中へと突き進んでいるのです。

この粒子の正体は、私たちの身の回りの物質をつくる 原子核や素粒子などです。宇宙線として地球に降り注ぐ 粒子の90%は陽子1個でできた水素原子核で、9%は陽 子と中性子が2個ずつ集まったヘリウム原子核、残りの 1%がヘリウム原子核よりも重たい原子核や素粒子で す。

## 1000億の粒の雨 空気シャワー

1936 年、宇宙線の線量は高度 15km ほどでピークと なり、それより高い場所では急速に減少することが測定 されました。これは何を意味しているのでしょうか。つ まり、これまで検出されていた宇宙線は、宇宙から地球 にやってきた高エネルギーの宇宙線が地球の大気と衝突 して生じた粒子だったのです。宇宙に起源を持つものを 「一次宇宙線」、大気と衝突して生じる大量の粒子を「二 次宇宙線」と呼びます。

地球の大気と衝突した一次宇宙線は、空気に含まれる 窒素原子や酸素原子の原子核を破壊して、中間子と呼ば れる新たな粒子をたくさん作り出します。さらに、その 中間子も周りの原子核と高速で衝突して、多くの中間子 を生み出し、ねずみ算的に粒子の数が増えていくのです。 生じた粒子のうち寿命が短いものはすぐに崩壊し、最終 的に 1000 億個もの粒となり、数百平方メートルの範囲 に降り注ぎます。

このようにシャワーのように降り注ぐ二次宇宙線のこ とを「空気シャワー」と呼びます。ミューオンやニュー トリノ、中性子、ガンマ線、電子、陽電子などが含まれ ます。中間子やミューオン、陽電子などの粒子は空気シャ ワーの観測により発見されました。宇宙線の研究は素粒 子物理学の発展に大きく貢献してきました。

## 宇宙からのメッセンジャー

大きなエネルギーを持つ一次宇宙線は、太陽系の外か らやってきます。空気シャワーの観測により、宇宙線の エネルギーは10の8乗電子ボルトから10の20乗電子 ボルトと、大きな幅があることが分かりました。最も高 いエネルギーを持つ宇宙線は、加速器実験で人工的に作 り出せる最大のエネルギー(14TeV)の1000万倍にもな ります。いったいどのように粒子をこんなエネルギーに まで加速しているのでしょうか?まだ謎に包まれてい ます。

エネルギーの低い宇宙線は、太陽系内や銀河系内の強 力な磁場により、進路を曲げられてしまいます。一方、 最高エネルギーの宇宙線は、磁場の影響をほとんど受け ずに真っ直ぐ地球にたどり着くので、宇宙のどこから やってきたかが分かります。このような宇宙線は、100 平方 km の範囲に年に 1 回ほどしか降りません。ちなみ に山手線の内側は約 63 平方 km です。

最新の観測により、重い星が寿命を終えるときに起こ す「超新星爆発」で、高エネルギーの宇宙線が生まれて いることが明らかになってきました。宇宙線を見つめる ことで、遥か遠い宇宙で起こっている激しい天体現象の メカニズムを明らかにし、さらには、宇宙の進化に迫り ます。宇宙線は、多くの謎を解く可能性を秘めた、宇宙 から私たちに向けて放たれた「メッセンジャー」なので す。



2 宇宙から降り注ぐ放射線(一次宇宙線)が、大気中の原子核と衝突 し二次宇宙線として空気シャワーを生み出す。 aaaaa

#### **High-Energy Particles from Space**

In 1912, Austrian physicist Victor Hess ascended in a balloon up to the sky. At that time, it was commonly thought that high-energy radiation originates from radioactive nuclei on earth. However, his experiment showed the intensity of radiation increased with altitude. Is radiation entering the atmosphere from above as well? This is the very beginning of cosmic ray research.

Cosmic rays are high-energy particles that strike the Earth from all directions. They originate in space and travel at nearly the speed of light through space to earth.

These particles pass through our bodies every day and penetrate even the earth. They are mostly the nuclei of the same atoms that constitute our everyday matter. About 90 percent of the cosmic rays are hydrogen nuclei-namely protons, 9 percent are helium nuclei, and the rest are heavier nuclei and elementary particles such as electrons and positrons.

#### Rain of Hundred Billion of Particles, "Air Shower"

In 1936, it was discovered that the flux of cosmic radiation increases sharply with altitude, but it peaks at about 15 kilometers in altitude, dropping sharply at higher altitude. What does it show? In other words, the radiation detected was from secondary particles produced by very high-energy cosmic rays reaching the Earth from space. Cosmic rays originating in space is called "primary cosmic ray", and the ones produced by in collisions between primary cosmic rays and air molecules is called "secondary cosmic ray".

## What are Cosmic Rays?

When a primary cosmic ray from space collides with an air molecule, it breaks apart the nucleus of the molecule, resulting in production of multiple high-energy particles, called "hadrons." Then these particles fly apart at nearly the speed of light, further striking the surrounding air molecules, producing more particles. The chain reaction quickly grows and the product particles soon decay into many types of lighter particles, and develops into hundreds of billions of secondary particles, raining on an area covering several hundred square meters on the ground finally.

This cascade of particles is called an "air shower." "Air shower" contains such as muons, neutrinos, gamma-rays, electrons and positrons. Muons, mesons, and positrons were first detected in air showers, bringing about profound impacts on the field of elementary particles.

#### **Messengers from Space**

High-energy primary cosmic rays come from outside the solar system. Observation of air shower tells that primary cosmic rays impact on the Earth' s atmosphere with a very wide energy spectrum, from 10<sup>8</sup> to 10<sup>20</sup> electron volts. A cosmic ray particle of the highest energy has energy that is ten million times the one of the highest energy man-made particle accelerator can produce. How does the universe accelerate particles to such enormous energies? Still in mystery.

Low-energy cosmic rays are bent their paths by galactic magnetic fields. On the other hand, cosmic ray particles of the highest energy travel straight through space without being affected by galactic magnetic fields to convey information of the environment they were produced. These cosmic ray particles of the highest energy rain only about once a year on an area covering hundred square kilometers on the ground. Just for comparison, the area within JR Yamanote Line is approximately 63 square kilometers. Recent studies have found that "supernova" are one such sources of cosmic rays. Looking into cosmic rays, we aim to understand the mechanisms of very high-energy astrophysical events occurring at enormous distances from the Earth, and even to uncover the mysteries of the evolution of the universe. Cosmic rays are "messengers" sent to mankind that convey messages from the edge of the universe, with a great potential to bring answers to questions that are asked in a wide range of fields in physics and astronomy.

宇宙線とは?

## ガンマ線、ニュートリノ、重力波 …… 多様な手段で宇宙線研究に挑む世界で唯一の研究機関

宇宙からやってくるメッセンジャーは原子核だけでは ありません。最もエネルギーが高い電磁波である「ガン マ線」、全ての物質を軽々とすり抜けて地球にやってく る素粒子「ニュートリノ」、時空のゆがみがさざ波のよ うに伝わる「重力波」、未知の物質「暗黒物質」なども あります。ガンマ線とニュートリノについては観測技術 が飛躍的に向上し、ガンマ線天文学やニュートリノ天文 学などの新たな学問が拓けてきました。

メッセンジャーのひとつの重力波は、アインシュタインが 100 年前に考えた一般相対性理論が提唱する物理 現象のうち、観測できていなかった唯一の現象でした。 しかし、ついに 2016 年 2 月、人類史上初めて重力波を 直接検出したと発表がありました。人類は電磁波と素粒 子に加え、新たに宇宙を調べる扉を開いたのです。重力 波とは、非常に重い天体が動くときに生じる空間のゆが みが、宇宙空間を波のように伝わる現象のことです。重 力波の観測により、重たい天体が合体する様子や、宇宙 初期に急激に膨張したインフレーションなど、原子核や 素粒子では捉えられない、最深部の宇宙の姿を直接観察 する可能性を秘めています。宇宙線研究所でも、2017 年度末の本格稼働を目指して、大型低温重力波望遠鏡 「KAGRA」の建設を進めています。

重力波 Gravitational Wave	暗黒物質 Dark Matter	ニュートリノ Neutrino	ガンマ線 Gamma Ray	宇宙線 Cosmic Ray					
アインシュタインの相対 性理論によって提唱され た時空の波。重たい天体 やブラックホール同士の 合体や超新星爆発など、 時空が急激に変化すると きに大きな波が生じる。	現在知られる物質では説 明できない正体不明の物 質。まだ直接検出された ことがない。宇宙に存在 すると計算される物質の 大半を占めている。	超新星爆発や太陽などの 星の中、地球の大気や内 部など、さまざまなとこ ろで生じる素粒子。人も 地球も何でもするりと通 り抜けて、ほとんどは宇 宙の遠くへ飛び去る。	最もエネルギーの高い領 域の電磁波。宇宙で起こ る様々な超高エネルギー 現象で生成される。 <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup> <sup>(2)</sup>	200km- 人工衛星. 宇宙ステーション (日本) (日本) (日本) (日本) (日本) (日本) (日本) (日本)					
	地下	= a - k y Neutrino	United as a second seco	km~5km 空気シャワー検出器 宇宙を高エネルギーで飛					
重力波検出装置	暗黒物質検出装置	水チェレンコフ望遠鏡	空気チェレンコフ望遠鏡	90% が陽子でできた水 素原子核で、9% がヘリ ウム原子核。残りはより 重たい原子核や素粒子。					

3 宇宙線を観測するさまざまな手段 / Methods of Cosmic Ray Detection

宇宙線研究所ではこのように、宇宙の謎を解くために 多角的なアプローチを用いており、「マルチメッセン ジャー」と呼んでいます。宇宙線研究所は、多様な手段 を用いて一括して宇宙線研究に挑む世界で唯一の研究機 関なのです。

## Gamma-rays, neutrinos, and gravitational waves,

# The only research center in the world challenging space research with the various messengers

"Nucleus" is not the only messenger bringing information from space, but "Gamma-rays" – high energy photons, "neutrinos" – elusive particles most of which pass thorough matter unnoticed, "gravitational waves" – ripples in the fabric of space-time, and "dark matter" – unidentified matter, are also the ones.

Especially for gamma-rays and neutrinos, recent technological developments have overcome many observational difficulties, and brought forth a new era of gamma-ray and neutrino astronomy.

Gravitational wave, one of the messengers, was predicted in Einstein' s general theory of relativity 100 years ago, and was the last physics phenomenon which hadn' t been detected yet in the prediction. But in February 2016, it was announced that the gravitational waves were finally detected for the first time in human history. Today humankind acquired new "eye" with which to see the universe, in addition to high energy photons and particles. Gravitational waves are ripples in the space-time which propagate through space at the speed of light. Detection of gravitational waves will reveal large portion of the universe that are, with the traditional probes, unobservable; such as, mergers of black-holes and the birth of the universe. The Large-scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope, named "KAGRA," is under-construction aiming for the advanced interferometer operation at the end of JFY 2017.

We, ICRR, take these kinds of multiple means to probe a broad range of cosmic events, and call it as "multi-messengers." ICRR at the University of Tokyo continues to be the only research center in the world that hosts a comprehensive array of leading cosmic ray research programs.

## What are Cosmic Rays?

第1章 研究内容につい

# 宇宙ニュートリノ研究部門

Neutrino and Astroparticle Research Division

スーパーカミオカンデグループ ■ T2K 実験グループ ■ XMASS グルー

## スーパーカミオカンデグループ



1 スーパーカミオカンデの内部 Inside of the Super-Kamiokande detector

#### 研究の目的

- 太陽や大気中、加速器で生成されたニュートリノを使って
   ニュートリノの性質を探る素粒子の研究
- 陽子崩壊の探索による大統一理論の検証
- 超新星爆発などから飛来するニュートリノを使って天体や 宇宙を探る研究

#### 実験装置

スーパーカミオカンデは岐阜県神岡町の神岡鉱山の地下 1000 メートルにある、純水 5 万トンを満たした円筒形のタン クです(図1)。荷電粒子が水中を超光速で走るときに発せられ る、チェレンコフ光という青白い微かな光を捕えるため、タン ク内面には直径 50cm の光電子増倍管(センサーの一種)が約 11100 本取り付けられています。平成 8 年 4 月 1 日に実験を 開始し、現在まで 20 年以上続けています。

#### 研究内容

#### 大気ニュートリノ観測によるニュートリノ質量の発見

宇宙から飛んでくる宇宙線は大気と反応してニュートリノを 作ります。この大気ニュートリノは、ミューニュートリノと電 子ニュートリノで構成されています。この中のミューニュート リノが、地球サイズの距離を飛ぶ間にタウニュートリノに変 わってしまうことを、平成10年に発見しました。図2を見ると、 上向きのミューニュートリノの数が減ったように見えますが、 これはタウニュートリノに変わってしまったためにそのように 見えています。このようにニュートリノがその種類を変えてし まう現象を「ニュートリノ振動」と呼びます。ニュートリノ振 動はニュートリノが質量を持っている場合にのみ起こる現象で あり、ニュートリノ振動の発見によってニュートリノが質量を 持つことが示されました。この成果によって、梶田隆章氏は平 成 27 年のノーベル物理学賞を受賞しました。最近では振動し た後のタウニュートリノの観測にも成功しています。引き続き、 大気ニュートリノの精密観測によって、未知のニュートリノの 性質を探っています。

太陽ニュートリノ観測とニュートリノ振動

太陽中心部では、核融合反応によってエネルギーが発生して います。その反応によって大量の電子ニュートリノが生まれ、 地球に降り注いでいます。スーパーカミオカンデは事象の方向 を測定できるので、太陽方向からのニュートリノ事象を同定で きます (図3)。スーパーカミオカンデが観測した強度は予測値 の 47%しかありませんでした。平成 13 年にカナダの SNO 実 験が、電子ニュートリノの強度を測り、その結果とスーパーカ ミオカンデでの結果の比較をすることによって、電子ニュート リノがミューニュートリノおよびタウニュートリノに振動して いることが分かりました。太陽ニュートリノは太陽内部の高密 度物質、地球の物質を通過してスーパーカミオカンデに届くた め、ニュートリノ振動に対する物質の効果を探ることができま す。最近ではこの物質効果によって夜間の方が昼間よりも ニュートリノ事象数が多くなるという兆候を掴みました。現在 は太陽内部の物質効果を調べるために精密観測をおこなってい ます。

#### 陽子崩壊探索実験

物質を構成する陽子は、陽子の仲間(バリオン)の中で最も 軽いので、未来永劫壊れることなく安定していると考えられて きました。しかし、素粒子の大統一理論は、陽子が他の種類(中 間子や電子の仲間)のより軽い粒子へ壊れることを予言してい ます。予言される陽子の寿命は宇宙の年齢よりもはるかに長い のですが、たくさんの陽子を集めてその中のいくつかが壊れれ ば、長い時間を待たなくても陽子の寿命を見積もることができ ます。スーパーカミオカンデの中には5万トンの純水が蓄えら れていますが、この有効体積中には 7×1033 個の陽子が含まれ ています。20 年以上も観測を継続していますが、陽子が壊れ た証拠はまだ得られていません。陽子が壊れなかったという観 測結果から、陽子の寿命は少なくとも 1034 年以上と推定されて います。もし陽子崩壊が観測されれば、素粒子の大統一理論研 究への突破口になります。最も有力な壊れ方の候補は、陽子が π<sup>0</sup>中間子と陽電子(電子の反粒子)に壊れるモードです。スー パーカミオカンデでは3 つの電子型のリングが観測されるはず です。(図4)。



2 大気ニュートリノの天頂角分布。上向きニュートリノの振動の証拠 Zenith-angle distribution of atmospheric neutrinos, showing evidence of oscillation for upward-going neutrinos





#### 将来計画

スーパーカミオカンデにガドリニウムを溶解させ中性子の同時計測ができるようにするアップグレード計画が進行しています。アップグレードが完了すると、反ニュートリノに対して飛躍的に感度が向上し、宇宙の初めから起きてきた超新星爆発からのニュートリノ(超新星背景ニュートリノ)を捉えることができるようになります。また、スーパーカミオカンデをさらに大型化し、約10倍の体積の水チェレンコフ装置(ハイパーカミオカンデ)によって、物質と反物質の非対称性の測定や、陽子崩壊の観測を行うための開発も精力的に進められています。

## Super-Kamiokande Group

The purpose of Super-Kamiokande (SK) is to study elementary particle physics and astrophysics through neutrino detection and nucleon decay searches.

SK is a 50,000-ton cylindrical water Cherenkov detector 40 m in height and 40 m in diameter. It is equipped with over 11,000 50-cm photomultiplier tubes (PMTs) in order to observe various elementary particle interactions in the detector. Detector operations began in 1996. SK observes enormous amounts of neutrinos produced both in the Sun (solar neutrinos) and by the interactions of cosmic rays in the atmosphere (atmospheric neutrinos). In 1998 SK observed a clear anisotropy in the zenith angle distribution of its atmospheric neutrino data, thereby establishing the existence of neutrino masses and mixing, a phenomenon known as "neutrino oscillations." For this result, the Nobel Prize in physics was awarded to Prof. Takaaki Kajita in 2015. Furthermore, accurate measurements of the solar neutrino flux using neutrino-electron scattering data in SK, in conjunction with results from the SNO experiment in Canada, led to the discovery of oscillations among neutrinos produced in the center of the Sun

All materials in this space are made of atoms, which consist of nucleus and electrons. Furthermore, nucleus is a composite of protons and neutrons. It has been thought that proton is eternally stable, however Grand Unified Theory, which unifies strong, weak, and electromagnetic interactions, predicts proton will decay into lighter particle like mesons and leptons. SK uses 50,000 tons of pure water and its fiducial volume contains 7x10<sup>33</sup> protons. (We are measuring proton lifetime with huge number of protons!) SK is running more than 20 years, however, any evidence of proton decay has not been observed yet. From this result, proton lifetime is estimated to be more than 10<sup>34</sup> years. SK will keep running towards a new horizon of the world of particle physics.

As a possible future detector improvement for supernova neutrino detection, R&D towards adding gadolinium to the SK detector is in progress. A proof-of-principle experiment using a 200-ton tank is now being conducted.

Further, R&D for a successor water Cherenkov detector, Hyper-Kamiokande, which has 10 times more volume than Super-Kamiokande, is underway. Hyper-Kamiokande aims to discover a possible particle-antiparticle asymmetry in neutrinos, known as CP violation, and to extend sensitivity to proton decays by an order of magnitude beyond what has been achieved by Super-Kamiokande.

## T2K 実験グループ



#### 研究の目的

- ミューオンニュートリノビームからの電子ニュートリノの 出現現象の精密測定を通して、θ,。の値の測定やニュートリ ノと反ニュートリノの性質の違い(CP 対称性の破れ)を 探索する
- ミューオンニュートリノ消失の観測により、混合角θっ及 び質量差∆m²₃ を精密に測定する

#### 実験装置

T2K 実験では、東海村の J-PARC に設置されている大強度陽 子加速器により生成する高輝度ニュートリノビームを用いま す。また振動後のニュートリノを観測するために、ニュートリ ノ源から 295km 離れた岐阜県飛騨市にあるスーパーカミオカ ンデを用いています。T2K 実験用ニュートリノビームラインの デザインには、オフアクシス(非軸)ビームというアイデア (Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment, BNL E889 proposal, (1995)) が取り入れられました。陽子ビームの方向 をわざとずらすことにより、エネルギーの広がりの小さい ニュートリノビームを効率的に生成することが可能となりま す。T2K 実験開始時はスーパーカミオカンデにおいてニュート リノ振動の効果が最大となるよう、ビームの方向がスーパーカ ミオカンデから 2.5 度ずれた方向となるよう機器が設置されま した。このとき、スーパーカミオカンデにおけるニュートリノ エネルギーの中心値はおよそ 650MeV となります。生成する ニュートリノはほぼミューオンニュートリノであり、電子 ニュートリノの混入はエネルギーピーク近傍で 0.4% 程度しか ないと見積もられています。この T2K ニュートリノビームライ ンが生成するビームは、K2K 実験と比較して 2 桁近い大強度を 達成することを予定しています。スーパーカミオカンデにおい ては、2008年にデータ収集電子回路装置を更新し、安定した 高精度観測ができるように準備を行いました。また加速器 ニュートリノビームの時間情報をリアルタイムに転送し、スー パーカミオカンデの T2K ニュートリノ事象選択を行うシステム を作りました。

#### 研究内容

#### ニュートリノと反ニュートリノの性質の違いを探索する

J-PARC の陽子加速器システムと T2K 実験のニュートリノ ビームラインの建設は 2009 年春に完了し、2010 年 1 月より 本格運用が開始されました。2010年2月24日にはスーパーカ ミオカンデにおいて加速器(J-PARC)からのニュートリノ反

応事象を初めて観測しました。さらに東日本大震災で 2011 年 3月11日に加速器が停止する直前までに取得したデータを解 析して、ミューニュートリノが電子ニュートリノに変化した兆 候である電子ニュートリノ事象6個(図1)を世界で初めてと らえたことを発表しました。東日本大震災からの加速器施設の 復旧を終え、2012年に実験を再開し、2013年には電子ニュー トリノ事象を 28 個に増やし、電子ニュートリノ出現の現象を より確実なものとしました。

また、2014 年からは反ミューニュートリノビームを用いた 実験を開始し、反ミューニュートリノの消失を確認、また、反 電子ニュートリノの候補事象も 4 事象確認しました。最新の電 子ニュートリノおよび反電子ニュートリノ出現のデータは CP 保存が破れている可能性を示しています。但し、統計的ふらつ きにより、もし CP が保存されていても 10 回に 1 回はこのよ うな観測結果となることがあり得ます。この実績をもとに今後 も実験を継続、ニュートリノ振動現象の全容解明を世界に先駆 けて行ってゆくことを目指します。



よって発生した電子が引き起こす電子・陽電子シャワーが発した チェレンコフ光がリング状に捉えられている。 An electron neutrino event candidate observed at Super-Kamiokande. A diffusing ring produced by electron-positron shower is observed



The one of main goals of the T2K is precise measurement of electron neutrino appearance phenomena in muon neutrino beam in order to measure  $\theta_{10}$  value and search for leptonic CP violation. Another important purpose of this experiment is precise measurement of  $\theta_{23}$  and  $\Delta m_{32}^2$  parameters via muon neutrino disappearance.

The intense neutrino beam is produced by using a high intensity proton synchrotron accelerator complex (J-PARC) constructed at JAERI site in Tokai village. As a far detector to study neutrino oscillation phenomena, the T2K experiment utilizes the Super-Kamiokande (SK) detector, which is located at 295 km away from the beam production target. In designing the neutrino beam line for T2K, the idea of off-axis beam (Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment BNL E889 proposal, (1995)) is conducted. With this method, we can produce sub-GeV energy neutrino beam with narrow energy spread efficiently from a 30 GeV proton beam. In the T2K experiment, the peak position of the neutrino beam energy is adjusted to ~650MeV by setting the off-axis angle to 2.5° to maximize the neutrino oscillation effects at the SK detector. The generated neutrino beam is primarily muon neutrino with a small contamination of electron neutrino, which is estimated to be 0.4% at the flux peak. The T2K neutrino beam is expected to become almost two orders of magnitude more intense compared to the K2K neutrino beam. In Super-Kamiokande, the front-end electronics were replaced in 2008 and we have achieved very stable data taking. The beam timing transfer

## **T2K Experiment Group**

2 J-PARC 原子核素粒子実験施設 J-PARC nuclear and particle physics facility © JAEA

system and Super-Kamiokande event selection by using the beam timing have been established.

The construction of the J-PARC accelerator complex for the T2K experiment was completed and physics run were started in January 2010. On February 24th 2010, we succeeded in observing the first J-PARC neutrino interaction event at Super-Kamiokande. Of the 88 neutrino events accumulated until just before the big earthquake on March 11th 2011, 6 electron neutrino candidates has been found (Figure 1). The indication of this electron neutrino appearance was published in June 2011. We resumed neutrino beam data taking in January 2012 and established the electron neutrino appearance phenomena by observed 28 candidate events in the updated analysis by using data taken by 2013. From 2014, we have started data taking with muon antineutrino beam. We have already confirmed the disappearance of muon antineutrino beam. Moreover, we have found four candidate events of electron antineutrino appearance. The latest results of electron and anti electron neutrino appearance seem to favor the CP violation and the probability that this observation is a result of random statistical fluctuations which would mimic a neutrino-antineutrino asymmetry when none exists is about 1 in 10. T2K continues to take further data and play the leading role in the study of full picture of neutrino oscillations.

## XMASS グループ



#### 研究の目的

- ダークマターを直接検出する
- 低エネルギー太陽ニュートリノを検出する
- ニュートリノの出ない二重ベータ崩壊を検出する

#### 背景

近年における宇宙の観測は目覚ましい成果を上げており、宇 宙のエネルギー・物質のうちわけを見ると、陽子や中性子など 「目に見える」物質は全体の約5パーセントしかないこと、そ してその5~6倍の未知の物質(ダークマター)があることが 分ってきました。初期宇宙にはこのダークマター密度の僅かな 揺らぎが種となり、密度の高いところは重力によってさらに ダークマターを引き寄せていき、しだいに目に見える物質であ るチリやガスも引き寄せ、やがて星や銀河が形成され、現在の 宇宙の持つ大規模構造が作られたと考えられています。このよ うにダークマターは宇宙の成り立ちに直接的に関わっているの です。その正体は分かっていませんが、観測事実からいくつか のその性質が推測されます。(1)電荷を持たず、(2)宇宙をゆっ くり動き回り、(3)安定であることです。このような物質は、 現在われわれが知っている素粒子では説明ができません。

#### 実験装置

液体キセノン検出器は、(1) ダークマターが衝突した際の発 光量が多く、(2)10トンを超える大型化が可能、(3)キセノンの 原子番号が大きいので、外部の放射線を外縁部で吸収できると いった特徴があります。特に発光量が多いことは、ほんの僅か にダークマターが衝突した現象を検出することができるため、 ダークマター直接探索の検出器として高い性能を発揮します。 現在、液体キセノン約1トンのダークマター探索装置 XMASS-Iを運転しています。直径10m・高さ10mの水タンク



The schematic view of the detector and the water tank

側面に 20 インチ PMT を配置し、中央には 832kg の液体キセ ノンを約 642 本の光電子増倍管で球状に囲った検出器が設置さ れています(図1)。XMASS グループでは、この実験に最適な「極 低放射能」光電子増倍管を浜松ホトニクスと共同で開発しまし た。この光電子増倍管は、液体キセノンからのシンチレーショ ン光を検出するだけでなく、放射性不純物を従来のものよりも 一桁以上下げました。

#### 研究内容

#### 季節変動によるダークマター探索

XMASS-I ではその大きな検出器質量と低エネルギーの閾値の 特性を生かし、2013 年 11 月から 2015 年 3 月に及ぶデータの 解析を通じて季節変動によるダークマター探索を行いました。 その結果、季節変動を用いた WIMP 探索において世界で初めて DAMA/LIBRA 実験の許容領域を排除(図 3)、さらに暗黒物質 のモデルに依存しない場合にも最も厳しい制限を与えました (図 4)。

#### Super-WIMP 探索

Warm Dark Matter(温かいダークマター)の候補の1つであ る、より軽くて極めて弱い相互作用をする粒子 Super-WIMP 探 索を行いました。超対称性粒子等が見つからない現在、WIMPs の他にも多様な暗黒物質候補を探索することが重要になってき ているためです。本探索では 40-120keV のエネルギー領域で データを解析した結果、有意なダークマターの信号は残念なが ら見つかりませんでしたが、このことにより、解析された質量 範囲で Super-WIMP が宇宙のダークマターの主成分であるとい うシナリオは正しくないことが明確になりました(図5)。

#### 二重電子捕獲崩壊探索

XMASS では暗黒物質の探索だけでなく、原子核の稀な現象 である 2 重電子捕獲崩壊探索も行いました。この現象は予想さ れていますが未だに観測されておらず、観測できれば原子核の 新しい理解が進むと考えられています。この崩壊原子核候補は <sup>124</sup>Xe と<sup>126</sup>Xe で、この探索の結果、それぞれ半減期にして> 4.7 × 10<sup>21</sup> 年、>4.3×10<sup>21</sup> 年となり、最も厳しい下限値が得ら れました。

#### 将来計画

より感度を上げた探索を行うために、次世代 XMASS 実験で ある" XMASS1.5"の構想を提案しています。検出器の質量は、 液体キセノン6トンに大型化し、さらに今までの経験を生かし て光電子増倍管をより低バックグラウンドにするだけでなく、 受光面をドーム型にすることでセンサー視野を大幅に広げ、大 きな感度向上を実現していきます(図6)。



3 季節変動によるスピンに依存しない場合の WIMP- 核子の散乱断面 積の上限値曲線。季節変動解析によって DAMA/LIBRA 領域を殆ど 排除した

Upper limit on the spin-independent elastic WIMP-nucleon cross section as a function of WIMP mass by an annual modulation analysis. XMASS excluded the most of the allowed region of DAMA/LIBRA experiment



4 ダークマターモデルに依存しない探索。季節変動を用いて得られた 振幅とエネルギーの関係を示す。XMASS 実験では有意な振幅は得ら れず、DAMA/LIBRA 実験の結果を再現しなかった

Model independent analysis by an annual modulation search. XMASS obtained strong upper limits on the amplitude in the low energy regions and could not reproduce the DAMA/LIBRA result.



5 ボゾン型 Super-WIMP(②:スピン0の擬スカラー粒子、③:スピン1のベクトル粒子)と電子の結合定数(縦軸)とその質量(横軸)。 実線は、宇宙初期に自然に生成されたダークマターが現在の残存量 をうまく説明できる結合定数を示す。赤い太線は本実験の結果を示 し、他は天体物理に基づいた議論による制限を示す。XENON100, EDW-IIは、他のグループの実験結果を示す。

Limits on coupling constants for electrons and pseudoscalar bosons(left) and electrons and vector bosons(right) at 90% C.L. (red line). (left) XENON100 and EDW-II correspond to constraints obtained by other experiments. (right) The thin solid line corresponds to the coupling constant required to reproduce the observed dark matter abundance. The other lines are obtained by astrophysical observations.



 次世代 XMASS 検出器 用に開発中の3イン チ光電子増倍管

> Newly developed 3inch PMT for next generation XMASS detector

## **XMASS Group**

The aims of multi purposes XMASS program are to detect low energy solar neutrino, dark matter particle, and neutrino-less double beta decay. Current evidence indicates that only 5 % of the mass energy density of the Universe is composed of baryonic matter and dark matter has made up about 27%. One of the attractive dark matter candidates is Weakly interacting massive particle (WIMP) and it may be detectable via rare elastic scattering interactions that deposit a few tens of keV in target nuclei.

The advantages to use LXe detector are followings, 1) high light yield, 2) scalability of the size up to tons of mass, and 3) large atomic number to shield radiations from outside of the detector. Figure 2 shows the schematic view of the detector and its water shield. The LXe target is surrounded by about 642 "ultra-low-radioactivity" PMTs suitable for this experiment (Fig. 1). Based on the data from XMASS-I, we obtained following results:

(1) A search for dark matter was conducted by looking for an annual modulation signal due to the Earth's rotation around the Sun. For the WIMP dark matter, the exclusion upper limit of the WIMP-nucleon cross section  $4.3 \times 10^{-41}$  cm<sup>2</sup> at 8 GeV/c<sup>2</sup> was obtained (Fig. 3). For the model independent case, the result shows most stringent upper limit on the modulation amplitude that is inconsistent with the positive DAMA/LIBRA signals (Fig. 4).

(2) A WIMP is well-motivated model that guides most experimental searches, however, simulations based on this cold dark matter scenario expect a richer structure on galactic scales than those observed. In this situation, it is natural to give attention to consider a particle which is lighter mass and more weaker interaction such as super-WIMPs, a warm dark matter candidate. We searched for signatures of bosonic super-WIMPs. For vector bosons, the present experimental limit excludes the possibility that vector super-WIMPs constitute all the dark matter (Fig. 5).

(3) XMASS-I conducted not only dark matter search but also rare nuclear decay process, two-neutrino double electron capture, on <sup>124</sup>Xe and <sup>126</sup>Xe. No significant excess over the expected background is found in the signal region, and we set a lower limit on its half-life of 4.7(4.3)×10<sup>21</sup> years at 90% CL for <sup>124</sup>Xe (<sup>126</sup>Xe). The obtained limit has ruled out parts of some theoretical expectations.

In addition to the current XMASS activity, we are proposing the next generation large detector with efforts on not only reducing radioactivity of PMTs but also designing the 'dorm' shape 3inch PMT to reduce the surface events of the detector by a wide angle of view (Fig. 6). The size of the detector will be 6 ton of liquid xenon and it will deeply explore the SUSY parameter region.







## **Cherenkov Cosmic Gamma Ray Group**

## チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ



1 CTA 超高エネルギーガンマ線天文台のイメージ図 Artist view of the CTA observatory

#### 研究の目的

- 最高エネルギー光子といえる TeV 領域宇宙ガンマ線を観測 し、極限的宇宙の姿を明らかにする
- 超新星残骸、超巨大ブラックホール周辺、ガンマ線バーストでの高エネルギー粒子の加速・生成機構を解明する
- 星・銀河の形成史を明らかにする
- 暗黒物質の対消滅からのガンマ線を観測する
- 量子重力理論を検証する

#### 実験装置

超高エネルギー宇宙ガンマ線による宇宙の研究は、近年大き く進展し宇宙物理学のあらたな一重要分野を形成している。こ の研究をさらに飛躍的に発展すべく、日米欧の国際共同により、 従来の装置の 10 倍の感度と広い光子エネルギー領域を観測で きる究極の超高エネルギーガンマ線観測施設チェレンコフ望遠 鏡アレイ (CTA)の建設への準備をすすめている。現在、100 GeV から 10TeV にわたる超高エネルギーガンマ線による天体 観測は、解像型空気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) によって行わ れている。地上ガンマ線望遠鏡 H.E.S.S.、MAGIC、VERITAS に より銀河系内、銀河系外に、多種多様な 200 に近い超高エネル ギーガンマ線源が発見されている。

CTA は大口径 (23m)、中口径 (12m)、小口径 (4m)のチェ レンコフ望遠鏡群で構成される。感度を一桁向上 (1mCrab~ 10<sup>-14</sup> erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> を達成 ) するとともに、観測可能なエネル ギー領域を 20GeV-100TeV と拡大し、高エネルギーガンマ線 天文学を飛躍的に発展させるものである。この計画が実現すれ ば、1000 を超える超高エネルギーガンマ線天体の発見が期待 される。



#### 研究内容

CTA により多くの重要な物理研究を行うことができる。100 年来の問題である宇宙線の起源は、超新星残骸、他の銀河内ガ ンマ線源、銀河内の拡散ガンマ線の詳細な観測により最終的に 解決されるであろう。パルサーやパルサー星雲を観測し、中性 子星近傍、また極限的な磁場中での物理が明らかになる。活動 銀河核の観測により、超大質量ブラックホール、またその周囲 の降着円盤、超相対論的なジェットの物理、さらには活動銀河 の宇宙論的スケールでの進化が研究される。また、宇宙最大の エネルギー放出現象であるガンマ線バーストのその本質に迫る ことができる。さらには、活動銀河核、ガンマ線バーストの詳 細な研究により 10<sup>20</sup>eV まで延びる最高エネルギー宇宙線の起 源に迫る。また、これらの宇宙論的な距離から伝播するガンマ 線を使い、宇宙の歴史における星形成史や宇宙初期に最初にで きた星について探り、さらには量子重力理論の検証を行う。宇 宙を満たす素粒子と考えられる暗黒物質の対消滅からのガンマ 線を今までに無い精度で探査する。

#### CTA 大口径望遠鏡の建設

日本グループは、アレイの中心に配置される大口径望遠鏡4 基の建設を進めている。2016 年度末には1号基がカナリア諸 島ラパルマに設置され、2018 年度末までに4基のファースト ライトを予定している。大口径望遠鏡は20GeV から1000GeV の低エネルギー領域をカバーする。鏡の総面積は、十分なチェ レンコフ光量を得るために、400m<sup>2</sup> が必要である。また、それ ぞれの光学エレメントに、高反射率、高集光効率、高量子効率 が要求される。日本グループは大口径望遠鏡に搭載する光セン サー(光電子増倍管)、超高速読み出し回路、分割鏡、光学補 償装置の量産を進めている。

大口径望遠鏡は、ガンマ線バースト等の種々のトランジェントな現象を捉えるために、高速回転により瞬時に源を視野内に捕らえることが求められる。現在、マックスプランク物理学研究所(ミュンヘン)のグループが、MAGIC 望遠鏡の経験をもとに 23m 口径の大口径望遠鏡の詳細デザインを進めている。 カーボンファイバーチューブによるスペースフレーム構造で、 軽量でかつ丈夫。ガンマ線バーストの follow up 観測を可能に するため総重量をおよそ 100 トンと軽量化し、20 秒で 180 度 回転が可能である。

2 現在稼働中の MAGIC, VERITAS, H.E.S.S. 超高エネルギーガンマ線望遠鏡 The current generation VHE gamma ray observatories, the MAGIC, VERITAS, and H.E.S.S. telescopes



3 超高エネルギーガンマ線源 (>100GeV) を銀河座標系に示したもの。 200 に近い銀河内、銀河系外のガンマ線源が発見されている。 Very High Energy Gamma Ray Sky (>100GeV). About 200 Galactic and extragalactic sources have been discovered.



4 大口径望遠鏡(23m口径)。日本グループは高分解能イメージング カメラ、超高速読み出し回路、高精度分割鏡のデザイン、光学補償 装置の量産をすすめている。

Large Size Telescope (23m diameter) designed by Max Planck Institute for Physics. CTA Japan is contributing to the design and production of the imaging camera at the focal plane, ultrafast readout electronics, high precision segmented mirrors and active mirror control system for Large Size Telescopes.



5 日本グループが設計と製作を担当したクラスターモジュール。7本 の高量子効率光電子増倍管、高圧回路、プリアンプ、スロー制御回路、 超高速 DRS4 波形読み出し回路、トリガーからなる。256 個を集め て大口径望遠鏡のカメラになる

Camera cluster for the Large Size Telescope (LST) developed by CTA-Japan. This cluster consists of seven high quantum efficiency photomultipliers (R11920-100), CW High Voltages, pre-amplifier, Slow Control Board, DRS4 Ultra fast waveform recording system and Trigger. The LST camera can be assembled with 265 of these clusters, cooling plates and camera housing.



6 日本グループ、三光精衡所により試作された大口径望遠鏡用の高精 度分割鏡。ミラーは60mm 厚のアルミハニカムを3mmのガラスで はさんだサンドイッチ構造である。鏡表面はSiO2, HfO2の多層保 護膜により長寿命、高反射率を実現する。

Prototype of the high precision segmented mirror for the LST developed by CTA-Japan in cooperation with Sanko Co.LTD. The mirror is made of a 60mm thick aluminum honeycomb sandwiched by 3mm thin glass on both sides. A surface protection coat consisting of the materials SiO2 and HfO2 will be applied to enhance the reflectivity and to elongate the lifetime.

During the past few years, Very High Energy (VHE) gamma ray astronomy has made spectacular progress and has established itself as a vital branch of astrophysics. To advance this field even further, we propose the Cherenkov Telescope Array (CTA), the next generation VHE gamma ray observatory, in the framework of a worldwide, international collaboration. CTA is the ultimate VHE gamma ray observatory, whose sensitivity and broad energy coverage will attain an order of magnitude improvement above those of current Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACTs). By observing the highest energy photons known, CTA will clarify many aspects of the extreme Universe, including the origin of the highest energy cosmic rays in our Galaxy and beyond, the physics of energetic particle generation in neutron stars and black holes, as well as the star formation history of the Universe. CTA will also address critical issues in fundamental physics, such as the identity of dark matter particles and the nature of quantum gravity.

VHE gamma rays from 100GeV to 10TeV can be observed with ground-based IACTs. The history of VHE gamma ray astronomy begun with the discovery of VHE gamma rays from the Crab Nebula by the Whipple Observatory in 1989. The current generation IACTs featuring new technologies, such as H.E.S.S., MAGIC, and VERITAS, have discovered about 200 Galactic and extragalactic sources of various types to date.

CTA is designed to achieve superior sensitivity and performance, utilizing established technologies and experience gained from the current IACTs. The project is presently in its preparatory phase, with international efforts from Japan, US and the EU. It will consist of several 10s of IACTs of three different sizes (Large Size Telescopes, Mid Size Telescopes, and Small Size Telescopes). With a factor of 10 increase in sensitivity (1m Crab  $\sim 10^{-14}$  erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>), together with much broader energy coverage from 20GeV up to 100TeV, CTA will bring forth further dramatic advances for VHE gamma ray astronomy. The discovery of more than 1000 Galactic and extragalactic sources is anticipated with CTA.

CTA will allow us to explore numerous, diverse topics in physics and astrophysics. The century-old question of the origin of cosmic rays is expected to be finally settled through detailed observations of supernova remnants and other Galactic objects along with the diffuse Galactic gamma ray emission, which will also shed light on the physics of the interstellar medium. Observing pulsars and associated pulsar wind nebulae will clarify physical processes in the vicinity of neutron stars and extreme magnetic fields. The physics of accretion onto supermassive black holes, the long-standing puzzle of the origin of ultrarelativistic jets emanating from them, as well as their cosmological evolution will be addressed by extensive studies of active galactic nuclei (AGN). Through dedicated observing strategies, CTA will also elucidate many aspects of the mysterious nature of gamma ray bursts (GRBs), the most energetic explosions in the Universe. Detailed studies of both AGNs and GRBs can also reveal the origin of the highest energy cosmic rays in the Universe, probe the cosmic history of star formation including the very first stars, as well as provide high precision tests of theories of quantum gravity. Finally, CTA will search for signatures from elementary particles constituting dark matter with the highest sensitivity yet. Realization of the rich scientific potential of CTA is very much feasible, thanks to the positive experience gained from the current IACTs.

The CTA-Japan consortium is making a significant contribution to the construction of the Large Size Telescopes (LSTs). In the end of FY 2016, the first LST will make the first light at La Palma in Canaries and three more LSTs will be build successively, the construction of the four LST array is scheduled to be in FY2018. The LST covers the low energy domain from 20GeV to 1000GeV and is especially important for studies of high redshift AGNs and GRBs. The diameter and area of the mirror is respectively 23m and 400m<sup>2</sup> to achieve the lowest possible energy threshold of 20GeV. All optical elements / detectors require high specifications, for example, high reflectivity, high collection efficiency, high quantum efficiency and ultra fast digitization of signal and etc. For the first telescope construction, CTA-Japan is producing high quantum efficiency photomultipliers, ultrafast readout electronics, high precision segmented mirror sont enters.

On the strength of their experience gained from construction of the MAGIC telescope, the Max-Planck-Institute for Physics in Munich is responsible for the construction of the 23m diameter telescope structure, based on a carbon fiber tube space frame. The LSTs require very fast rotation (180 degrees/20 seconds) for promptly observing GRBs.

## テレスコープアレイ (TA) グループ



#### 研究の目的

- 最高エネルギー宇宙線の発生源を探る
- 最高エネルギー宇宙線はどんな粒子なのかを探る
- GZK 効果を観測して、極高エネルギーでの特殊相対性理論 を検証する

#### 実験装置

テレスコープアレイ (TA) は約 700 km<sup>2</sup> の地表をカバーす る地表粒子検出器アレイと、3 カ所の大気蛍光望遠鏡ステーショ ンで構成されます (図 2)。米国ユタ州の砂漠地帯 (北緯 39 度、 西経 113 度、標高約 1400m) で、日米韓露とベルギーの 5 カ 国の研究者約 130 人が共同で観測を行っています。

507 台のシンチレーター(宇宙線が通過すると発光する物質 を用いて作られた検出器)地表検出器を、1.2 km 間隔で格子状 に並べました。観測データは無線 LAN ネットワークを使って 取得しています。シャワー粒子の到来時刻は、全地球測位シス テム(GPS)で測定し、装置の運転に必要な電力は太陽電池で 供給します。自然環境に負荷を掛けない自立型検出器です(図 1 左)。



2 TA の装置を実線の矢印で、その北西部にある TALE を点線の矢印で示す。TA の東側にある TAx4 のために追加する装置を破線の矢印で示す。線で囲んだ領域は地表検出器アレイを、矢印の付いた水色の丸印は大気蛍光望遠鏡を示す。

The TA detector is indicated by solid arrows. The TALE detector is indicated by dotted arrows. The additional detector for the TAx4 detector is indicated by dot-dashed arrows. The area surrounded with a line is an array of surface detectors. The circles in light blue with arrows indicate fluorescence telescope stations.

1 (左)砂漠に基盤目状に設置した TA の地表検出器。後方に更に4台が見える。 (右)TA 大気蛍光望遠鏡と建物。光電子増倍管によるカメラを用いて空気シャ ワーからの紫外発光を光速、高感度で撮影する。前方の小屋にあるのが JEM-EUSO の望遠鏡の試験機

(Left) One of the TA ground array detectors deployed in the field. Four more are seen behind. (Right) TA air fluorescence telescopes. The detector in the hut in front of the TA FD station is the prototype of JEM-EUSO.

地表検出器アレイの外縁には、大口径の広視野望遠鏡を3カ 所に設置し、空気シャワー中の粒子が引き起こすわずかなシン チレーション光を撮像しています(図1右)。地表での粒子の 測定に、望遠鏡による大気中での空気シャワーの発達の観測が 加わるので、測定の精度や信頼度が格段に高まります。さらに、 シャワーを発生した元の宇宙線の粒子種(陽子や原子核、ガン マ線やニュートリノなど)の区別も可能となります。

また TA の北側のサイトに望遠鏡を追加し、10<sup>15.6</sup>eV~10<sup>18</sup>eV 以下の低エネルギーへの性能拡張(TA Low-energy Extension: TALE)によって銀河宇宙線から銀河系外宇宙線に移り変わる 物理現象を突きとめる研究も始まっています。

#### 研究内容

#### 超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトルと組成

平成 27 年 5 月までの 7 年間に、地表アレイでは約 3000 例 の 10<sup>19</sup> 電子ボルト (1000 京電子ボルト) 以上の宇宙線を観測 しました。TALE 望遠鏡によって取得された 10<sup>15.6</sup> 電子ボルト (4000 億電子ボルト) 以上の宇宙線のエネルギースペクトルを 測定しました(図3)。10<sup>19.8</sup>電子ボルトに折れ曲がりが観測され、 過去に AGASA が観測した極高エネルギー宇宙線の超過数は確 認されませんでした。また、10<sup>18.72</sup> 電子ボルトに折れ曲がりが 見られ、電子陽電子対生成から期待される折れ曲がりと矛盾が ありません。さらに、TALE 望遠鏡で、10<sup>16.3</sup> 電子ボルトと 10<sup>17.3</sup> 電子ボルト付近にも折れ曲がりが見られました。

また、1 つの望遠鏡と地表アレイを使ったハイブリッド観測 で、空気シャワーの最大発達深さ Xmax のエネルギー依存性を 測定しました(図4)。10<sup>182</sup> 電子ボルト(約160京電子ボルト) 以上の宇宙線の粒子種は軽い組成(主に陽子)と矛盾がありま せん。

#### 最高エネルギー宇宙線の到来方向の異方性

平成 27 年 5 月までの 7 年間に地表検出器で観測した 10<sup>19.76</sup> 電子ボルト以上の最高エネルギー宇宙線 109 事象の到来方向の 有意度マップを赤道座標で図 5 に表示しました。世界で初めて 高い有意度で異方性(過剰に宇宙線が到来する天球上の領域 [ホットスポット])の兆候をとらえました。また宇宙の大規 模構造との相関、近傍の AGN の位置との相関のヒントも見ら れました。

#### 将来計画

地表検出器を 500 台追加して、2.1km 間隔で設置し、TA の 地表検出器を展開する領域を4倍(約 3000km<sup>2</sup>)に拡張します (TAx4)。これによりデータの取得を加速して、ホットスポット の兆候を確実に確認し精査観測をして、高統計で詳細に最高エ ネルギー宇宙線の起源を探り、近傍の超銀河宇宙との関わりを 研究する予定です。この建設が平成 27 年度から始まりました。 また、これまで TALE 実験で計画した約 100 台の地表検出器 のうち、部分的に設置して稼働しています。残りの TALE 地表 検出器の建設も平成 27 年度から始まりました。TA サイトで新 しい宇宙線観測装置の R&D を行っています。例えば、最高エ ネルギー宇宙線を国際宇宙ステーションから観測する JEM-EUSO 計画の試作機の試験も行っています。



3 TA の地表検出器(●)、TA の大気蛍光望遠鏡(■) と TALE の大気蛍光望遠鏡(●□)で測定した超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル。

The energy spectra of UHECR measured by TA surface detector  $(\bullet)$ , TA fluorescence detector  $(\bullet)$  and TALE fluorescence detector  $(\bullet)$ 



4 TA で測定した超高エネルギー宇宙線の平均 Xmax とエネルギーの 関係(●)。青線が陽子モデルで、赤線が鉄モデル。のキャプション: 修正無し

The average Xmax vs. energy of TA cosmic ray events ( $\bullet$ ). The blue and red lines denote proton and iron models, respectively.



## **Telescope Array Group**

The Telescope Array (TA) was built to study the nature and origin of Ultra-high Energy Cosmic Rays (UHECRs) in Utah, USA. It is composed of a ground array of 507 scintillation counters and three batteries of air fluorescence telescopes overlooking the array from the periphery. The accuracy of measurements is greatly improved by observing the same event by the telescope and the ground array at the same time. The sensitivity of TA is an order of magnitude larger than that of AGASA, a predecessor of TA, which had been operated until 2004 in the Akeno observatory in Yamanashi, Japan. The large sensitivity and the precision of TA help to improve the association of high energy cosmic rays with the potential astronomical sources in the sky. The TA has been operated by the international collaboration of Japan, USA, Korea, Russia and Belgium. Observations by TA began in the spring of 2008. The TALE is the TA Low-energy Extension down to 10<sup>15.6</sup> eV, which aims at studying the transition of galactic cosmic rays to extragalactic cosmic rays. In the northern TA site, the full TALE telescopes started and the TALE surface detector array was partially started.

By May 2015, about 3000 cosmic ray events above  $10^{19}$  electron volts (eV) have been collected by the TA air shower array. Fig.3 shows the TA energy spectrum. TA confirmed flux suppression above  $10^{19.8}$  eV, which is consistent with the prediction by Greisen, Zatsepin and Kuzmin (GZK). TA confirmed a break at  $10^{18.72}$  eV (ankle), and there are breaks at around  $10^{16.3}$  eV and  $10^{17.3}$  eV in the TALE spectrum. The composition by TA is consistent with a light, largely proton composition as shown in Xmax vs energy plot (Fig.4). Using 109 cosmic-ray events with energy E >  $10^{19.76}$  eV, TA observed a cluster of events (hotspot) with a statistical significance of 5.07 $\sigma$ , centered at right ascension of 148.4° and declination of 44.5° (Fig.5). The probability of such a hotspot appearing by chance in an isotropic cosmic-ray sky was  $3.7 \times 10^4$  (3.4 $\sigma$ ).

The TA extension (TAx4), which quadruples the TA, aims at confirming the above-mentioned hotspot and studying energy spectrum, composition and other anisotropies of arrival directions for UHECRs in highest-energy region precisely. Its construction started in 2015. The subject of the TALE surface detector extension concerns the study of the transition from galactic to extragalactic cosmic rays by measuring Xmax with better accuracy. Its construction started in 2015.

TA で観測した 10<sup>19.76</sup> 電子ボルト以上の宇宙線の到来方向を半径 20°の円でサンプリングした場合の統計的な有意度をプロットした天球マップ(赤道座標表示)。赤経 148.4°、赤緯 44.5°を中心としたホットスポットが見られ(期待数が 6.88 に対して観測数が 24)、その最大有意度は 5.07σである。一様到来方向分布の場合に、この最大有意度を偶然超える確率は 3.7×10<sup>-4</sup> (3.4σ)である。

Hammer projection of the statistical significance of TA cosmic ray events with E > 10<sup>19.76</sup> eV with 20 ° -radius circle sampling in the equatorial coordinates. The maximum excess appears as a hotspot centered at right ascension of 148.4° and declination of 44.5° with a statistical significance of 5.07  $\sigma$  (24 events observed, whereas 6.88 expected). The chance probability of obtaining this maximum significance for isotropic distribution is  $3.7 \times 10^4$  (3.4  $\sigma$ )

## チベットグループ



#### 研究の目的

- 高エネルギーガンマ線を放射している天体を探索し、宇宙線の加速起源を明らかにする
- 超高エネルギーー次宇宙線の化学組成(どの原子核なのか) を解明する
- 超高エネルギーー次宇宙線のエネルギースペクトル(分布) を計測し、宇宙線の加速機構を解明する
- 高エネルギー宇宙線により太陽惑星間に拡がる磁場構造を 調べる
- ●高エネルギー宇宙線の飛来方向に関する特異性(異方性) を調べる

#### 実験装置

中国チベット自治区の羊八井高原(ヤンパーチン高原、標高 4,300m)に、中国と共同で空気シャワー観測装置を建設し、 宇宙から飛来する高エネルギー(1TeV=10<sup>12</sup> 電子ボルト =1 兆 電子ボルトから 100PeV=10<sup>17</sup> 電子ボルト =10 京電子ボルト) 宇宙線(原子核とガンマ線)の観測を行っています。主装置と して、プラスチックシンチレーターと呼ばれる、荷電粒子が通 過すると発光する素材を用いた空気シャワー観測装置(図1) を使用します。具体的には、面積 0.5m<sup>2</sup> のプラスチックシンチ レーターを、7.5m 間隔でほぼ碁盤目状に並べ、37,000m<sup>2</sup> の領 域に飛来する空気シャワーを観測します。荷電粒子による発光 は、光センサーである光電子増倍管で検出後に電気信号に変換 され、その発光時刻と発光量(電荷)をデータとして収集します。 検出出来る空気シャワーのエネルギーの下限値は約 3 兆電子ボ ルトです。

#### 研究内容

#### 数兆電子ボルト(数 TeV)ガンマ線の検出

空気シャワー観測装置で、かに星雲から TeV 領域のガンマ線 を検出しました(図2)。空気シャワー観測装置による高エネ ルギーガンマ線の検出は世界で初めてです。また、活動銀河核 の Mrk421 や Mrk501 などからのガンマ線検出にも成功してい



1 チベット空気シャワー観測装置 / Tibet air shower array

#### Knee エネルギー領域の一次宇宙線の エネルギースペクトルの観測

Knee エネルギー領域(1000 兆電子ボルト~1京電子ボルト) の一次宇宙線のエネルギースペクトルを大変良い精度で観測し ました(図3金)。Knee エネルギー領域のエネルギースペクト ルの折れ曲がりは、超新星爆発の衝撃波による粒子加速の限界 や、銀河系からの宇宙線の流出問題を解く重要な鍵を握ってい ます。一方空気シャワー観測装置とその中心に置かれた空気 シャワーコア検出器と呼ばれる装置との連動実験からは、宇宙 線を構成する原子核成分の内、陽子やヘリウムに関するエネル ギースペクトルが得られていますが、図3箇からはエネルギー が高くなるに従って、宇宙線を構成する原子核成分に重原子核 成分が大きく含まれるようになっていることが見て取れます。



3 ② Knee エネルギー領域以上の宇宙線全粒子エネルギースペクトル ③ Knee エネルギー領域一次宇宙線中でヘリウムより重い原子核成 分の割合のエネルギー依存性

(left) All-particle energy spectrum of primary cosmic rays above "Knee" energy region. / (right) Energy dependence of fraction of nuclei heavier than helium in primary cosmic rays around "Knee" enegy region.

#### 太陽活動と銀河宇宙線による「太陽の影」の変動

太陽活動(黒点数)は11年周期(サイクル)で変化するこ とが知られており、2008年から太陽サイクル24に入りました。 チベットの空気シャワー観測装置は精巧に作られているため、 銀河宇宙線による太陽と月(いずれも視直径約0.5°)の影を 鮮明に捉えることが出来ます。銀河宇宙線中の太陽の影は、太 陽活動によって変化する太陽惑星間の磁場の影響を受けて、そ の深さや位置が変化します。図4はこの装置で観測された「太 陽の影」の深さの年変化です。宇宙線中の太陽の影の観測を 1996年から2009年に掛けて行い、太陽サイクル23をほばカ バーしたことになります。これは、太陽活動を考慮したシミュ レーションと良く合っていることがわかります。この実験によ り、今まで観測方法が無かった太陽惑星間の磁場構造について も貴重なデータが得られるものと期待されています。

#### 銀河宇宙線の異方性

ほぼ等方的に飛来する、数兆電子ボルト(数 TeV)から数百 兆電子ボルト(数百 TeV)のエネルギーを持つ宇宙線の恒星時 異方性を高精度で2次元的に測定しました。(図5 ⑤)。良く知 られた0.2%程度の恒星時異方性(Tail-inやLoss Cone)の他に、 白鳥座方向(シグナス領域)に新しい銀河宇宙線異方性を発見 しました(図5⑤)。さらに、シグナス領域に数個のホットスポッ トがあることが判明し、新しいガンマ線放射天体の可能性が示 唆されました。そしてそれは米国のミラグロ実験によって確認 され、我々の観測の正しさが検証されました。また、銀河回転 運動に起因する見かけの恒星時異方性(約 0.1%)が観測され なかったことにより、銀河宇宙線が局所的な銀河磁場と共回転 していることが示されました。

#### 将来計画

銀河系内のどこかに宇宙線を Knee エネルギー領域まで加速 する未知の宇宙加速器が存在し、宇宙線はその宇宙加速器の近 傍で 100TeV 領域のガンマ線を生成します。我々はその 100TeV 領域ガンマ線観測の世界初観測を目指して、空気シャ ワー観測装置の地下に約 4000m<sup>2</sup> の大型水チェレンコフ型 ミューオン観測装置 (MD) を建設しました。また、Knee エネ ルギー領域の陽子やヘリウムを選別してそのエネルギースペク トルの折れ曲がり位置をさらに精密に測定することにより、宇 宙線の衝撃波加速シナリオを検証するために、新空気シャワー コア観測装置 (YAC)を建設しました。空気シャワー観測装置 と MD 及び YAC の連動実験が平成 26 年に開始され、宇宙線 の起源と加速機構解明に向けて大きな期待が寄せられていま す。



4 観測された宇宙線中の太陽の影の深さに関するデータシミュレー ションの比較企と、太陽黒点数の年変化(予

Comparison of Sun shadow depth in cosmic rays between MC and simulation and the observed data. (top) Yearly variation of sun spot numbers. (bottom)



5 恒星時宇宙線異方性雹(上から 4, 6.2, 12, 50, 300TeV)と、シグナス領域(Ⅲ)のガンマ線点源探索雹 (e の赤いホットスポットに注目)

Cosmic ray anistropy at sidereal time frame for 4, 6.2, 12, 50, 300TeV from above. (left) Search for gamma ray point sources in the Cygnus region (III). (right) Watch out the hot red spots in e), please.

## Tibet ASr Group

Our research subjects are: Search for high-energy gamma-ray (a few TeV) celestial point sources; The measurement of the energy spectrum and the composition of very high-energy primary cosmic rays; The study of 3-dimensional global structure in the solar and interplanetary magnetic fields by means of high-energy galactic cosmic rays; The measurement of high-energy galactic cosmic-ray anisotropies.

Tibet-III, 37,000m in area, consists of 789 scintillation counters that are placed at a lattice with 7.5 m spacing. Each counter has a plate for a plastic scintillator, 0.5 m in area and 3 cm in thickness, and equipped with a 2-inch-in-diameter photomultiplier tube. The detection threshold energy is approximately a few TeV.

We successfully observed TeV gamma-ray signals from the Crab Nebula for the first time in the world as an air-shower array. TeV gamma-ray signals from active galactic nuclei, Markarians 501 and 421, were also observed.

We made a precise measurement of the energy spectrum of primary cosmic rays in the "knee"  $(10^{15} - 10^{16} \text{eV})$  region. The chemical composition in the "knee" region is a crucial key to clarify the mechanism of how cosmic rays are generated, accelerated and propagated to Earth. The hybrid experiment with the air shower core detectors and Tibet-III demonstrates that the fraction of nuclei heavier than helium increases in primary cosmic rays as energies go up and that the "knee" is composed of nuclei heavier than helium, supporting the shock-wave acceleration scenario in supernova remnants.

Because a charged particle is bent by a magnetic field, the apparent position of the Sun's shadow in the galactic cosmic rays shifts from its expected location due to the solar and interplanetary magnetic fields. It is expected that Tibet-III will provide important data to study the global structure of the solar and interplanetary magnetic fields correlated with 11-year-period solar activities. Covering mostly the solar cycle 23 (our data from 1996 to 2009), we show that yearly change in the Sun's shadow depth in cosmic rays is well explained by a simulation model taking into account the solar activities.

Tibet-III measures high-energy galactic cosmic-ray anisotropies with high statistics. We made precise 2-dimensional maps of high-energy (a few TeV to a few hundred TeV) galactic cosmic-ray anisotropies at sidereal time frame. Besides the established "Tail-in" and "Loss-cone" anisotropies, we discovered a new anisotropy in the Cygnus region. We found some hot spots in the Cygnus region, suggesting that they be celestial sources emitting TeV gamma rays. They were recently confirmed by the Milagro experiment in U.S.A. On the other hand, the corotation of cosmic rays with our galaxy was shown as well, as we observed no big (1% level) apparent anisotropy due to galactic rotation which would have been observed otherwise.

We constructed large underground muon detectors (MD: approximately 4000m<sup>2</sup>) under Tibet-III to locate yet-unknown cosmic ray accelerator (PeVatron) producing gamma rays at 100 TeV energies. We also set up new air shower core detectors (YAC) in order to more precisely measure the knee position of proton and helium energy spectra. The hybrid experiment (Tibet-III+ MD+ YAC) started data-taking in 2014. New and interesting results from them are expected as regards the origin and acceleration mechanism of comic rays.

## 高エネルギー天体グループ



1 高エネルギー粒子加速源として知られるかに星雲像。1054 年の超新星爆発の後に形成された回転中性子星(かにパルサー)が星雲の中心にあり、 星雲全体にエネルギーを供給していることが知られている。©NAOJ / A Subaru image of the Crab nebula, which is known as an efficient particle accelerator. A rotating neutron star, the Crab pulsar, which was created after the supernova explosion in 1054 A.D, is at the center of the nebula and known to provide energy throughout the nebula

#### 研究の目的

宇宙には光速に近い速さで飛び回っている粒子が存在し、そ のエネルギーは100万~10億電子ボルト未満から1垓(1兆 の1億倍)電子ボルト超まで、十数桁以上に渡ります。それ らは宇宙線として地球に飛来し直接観測されることもあれば、 それらの放つエックス線、ガンマ線、ニュートリノの観測によ り間接的に存在が知られることもあります。こうした宇宙線粒 子は高エネルギー天体現象に伴い加速・生成されていると考え られていますが、その詳細には未知の部分が沢山残っており、 我々「高エネルギー天体グループ」の研究ターゲットになって います。

#### 背景

宇宙線粒子の加速過程とは、背景の熱的プラズマ・磁場のエ ネルギーが、少数の高エネルギー粒子に選択的・集中的に引き 渡される過程であり、その理解のためには、プラズマ物理学の 基礎に基づいた詳細な考察が必要となります。反対に、粒子加 速過程の研究を通じて、プラズマ物理学はその内容を豊富にし てきました。宇宙線加速の基本過程と考えられている衝撃波統 計粒子加速機構の研究の発展はその例であり、他の有名な例と して、磁気エネルギーの爆発的解放をもたらす磁力線再結合機 構の研究の発展があります。その両者において、日本の研究者 群が挙げてきた先進的な成果が、「高エネルギー天体グループ」 の活動の背景です。

#### 研究内容

#### 高エネルギー天体現象による宇宙線の加速過程の探索

宇宙線の加速過程・放射過程の舞台となる高エネルギー天体 現象として、超新星爆発・パルサー磁気圏(図1)、マグネター(超 強磁場中性子星)の巨大フレア、銀河中心ブラックホールから 噴き出すジェット、星形成銀河、正体不明のガンマ線バースト、 銀河団などを挙げることができます。近年の Fermi 衛星や地上 チェレンコフ望遠鏡の活躍により、こうした天体からのガンマ 線観測は、目覚ましい発展を遂げています。また IceCube のよ うな巨大設備の稼動が始まってニュートリノの検出効率があが り、その起源天体を探るうえで十分な量のサンプルが取れる日 が近づいています。我々のグループでは、伝統的な衝撃波によ る粒子加速過程だけではなく、乱流による比較的遅い加速過程 を考え、活動銀河核ジェットやガンマ線バーストなどに適用す る研究を進めています。また、こうした天体から放出されるガ ンマ線、宇宙線、ニュートリノなどの量を定量的に見積った上 で観測と比べたり(図2)、重力波源と期待される中性子星合体 時の電磁波放射の計算を進めたりしています。このように、我々 の研究対象は宇宙線研究所で進められている観測プロジェクト と密接に関係しています。

#### 理論的手段や人工衛星の観測データ解析も活用

我々は、数値シミュレーションなどの理論的手段に加え、人 工衛星などの観測データ(電磁場・電波観測、プラズマ粒子・エッ クス線~ガンマ線観測など)の解析も活用しています。近年、 宇宙線を構成している粒子成分のうちの電子のエネルギースペ クトルの振る舞いに異常が見つかり、その起源に注目が集まっ ています。我々は国際宇宙ステーションにおける電子観測計画 に参加してその起源の解明に寄与したいと考えています。

#### 巨大電波パルスや短時間電波バーストの解明

我々は中性子星における高エネルギー現象を探る手がかりと して巨大電波パルス(GRP)の観測的研究も行ってきました(図 3)。一方、最近注目を集めている謎の高エネルギー天体現象に 短時間電波バースト(FRB)があります。FRB は銀河系外起源と 推定され、銀河系内からの GRP とは別種の現象ですが、観測 手法的に多くの共通点があるばかりではなく、電波発生の物理 機構解明にも FRB・GRPの比較研究が重要と考えられます。我々 は FRB の謎を解明すべく、電波天文研究者との共同研究を開始 しています。



2 乱流加速モデルに基づく、ガンマ線バーストから放たれる最高エネルギー宇宙線のスペクトル(太い実線)。Telescope Array(緑色の丸)や AUGER 実験(白抜き丸)のデータと良く一致しています。宇宙線が宇宙空間を伝播中に放つニュートリノ(細い実線)は、10<sup>17-1018</sup>eV にかけて、他のモデル(点線、破線)とは異なった急激な立ち上がりを見せます。これを将来観測で確認することで、宇宙線の起源に迫ることができます。

The model spectra of ultra high-energy cosmic rays (UHECRs, thick solid lines) based on the stochastic acceleration by turbulences in gamma-ray bursts jets. They agree with the observed data with Telescope Array (green circles) and AUGER (open circles). The spectra of cosmogenic neutrinos (thin solid lines), which are produced from UHECRs during propagation in the intergalactic space, show a sharp rise at  $10^{17} - 10^{18}$ eV, which are distinctively different from other models (dotted and dashed lines). If we confirm such a spectral shape in future observation, that will be evidence of the stochastic acceleration



## **High Energy Astrophysics Group**

The high energy astrophysics group aims at making theoretical and observational studies of violent astrophysical phenomena, in which energies of background plasma/magnetic field are transported into selected particles, namely, non-thermal cosmic ray particles. The standard theory of cosmic ray acceleration process invokes effective diffusive-shock-acceleration (DSA) mechanism working around collisionless astrophysical shocks and their turbulent environment. The magnetic reconnection (MRX) mechanism is another candidate for effective particle acceleration processes. Understanding of transport/selection processes involved in the DSA and MRX mechanisms requires deep consideration based on microscopic plasma physics. Research tradition in Japan for studies of DSA and MRX mechanisms provides the background for the activity of our high energy astrophysics group.

Targets of our current study include supernova explosions/pulsar magnetospheres (Fig. 1), giant flares of magnetars, jets from active galactic nuclei, star-burst galaxies, mysterious gamma ray bursts, and galaxy clusters. We have studied not only the models based on standard DSA theory, but also a relatively slow acceleration model via plasma turbulences, which has been applied to the relativistic jets from active galactic nuclei, or gamma-ray bursts. We have also estimated emissions of gamma-rays, cosmic-rays, and neutrinos from high-energy astronomical objects, and compare our results with observational constraints (Fig. 2). Another study we have been conducting is electro-magnetic wave emission as a counterpart of gravitational wave emission from a binary neutron star merger. Our research targets, thus, closely relate to the observational projects in ICRR.

To probe high-energy phenomena in neutron star magnetospheres, we have been also observing giant radio pulses (GRPs, Fig. 3). GRPs have commonalities with recently-discovered enigmatic extragalactic phenomena, fast radio bursts (FRBs), not only on the detection technology side but also on the physical side of emission mechanisms. We have started collaboration with radio astronomers to solve the FRB problem.

3 情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター34mパラボラアンテナ(左) と東北大学惑星圏飯舘観測所惑星シンクロトロン電波望遠鏡(右)。 パルサーからの巨大電波パルス(GRP)の多波長・多地点観測をこ れらの望遠鏡で行ってきました。こうした観測とそのデータ解析は、 将来の短時間電波パースト(FRB)観測のための技術開発を兼ねています。

Kashima 34m Antenna of Kashima Space Technology Center, National Institute of Information and Communications Technology (left) and litate Planetary Radio Telescope of Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University (right). With those telescopes, we have operated multi-wavelength and multi-point observations of giant radio pulses (GRPs). Those observations and data analysis serve as the technical development for future observation of fast radio bursts (FRBs)

## 宇宙基礎物理学研究部門

Astrophysics and Gravity Research Division

3 1000

a provident and the second state of the second state





## 重力波グループ



#### 研究の目的

● 大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」を用いて重力波を直接検出し、重力波観測ネットワークの一員として、重力波を用いた天文学を開始すること

アインシュタインの一般相対性理論によれば、質量の存在に より物体の周囲の空間が歪んでおり、その空間の歪みこそが重 力であると表現します。物体が運動すると、周囲の空間を歪め ながら移動するので、その歪みが振動となって遠方まで伝わり ます。伝わる速さは光の速さと同じ速さと考えられています。 これが重力波です。超新星爆発やブラックホールの形成など、 強い重力場での一般相対性理論の検証は、唯一重力波によって のみ可能です。また、可視光、電磁波、ニュートリノと拡がっ てきた天体観測の手段に新たに重力波が加われば、今まで観測 不能であった星や宇宙の情報が得られる可能性があり、重力波 を検出することには非常に重要な意味があります。そしてつい に、アメリカの LIGO グループの 2 台の重力波望遠鏡が、 2015 年 9 月 14 日に、人類史上初めて、連星ブラックホールの 合体から発生した重力波の直接観測に成功し、いよいよ重力波 天文学の幕が切って落とされました。

#### 実験装置

重力波が到達すると、二つの物体間の距離が変化することが 分かっています。そこで、重力波によって変化する物体間の距 離の変動を超精密に測定することで、重力波を検出します。そ の距離の変化は、地球と太陽の間の距離が水素原子一個分変わ るくらい小さなものであることからも、それが如何に困難なこ とかが理解できると思います。測定には、極めて精度の高いレー ザー光を"物差し"として利用する、マイケルソン干渉計を用 います。元々1本の光を直交する2本の光に分け、それを鏡で 折り返してまた1本に重ねるということをする装置です。光路 長に応じて、重なり方が変化し、それが光の干渉縞となって観 測されます。もし光路長が重力波によって変化したとすると、 その干渉縞が明滅し始めます。このわずかな明滅を利用して、 重力波の存在を検出します。望遠鏡の感度を高めるには、干渉 計の光路を長くすることと、様々な振動雑音を極限まで取り除 くことが必要です。特に地面の振動は、重力波以外の光路長を 変えてしまう原因となるので、極限までの振動抑制が必要とな ります。そのために、日本の KAGRA では、この望遠鏡を地面 振動の少ない神岡鉱山地下 200m の、L 字型に直交する長さ 3km のトンネル二本の中に設置します。さらに、装置の一部を 低温化することで、装置の熱振動による揺らぎすら低減させる 技術を投入します。

■ Xアームに設置された真空ダクト。/ Vacuum tubes set in the X-arm

#### 研究の現況

#### 高性能防振装置やサファイア鏡の開発

KAGRA 計画は 2010 年から文部科学省の最先研究事業の一 つとして建設が開始され、現在は大規模学術フロンティア促進 事業として推進されています。2012年に開始された空洞掘削 は 2014 年 3 月末に完成し、2014 年度は、電気工事・冷却水 等の配管工事・真空装置の設置土台工事等、空洞内整備が行わ れました。2015年度には、レーザー干渉計の設置・インスト ルが行われ、第一期実験施設を完成させた後、2016年3月か ら4月にかけて、初めてのレーザー干渉計の試験運転を行いま した。並行して、KAGRA の最終形で投入される高性能鏡防振 装置及び低温鏡懸架装置、サファイア鏡などの開発と準備も行 われています。また、本計画の特徴であり、先進的な挑戦でも ある地下環境の利用と装置と低温化に関し、同様のテーマを共 有するヨーロッパの次世代重力波望遠鏡計画母体(EGO)との 間で 2012 年に開始した国際共同研究では重要な研究成果が上 がっています。さらに、KAGRA 計画における各重要構成部門 の推進を加速させるために、韓国などアジアの重力波研究グ ループとの共同研究も拡大し、KAGRA Scientific Collaboration (KSC)が創設されました。



2 KAGRA の完成予想図 Schematic view of KAGRA planed underground at Kamioka

#### 7 億光年の範囲で発生する重力波検出を目指す

KAGRA 計画では、地球から約7億光年の範囲内で発生する 重力波の直接検出を目指し、同様に重力波の初検出を目指すア メリカやヨーロッパの重力波望遠鏡計画(LIGO 計画、VIRGO 計画、GEO 計画)と、重力波の検出という人類共通の目標の 達成のために、各計画と技術的・観測的協力をより密に行う覚 書を締結しています。



3 レーザーとレーザーを格納する ISO Class 1 クリーンブース Laser system and ISO class 1 clean room for housing it



 <sup>4</sup> 中央実験室に設置 されたクライオス タットと断熱真空 ダクト
 Cryostat and radiation shield duct set in the

corner station



5 KAGRA 試験運転を行う制御室 / Control room in the KAGRA Data Analysis Building at Higashi-mozumi area

# 第1章 研究内容について 宇宙基礎物理学研究部門

## **Gravitational Waves Group**

The gravitational wave group conducts the construction of the Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (nicknamed "KAGRA") for the detection of gravitational waves predicted by Einstein. On September 14th in 2015, the LIGO gravitational wave observatory finally detected gravitational waves from the binary black hole coalescence. The gravitational wave astronomy has started to observe the dynamic behavior of compact stars, such as neutron stars and black holes.

A gravitational wave should cause a relative change (strain) between two displaced points in proportion to their distance. Even if we take a 3 km baseline length, the effect is so tiny that extensive R&D is needed to detect it. Based on technical achievements of a 300m TAMA interferometer and a 100m interferometer CLIO (Cryogenic Laser Interferometer Observatory), the KAGRA project started as one of Strategic Fund for Strengthening Leading-edge Research and Development of Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology-Japan in 2010. The tunnel construction has been finished in FY 2013. In FY 2014, the construction of facilities and setting of almost vacuum tubes and tanks have been done. In parallel, the laser source and its frequency and transverse mode stabilization system using a mode cleaner cavities and several optics for forming a Michelson interferometer were installed. In March 2016, the first interferometer operation was demonstrated (named iKAGRA), and its engineering run finished on April 25th in 2016.

The collaboration research between the European Gravitational Observatory (EGO) and KAGRA has been conducted to explore the further technical enhancement about a cryogenic interferometer and to share the profound knowledge about the underground environment. In addition to this, KSC (KAGRA Scientific Collaboration) was established to accelerate the KAGRA subsection' s progress with the Korean gravitational wave research group.

KAGRA is designed to detect at the quantum limit a strain on the order of  $h\sim 10^{-22}$  in terms of the metric perturbations at a frequency of around 140 Hz. This would enable to detect coalescing binary neutron stars of 1.4 solar mass to 250 Mpc at its optimum configuration, for which one expects a few events per year, on average. To satisfy this objective, KAGRA adopts a power-recycled Fabry-Perot Michelson interferometer with resonant-sideband extraction scheme, the main mirrors of which are cooled down to cryogenic temperature, 20 K, for reducing the thermal noise; they are located in a quiet underground site in Kamioka mine.

KAGRA project is collaborating with foreign GW detection projects, such as advanced-LIGO (USA), advance-VIRGO (Italy-France-Netherland), GEO (UK-Germany) to explore the gravitational wave astronomy and multi-messenger astronomy with other astronomical observation channels.

## 観測的宇宙論グループ



1 ハワイ島マウナケア山頂に設置されたすばる望遠鏡 Subaru telescope at the summit of Mauna-Kea, Hawaii Island

#### 研究の目的

- 大型望遠鏡を用いた深宇宙探査により遠方銀河を探し、宇 宙初期の銀河形成過程を探る
- 宇宙初期の銀河形成に密接に関係する、宇宙再電離の物理 過程を探る

光赤外線観測などにより宇宙史の初期を明らかにすることを 目指しています。ビッグバンから始まった 138 億年の宇宙史に おいて最初の約 10 億年(宇宙背景放射の時代である赤方偏移 1100 から 6 までの間)は、ほとんど観測できておらず、宇宙 史におけるミッシングピースとなっています。この時代は宇宙 の黎明期に当たり、原始ガスから星や銀河が初めて誕生すると いった未解明の現象が数多く存在しています。またこの頃には、 宇宙を満たす水素ガスが再電離されるという宇宙史最後の大イ ベントが起こったと考えられていますが、その過程はもとより、 原因についても明らかにされていません。これらの問題は、ビッ グバン後約 10 億年の宇宙を観測しない限り分からないのです が、この時代の天体は非常に遠いため、見かけ上とても暗く、 簡単に観ることができません。

私たちは、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡、ケック望遠 鏡さらには ALMA といった世界最高感度を誇る大型望遠鏡を駆 使して、未だ人類が目にしたことのない宇宙に挑戦しています。 すばる主焦点カメラ (Suprime-Cam) に取り付けた狭帯域フィ ルターを用いて、宇宙史初期に多数存在する初期銀河、その中 でも特に検出しやすい Lyα輝線を出す銀河 (LAE) を探索して います。見つけられたこれらの銀河をハッブル宇宙望遠鏡や ケック望遠鏡などで詳しく調べることで星や銀河の誕生の謎に 迫っています。さらに、LAE の Lvα輝線が宇宙の中性水素から 受ける吸収の強度によって宇宙再電離の歴史を調べています。

#### 研究内容

#### Hyper Suprime-Cam による初期銀河の探査

すばる望遠鏡主焦点カメラ Suprime-Cam およびケック望遠 鏡 DEIMOS 分光器を用いて赤方偏移 7 における LAE の大規模 観測を行いました。この結果は 2010 年および 2012 年に Astrophysical Journal 誌の論文、さらには多くの国際研究会で 発表され、世界的に高い評価をうけました。

この観測研究から、赤方偏移 7 において宇宙再電離の痕跡が 見つかりましたが、大半の水素ガスは既に電離されているとい う事が明らかになりました。一方でこの結果は新たな疑問を投 げかけることになりました。赤方偏移 7 では初期銀河が発する 遠紫外線は、宇宙を電離するのに必要な量の 1/3 かそれ以下し かありません。このように赤方偏移 7 では遠紫外線の放出量が 非常に少ないのにも関わらず、宇宙を満たす水素の大半が電離 されているという問題が出てきました。従来の研究の測定精度 が低いのか、宇宙初期の銀河の性質を正しく理解していないの か、観測できていない宇宙初期の銀河が多数あるためにこのよ うな問題が出てきているのかもしれません。さらに、私たちの 想像を超えた現象が宇宙史初期で起きていた可能性もありま す。実際、私たちは赤方偏移7に直径5万光年にもなる予想以 上に大きな天体を発見しましたが、このような天体の再電離へ の寄与は分かっていません。

そこで、Suprime-Cam と比べて1桁程度探査能力が高いす ばる望遠鏡の次世代超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) に私たちが独自に開発した狭帯域フィルターを用いて、 研究を発展させる計画を進めています。HSC は現在、東京大学、 国立天文台、プリンストン大学や台湾の研究機関が協力して製 作し、2012 年度にファーストライトを迎えました。試験観測 期間を経て 2014 年に本格運用が始まりました。これまでの 10 倍の規模で LAE を含む初期銀河の探査を行っています。





2 ハワイ島マウナケア山頂 に設置された国立天文台 の口径 8 2m すばる望遠 鏡(下)とトップリング 上に装着された Suprime-Cam (上), Subaru telescope, NAOJ, with an 8.2m primary mirror at the summit of Mauna-Kea, Hawaii Island (bottom) and

Suprime-Cam installed

on the top ring (top).



3 これまでの研究で明らかにされた宇宙再電離の歴史。赤方偏移(横 軸)に対する中性水素比(縦軸)の進化。赤印が Suprime-Cam の 探査から付けられた制限。4つの曲線は異なる理論モデル。いつ、 どのように宇宙再電離が進んできたかはほとんど分かっていない。 History of cosmic reionization, so far, understood. Red symbols denote constraints from our Suprime-Cam survey. Four lines represent different theoretical predictions. The epoch and process of cosmic reionization are unknown

## **Observational Cosmology Group**



開発中のすばる HSC 用狭 帯域フィルター(Materion 旧 Barr Associates] 社と 協力)。

Subaru/HSC narrow band filter under development (collaboration with Barr Associates Inc.)

We study the early universe by deep multi-wavelength observations. Armed with the state-of-the art telescopes such as Subaru, Hubble, Keck, and ALMA, we aim to push the today's observational frontier towards the very high redshift universe that no one has ever seen by observations. Our goal is understanding physical processes of galaxy formation at the early stage and the relevant event of cosmic reionization.

We have recently completed our large survey for Lya emitting galaxies (LAEs) at z~7 with Subaru Prime Focus Camera (Suprime-Cam) and Keck DEIMOS spectrograph, and reported the results of the survey widely in the world. Our results indicate that there are clear signatures of increasing neutral hydrogen fraction towards z~7, but that the universe is still highly ionized at z~7. These results cast a riddle for the physics of cosmic reionization. It is known that ionizing photons produced by stars and galaxies are less than 1/3 of the amount of ionizing photons necessary for ionized universe at  $z\sim$ 7. The question is why the universe is ionized with the little ionizing photons. It would be possible that the accuracy of our neutral hydrogen fraction measurement is not high enough, or that the previous studies miss a large population of galaxies in the Suprime-Cam observations. In fact, we have discovered a giant bright Lya emitter, and the total ionizing photons produced by this kind of obiect are unknown.

We plan to address these issues with the next generation Subaru wide-field camera, Hyper Suprime-Cam (HSC), that has the survey speed about an order of magnitude faster than Suprime-Cam. HSC is developed by the University of Tokyo, National Astronomical Observatory of Japan, Princeton University, and Taiwanese institutes. HSC saw first light in the fiscal year 2012, and the survey observations have been started since 2014. Using the narrowband filters that our group develops, we conduct an order of magnitude larger survey for galaxies at z~7 with HSC than our previous surveys with Suprime-Cam.

理論グループ



#### 研究の目的

- 素粒子標準模型の背後に存在すると期待される標準模型を 超えた物理を探る
- 大統一理論と理論が予言する物理現象を理論的に探る
- 超対称性を持つ素粒子模型を探る
- 物質の起源とその進化を理論的に探る
- インフレーション宇宙模型を探る

#### 研究内容

#### 電磁気力、弱い力、強い力をまとめる大統一理論

理論グループでは、様々な角度から素粒子と宇宙に関する理 論的研究を行っています。素粒子物理学の一つの目的は、我々 の周りで起こっている現象を統一的に説明することにありま す。現在、我々の周りで起こっている現象は全て電磁気力、弱 い力、強い力、そして重力という四つの基本的な相互作用の組 み合わせに帰着できることが分かっています。素粒子の標準模 型では、さらにそれらのうち電磁気力と弱い力を元々は一つの 同じ力であったとして統一的に表現することに成功し、実験的 にも非常に高い精度でその正しさが確かめられています。この ような力の統一という観点から、素粒子物理学の次の大きなス テップとして電磁気力、弱い力と強い力が元々一つの同じ力と して統一される大統一理論の存在が期待されています。実際、 それぞれの力の強さを表す結合定数の精密測定の結果から そ のような大統一理論がいままでに実験的に到達したことのない ような高いエネルギー領域において存在する可能性を強く示唆 しています。現在の段階では大統一理論は単なる仮説に過ぎま せんが、様々な興味深い観測可能な現象や粒子の性質、例えば 陽子の崩壊やクォークとレプトンの質量の関係、ニュートリノ の質量構造を予言しており、それらの実験による検証が待たれ ています。理論グループでは、大統一理論に関連した様々な模 型の理論的性質に関して、加速器実験や宇宙観測等を包括的に 組み合わせることで研究を進めています。

#### 超対称性を持つ素粒子模型・宇宙模型

素粒子の世界を司る法則は、いくつかの対称性と呼ばれる概 念が自然界に存在することと強く結びついていることが分かっ ています。そのことから、現在素粒子論が抱えるいくつかの問 題についても何らかの未知の対称性が解決の鍵となっているの ではないかと期待されています。例えば特に超対称性と呼ばれ る新たな対称性が自然界に存在していた場合、素粒子の標準模 型の大きな問題の一つと考えられているいわゆる階層性問題が 解決されます。さらに、超対称性を仮定すると、大統一理論に 不可欠な結合定数の統一がより精度良く実現することが分かっ ています。このようなことから超対称性は現在の素粒子模型の 背後にある新しい対称性の有力な候補と考えられており、超対 称性を持つ素粒子模型・宇宙模型の研究は理論グループの重要 な研究テーマとなっています。

#### インフレーション宇宙模型

素粒子の標準模型は、これまで私達人類が検証してきた素粒 子の世界を非常に精密に記述していますが、一方で大統一理論 や超対称標準模型といった標準模型の背後にある新しい物理法 則の存在も強く期待されています。それらの標準模型を越える 物理法則を研究する上で、今日宇宙初期と天体研究は欠かせな いものとなっています。我々の宇宙は今から約 140 億年前に ビッグバンの大爆発で誕生したと考えられています。その誕生 直後の宇宙は地球上では到底再現されないような高温高密度状 態にあり、様々な素粒子が光速で飛び回っており、標準模型を 超えた世界が実現されていました。理論グループでは、大統一 理論や超対称性理論を宇宙論に応用することによって、誕生間 もない宇宙で起きる様々な素粒子現象を研究し、宇宙論の新た なパラダイムであるインフレーション宇宙をはじめ、宇宙にお ける物質の起源や暗黒物質・暗黒エネルギーの正体に関する研 究を行い、誕生から現在に至る宇宙の進化を素粒子物理の観点 から統一的に理解することを目指しています。 宇宙には我々の知っている物質では説明できない未知の暗黒 エネルギーや暗黒物質の存在が宇宙観測によって明らかになっ て来ています。理論グループでは暗黒物質等の正体を理論的側 面、現象論的側面、宇宙論からの視点をとおして研究していま す。



 超対称性標準理論で予言されるノントポロジカル・ソリトンである Q ボールの 3 次元シミュレーション
 3D simulation of Q-balls which are non-topological solitons predicted in the minimal supersymmetric standard model

The theory group is studying various theoretical aspects in elementary particle physics and cosmology.

The aim of particle physics is to give a unified view on the various interactions around us. To date, all the known interactions around us are successfully reduced into only four fundamental interactions; the electromagnetic interaction, the weak interaction, the strong interaction, and the gravitational interaction. The Standard Model of particle physics further unifies the electromagnetic and the weak interactions and has passes stringent experimental tests for more than two decades since the discovery of the W and Z bosons.

With the success of the Standard Model as a unified theory, the next big leap in particle physics will be the theory which unifies the electroweak and the strong interactions, i.e. the grand unified theory. In fact, the precise measurements of the strengths of the interactions strongly suggest the grand unification at the very high energy scale which we have not reached experimentally yet. At present, the grand unification theories are mere theoretical hypotheses, but the grand unified theories predict a lot of interesting physics, such as the decay of protons, the mass relations between quarks and leptons and the structure of the neutrino masses. Theory group is studying theoretical aspects of those phenomena related to the grand unified theory by combining the results of the observations at collider experiments and cosmological observations in a comprehensive manner.

## **Theory Group**



2 グルイーノ及びウィーノ質量の LHC14TeV 実験で期待される制限 領域 (300/fb) Phys.Rev. D87 (2013) no.1, 015028 より Expected bounds on the gluino and wino masses obtained with 300/fb of data at 14 TeV running (the solid lines). For more detail (see Phys.Rev. D87 (2013) no.1, 015028)

It is conceivable the Nature has higher symmetries at high energy scale, and existence and interaction of elementary particles may be subject to these symmetries. Supersymmetry is one of the most promising symmetries in this respect. Supersymmetry not only allows a vast separation of low energy scales from high energy scales such as the Planck scale but also makes the coupling unification at the high energy better. The Higgs boson discovered at the LHC has so far shown no hints of its substructure which is highly consistent with supersymmetry. In view of these phenomenological advantages, supersymmetric models are one of the most important subjects for Theory group.

The universe was created by a Big Bang fourteen billion years ago. Immediately after its creation, the universe is considered to be extremely hot and dense, and various elementary particles, even those difficult to produce by present-day accelerators, have been present at this early epoch. The four forces were almost indiscernible and higher symmetries should have emerged at that time. Theory group is attempting to check the elementary particle physics and/or cosmology by studying effects from interactions of the elementary particles that have taken place at the early universe.

The dark side of the universe is also an important subject of particle physics and cosmology. Recently, the existence of the dark side of the universe, i.e. dark energy and dark matter, has been revealed by cosmological observations. Theory group is studying what are the candidates for those dark unknown material from theoretical, phenomenological and cosmological point of view.

## 実験施設について Facilities

## 神岡宇宙素粒子研究施設



#### 研究内容

神岡鉱山内に設置された世界最大の水チェレンコフ検出器 スーパーカミオカンデを用いて、ニュートリノや陽子崩壊に関 する研究を行っています。1998 年には大気ニュートリノ振動 を発見してニュートリノ質量の存在を明らかにしました。この 成果により 2015 年には梶田隆章教授がノーベル物理学賞を受 賞されました。2001 年にはカナダSNO実験と共に太陽ニュー トリノ振動を発見、2004 年には茨城県つくば市にある高エネ ルギー加速器研究機構から打ち込まれた人工ニュートリノを用 いてニュートリノ振動を確認しました。また、2009 年には、 茨城県東海村にある大強度陽子加速器 (J-PARC) で生成され た人工ニュートリノをスーパーカミオカンデに打ち込み、さら に精密にニュートリノが電子ニュートリノへ変化した兆候を世 界に先駆けてとらえました。

同じ坑内では、液体キセノンを用いたダークマター探索実験 (XMASS 実験) も進められています。また共同利用研究として、 カルシウム 48 を用いた二重ベータ崩壊探索実験(CANDLES 実験)、方向に感度を持つ暗黒物質探索実験(NEWAGE 実験)、 100mレーザー干渉計による重力波及び地球物理の研究もおこ なわれています。付近には専任スタッフや共同利用研究者のた めの研究棟、宿泊施設等があり、24 時間体制で研究を行って います。



## Kamioka Observatory

#### 基本情報

住所	〒506-1205 岐阜県飛騨市神岡町東茂住 456
TEL	0578-85-2116
FAX	0578-85-2121
位置	北緯 36 度 25 分 26 秒、東経 137 度 19 分 11 秒
海抜	350m

#### アクセス

- 富山駅→JR 高山本線(50 分)→猪谷駅 →バス(10 分)→茂住バス停→徒歩(1 分)
- 富山駅→バス (70 分)→茂住バス停→徒歩 (1 分)
- 富山空港→バス(40分)→茂住バス停→徒歩(1分)

Kamioka Observatory is located in Gifu prefecture, Japan. The observatory was established in 1995 to operate Super-Kamiokande, a 50,000-ton water Cherenkov detector located 1000 m underground (2700m.w.e) in the Kamioka Mine. Super-Kamiokande discovered evidence for neutrino oscillations using atmospheric neutrinos in 1998. Because of this discovery Prof. Takaaki Kajita was awarded the Nobel Prize in Physics in 2015. By comparing solar neutrino measurements at Super-Kamiokande with the results from the SNO experiment in Canada, neutrino oscillations were further established in 2001. In 2004 neutrino oscillations were confirmed using manmade neutrinos produced by a proton accelerator at KEK. The T2K experiment, which utilizes a new accelerator facility in Tokai village (J-PARC) for precision neutrino studies, started in 2009 and observed the world's first indication of muon neutrinos oscillating into electron neutrinos in 2011.

In addition, a dark matter search experiment using liquid xenon, the XMASS experiment, is being conducted at the observatory. Several inter-university collaborative research projects, including a double beta decay experiment using calcium-48 (CANDLES), a direction-sensitive dark matter search experiment (NEWAGE), a 100 m long laser interferometer gravitational wave experiment and geophysical measurements are underway as well.

Research offices, a computing facility and a dormitory for researchers are located near the observatory allowing easy access to the experimental facilities within the mine.

#### Information

Address	456 Higashi-Mozumi, Kamioka-cho, Hida-shi, Gifu Prefecture 506-1205 Japan
TEL	+81-578-85-2116
FAX	+81-578-85-2121
Location	N36°25′26, E137°19′11
Altitude	350m

#### Access

● TOYAMA Airport → Bus(40min.) → MOZUMI Bus Stop → Walk(1min.)

```
● TOYAMA Sta. → Bus(70min.) → MOZUMI Bus Stop
→ Walk(1min.)
```

第2章 実験施設につい

## 重力波観測研究施設



#### 研究内容

神岡鉱山内に大型低温重力波望遠鏡 KAGRA を建設していま す。この重力波望遠鏡は、地面振動の小さな地下に設置するこ とで外乱を避け、サファイアミラーを極低温(20K)まで冷却 して熱雑音を抑えることで、連星中性子星の合体イベントなら ば7億年かなたのものまで観測できる感度を実現することが目 標です。

重力波の存在を予言したアインシュタインの一般相対性理論 が、その誕生からちょうど百年日となる平成 27 年に、米国 LIGO が連星ブラックホール合体イベントからの重力波をとら えました。これは人類初の重力波の直接観測として新聞等でも 大きく取り上げられましたが、そんな状況の中、本施設は発足 しました。今後は、重力波天文学を国際共同で創成することが 新たな目標となります。そのためには欧州 Virgo を加えた日米 欧の3拠点で国際ネットワークを構成し、同時観測を実行して、 重力波源の方向を定めることが重要となります。平成 30 年頃 までに低温鏡を含む KAGRA を完成させ、本格観測を開始する ことを目指しています。

#### 基本情報

- 住所 〒506-1205 岐阜県飛騨市神岡町東茂住 238
- TEL 0578-85-2343
- FAX 0578-85-2346
- 位置 北緯 36 度 25 分 26 秒、東経 137 度 19 分 11 秒 海抜 350m

#### アクセス

- 富山駅→JR 高山本線(50 分)→猪谷駅 →バス (10 分)→茂住バス停→徒歩 (5 分)
- 富山駅→バス(70分)→茂住バス停→徒歩(5分)
- 富山空港→バス(40分)→茂住バス停→徒歩(5分)

## **KAGRA** Observatory

KAGRA Observatory is located in Gifu prefecture, Japan. The observatory was established in 2016 to operate KAGRA gravitational-wave telescope, which is a 3km laser interferometer with cryogenic sapphire mirrors, located 200 m underground site in Mt. Ikenoyama.

We will complete the construction of KAGRA in two years and ioin the international gravitational wave network as soon as possible. KAGRA will contribute to the new field of gravitational wave astronomy because of its high sensitivity due to underground site and cryogenic mirrors. KAGRA is particularly suited to study gravitational wave signals below about 100 Hz, where many signals from mergers of black hole binaries are expected, as observed by LIGO.

In addition to the merger of black hole binaries, there are many astronomical objects to be studied with gravitational waves. For example, we want to detect a birth of a black hole created by a coalescence of binary neutron stars, and to resolve the mystery of short gamma ray bursts with the other gravitational wave detectors and with the counterpart astronomical observatories using various observation channels such as neutrinos and electromagnetic waves.

#### Information

Address 238 Higashi-Mozumi, Kamioka-cho, Hida-shi, Gifu Prefecture 506-1205 Japan TEL +81-578-85-2343

- FAX +81-578-85-2346
- Location N36°25′26, E137°19′11
- Altitude 350m

#### Access

- TOYAMA Airport → Bus(40min.) → MOZUMI Bus Stop  $\rightarrow$  Walk(5min)
- TOYAMA Sta. → Bus(70min.) → MOZUMI Bus Stop → Walk(5min.)

## 宇宙ニュートリノ観測情報融合センター **Research Center for Cosmic Neutrinos**



1 平成 28 年 2 月 20 日に宇宙線研究所で開催された第 29 回ニュート リノ研究会の様子 / the domestic neutrino workshop held in ICRR on February 20, 2016

#### 研究内容

宇宙ニュートリノ観測情報融合センターは、ニュートリノ、お よび、関連する研究を行うことを目的として、平成 11 年に設 立され今日に至っています。本センターのメンバーはスーパー カミオカンデ実験に参加してニュートリノ研究を進めるととも に、スーパーカミオカンデ、および、長基線ニュートリノ振動 実験 T2K 実験のニュートリノデータからニュートリノに関する 知見を最大限にあげ、さらに、理論と実験の交流をはかるなど して、ニュートリノ研究の新たな道を探っています。また、スー パーカミオカンデのニュートリノデータを最大限に生かすた め、大気ニュートリノのフラックスの研究なども行っています。 更に、次世代大型実験であるハイパーカミオカンデ計画にも参 加し、将来のニュートリノ研究を推進しています。

本センターは、本研究所の共同利用研究の役割も果たしていま す。一つは、本研究所計算委員会と共に、全国の宇宙線研究者 が本研究所の共同利用で使用される大型計算機システムの運用 をしています。本計算機システムは、総数約 2700 コアを持つ CPU、4ペタバイトの大容量ディスクシステム、18 ギガバイト /秒のデータ転送性能を持ち、大量のデータを高速で解析する ことが可能です。平成25年度に更新が行われて以来、安定に 運用されています。また、平成 16 年度より、柏地下で行われ ている一次線共同利用研究の受け入れ窓口をつとめ、また計算 機利用のみの共同利用研究や将来計画等に関連した研究会の受 け入れ窓口となっています。平成 27 年度はこれらについて合 計5件の共同利用研究を受け入れました。

平成 27 年度は、国内の関係の研究者の情報交換などをはかる ことを目的に「宇宙ニュートリノ研究会」を 2016 年 2 月 20 日に開催しました。参加者は40名でした。今回の研究会のテー マは、「大気ニュートリノ」として、本年度の梶田教授ノーベ ル物理学賞受賞を記念して、ニュートリノ振動の発見から現在 までの大気ニュートリノ研究、および将来の展望などについて 話し合いました。また、平成 21 年以来宇宙線研究所とカブリ 数物連携宇宙研究機構 (Kavli-IPMU) で年に春と秋の 2 回一般 講演会を開催していますが、春については本センターが宇宙線 研究所広報室と共同で企画・実施をしています。平成 27 年度 は 2015 年 4 月 18 日に開催され、2 人の講師によって最新の 宇宙論や重力波実験の最前線についての講演があり多くの方々 が講演に耳を傾けました。

臺 実験 施設に 5

The Research Center for Cosmic Neutrinos (RCCN) was established in April, 1999. The main mission of this center is to promote researches related to neutrinos based on data from various observations and experiments, and we have provided the occasion to discuss theoretical ideas and experimental results on neutrino physics. Members of this center have been involved in the Super-Kamiokande and T2K experiments, and contributing precise measurements of neutrino oscillations. Also we have been involved in the future project, Hyper-Kamiokande, and worked on the calculation of the atmospheric neutrino flux to have better predictions of the neutrino flux

RCCN, together with the computer committee of ICRR, is in charge of operating the central computer system in ICRR. The computer facility has high performance to analyze huge amount of data, and has been operated without any serious trouble since it was upgraded in 2014. Since 2004, RCCN has been accepted inter-university programs related to activities in the low-background underground facility also. In FY2015, we accepted \*\* programs related to these facilities.

RCCN has been organizing domestic neutrino-related workshop since it was established. On February 20, 2016, we hosted one neutrino workshop on "Atmospheric Neutrinos" in commemoration of Nobel Prize award by Prof. Kajita. Forty physicists participated in this meeting. We have also contributed holding public lectures. Since JFY2009, ICRR and the Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli-IPMU) have co-sponsored two public lectures each year. The public lecture held in Spring is co-organized by RCCN and the Public Relation Office of ICRR. The Spring public lecture in FY2015 was held on April 18, 2015. Two scientists lectured on the latest cosmology and the gravitational wave detection experiment.

## 乗鞍観測所

## 明野観測所



#### 研究内容

乗鞍における宇宙線研究の始まりは昭和 24 年に大阪市立大 学が畳平で行った実験です。翌年には大阪市立大学、名古屋大 学、神戸大学、理化学研究所の 4 機関が朝日新聞学術奨励金を 受けて岩井谷の現在の場所に通称「朝日の小屋」を建設し、宇 宙線の研究にさらに弾みをつけました。昭和 28 年 8 月初めて の全国の大学の共同利用のための研究機関として東京大学宇宙 線観測所が正式に発足しました。昭和 51 年には今までの観測 所は東京大学宇宙線研究所として生まれ変わり、乗鞍観測所は その付属施設となり現在に至っています。

超高エネルギー領域での素粒子・核反応に関する研究、銀河 系・太陽惑星空間における宇宙線変動と磁場や太陽活動に関連 した研究、太陽中性子に関連する研究、雷雲による宇宙線加速 の研究等の最先端の宇宙線研究が行われてきました。また最近 では、人工汚染の少ない高山でのエアロゾルを採取して、その 大気圏での輸送機構や大気汚染・雲発生などの影響を調べる実 験、温暖化・酸性雨などが高山の植生に及ぼす影響の調査など、 地球環境に関する研究が盛んになっています。宇宙天体からの 超高エネルギーガンマ線を探索する予備実験や、宇宙線観測用 望遠鏡の性能試験など、高い標高や暗い夜間を利用した試験観 測も行われています。近年の乗鞍観測所は、その特徴を生かし て、色々な分野の研究者によって多目的に利用されています。

#### 基本情報

- 住所 〒506-2100 岐阜県高山市丹生川町乗鞍岳
- TEL 090-7721-5674 090-7408-6224
- 位置 北緯 36 度 6 分、東経 137 度 33 分
- 標高 2,770m(平均気圧 720hPa)



#### アクセス

- JR 中央本線松本駅 → 松本電鉄 (30 分) → 新島々駅
- → 松本電鉄(2時間)→ 乗鞍岳山頂バスターミナル
   → 徒歩(25分)(バスの運行期間は7月~10月上旬)
- JR 高山本線高山駅 → 濃飛バス平湯経由(2 時間)
- → 乗鞍岳山頂バスターミナル
- → 徒歩(25分)(バスの運行期間は7月~10月上旬)

Cosmic ray research in Mt.Norikura started with an experiment conducted by Osaka City University in Tatamidaira in 1949. In the next year, the four institutions, Osaka City University, Nagoya University, Kobe University, and Institute of Physical and Chemical Research, established a lodge for cosmic-ray experiments, called "Asahi Hut", in Iwaitani based on the Asahi Academic Grant. In August 1953, the Cosmic Ray Observatory of the University of Tokyo was formally established as the first Japanese joint-use research institute for universities. In 1976, the observatory was reborn as the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), and the Norikura observatory became one of facilities of ICRR.

The observatory has been hosting cutting-edge cosmic ray researches, including the study of particle and nuclear interactions in ultra-high energy regions, cosmic ray modulations by magnetic fields and solar activities in the galaxy and the interplanetary space, observation of solar neutrons and study of cosmic-ray acceleration mechanism in thunderclouds. In addition, recent activities include researches related to the Earth environments. For examples, aerosols are observed in the unpolluted high mountain to study their transport mechanisms and their effect to air pollution and cloud generation, and the green-house effect and acid rain are studied by surveying alpine vegetation. Moreover, the observatory is used for prototype experiments to search for very-high-energy gamma-rays from the sky, and performance tests of cosmic-ray telescopes, utilizing its high altitude and night-sky darkness. Thus the Norikura observatory is working as a multi-purpose laboratory used by researchers in various fields with its unique features.

#### Information

- Address Norikuradake, Nyukawa-cho, Takayama-shi, Gifu Prefecture 506-2100 Japan
- TEL
   +81-90-7721-5674
   +81-90-7408-6224
- Location N36°6, E137°33
- Altitude 2,770m (average atmospheric pressure: 720hPa)

#### Access

- Matsumoto Sta. of JR Chuo Line → Matsumoto Dentetsu (30min.) → Shinshimashima Sta. → Matsumoto Dentetsu Bus (2hrs) → Bus terminal at the summit of Mt.Norikura → Walk (25min.) (Bus service: Jul. to early Oct.)
- Takayama Sta. of JR Takayama Line → Hohbi Bus via Hirayu (2hrs)
   → Bus terminal at the summit of Mt.Norikura → Walk (25min.) (Bus service: Jul. to early Oct.)



#### 研究内容

明野観測所では、10<sup>20</sup>eV(10000 京電子ボルト)を超える極高エネルギー空気シャワーを観測し、空気シャワーの発達や、 宇宙における極高エネルギー宇宙線の発生起源を研究して来ました。主要装置の AGASA は、平成2 年から平成16 年まで世界最大の空気シャワー観測装置として運用を行いました。現在、その観測は米国ユタ州に建設した、より大規模な複合装置 Telescope Array (TA) に引き継がれています。観測所の諸設備は、TA の観測支援と関連する開発研究、高エネルギー宇宙線 観測のための新しい装置の試験、また重力波検出用低温装置の 組立などに使われています。



## **Akeno Observatory**

#### 基本情報

住所	〒408-0201 山梨県北杜市明野町浅尾 5259
TEL	0551-25-2301
FAX	0551-25-2303
位置	北緯 35 度 47 分、東経 138 度 30 分
標高	900m(平均気圧 910hPa)

#### アクセス

● JR 中央本線韮崎駅 → タクシー(25 分)

At the Akeno Observatory, extremely high-energy cosmic rays with energies exceeding 10<sup>20</sup> eV were observed by the AGASA experiment. The AGASA had been in operation as the world' s largest air-shower array for 13 years since 1990, but was terminated in January 2004, while handing over the observation to its larger scale hybrid successor Telescope Array (TA) in Utah, USA. The observatory now supports the operation of TA in Japan, research and development related to the observation of high energy cosmic rays and the use by university collaborators in associated fields.

#### Information

Address	5259 Asao, Akeno-cho, Hokuto-shi, Yamanashi, 408-0201 Japan
TEL	+81-551-25-2301
FAX	+81-551-25-2303
Location	N35°47, E138°30
Altitude	900m (average atmospheric pressure: 910hPa)

#### Access

● Nirasaki Sta. of JR Chuo Line → Taxi (25min.)

## 📕 チャカルタヤ宇宙物理観測所





#### 研究内容

チャカルタヤ宇宙物理観測所は、南米ボリビア国立サンアン ドレス大学物理学研究所の附属施設で、ラパス市郊外 30km の チャカルタヤ山(南緯 16°21'、西経 68°08',標高 5300 m) 頂上付近に位置する世界最高高度の宇宙線観測所として、昭和 37 年以来、日本・ボリビア共同空気シャワー実験(BASJE 実験) と、日本・ブラジル共同エマルションチェンバー実験が行われ てきました。

後者は既に終了しましたが、前者(BASJE 実験)は空気シャ ワー観測装置を更新しながら観測を継続してまいりました。そ の研究目的は、10<sup>13</sup>eV 以上のエネルギー領域における質量組成 測定を主に行い、宇宙線起源を解明することです。その成果と して、knee 領域(~10<sup>15</sup>eV)にかけて、一次宇宙線核種成分が軽 核から重核へと移行していることを示しました。近年は、研究 対象エネルギー領域を 10<sup>16</sup>eV 以上に設定し、銀河系内起源宇 宙線のエネルギー上限の確定を目指して来ましたが、平成 28 年3月末をもって終了いたしました。

BASJE 実験の後を受けて、100TeV (10<sup>12</sup>eV) 領域の宇宙ガ ンマ線の広視野連続観測を主目的とする ALPACA (Andes Large area PArticle detector for Cosmic ray physics and Astronomy) 実験計画の準備がチャカルタヤ山の麓(標高 4740m) で始まりました。knee 領域まで加速された銀河宇宙 線が、その加速源である未知の宇宙加速器 (PeVatron) 周辺の 物質と反応する際に生成される中性パイ中間子が崩壊して生ず るガンマ線のエネルギーは 100TeV 領域になります。したがっ て、100TeV 領域ガンマ線の観測は未知の宇宙加速器の同定を 行う際の鍵となる実験になります。 Chacaltaya Observatory of Cosmic Physics has been jointly operated with Bolivia since 1962 at Mt.Chacaltaya, Bolivia, as the world-highest cosmic-ray laboratory (16°21' S, 68°08' W, 5300m a.s.l.).

The air-shower experiment, BASJE (Bolivia Air Shower Joint Experiment), aims to investigate the origin of primary cosmic rays around and above the knee region (~10<sup>15</sup>eV) by measuring the mass composition, the energy spectrum and the arrival direction distribution. As a result, the mass composition of primary cosmic rays becomes heavier with the increasing energy up to the knee region. This project is finished at the end of mMarch, 2016.

After the BASJE experiment, preparation of the ALPACA (Andes Large area PArticle detector for Cosmic ray physics and Astronomy) experiment, which aims at wide field-of-view observation of cosmic gamma rays in the 100 TeV region, started at the foot of Mt. Chacaltaya (4740m above sea level). The 100 TeV gamma rays are decay product of neutral pions produced by primary cosmic rays accelerated up to the knee energy region interacting with matter surrounding a yet-unidentified cosmic ray accelerator (PeVatron). Therefore, observation of 100 TeV gamma rays will be a key experiment to locate an unknown PeVatron





東京大学宇宙線研究所は宇宙線の観測と研究とを様々な角度 から行っている研究所です。前身は、昭和25年に朝日学術奨 励金によって建てられた乗鞍岳の朝日小屋です。これが昭和 28年に東京大学宇宙線観測所となりました。この観測所は我 が国初の全国共同利用研究機関でした。

昭和 32 年には IGY (国際地球観測年)の世界規模の観測に 参加し、早くも国際的活動が始まりました。この年に空気シャ ワーの観測を始め、昭和 33 年にはエマルションチェンバーに よる観測を始めました。その後しばらくの間、これらの観測装 置による地道な観測が続けられました。

昭和 47 年になると、新たにミュートロン(電磁石スペクト ロメータ)の建設が始まり、実験設備が整って行きました。昭 和 48 年には、学術振興会の事業であった2つの国際研究が研 究所の事業として吸収されました。一つはインド・コラー金鉱 の深地下実験で、もう一つはボリビヤ・チャカルタヤ山の高山 実験です。昭和 50 年にはミュートロンが完成し、続いて明野 観測所の建設も始まりました。

昭和 51 年に、東京大学宇宙線観測所は東京大学宇宙線研究 所となりました。ここには、昭和 31 年から同じような研究を していた東京大学原子核研究所宇宙線部の 3 部門が吸収され、 全部で6 部門1 施設の研究所として再出発しました。昭和 52 年には明野観測所が正式に第二の附属施設となり、昭和 54 年 には明野の1 平方 km 空気シャワー装置と富士山のエマルショ ン・チェンバーができ、昭和 56 年にはエマルション・チェンバー による日中共同研究が始まりました。昭和 58 年には共同実験 として神岡の陽子崩壊実験が始まり、一次宇宙線研究設備もで きました。

昭和 60 年代になると大きな実験結果が出始め、実験設備の 拡充もさらに行われるようになりました。昭和 62 年には神岡 で、世界で初めて超新星からのニュートリノをとらえました。 同じ年に明野では、100 平方 km 広域シャワー観測装置の建設 がはじまりました。昭和 63 年には神岡で太陽ニュートリノ欠 損を観測し、平成元年には乗鞍で太陽フレアーに伴う宇宙中性 子線の大幅な増大を観測しました。平成2年に明野の広域シャ ワー観測装置が完成し、平成 3 年にスーパーカミオカンデの建 設が始まりました。平成4年には共同実験のオーストラリアで、 南半球では世界で初めて超高エネルギーガンマ線を観測しまし た。同じ年に、研究所に新たに重力波の観測グループが加わり ました。平成5年には、チベットでエアシャワーガンマ線実験 装置の建設が始まりました。平成6年には明野で、理論上あり 得ないと思われていた最高エネルギーの大シャワーを観測し、 神岡では、大気ニュートリノの異常を観測しました。平成7年 には神岡が第三の附属施設として新たに出発し、神岡宇宙素粒 子研究施設となりました。平成8年にはスーパーカミオカンデ が完成して本格観測が始まり、平成10年には2年間の観測結 果として、ニュートリノに質量があると発表しました。

平成 11 年度から、ニュートリノの質量をさらに詳しく調べ るために、高エネルギー加速器研究機構からスーパーカミオカ ンデに向けて人工ニュートリノを発射して調べる実験も始まり ました。宇宙ニュートリノの観測情報を融合して新たなニュー トリノ研究の道を開くための、宇宙ニュートリノ観測情報融合 センターも出発しました。さらに、オーストラリアの超高エネ ルギーガンマ線観測を大幅に充実させるための科学研究費 COE 拠点研究も認められました。 平成 15 年度から、最高エネルギーの宇宙線の起源を詳しく 調べるために、米国ユタ州での TA 実験が認められました。本 格的な建設は平成 17 年度と平成 18 年度に行われ、平成 19 年 度から観測が始まりました。

平成 16 年 4 月 1 日には、東京大学の法人化を機に研究部を 改変し、3 研究部門からなる研究体制となりました。

平成22年4月1日には、新たに共同利用・共同研究拠点とし認定され、共同利用研究を更に推進していくことになりました。

平成 22 年 7 月には、宇宙線研究所の将来計画の柱として研 究開始が待たれていた大型低温重力波望遠鏡(後に「かぐら」 と命名)が文部科学省の最先端研究基盤事業の1つに選定され、 建設がはじまりました。これを受けて、平成 23 年 4 月には重 力波推進室を設置して建設を推進することになりました。

平成 22 年には、東海村の J-PARC とスーパーカミオカンデ 間のニュートリノ振動実験 T2K がはじまり、平成 23 年 6 月に はミューニュートリノが電子ニュートリノに振動する新たな振 動モードが存在する兆候を、そして平成 26 年までには確かな 証拠を得ました。

平成24年3月には、オーストラリアの超高エネルギーガン マ線観測実験「カンガルー」を終了しました。そして超高エネ ルギーガンマ線観測においては、平成27年にCTA(Cherenkov Telescope Array)プロジェクトの大口径チェレンコフ望遠鏡の 1号機の設置をスペイン領カナリア諸島ラパルマで開始するこ とになりました。

平成28年3月には、岐阜県飛騨市の神岡鉱山の中に設置された大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」の試験運転を実施しました。4月には重力波観測研究施設が発足し、いよいよ本格稼働に向けて動き出します。



The Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) conducts observational studies of cosmic rays from various aspects. Its predecessor was an experimental hut called Asahi Hut, on Mt. Norikura built on an Asahi Academic Grant. In 1953, it developed into the Cosmic Ray Observatory of the University of Tokyo. This observatory was the Japan's first joint-use research facility.

In 1957, the observatory took a pioneering initiative to internationalize, and participated in worldwide observation experiments of the International Geophysical Year (IGY). In the same year, the observatory started the air shower observation, and in the following year, it started utilizing an emulsion chamber for cosmic ray observations. Since then, the observatory has operated observation experiments steadily with these instruments.

In 1972, the construction of Mutron (an electromagnetic spectrometer) was commenced, improving the experimental facilities. In 1973, two international projects of the Japan Society for the Promotion of Science—a deep underground experiment at Kolar Gold Mine in India and a high-altitude experiment on Mt. Chacaltaya in Bolivia—were incorporated into the activities of the observatory. In 1975, the construction of Mutron was completed. In the same year, the construction of Akeno Observatory began.

In 1976, the Cosmic Ray Observatory was reorganized to become the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR). ICRR absorbed the 3 sections of the Cosmic Ray Division of the Institute for Nuclear Study of the University of Tokyo, which had conducted similar research since 1956, to become an institute comprising 6 divisions and 1 facility. In 1977, the Akeno Observatory was formally recognized as a second adjunct facility. In 1979, a square kilometer scale air-shower detector array was installed at the Akeno Observatory, and an emulsion chamber on Mt. Fuji. In 1981, Japan-China joint research was initiated using the emulsion chamber. In 1983, a proton decay experiment was started as a joint use experiment in Kamioka, and the construction of facilities for studying primary cosmic rays was completed.

From 1985 on, ICRR started to produce increasingly significant experimental results, and further improved its experimental equipment. In 1987, the Kamioka Observatory succeeded to detect neutrinos from a supernova for the first time in the world. In the same year, the construction of a 100-square kilometer scale wide-area air-shower detector was commenced at the Akeno Observatory. In 1988, the Kamioka Observatory observed a deficit of solar neutrinos, and in 1989, the Norikura observatory observed a considerable increase in cosmic neutrons in solar flares. In 1990, the construction of the wide-area air-shower detector at the Akeno Observatory was completed. In 1991, the construction of Super-Kamiokande started. In 1992, the joint use experiment in Australia observed ultra-high-energy gamma rays for the first time in the southern hemisphere. In the same year, a gravitational wave group joined ICRR. In 1993, the construction of the air-shower gamma-ray detector started in Tibet. In 1994, the Akeno Observatory observed a significant shower with its energy beyond the theoretical limit, and the Kamioka Observatory detected an anomaly in atmospheric neutrinos. In 1995, the Kamioka Observatory became the third adjunct facility of ICRR. In 1996, the construction Super-Kamiokande was completed, and the full-scale observation began. In 1998, the Super-Kamiokande group reported, after two-year observation, that neutrinos have masses.

In 1999, in order to further study the masses of neutrinos, ICRR started a long-baseline neutrino experiment in which the Super-Kamiokande detected the neutrinos artificially produced by an accelerator at the High Energy Accelerator Research Organization. ICRR also established the Research Center for Cosmic Neutrinos in the aim of paving the way for new fields of neutrino research by integrating data and scientific ideas. Further, ICRR was granted a Scientific Research Fund for a COE (Center of Excellence), which helped significantly improve the ultra-high-energy gamma-ray telescopes in Australia. In 2003, ICRR was granted a Scientific Research Fund to construct the Telescope Array (TA) experiment to investigate the origin of extremely high-energy cosmic rays. After five years of construction, TA started observation in 2008.

On April 1, 2004, the University of Tokyo became an independent administrative entity, and ICRR was reorganized to house 3 research divisions. On April 1, 2010, ICRR renewed its inter-university research activities as a new "Inter-University Research Center". In July 2010, the Large Cryogenic Gravitational wave Telescope (LCGT) project (later named "KAGRA") was approved by the "Leading-edge Research Infrastructure Program" of MEXT. The construction of LCGT began in the same year. ICRR established the Gravitational Wave Project Office in April 1, 2011 to promote the construction of LCGT. In 2010, T2K, or Tokai to Kamioka Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment, started its operation, and in June 2011 observed the indication of a new type of neutrino oscillation in which a muon neutrino transform into an electron neutrino. The data from T2K show clear evidence for muon-neutrino to electron neutrino oscillations by 2014. In March 2012, very high-energy gamma-ray observatory in Australia, the CANGAROO experiment, ended its operation. The gamma-ray studies will be taken over by the CTA (Cherenkov Telescope Array) project. The first Large Size Telescope (LST) of CTA will be constructed in 2015-2016 at La Palma in Canary Islands.

In March 2016, KAGRA, located in Kamioka Mine in Hida city, Gifu prefecture, had been in the test operation. In April, KAGRA observatory was established for moving on to the full-scale operation.

## 年表

- 1950 朝日学術奨励金によって乗鞍岳に朝日の小屋が建つ (木造15坪) Asahi Hut (wooden structure; about 50 sq. meters) was constructed on Mt. Norikura based on the Asahi Bounty for Science 1953.8 東京大学宇宙線観測所となる Asahi Hut was incorporated into the Cosmic Ray Observatory, the University of Tokyo. 1955.8 乗鞍観測所の本館および研究設備が完成する The main building and research facilities of the Norikura Observatory were constructed. 1956 東京大学原子核研究所宇宙線部が発足(空気シャワー 部とエマルション部) The Cosmic Ray Division (composed of Air Shower Section and Emulsion Section) was inaugurated at the Institute for Nuclear Study, the University of Tokyo. **1957** 乗鞍観測所が IGY (国際地球観測年)の観測に参加し、 空気シャワーの観測を開始する The Norikura Observatory participated in IGY (International Geophysical Year) activities, and began air shower observation
- **1958** エマルションチェンバーが観測を開始する The emulsion chambers started operation.
- **1959** 東京大学原子核研究所が空気シャワーの観測を開始 Air Shower observation started at the Institute for Nuclear Study, the University of Tokyo.
- 1960 東京大学原子核研究所エマルション部が大型気球を 開発

The Emulsion Section of the Institute for Nuclear Study, the University of Tokyo, developed a large-size balloon.

- 学術振興会の海外特別事業(インド、ブラジル、ボ リビアの国際協力研究)が始まる International Projects of the Japan Society for the Promotion of Science started (international collaboration with India, Brazil and Bolivia).
- 1966 東京大学原子核研究所エマルション部の気球事業が 宇宙航空研究所に移管される

The balloon project of Emulsion group of Institute for Nuclear Study, the University of Tokyo, was transferred to the Institute of Space and Aeronautical Science.

- 1968 東京大学原子核研究所エマルション部が富士山でエ マルションチェンバーによる観測を開始 The Emulsion Section of the Institute for Nuclear Study, the University of Tokyo, started observation on Mt. Fuji with omulsion schembers
- emulsion chambers. 1972 専任所長が着任する

A full-time director was appointed.

ミュートロンの建設が始まる The construction of MUTRON was commenced.

#### 東京大学原子核研究所宇宙線部に宇宙物質研究部が 発足する

The cosmic material research section was established in the Cosmic Ray Division of the Institute for Nuclear Study.

1973 超高エネルギー弱相互作用部門が新設される

The ultra-high energy weak-iteration division was newly established.

学術振興会の海外特別事業(インド、ブラジル、ボ リビアの国際協力研究)が移管される The international projects of the Japan Society for the Promotion of Science (with India, Brazil, ad Bolivia) were

Promotion of Science (with India, Brazil, ad Bolivia) wer incorporated.

- **1974** 専任事務長が着任する A full-time chief administrator was appointed.
- **1975** ミュートロンが完成する MUTRON was completed.
  - **明野観測所の建設が始まる** The construction of the Akeno Observatory started.

■ 超高エネルギー強相互作用部門が新設される The ultra-high energy strong-iteration division was newly established

1976.5 国立学校設置法改正によって東京大学宇宙線研究所

#### となる

In the wake of the amendment of the National School Establishment Law, the observatory was reorganized into the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR).

超高エネルギー強相互作用部門が第一第二部門に分かれ、東京大学原子核研究所からミュー中間子測定・ 中間子物理学実験・宇宙線学が移管し、6部門1観 測所となる

The Ultra-high energy strong-iteration division was divided into two divisions, and the three divisions of the Institute for Nuclear Study, the University of Tokyo (muon measurement, experimental meson physics and cosmic ray study) were transferred to ICRR. As the result, ICRR started out with 6 divisions and 1 observatory.

1977.4 明野観測所が附属施設となる Akeno Observatory was established as one of the ICRR facilities

1978.10 明野観測所が開所式を行う

Akeno Observatory performed the opening ceremony.

- 1979 
  『明野観測所に空気シャワー装置 (1km<sup>2</sup>) が完成する Akeno 1km<sup>2</sup> air shower detector was completed.
  - ■富士山エマルションチェンバー特別設備を建設する The special facility for emulsion chamber on Mt. Fuji was constructed.
  - ■京都にて第 16 回宇宙線国際会議を開催する The 16th International Cosmic Ray Conference was held in Kyoto.
- **1981** エマルションチェンバーによる日中共同研究を開始 Japan-China joint research on emulsion chamber observations started.
- 1982 『宇宙線計測部門(客員)が新設される The cosmic ray detection division (for guest researchers) was newly established.
- 1983 【神岡鉱山で陽子崩壊実験を共同実験として開始する The nucleon decay experiment started in the Kamioka Mine as a collaborative research project.
  - 質量分析器を中心とした一次宇宙線研究設備が設置 される The primary cosmic ray research facility (i.e. mass

The primary cosmic ray research facility (i.e. mass spectrometer etc.) was installed.

- **1986** 【将来計画検討小委員会(I)が設置される The first committee for future projects was organized.
- 1987 神岡地下実験が世界で初めて超新星からのニュート リノバーストを捕まえる

The underground detector at Kamioka observed a neutrino burst from a supernova for the first time in history.

1987 ■明野観測所で 100km<sup>2</sup> の広域シャワー観測装置 AGASA の建設が始まる The construction of the 100km<sup>2</sup> wide-area air shower

etector, AGASA, started at the Akeno Observatory.

■将来計画検討小委員会(Ⅰ)の答申が出る The first committee for future project submitted an evaluation report.

1988 単神岡地下実験が太陽からのニュートリノ欠損を観測 する

The underground detector at Kamioka observed a deficit in solar neutrino flux.

**1989** ■乗鞍観測所で太陽フレアーに伴う宇宙線の大幅な増 大を観測する

A significant increase of cosmic ray intensity coincident with a solar flare was observed at the Norikura Observatory.

1990 【明野観測所に 100km<sup>2</sup> の広域シャワー観測装置 AGASA が完成する The 100 km<sup>2</sup> wide area air shower detector, AGASA, was

completed at Akeno Observatory.

**1991** スーパーカミオカンデの建設が始まる The construction of Super-Kamiokande was commenced.

> ■将来計画検討小委員会(Ⅱ)が設置される The second committee for future projects was organized.

1992 ■ニュートリノ宇宙物理学部門が新設され、宇宙線計 測部門(客員)が廃止される The neutrino astrophysics division was newly established,

and the cosmic ray detection division (for guest researchers) was discontinued.

■重力波グループがミュー中間子測定部門に加わる The gravitational wave group joined in muon measurement division at ICRR.

オーストラリアでカンガルー計画が始まる

The Cangaroo project started in Australia.

#### カンガルー計画が PSR1706-44 からの TeV ガンマ線 を観測する The Cangaroo project observed TeV gamma rays from a

The Cangaroo project observed TeV gamma rays from a pulsar (PSR1706-44).

1993 【チベットでエアシャワーガンマ線実験装置の建設が 始まる

The construction of air shower gamma ray detector started in Tibet.

1994 【神岡に計算機棟ができる A computer center was but at the Kamioka Observatory.

> **スーパーカミオカンデのための空洞掘削が完了する** The excavation for Super-Kamiokande was completed.

■明野観測所で2×10<sup>20</sup>eVの大シャワーを観測する A giant air shower with energy of 2 x 10<sup>20</sup>eV was observed at Akeno Observatory.

■外部評価が実施される An external evaluation of ICRR was conducted.

■神岡で大気ニュートリノ異常の天頂角依存を観測 The anormalous zenith angle dependence of the atmospheric neutrinos was observed at Kamioka.

1995. 4 ニュートリノ宇宙物理学部門が廃止され、神岡宇宙 素粒子研究施設が新設される

The neutrino astrophysics division was discontinued, and the Kamioka Observatory for Cosmic Elementary Particle Research was established.

11	スーパーカミオカンデの完成式が開かれる The completion ceremony of Super-Kamiokande was held.
1996. 4	<mark>スーパーカミオカンデの本格観測が始まる</mark> The full-scale operation of Super-Kamiokande began.
1997	<b>チベットのエアシャワーガンマ線実験装置が完成</b> The Air shower gamma ray detector in Tibet was completed.
1998. 6	スーパーカミオカンデによるニュートリノ質量の発 見が正式発表される The Super-Kamiokande collaboration officially announced the discovery of none-zero neutrino mass.
1998.11	柏キャンパスの建設が始まる The construction of the Kashiwa Campus was commenced.
1999.4	宇宙ニュートリノ観測情報融合センターが新設 The Research Center for Cosmic Neutrinos was established.
- I	<b>オーストラリアでカンガルー計画 2 が始まる</b> The Cangaroo-2 began operation in Australia.
	<b>オーストラリアでカンガルー計画3が準備を開始</b> Preparation of the Cangaroo-3 began in Australia.
	科研費 COE 拠点形式プログラムにより超高エネル ギーガンマ線研究拠点が発足する Ultra high energy gamma ray research foothold was established.
2000. 3	柏キャンパスに全面移転する ICRR moved to the Kashiwa Campus.
2001.11	スーパーカミオカンデに事故が発生し、半数以上の 光電子増倍管が壊れる An accident occurred at the Super-Kamiokande, destroying more than half of the photomultipliers.
2002.12	カミオカンデの成果をもとに、宇宙ニュートリノ検 出へのパイオニア的貢献により、小柴昌俊名誉教授 がノーベル物理学賞を受賞する Professor Emeritus Masatoshi Koshiba won the Nobel Prize in Physics for his pioneering contribution to the detection of cosmic neutrinos, based on outcomes of the Kamiokande experiment.
12	スーパーカミオカンデが部分復旧して実験を再開 The Super-Kamiokande was partially restored, and observation resumed.
2003. 8	第 25 回宇宙線国際会議をつくばで開催する The 25th International Cosmic Ray Conference was held in Tsukuba.
- 1	<b>テレスコープアレイの建設が始まる</b> The construction of the Telescope Array was commenced.
	<b>カンガルー計画 3 の 4 台の望遠鏡が完成する</b> Four telescopes for the Cangaroo-3 were completed.
2004. 4	国立大学が法人化される Japanese national universities became independent administrative agencies.
4	宇宙ニュートリノ研究部門、高エネルギー宇宙線研 究部門、宇宙基礎物理研究部門の3研究部門となる The research divisions of ICRR were reorganized into the three divisions: Neutrino and Astroparticle Division, High Energy Cosmic Ray Division, and Astrophysics and Gravity Division.
2006	スーパーカミオカンデが完全復旧される The restoration of the Super-Kamiokande was completed.

	年表	Timeline 機構
2007	■将来計画検討委員会(Ⅲ)が設置される The Committee of Future Projects Ⅲ was established	■ 組織図   Ogranization Chart
	8 将来計画検討委員会 (III)の答申が出る The Committee of Future Projects III submitted its report.	教授会 Faculty Council
2008	■テレスコープアレイ実験の観測を開始 The Telescope Array experiment started.	協議会 Board of Councilors
2010	<b>T2K 実験の最初のニュートリノをスーパーカミオカ</b> ンデで観測する The Super-Kamiokande detected the first neutrino from the T2K experiment.	
	<ul> <li>宇宙線研究所が共同利用・共同研究拠点として新た な形で共同利用の推進を開始する</li> <li>ICRR became an Inter-University Research Center, renewing its existing function as an inter-university research institute.</li> </ul>	所長 Director
	大型低温重力波望遠鏡(後に「KAGRA」と命名)が 文部科学省の最先端研究基盤事業の一つに選定され、 建設が始まる The Large Cryogenic Gravitational Wave Telescope (later named KAGRA) was approved as a Leading-edge Research Infrastructure Program by MEXT. The construction started.	副所長 Vice-Director
2011.	4 重力波推進室が設置される The Gravitational Wave Project Office was established.	運営委員会 Advisory Committee
	6■T2K 実験が電子ニュートリノ出現現象の兆候を捉え	
	<b>5</b> The T2K experiment caught a sign of electron neutrino appearance.	
	■将来計画検討委員会(Ⅳ)が設置される The Committee one Future Projects IV was established.	■研究所の運営
2012. 2014.	<ul> <li>3 オーストラリアのカンガルー計画が終了 The Cangaroo project ended its operation.</li> <li>7 KAGRA のためのトンネル掘削が完了する The excavation of KAGRA tunnel was completed.</li> </ul>	宇宙線研究所の共同利用について協議する会で、所長の諮問 によって集まります。所長の他、約14名の委員で構成されます 委員の構成は以下の通りです。①研究所の教授又は准教授の ちで所長が命じた者 ②東大理学系研究科長、東大理事又は副 長(研究担当)③国立天文台長、高エネルギー加速器研究機材
2015.	10 CTA 大口径望遠鏡 1 号基の建設が始まる The construction of the first CTA Large Size Telescope (LST) was commenced.	素粒子原子核研究所長、京大基礎物理学研究所長④大学内外の 学識経験者のうちから所長が委嘱した者
	<ul> <li>11 KAGRA の第一期実験施設が完成する         The construction for iKAGRA (initial KAGRA) was completed.     </li> <li>12 ニュートリノが質量を持つ事を示すニュートリノ振</li> </ul>	教授会 次期所長や教員人事について審議を経て総長へ推薦したり 研究所の重要な事項について審議する会です。所長の他、研究 所専任の全教授・准教授で構成されます。
	動現象の発見により、所長の梶田隆章名誉教授がノー ベル物理学賞を受賞 Director and Professor Emeritus Takaaki Kajita received the Nobel Prize in Physics for the discovery of neutrino oscillation, which shows neutrinos have mass.	運営委員会 宇宙線研究所の運営について、計画案を作成し教授会に提出 する委員会です。研究所内外の研究者約 14 名(東京大学外の 委員が半数以上)で構成されます。
2016.	3 KAGRA が試験運転を実施 KAGRA was in test operaion.	廿同刊田研究演员委员会
	4 重力波推進室が改組され重力波観測研究施設が発足 The Gravitational Wave Project Office was reorganized into the KAGRA Observatory.	共同利用研究を円滑に進めるための審議をし、運営委員会に 提案や報告をする委員会です。所内で選ばれた委員と所外から の学識経験者で構成されます(東京大学外の委員が半数以上)。
		共同利用研究課題採択委員会
		共同利用研究申請課題について、採択の適否を審議します 共同利用研究実施計画の原案を運営委員会に提出する委員会1 す。所内で選ばれた委員と所外からの学識経験者で構成され; す(東京大学外の委員が半数以上)。

## Organization



#### Administration

#### Board of Councilors

This board is a board for discussion the joint use of ICRR, and is summoned to meet upon the director's request for advice. This board is composed of the Director and about 14 other members. The board members are selected from the following personnel: 1) the professors and associate professors of ICRR, enumerated by the Chancellor of the University of Tokyo. 2) the Dean of Department of Science and the Director of the Executive Office, the University of Tokyo. 3) the Director of National Astronomical Observatory, the Director of the Institute for Particle and Nuclear Study of the High Energy Accelerator Research Organization, and the Director of Yukawa Institute for theoretical Physics, Kyoto University. 4) those who have academic careers inside and outside of the University and who were enumerated and entrusted by the Chancellor of the University of Tokyo.

#### Faculty council

This is a board for deliberating important items of ICRR, such as the recommendation of an incoming director to the Chancellor of the University of Tokyo and the appointment of staff members. The council is composed of the director and all full-time professors and associate professors of ICRR.

#### Advisory Committee

This is a committee for drawing up schemes for operating ICRR and submitting them to the Faculty council. This committee is composed of about 14 researchers from both inside and outside ICRR (more than half are from outside the University of Tokyo).

#### Inter-University Research Advisory Committee

This is a committee for having discussions to facilitate joint-use researches, and suggesting or reporting the results to the Advisory Committee. This committee is composed of members selected from inside ICRR, and outside members who have academic careers (more than half are from outside the University of Tokyo).

#### Inter-University Research Program Selection Committee

This is a committee for having discussions to select Inter-University research programs from applications. This committee is composed of members selected from inside ICRR, and outside members who have academic careers (more than half are from outside the University of Tokyo).

## 委員会

協議会委員		Board of Councilors
所属・職名	氏名	Members
東京大学宇宙線研究所長	梶田 隆章	Prof. Takaaki Kajita Director of ICRR, the University of Tokyo
第1号委員		
東京大学宇宙線研究所 教授	大橋 正健	Prof. Masatake Ohashi ICRR, the University of Tokyo
東京大学宇宙線研究所 教授	手嶋 政廣	Prof. Masahiro Teshima ICRR, the University of Tokyo
東京大学宇宙線研究所 教授	中畑 雅行	Prof. Masayuki Nakahata ICRR, the University of Tokyo
第2号委員		
東京大学大学院理学研究科長	福田 裕穂	Prof. Hiroo Fukuda Dean of School of Science, the University of Tokyo
東京大学理事・副学長(研究担当)	保立 和夫	Prof. Kazuo Hotate Vice President of the University of Tokyo
第3号委員		
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所長	德宿 克夫	Prof. Katsuo Tokusyuku Director of Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization
京都大学基礎物理学研究所長	佐々木 節	Prof. Misao Sasaki Director of Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University
自然科学研究機構国立天文台長	林 正彦	Prof. Masahiko Hayashi Director of General of National Astronomical Observatory of Japan
第4号委員		
京都大学 名誉教授	中村 卓史	Prof. Emeritus Takashi Nakamura Kyoto University
法政大学大学院理工学研究科 教授	岡村 定矩	Prof. Sadanori Okamura Graduate School of Science and Engineering, Hosei University
早稲田大学理工学術院 教授	烏居 祥二	Prof. Shoji Torii Waseda Research Institute for Science and Engineering
宇宙科学研究所長	常田 佐久	Prof. Saku Tsuneta Director of Institute of Space and Astronomical Science
立命館大学理工学部 教授	森 正樹	Prof. Masaki Mori College of Science and Engineering, Ritsumeikan University
東京大学素粒子物理 国際研究センター長	駒宮 幸男	Prof. Sachio Komamiya Director of International Center for Elementary Particle Physics, the University of Tokyo

任期 平成 28 年 4 月 1 日~平成 30 年 3 月 31 日 / April 1, 2016 thru. March 31, 2018 Observer 東京大学宇宙線研究所 教授 川崎 雅裕 / Prof. Masahiro Kawasaki, ICRR, the University of Tokyo

氏名

梶田 隆章

井岡 邦仁

西嶋 恭司

川崎 雅裕

中畑 雅行

塩澤 真人

川村 静児

手嶋 政廣

大橋 正健

佐川 宏行 任期 平成 28 年 4 月 1 日~平成 30 年 3 月 31 日 / April 1, 2016 thru. March 31, 2018

Advisory Committee

Members Prof. Takaaki Kajita Director of ICRR, the University of Tokyo

Prof. Junji Hisano Graduate School of Science, Nagoya University

Prof. Kunihito loka Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

Prof. Masashi Hazumi High Energy Accelerator Research Organizatio

Assoc. Prof. Masashi Yokoyama School of Science, the University of Tokyo

Prof. Nobuyuki Kawai Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Prof. Shoichi Ogio Graduate School of Science, Osaka City University

Prof. Nobuyuki Kanda Graduate School of Science, Osaka City University

Prof. Kyoshi Nishijima School of Science, Tokai University

Prof. Masahiro Kawasaki ICRR, the University of Tokyo

Prof. Masayuki Nakahata ICRR, the University of Tokyo

Prof. Masato Shiozawa ICRR, the University of Tokyo

Prof. Seiji Kawamura ICRR, the University of Tokyo

Prof. Masahiro Teshima ICRR, the University of Tokyo

Prof. Masatake Ohashi ICRR, the University of Tokyo

Assoc. Prof. Hiroyuki Sagawa ICRR, the University of Tokyo

Prof. Yoshitaka Itow Solar-Terrestrial Envir Nagoya University

Prof. Nori Aoi Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

ment Laboratory,

運営委員会委員

所属・職名

京都大学基礎物理学研究所 教授

名古屋大学大学院理学研究科 教授 久野 純治

高エネルギー加速器研究機構 教授 羽澄 昌史

大阪大学核物理研究センター 教授 青井 考

東京大学大学院理学系研究科 准教授 横山 将志

東京工業大学大学院理工学研究科 教授 河合 誠之

名古屋大学宇宙地球環境研究所 教授 伊藤 好孝

大阪市立大学大学院理学研究科 教授 荻尾 彰一

大阪市立大学大学院理学研究科 教授 神田 展行

東京大学宇宙線研究所長

東海大学理学部 教授

東京大学宇宙線研究所 准教授

共同利用研究運営	委員	Inter-University Research Advisory Committee					
所属・職名	氏名	Members					
大阪市立大学大学院理学研究科 教授	<sub>委員長</sub> 神田 展行	Chairperson Prof. Nobuyuki Kanda Graduate School of Science, Osaka City University					
言州大学理学部 教授	宗像 一起	Prof. Kazuoki Munakata Dep. of Science, Shinshu University					
2命館大学理工学部 教授	森 正樹	Prof. Masaki Mori College of Science and Engineering, Ritsumeikan University					
千葉大学大学院理学研究科 教授	吉田 滋	Prof. Shigeru Yoshida Graduate School of Science, Chiba University					
神戸大学大学院理学研究科 教授	竹内 康雄	Prof. Yasuo Takeuchi Graduate School of Science, Kobe University					
名古屋大学宇宙地球環境研究所 講師	坮 隆志	Lecturer Takashi Sako Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University					
高エネルギー加速器研究機構 准教授	都丸 隆行 (3号委員)	Assoc. Prof. Takayuki Tomaru High Energy Accelerator Research Organization (Group3)					
名古屋大学宇宙地球環境研究所 准教授	增田 公明 (3号委員)	Assoc. Prof. Kimiaki Masuda Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University (Group3)					
東京大学宇宙線研究所 教授	中畑 雅行	Prof. Masayuki Nakahata ICRR, the University of Tokyo					
東京大学宇宙線研究所 准教授	瀧田 正人	Assoc. Prof. Msato Takita ICRR, the University of Tokyo					
東京大学宇宙線研究所 准教授	佐川 宏行	Assoc. Prof. Hiroyuki Sagawa ICRR, the University of Tokyo					
東京大学宇宙線研究所 准教授	内山 隆	Assoc. Prof. Takashi Uchiyama ICRR, the University of Tokyo					
東京大学宇宙線研究所 准教授	<sub>幹事</sub> 森山 茂栄	Organizer Assoc. Prof. Shigetaka Moriyama ICRR. the University of Tokyo.					

任期 平成 28 年 4 月 1 日~平成 30 年 3 月 31 日 / April 1, 2016 thru. March 31, 2018 Observer 東京大学宇宙線研究所 所長 梶田 隆章 / Prof. Takaaki Kajita, Director of ICRR, the University of Tokyo

共同利用研究課題採択委員 Inter-University Research Program Selection Committee								
所属・職名	氏名	Members						
大阪市立大学理学研究科 教授	<sub>委員長</sub> 荻尾 彰一	Chairperson Prof. Shoichi Ogio Graduate School of Science, Osaka City University						
甲南大学理工学部 教授	山本 常夏	Prof. Tokonatsu Yamamoto Faculty of Science and Engineering						
山形大学理学部 教授	門叶 冬樹	Prof. Fuyuki Tokanai Faculty of Science, Yamagata University						
高エネルギー加速器研究機構 准教授	都丸 隆行	Assoc. Prof. Takayuki Tomaru High Energy Accelerator Research Organization						
所内								
高エネルギー宇宙線研究部門 主任	手嶋 政廣	Prof. Masahiro Teshima Head of High Energy Cosmic Ray Division ICRR, the University of Tokyo						
宇宙ニュートリノ研究部門 主任	中畑 雅行	Prof. Masayuki Nakahata Head of Neutrino and Astroparticle Division ICRR, the University of Tokyo						
宇宙基礎物理学研究部門 主任	川崎 雅裕	Prof. Masahiro Kawasaki Head of Astrophysics and Gravity Division, ICRR, the University of Tokyo						
宇宙ニュートリノ研究部門 准教授	<sub>幹事</sub> 早戸 良成	Organizer Assoc. Prof. Yoshinari Hayato Neutrino and Astroparticle Division, ICRR, the University of Tokyo						
宇宙基礎物理学研究部門 准教授	副幹事 内山 隆	Assistant Organizer Assoc. Prof. Takashi Uchiyama Astrophysics and Gravity Division, ICRR, the University of Tokyo						

任期 平成 28 年 4 月 1 日~平成 30 年 3 月 31 日 / April 1, 2016 thru. March 31, 2018

## 教職員

#### 歴代代表者

[2]

[4]

(2) <2>

(1)

東京大学宇宙	<b>日線観</b>	測所											
所長 所長事務取扱 所長事務取扱 所長 所長 所長	平菊野熊野菅三田池中谷中浩宅	森 正 到 寛 到 一 三 郎	昭和23日7月11日11日11日11日111日111日111日111日111日111日1	28 00 4 55 15 15 17	8月 9月 12 4月 4月	1 22 1 月 1	8 - 2 8 8 - 1 8 8 - 8 - 8 -	昭和 昭昭 昭和 昭昭 昭昭 昭昭 昭 昭昭 昭 昭 昭 昭 昭 昭 昭 昭	30 34 0 3 30 0 4 47 51	年8 5 年 5 年 5 年 5 年 5 年 5 年 5 年 5 年 5 年 5	月月7月3月13月15日	31 ( 21 ( 31 30 31 ( 31 ( 24 (	
東京大学宇宙	<b>目線研</b>	究所											
所所所所所所所所副副所副副副長長長長長長長長長長長長長長長長長長長長長長長子所所長所所所所所所所所	三鎌近棚荒戸吉鈴黒福梶寺中川宅田藤橋船塚村木田島田澤畑崎	三甲一五次洋太洋和正隆敏雅雅郎一郎郎郎二彦一明己章夫行裕郎	昭昭昭昭昭平平平平平平平平平和和和和和和成成成成成成成成成成成成	51 59 51 52 52 53 6 6 6 00 24 77 88 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78 7	54445月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月月	2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	5 0 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0	- 昭昭昭平平平平平平 平 - 昭和和和成〕成成成成 成	0 5 <sup>9</sup> 61 62 62 9 全 16 20 20 24 28	9年年年年13月4年年年年年年年年13月1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1日1	3月月月3月月月月月日日	31 31 ( 30 ( 30 ( 31 ( 31 ( 31 ( 31 ( 31 ( 31 ( 31 ( 31	
乗鞍観	測所												
所長事務取扱 所長 所長 所長 所長	三近湯福瀧	三郎 一郎 利典 正人	昭和5 昭和5 昭和んし 平成1	1年年年 12年年 12年 14年 14年 14年 14年 14年 14年 14年 14年 14年 14	5月 3月 4月 4月	2: 1 1 1 1	5 8 8 - 8 - 8 - 8 -	- 昭和 昭和 平成 平成	0 52 61 12 15	2 年 3 年 3 年 3 年 3	2 月 月 月 月	28 31 ( 31 ( 31 (	8
明野観	測所		07.10					070 1				~ 1	_
<b>所所所所所所</b> 所長長長長長長長	鎌棚永手福佐田橋野嶋島川	甲五元政正宏	昭昭昭平平平平 昭和5500000000000000000000000000000000000	1年年年年年年	4月 4月 4月 月月 月 月 月 月 月 月 月 月 月 月 月 月 月 月	1 1 1 1 1	8 U 0 - 0 - 0 - 0 -	- 昭和 昭和成 平平成成	0 59 63 10 14 24	y年; 年3 年3 年1 年3	3 月 月 2 月 月	31 31 31 31 31 31	U 3 9 9
神岡宇宙素	粒子研	F究施設											
施設長 施設長 施設長	戸塚 鈴木 中畑	洋二 洋一郎 雅行	平成 7 平成 1 平成 2	7年4 4年 26年	月 10 4月	1 E 月 1	9 - 3 1 8 8 -	平成 1 - 平成	4年 20	₣9∮ 6 年;	] 3 3月	)日 31	θ
宇宙ニュート	リノ	観測情報	融合セ	ンタ	-								
センター長 センター長	梶田 奥村	隆章 公宏	平成 1 平成 2	1年 28年	4月 4月	1 1	8 - 8 -	平成	28	年 3	月:	31 (	3
重力波観	測研究	2施設											
施設長	大橋	正健 Nu	平成 2	28 年 4 C	4月 +cf	•	8 -						
<b>秋</b> 柳貝英	X	NUIII	er 0	0 3	ıdl								
教授 Professors	6	准 Ass Prot	教授 sociate fessors			A Pi	助教 Assista rofess	<b>t</b> ant sors			研 Rei Fe	究 sear	ch rs
8			15				31					10	

[]:客員(外数)():女性(内数) < >:外国人特任教員 The numbers shown inside [ ],( ),< > are numbers of guest members, female staff and foreign staff respectively.

48	Committees
	00111111110000

## **Committees**

Staff

#### Past Representatives

#### Cosmic Ray Observatory, the University of Tokyo

Director	Morizo Hirata	Aug. 1, 1953 - Aug. 31, 1955
Director	Seishi Kikuchi	Sep. 1, 1955 - Sep. 21, 1959
Acting Director	Itaru Nonaka	Sep. 22, 1959 - Jul. 31, 1960
Acting Director	Hiroo Kumagai	Aug. 1, 1960 - Nov. 30, 1960
Director	Itaru Nonaka	Dec. 1, 1960 - Mar. 31, 1970
Director	Kouichi Suga	Apr. 1, 1970 - Mar. 31, 1972
Director	Saburo Miyake	Apr. 1, 1972 - May. 24, 1976

#### Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo

Director	Saburo Miyake	May. 25, 1976 - Mar. 31, 198
Director	Kouichi Kamata	Apr. 1, 1984 - Mar. 31, 1986
Director	Ichiro Kondo	Apr. 1, 1986 - Mar. 31, 1987
Acting Director	Goro Tanahashi	Apr. 1, 1987 - Apr. 30, 1987
Director	Jiro Arafune	May. 1, 1987 - Mar. 31, 1997
Director	Youji Totsuka	Apr. 1, 1997 - Mar. 31, 2001
Director	Motohiko Yoshimura	Apr. 1, 2001 - Mar. 31, 2004
Director	Yoichiro Suzuki	Apr. 1, 2004 - Mar. 31, 2008
Vice Director	Kazuaki Kuroda	Apr. 1, 2004 - Mar. 31, 2008
Vice Director	Masaaki Fukushima	Apr. 1, 2008 - Mar. 31, 2012
Director	Takaaki Kajita	Apr. 1, 2008 -
Vice Director	Toshio Terasawa	Apr. 1, 2012 - Mar. 31, 2016
Vice Director	Masayuki Nakahata	Dec. 1, 2015 -
Vice Director	Masahiro Kaswasaki	Apr. 1, 2016 -

#### Norikura Observatory

Acting Director	Saburo Miyake	May. 25, 1976 - Feb. 28, 1977
Director	Ichiro Kondo	Mar. 1, 1977 - Mar. 31, 1987
Director	Toshinori Yuda	Apr. 1, 1987 - Mar. 31, 2000
Director	Masaaki Fukushima	Apr. 1, 2000 - Mar. 31, 2003
Director	Masato Takita	Apr. 1, 2003 -

#### Akeno Observatory

Director	Koichi Kamata	Apr. 18, 1977 - Mar. 31, 198
Director	Goro Tanahashi	Apr. 1, 1984 - Mar. 31, 1988
Director	Motohiko Nagano	Apr. 1, 1988 - Mar. 31, 1998
Director	Masahiro Teshima	Apr. 1, 1998 - Dec. 31, 2002
Director	Masaaki Fukushima	Jan. 1, 2003 - Mar. 31, 2012
Director	Hiroyuki Sagawa	Apr. 1, 2012 -

#### Kamioka Observatory

Observatory Head	Yoji Totsuka
Observatory Head	Yoichiro Suzuki
Observatory Head	Masayuki Nakahata

#### **Research Center for Cosmic Neutrinos**

Center Chief	Takaaki Kajita	Apr. 1, 1999 - Mar. 31, 2016
Center Chief	Kimihiro Okumura	Apr. 1, 2016 -

#### KAGRA Observatory

Observatory I	Head	Masatake	Ohashi
---------------	------	----------	--------

(2016.5.1)

Apr. 1, 1995 - Sep. 30, 2002

Oct. 1, 2002 - Mar. 31, 2014

Apr. 1, 2014 -

Apr. 1, 2016 -

<b>技術職員</b> Technical Employee	事務職員 Administrative Employee	非常勤職員 Adjuncts	合計 Total
8	13	<b>41</b>	<b>126</b>
(1)	(3)	(32)	[6] (39) <2>

#### **Research Budget and Facilities**

#### ■ 歳出決算額 Anual Expenditures

区分 Category	FY2011	FY2012	FY2013	FY2014	FY2015
<b>人件費</b> Personal Expenses	653,000	658,000	687,000	706,000	757,000
物件費 Non-personal Expenses	1,400,000	1,172,000	1,095,000	1,281,000	1,327,000
合計 Total	2,053,000	1,830,000	1,782,000	1,988,000	2,084,000
					千円 thousand yen

#### ■ 外部資金等の受入金額 External Funds. etc

区分 Category	FY2011	FY2012	FY2013	FY2014	FY2015
民間等との共同研究 Joint Research with the Private Sector	500 (1)	0 (0)	3,000 (1)	300 (1)	201 (1)
<b>受託研究</b> Entrusted Research	29,239 (1)	0 (0)	36,321 (2)	38,250 (2)	13,500 (1)
授学寄附金 Donation for Scholarly Development	0 (0)	85 (1)	364 (1)	181 (1)	0 (0)

千円 thousand yen ( ) は受入件数 The number of ( ) represents quantity

#### ■ 科学研究費助成事業の受入金額 Grants-in-aid for Scientific Research

研究種目 Research Classes	FY2011	FY2012	FY2013	FY2014	FY2015
特別推進研究 Specially Promoted Research	103,300 (1)	187,300 (2)	168,100 (2)	191,800 (3)	331,100 (4)
<b>学術創成研究</b> Creative Scientific Research	72,100 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
新学術領域研究 Scientific Research on Priority Area	0 (0)	0 (0)	10,000 (1)	80,700 (3)	89,300 (3)
特定領域研究 Particular Field Research	1,700 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
基盤研究 (S) Scientific Research (S)	47,900 (2)	10,700 (1)	10,700 (1)	0 (0)	0 (0)
基盤研究 (A) Scientific Research (A)	34,800 (4)	72,200 (4)	47,000 (4)	13,300 (3)	27,087 (3)
基盤研究 (B) Scientific Research (B)	33,200 (5)	12,700 (4)	15,800 (5)	15,200 (3)	15,600 (4)
基盤研究 (C) Scientific Research (C)	4,800 (5)	3,700 (4)	6,800 (5)	6,100 (5)	6,400 (7)
<b>若手研究 (A)</b> Grant-in-Aid for Young Scientists (A)	2,900 (1)	5,600 (1)	12,700 (2)	9,900 (2)	14,200 (3)
<b>若手研究 (B)</b> Grant-in-Aid for Young Scientists (B)	5,100 (4)	2,700 (3)	6,000 (5)	8,000 (8)	14,200 (10)
挑戦的萌芽研究 Challenging Exploratory Research	5,900 (4)	9,000 (6)	4,700 (4)	3,400 (2)	3,000 (3)
研究活動スタート支援 Research Activity Start-up		1,200 (1)	800 (1)	0 (0)	0 (0)
合計 Total	311,700 (28)	305,100 (26)	282,600 (30)	328,400 (29)	499,787 (37)

千円 thousand yen ( ) は受入件数 The number of ( ) represents quantity

#### 施設 Facilities 建物 Building (m<sup>2</sup>) 施設 Facilities 所在地 Location 土地 Land (m<sup>2</sup>) 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 柏キャンパス **313,391** (柏キャンパス全体) 7,185 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, Japan Kashiwa Campus 2,195 神岡宇宙素粒子研究施設 岐阜県飛騨市神岡町東茂住 456 95,523 456 Higashimozumi, Kamioka-cho, Hida-shi, Gifu, Japan Kamioka Observatory 重力波観測研究施設 KAGBA Observatory 岐阜県飛騨市神岡町東茂住 238 **39,327 444** (借入 173) 238 Higashimozumi, Kamioka-cho, Hida-shi, Gifu, Japan 乗鞍観測所 岐阜県高山市丹生川町乗鞍岳 59,707 1,655 Norikura Observatory Mt. Norikura, Nyukawa-cho, Takayama-shi, Gifu, Japan 鈴蘭連絡所 長野県松本市安曇鈴蘭 4306-6 2,303 182 4306-6 Azumi Suzuran, Matsumoto-shi, Nagano, Japan Suzuran Lodo 明野観測所 山梨県北杜市明野町浅尾 5259 18,469 2.843 5259 Asao, Akeno-cho, Hokuto-shi, Yamanashi, Japan

## 共同利用研究•教育 Inter-University Research and Education

#### ┃ 共同利用研究 Inter-University Research

東京大学宇宙線研究所は、共同利用・共同研究拠点として、 柏キャンパス、神岡宇宙素粒子研究施設、乗鞍観測所、明野観 測所の付属施設で共同利用研究を行っています。また国内のみ ならず、海外での国際協力研究事業も行っています。これらの 共同利用研究は毎年全国の研究者から公募し、共同利用運営委 員会及び共同利用実施専門委員会で採択します。平成 27 年度 の施設別の申請件数と採択件数は以下のとおりです。

平成 27 年度利用状況	申請件数 Applications
宇宙ニュートリノ研究部門 Neutrino and Astrophysics Division	39 (39)
高エネルギー宇宙線研究部門 High Energy Cosmic Ray Division	51 [11]
宇宙基礎物理学研究部門 Astrophysics and Gravity Division	26
宇宙ニュートリノ観測情報融合センター Research Center for Cosmic Neutrinos	8
	(

#### ■大学院教育 Education

東京大学字宙線研究所は、東京大学理学系研究科物理学及び 天文学専攻課程の一環として大学院学生を受け入れ研究指導を するとともに、大学院の講義も担当しています。教養学部学生 を対象に、全学一般教育ゼミナールも実施しています。また東 京大学大学院の一環として、国内外の他大学の大学院生を、特 別聴講生、特別研究生、外国人研究生として受け入れる道も開 いています。東京大学宇宙線研究所の大学院学生受入数は以下 のとおりです。

	FY2012	FY2013	FY2014	FY2015	FY2016
修士 Master's course	19 (0)	27 (4)	30 (5)	30 (3)	33 (2)
博士 Doctor's course	12 (2)	16 (1)	17 (0)	22 (2)	25 (2)
合計 Total	31 (2)	43 (5)	47 (5)	52 (5)	58 (4)

( )はうち女性 The number of ( ) represents female students.

ICRR, as one of the "Inter-University Research Centers," conducts Inter-University Research at Kamioka observatory, Norikura Observatory, Akeno Observatory, and on Kashiwa Campus. The ICRR joint-research operates internationally as well as domestically. The Inter-University programs accept applications from researchers around the country, and are selected by the advisory committee and user's committee. The table lists the number of total and successful applications for each observatory or center in 2015.

採択件数 Successful Applications	述べ研究者数 Total Researchers
39 (39)	865 (865)
50 [11]	1021 [91]
26	560
8	83
はるさ神図史中事些マ研究体別	「 ] /+ ス + 垂 勅知測詞

( )はうち神岡宇宙素粒子研究施設、[ ]はうち乗鞍観測所
 The number of () represents the one from Kamioka Observatory, and []represents the one from Norikura Observatory.

ICRR accepts graduate students, and also delivers lectures for them as a part of the Graduate School of Science, the University of Tokyo. ICRR also conducts liberal seminars for undergraduate students. ICRR also accepts graduate students from other universities inside and outside Japan as special listeners, special researchers, and foreign researchers, as the graduate school of the University of Tokyo. The table lists the number of graduate students accepted by ICRR in recent years.

## 国際交流

#### **International Exchange**

## 成果発表

#### 国際協力研究プロジェクト nternational Projects

エマルションチェンバープロジェクト Emulsion Chambers Project

ボリビアのチャカルタヤ山では、エマルションチェンバーを 用いて宇宙線の起こす核相互作用の研究が行われています。 On Mt. Chacaltaya in Bolivia, studies on nuclear interactions by cosmic rays are conducted using emulsion chambers.

● チベット空気シャワープロジェクト Tibet ASy Collaboration

チベットの羊八井(ヤンパーチン)高原では空気シャワー観 測装置を用いて高エネルギー宇宙線実験が行われています。 On Yangbajing Plateau in Tibet, experimental studies on high-energy cosmic rays are conducted using air-shower detector.

テレスコープアレイプロジェクト Telescope Array Project

アメリカのユタでは、大気蛍光望遠鏡を用いて最高エネル ギーの宇宙線の観測・研究を行っています。

In Utah, USA, observational studies of ultra high-energy cosmic rays are conducted.

スーパーカミオカンデプロジェクト Super-Kamiokande Collaboration

神岡宇宙素粒子研究施設では、スーパーカミオカンデを用い て、ニュートリノ振動や陽子崩壊の探索などの研究を行って います。8カ国の研究者が共同研究に参加しています。

At Kamioka observatory, studies on neutrino osccilation and proton decay are conducted with Super-Kamiokande detector. Researchers from 8 countries have joined the project.

#### ● XMASS プロジェクト XMASS Project

神岡宇宙素粒子研究施設では、液体キセノン検出器 XMASS を用いて、ダークマターの直接検出を目指しています。日本 と韓国の研究者が研究に参加しています。

At Kamioka observatory, project of detecting dark matter particle is conducted with XMASS detector. Both Japanese and Korean researchers are involved.

#### ● KAGRA プロジェクト

**KAGRA** Project

重力波観測研究施設では、大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」 の建設を進めています。14 カ国の研究者が共同研究に参加 しています。

At KAGRA observatory, construction of the Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (KAGRA) is proceeding. Researchers from 14 countries have joined the project.

#### ● CTA プロジェクト

Cherenkov Telescope Array Project

スペイン・カナリア諸島のラパルマとチリ・パラナルでは、 高エネルギーガンマ線天体物理学の研究を行うために、チェ レンコフテレスコープアレイ(CTA)の建設を進めています。 33 カ国の研究者が共同研究に参加しています。

On Canary Islands, Spain and at Paranal, Chile, construction of the Cherenkov Telescope Array (CTA) is proceeding to study about very high energy gamma-ray astrophysics. Researchers from 33 countries have joined the project.

#### 国際学術交流協定締結機関名 Academic Exchange Agreement

- 1981 ボリビアサンアンドレス大学(ボリビア)
- 中国科学院高能物理研究所(中国) 1995 ute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (China)
- 1995 ユタ大学理学部(アメリカ) of Litab (LIS)
- カリフォルニア大学アーバイン校物理科学部(アメリカ) 1995
- ボストン大学大学院文理学研究科(アメリカ) 1995
- 2001 ロシア科学アカデミー原子核研究所(ロシア)
- 2001 アデレード大学物理数学部(オーストラリア)
- 2001 西オーストラリア大学生命物理科学部(オーストラリア)
- 2009 ソウル大学校自然科学大学(韓国)
- カリフォルニア工科大学 LIGO 研究所(アメリカ) 2009
- バーゴ共同研究組織(イタリア) 2011 atory / The Virgo Collaboration (Italy)
- 2011 上海師範大学(中国) Center for Astrophysics Shanghai Normal University (China)
- 2011 グラスゴー大学重力研究所(英国) ersity of Glasgow (US) 2011 国立清華大学理学部(台湾)
- sing Hua University (Taiwan) 中国科学院上海セラミック研究所人工結晶研究センター(中国) 2012
- The SICCAS-GCL Research & Development Center, The Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences (China) ルイジアナ州立大学理学部(米国) 2012
- サニオ大学工学部(イタリア) 2012
- sity of Sannio at Benevento (Italy 中国科学院国家天文台(中国) 2012
- es. Chinese Academy of Sciences (China) マドリッド自治大学理学部(スペイン) The Faculty Sciencer Automation ( 2013
- rsity of Madrid (Spain
- 2015 カナリー宇宙物理学研究所(スペイン)

#### 外国人研究者との人的交流 nternational Exchange

国際交流状況調査による外国人研究員の受入数は下記の表の通 りです。P43 に掲載されている共同利用研究に参加している外 国人研究員の数と合わせると、平成 27 年度で延べ 1,325 名に 上ります。

Recent data on the number of accepted foreign researchers by the study of international exchange is given in Table below. Adding up the number of foreign researchers joined ICRR inter-university research projects, the total comes to 1,325 in 2015.

受入外国人研究員数 The	Number of Accepted Foreign Researcher

	2011	2012	2013	2014	2015
アジア Asia	24	26	32	39	27
オセアニア Oceania	1	2	1	7	2
中南米 Latin America			3	3	
北米 North America	72	69	52	79	54
ヨーロッパ Europe	28	41	66	83	13
合計 Total	125	138	154	211	96

#### ■ 国際会議および国際研究集会の開催 International Conference and Workshops

東京大学宇宙線研究所は、国際会議や国際研究集会をそれぞ れ年 1回程度開催しています。内外の著名な学者や新鋭の若手 研究者を招いて最新の研究について話してもらうセミナーも、 月 1回程度行っています。過去 10 年間に開催した国際会議及 び国際研究集会は、以下のとおりです。

国際ワークショップ「高エネルギー宇宙のエネルギー収支」 International Workshop on Energy Budget in the High Energy Ur 2006.2.22-24 (千葉 Chiba) 126 人

国際ワークショップ「J-PARC ニュートリノビームに対する韓国遠隔検出器」 2nd International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutron Beam 2006.7.13-14 (韓国 Korea) 61 人

国際ワークショップ「次世代核子崩壊とニュートリノ検出器 2007」 Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detector 2007 2007.10.2-5 (静岡 Shizuoka) 102 人

テレスコープアレイ (TA) 完成記念講演会および祝賀会 Inauguration Ceremony and Symposium of Telescope 2008.8.25 (千葉 Chiba) 101 人

第 58 回 藤原セミナー「重力波観剖のための世界規模ネットワーク」 58th Fujihara seminar: World-wide Network for Gravitat 2009.5.26-29 (神奈川 Kanagawa) 84 人

重力波国際会議「Gravitational-Wave Advanced Detector Workshop 2010」 Gravitational-Wave Advanced Detector Workshop, GWADW 2010 2010.5.16-21 (京都 Kyoto) 107 人

国際シンポジウム「最高エネルギー宇宙線観測の最近の進展」 International Symposium on the Recent Progress of Ultra High Energy Cosmic Ray Observation 2010.12.10-12 (名古屋 Nagoya) 114人

伊日共同ワークショップ 2011.10.4-5 (千葉 Chiba) 39 人

第2回日韓 KAGRA ワークショップ 2nd Japan Korea workshop on KAGRA 2012.5.28-29 (千葉 Chiba) 26 人

第1回 EliTES 重力波国際会議 1st EliTES General Meeting 2012.10.3-4 (東京 Tokyo) 80 人

#### ■ 論文 Academic Papers

共同利用研究の成果は、内外の学会等で発表する他、論文と して内外の学術雑誌上でも発表します。研究所スタッフの論文 の内、レフリー付英文雑誌、ICRR Report(英文)及び国際会 議の Proceedings に発表されたものの数を年度別にして以下に 示します。

Reports of joint-use research are presented at academic conferences in Japan and overseas, and also published in Japanese and foreign academic journals. The plot shows the numbers of papers authored by ICRR members that are published each fiscal year in ICRR Reports, refereed journals, and proceedings of international conferences.

	論文以外の刊行物	Other Publications
•	研究所要覧 ICRR Catalogue	
•	研究所紹介パンフレット ICRR Brochure	
•	ICRR Annual Report	
•	ICRR Report	

ICRR ニュース

## **Achievement Reports**

ICRR holds international conferences and international workshops about once every year, and hosts monthly seminars inviting renowned scientists and promising young researchers to discuss cutting-edge research. The table below lists the international conferences and workshops held in the past decade, with the number of participants at the end of each item

第3回日韓 KAGRA ワークショップ 3rd Japan Korea workshop on KAGRA 2012.12.21-22 (韓国 Korea) 20 人

第4回日韓 KAGRA ワークショップ 4th Japan Korea workshop on KAGRA 2013.6.10-11 (大阪 Osaka) 34 人

第5回日韓 KAGRA ワークショップ 5th Japan Korea workshop on KAGRA 2013.11.29-30 (韓国 Korea) 36 人

第2回 EliTES 重力波国際会議 2nd EliTES General Meeting 2013.12.4-5 (東京 Tokyo) 80 人

CTA LST 国際会議 CTA LST General Meeting 2014.1.14-17 (千葉 Chiba) 83 人

第6回日韓 KAGRA ワークショップ 6th Japan Korea workshop in KAGR 2014.6.20-21 (東京 Tokyo) 49 人

**第7回日韓 KAGRA ワークショップ** 7th Japan Korea workshop in KAGRA 2014.12.19-20(富山 Toyama)34 人

ハイパーカミオカンデ国際共同研究グループ結成記念シンポジウム及び調印式 The Inaugural Symposium of the Hyper-I 2015.1.31 (千葉 Chiba) 108 人

第3回 EliTES 重力波国際会議 3rd EliTES General Meeting 2015.2.9-10 (東京 Tokyo) 42 人



第 音 研 所 1-0 い

受賞歴

Awards

## 📕 アクセス

#### 所在地 Location

♥ 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8582, Japan

▲ 04-7136-3102(総務係) +81-4-7136-3102(General Affairs)

#### アクセス Access

#### 成田空港から

成田空港交通バス(75分・1700円)で柏の葉キャンパス駅へ 柏の葉キャンパス駅から東武バス(10分・170円)で国立が ん研究センターで下車し徒歩2分

#### 羽田空港から

東武バスまたは京浜急行バス(85 分・1540 円)で国立がん研 究センターで下車し徒歩2分

#### 秋葉原駅から

つくばエクスプレスで柏の葉キャンパス駅へ(30分・670円) 柏の葉キャンパス駅から東武バス(10分・170円)で国立が ん研究センターで下車し徒歩2分

#### 上野駅から

JR 常磐線で柏駅へ(30 分・470 円)柏駅から東武バス(25 分・ 290 円)で国立がん研究センターで下車し徒歩 2 分



主な	<b>送賞歴</b> (過	去 10 年)	Awards (Past De	ecade)
2007	ペンジャミンフラ Benjamin Franklin M	ランクリンメダル Medal in physics	戸塚洋二 Yoji Totsuka	ニュートリノに質量があることの発見 Discovery of the neutrino mass
2008	素粒子メダル Particle Physics Me	dal	荒船次郎 Jiro Arafune	非可換ゲージ理論におけるモノポールのトポロジー的性質の研究 Topological property of monopole in non-commutative gauge theories
2008	井上学術賞 Inoue Prize for Scie	nce	中畑雅行 Masayuki Nakahata	太陽ニュートリノの観測とニュートリノ振動の研究 Solar neutrino detection and research of neutrino oscillation
2008	地球化学研究協会 Young Scientist Aw Geochemistry Rese	会奨励賞 ard of the arch Association	宮原ひろ子 Hiroko Miyahara	宇宙線生成核種による太陽活動史の研究 Study of the long-term solar variations using cosmogenic nuclide
2010	井上研究奨励賞 Inoue Research Awa	ard for Young Scientist	西野玄記 Haruki Nishino	スーパーカミオカンデにおける荷電レポトンとメソンへの核子崩壊の探索 Search for Nucleon Decay into Charged Antilepton plus Meson in Super-Kamiokande
2010	戸塚洋二賞 Yoji Totsuka Prize		梶田隆章 Takaaki Kajita	大気ニュートリノ振動の発見 Discovery of atmospheric neutrino oscillation
2011	ブルーノ・ポンラ Bruno Pontecorvo F	テコルボ賞 Prize	鈴木洋一郎 Yoichiro Suzuki	スーパーカミオカンデ実験における大気ニュートリノおよび太陽ニュートリノ振動の発見 Discovery of atmospheric and solar neutrino oscillations in the Super-Kamiokande experiment
2011	戸塚洋二賞 Yoji Totsuka Prize		中畑雅行 Masayuki Nakahata	長年に亘る太陽ニュートリノと振動の研究 Study of the solar neutrino and its oscillations
2011	日本物理学会若言 Young Scientist Aw Physical Society of	手奨励賞 ard of the Japan	佐古崇志 Takashi Sako	チベット空気シャワーアレイにおける高エネルギー宇宙線異方性の研究 Study on the High-Energy Cosmic Ray Anisotropy with the Tibet Air-Shower Array
2012	戸塚洋二賞 Yoji Totsuka Prize		福来正孝 Masataka Fukugita	レプトン起源の宇宙のバリオン数非対称機構の提唱 Pointing out a mechanism to generate cosmological baryon number violation originated by lepton
2012	日本学士院賞 Japan Academy Priz	ze	梶田隆章 Takaaki Kajita	大気ニュートリノ振動の発見 Discovery of atmospheric neutrino oscillations
2012	文部科学大臣賞和 MEXT Young Scien	告手科学者賞 tists' Prize	宮原ひろ子 Hiroko Miyahara	太陽活動および宇宙線が気候に及ぼす影響の研究 Study for solar activities and its effects
2012	素粒子メダル奨励 Young Scientist Aw Theoretical Particle	动賞 ard in Physics	伊部昌宏 Masahiro Ibe	超対称性の破れにおける現象論的宇宙論的制限を満足する新しいシナリオの構築と検証 Sweet Spot Supersymmetry
2013	ティンズリー・ス Extragalactic Tinsle	スカラー・アワード ry Scholar Award	大内正己 Masami Ouchi	遠方宇宙観測による広範囲な研究 Extensive work on distant galaxies and cosmological events in the early universe
2013	ヨド賞 Yodh Prize		永野元彦 Motohiko Nagano	最高エネルギー宇宙線分野における先駆的研究 Pioneering leadership in the experimental study of the highest cosmic rays
2013	ジュセッペ・ヴァ Giuseppe and Vann	・ンナ・ココニ a Cocconi Prize	鈴木洋一郎 Yoichiro Suzuki	太陽ニュートリノの全フレーバー測定による太陽ニュートリノの謎の解明 Outstanding contributions to the solution of the solar neutrino puzzle by measuring the flux of all neutrino flavors
2013	ユリウス・ヴェス Julius Wess Award	賞	梶田隆章 Takaaki Kajita	スーパーカミオカンデ実験による大気ニュートリノ振動現象の発見 Discovery of atmospheric neutrino oscillations with the Super-Kamiokande experiment
2014	湯川記念財団・フ Yukawa-Kimura Pri	木村利栄理論物理学) <sup>ze</sup>	賞 川崎雅裕 Masahiro Kawasaki	重力まで含めた相互作用の統一理論の構築における功績 Supergravity and nucleosynthesis
2014	文部科学大臣表章 MEXT Young Scien	影若手科学者賞 tists' Prize	大内正己 Masami Ouchi	可視光広域深探査による宇宙進化の研究 Pioneering studies into the early universe through wide-field multi-wavelength observations
2015	戸塚洋二賞 Yoji Totsuka Prize		塩澤真人 Masato Shiozawa	加速器ミューニュートリノビームによる電子ニュートリノ出現現象の発見 Observation of electron neutrino appearance in an accelerator muon neutrino beam
2015	日本天文学会研究 The Astronomical S Japan Young Astron	究奨励賞 fociety of nomer Award	小野宣昭 Yoshiaki Ono	銀河進化と宇宙再電離の観測的研究 Observational studies of galaxy evolution and cosmic reionization
2015	基礎物理学ブレ- Breakthrough Prize	- クスルー賞 in Fundamental Physics	梶田隆章 s Takaaki Kajita	ニュートリノ振動という本質的な発見をし、素粒子物理学の標準理論を遥かに超える新しいフロンティアを開拓した The fundamental discovery and exploration of neutrino oscillations
2015	<b>文化</b> 勲章 The Order of Cultu	re	梶田隆章 Takaaki Kajita	ニュートリノ物理学において著しい研究成果を挙げ、素粒子物理および宇宙論に多大な影響を与えた功績 Outstanding contributions to particle physics and cosmology by the remarkable achievements for researches in Neutrino phys
2015	文化功労者 Person of Cultural I	Merit	梶田隆章 Takaaki Kajita	ニュートリノ物理学において著しい研究成果を挙げ、素粒子物理および宇宙論に多大な影響を与えた功線 Outstanding contributions to particle physics and cosmology by the remarkable achievements for researches in Neutrino phys
2015	ノーベル物理学 Nobel Prize in Phys	ics	梶田隆章 Takaaki Kajita	ニュートリノが質量を持つ事を示す、ニュートリノ振動現象の発見 The discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass

#### ┃ 宇宙線研究所修士博士研究発表会所長賞 ICRR Graduate Student Workshop Best Presentation Awards

2	2012		関口貴令 Takanori Sekiguchi	大型低温重力波検出器 (LCGT) 用防振装置のモデリングとシミュレーション Modeling and Simulation of Vibration Isolation System for Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope (LCGT)
4	2013	博士 Doctor	斎川賢一 Kenichi Saikawa	アクシオン暗黒物質の熱化過程の解析 Thermalization of axion dark matter
2	2013	修士 Master	三上諒 Ryo Mikami	Crab パルサーからの巨大電波パルス:電波・硬 X 線同時観測による放射機構 Giant Radio Pulses from the Crab Pulsar: Study of Radiation Mechanism with Simultaneous radio and hard x-ray observations
2	2014	博士 Doctor	北嶋直弥 Naoya Kitajima	カーバトン模型における原始ブラックホール形成及び重力波生成 Primordial blackhole formation and gravitational wave production in a curvaton model
2	2014	修士 Master	亀谷功 Isao Kametani	大気ニュートリノの東西効果及び太陽活動が大気ニュートリノのフラックスに与える影響 East-West Effect of Atmospheric Neutrinos And Effect of Solar Activities On The Flux Of Atmospheric Neutrino
2	2015	博士 Doctor	陳タン Chen Dan	重力波望遠鏡 KAGRA のための低温懸架システムの研究 Studies on the cryogenic suspension system for KAGRA
2	2015	修士 Master	佐々木健斗 Kento Sasaki	フェルミバブルにおける乱流加速と放射 Turbulent acceleration and radiation in Fermi bubble
4	2015	ポスター Poster	山田 將樹 Masaki Yamada	Gravitational waves as a probe of supersymmetric scale
2	2016	博士 Doctor	山田將樹 Masaki Yamada	アフレック・ダイン機構を通じた物質および暗黒物質生成 Visible and dark matter genesis through the Affleck-Dine mechanism
2	2016	修士 Master	藤本征史 Seiji Fujimoto	ALMA で検出された 0.02 mJy に至る暗いミリ波天体 : 物理的起源と銀河系外背景光への寄与 ALMA Faint-mm Sources Down to 0.02 mJy: Physical Origins and Contributions to the Extragalactic Background Light
2	2016	ポスター Poster	榎本雄太郎 Yutaro Enomoto	重力波検出器 KAGRA のための量子雑音低減法の開発 Reduction of quantum noise for gravitational wave detector KAGRA

## Access

#### From Narita Airport

By Airport Bus (Narita Airport Express Bus) NARITA Airport - Kashiwanoha Campus Station: about 75min, 1,700JPY (one-way) Kashiwanoha Campus Station (West Exit) - National Cancer Center: around 10min, 170JPY (one-way)

#### From Haneda Airport

By Airport Bus (Tobu / Keihin Kyuko Airport Bus) HANEDA Airport - National Cancer Center: around 85min, 1,540JPY (one-way)

#### From Akihabara Statioin

By Train (Tsukuba Express) Akihabara Station - Kashiwanoha Campus Station: around 30min, 670JPY (one-way) Kashiwanoha Campus Station (West Exit) - National Cancer Center: around 10min, 170JPY (one-way)

#### From Ueno Statioin

By Train (JR Joban Line) Ueno Station - Kashiwa Station: around 30min, 470JPY (one-way) Kashiwa Station (West Exit) - National Cancer Center: around 25min, 290JPY (one-way)