



☐ 柏キャンパス

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5  
TEL: 04-7136-3102

☐ 神岡宇宙素粒子研究施設

〒506-1205 岐阜県飛騨市神岡町東茂住456  
TEL: 0578-85-2116

☐ 乗鞍観測所

〒506-2100 岐阜県高山市丹生川町乗鞍岳  
TEL: 090-7721-5674

☐ 明野観測所

〒408-0201 山梨県北杜市明野町浅尾5259  
TEL: 0551-25-2301

☐ Kashiwa Campus

5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa-shi, Chiba,  
277-8582 Japan  
TEL: +81-4-7136-3102

☐ Kamioka Observatory

456 Higashi-Mozumi, Kamioka-cho, Hida-shi, Gifu,  
506-1205 Japan  
TEL: +81-578-85-2116

☐ Norikura Observatory

Norikuradake, Nyukawa-cho, Takayama-shi, Gifu,  
506-2100 Japan  
TEL: +81-90-7721-5674

☐ Akeno Observatory

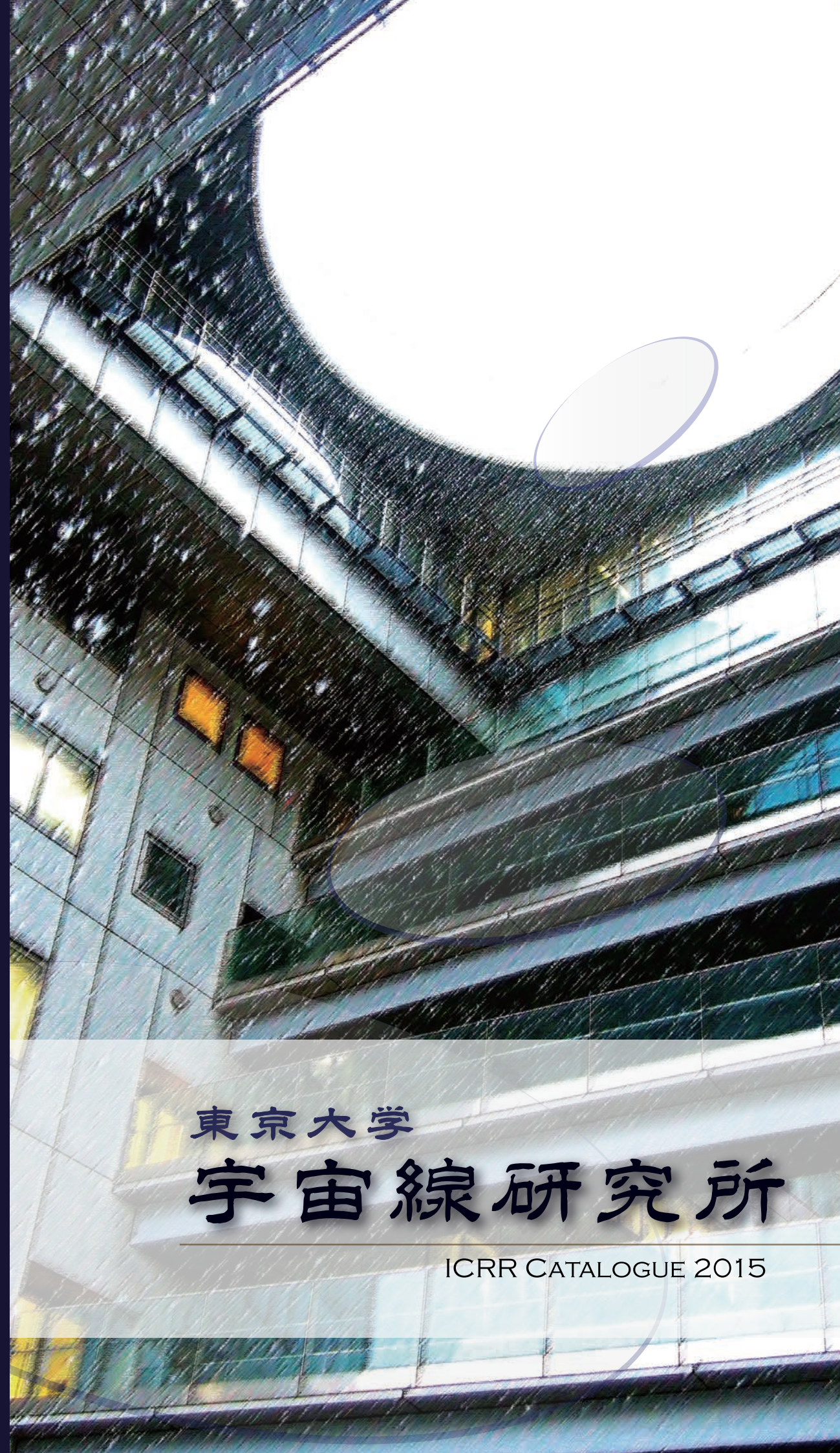
5259 Asao, Akeno-machi, Hokuto-shi, Yamanashi,  
408-0201 Japan  
TEL: +81-551-25-2301

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/>



THE UNIVERSITY OF TOKYO

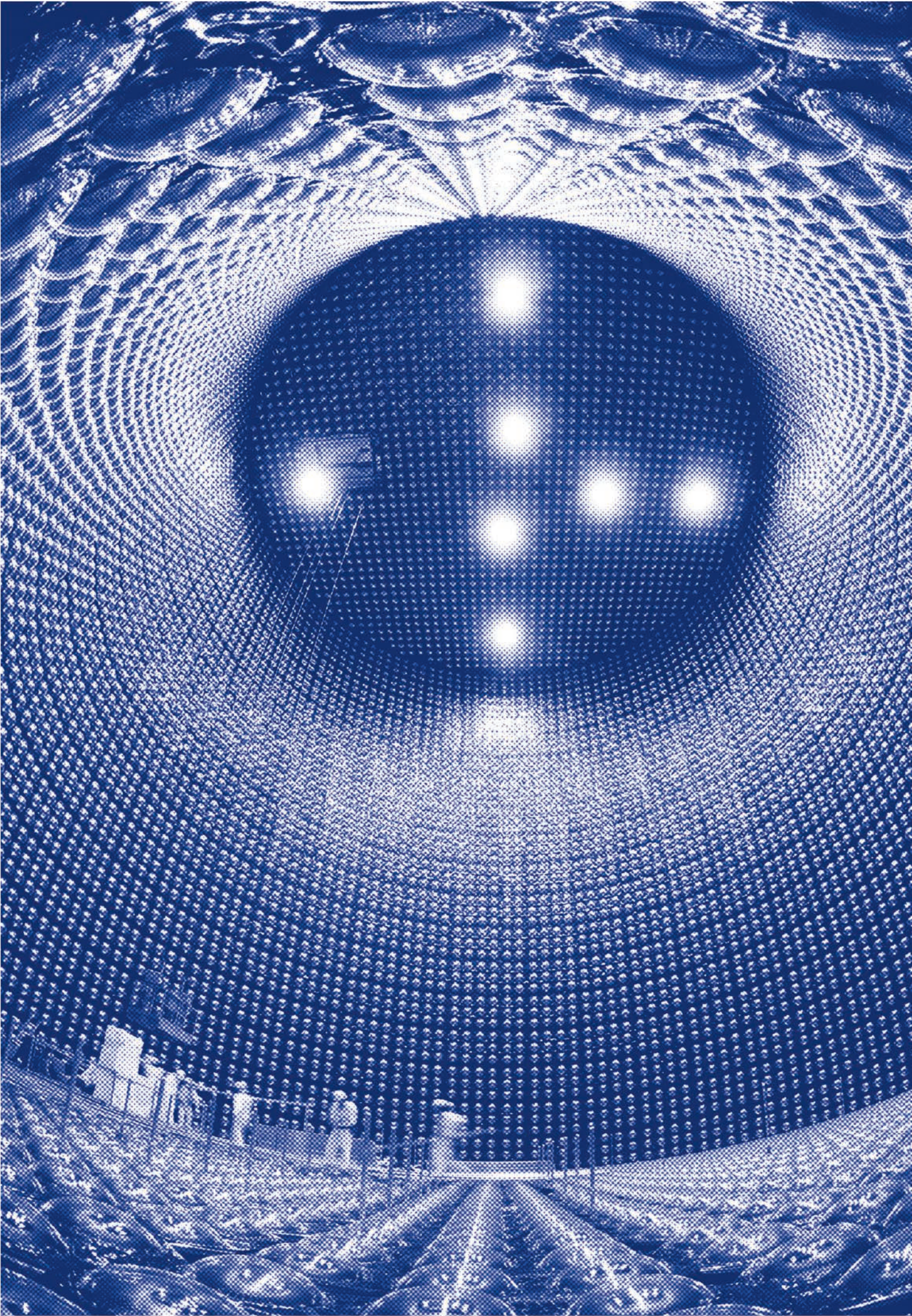
INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH



東京大学  
宇宙線研究所

ICRR CATALOGUE 2015





# CONTENTS

# 目次

## ◆研究内容について

ご挨拶	2
Preface	
宇宙線とは？	4
What Are Cosmic Rays?	
宇宙ニュートリノ研究部門	
Cosmic Neutrino Research Division	
スーパーカミオカンデグループ	8
Super-Kamiokande Group	
T2K実験	10
T2K Experiment	
XMASSグループ	12
XMASS Group	
高エネルギー宇宙線研究部門	
High Energy Cosmic Ray Research Division	
チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ	14
Cherenkov Cosmic Gamma Ray Group	
TAグループ	16
Telescope Array Group	
チベットグループ	18
The Tibet AS-γ Collaboration	
「高エネルギー天体」グループ	20
High Energy Astrophysics Group	
宇宙基礎物理学研究部門	
Astrophysics and Gravity Research Division	
重力波推進室	22
Gravitational Wave Project Office (GWPO)	
観測的宇宙論グループ	24
Observational Cosmology Group	
理論グループ	26
Theory Group	

## ◆施設と所在地について

宇宙ニュートリノ観測情報融合センター	28
Research Center for Cosmic Neutrinos	
神岡宇宙素粒子研究施設	29
Kamioka Observatory	
乗鞍観測所	30
Norikura Observatory	
明野観測所	31
Akeno Observatory	
チャカルタヤ宇宙物理観測所	32
Chacaltaya Observatory of Cosmic Physics	

## ◆研究所について

沿革	34
History	
年表	36
Timeline	
組織・運営	39
Organization and Administration	
各種委員会委員	40
Committee Members	
教職員数・歴代代表者	41
Number of Staff and Past Representatives	
経費・施設	42
Research Budget & Facilities	
共同利用研究・教育	43
Inter-University Research and Education	
国際交流	44
International Exchange	
成果発表と受賞歴	45
Achievement Reports and Awards	
柏キャンパス	47
Kashiwa Campus	





東京大学宇宙線研究所長  
梶 田 隆 章

## 宇宙線研究所と宇宙線の研究

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ことであることを示しており、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、宇宙には我々が目に見える光以外に、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こと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、いよいよこれから5年以内に観測され、新たな重力波天文学の研究分野が生まれる可能性が高くなってきたと思われます。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などが、近年の成果のハイライトと言えます。宇宙にはその総重量が我々の知っている物質の何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たことは広く認められていることと思います。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、 $10^{20}$  eV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2度に渡る宇宙線研究所の将来計画検討委員会でその重要性が指摘された重力波望遠鏡(KAGRA)も2010年に装置建設が開始されました。2015年の最初の干涉計運転を経て、2017年度には本格運転を開始する予定です。この装置からの重力波の世界初検出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プロジェクトなどの研究計画の実現にも積極的に取り組んでいくつもりです。

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。

## Institute for Cosmic Ray Research and researches in cosmic rays

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, suggesting that the gravitational wave signal could be observed within the next 5 years. 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. 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.

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 Inter-University Research Institute. 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  $10^{20}$  eV 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 is going to have the initial interferometer operation in JFY 2015 and move on to the advanced interferometer operation in JFY 2017. We are looking forward to seeing the long-awaited first signal of a gravitational wave. Finally, realizing the projects such as high-energy gamma-ray astronomy (CTA) is also one of the important missions for ICRR.

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？ What Are Cosmic Rays?

## 宇宙から降り注ぐミクロな粒子

宇宙線とは、宇宙空間を高エネルギーで飛び交っている極めて小さな粒子のことをいいます。地球にも多くの宇宙線が到来しており、大気に衝突して大量の粒子を生成し、地表に降り注いでいます。これらの粒子は、日常的に私たちの体や岩をすり抜けて地中に突入しています。

このミクロな粒子の正体は、物質を構成している原子核や素粒子などの粒子です。原子核とは原子の中の電子を剥ぎ取ったときに残る電気を帯びた粒子で、陽子と中性子でできています。宇宙線として降ってくる粒子のうちおよそ90パーセントは陽子1個でできた水素原子核、およそ9パーセントが陽子と中性子が2個ずつでできたヘリウム原子核、そしてほんの1パーセントが素粒子やヘリウム原子核よりも重たい原子核になります。

これらの粒子は大変高いエネルギーで飛び交っているため、「放射線」とも呼ばれています。岩や地中に含まれる放射性原子核から出るアルファ線やベータ線などの放射線はよく知られていますが、同様の放射線が空からも降り注いでいることが知られるようになったのは、今からおよそ100年前のことでした。1912年、オーストリアの科学者ヘスは高度5キロメートルまで気球を飛ばし、高度が高くなるほど放射線量が増えることを示しました。これにより、放射線は地面からのみではなく、宇宙からも到来していることが証明され、宇宙線の発見に至りました。

## 宇宙線が生成する「空気シャワー」

こうして発見された宇宙線は、さらに調べていくうちに無作為に降り注ぐのではないこともわかってきます。数台の放射線検出器を、距離をおいて設置し宇宙線を検出すると、一度に大量の宇宙線が地表に到達している様子が観測されたのです。また1936年には、高度が上がるにつれ急増する宇宙線の線量は、高度およそ15キロメートルでピークとなり、その後急速に減少するという測定がされました。つまり、これまで

に検出されていた宇宙線は、宇宙で発生し地球に到来した高エネルギーの宇宙線が大気と反応することで生成された、二次的な宇宙線であることがわかったのです。宇宙に起源する宇宙線を一次宇宙線、大気と反応して生成する大量の粒子を二次宇宙線と呼びます。

地球大気に猪突する一次宇宙線は、空気中の酸素分子や窒素分子と反応を起こすと、その高エネルギーに依り原子核を破壊し、中間子と呼ばれる新たな粒子を多数生成します。生成された中間子もまた高速で周りの原子核に衝突しさらに多数の中間子を生成し、粒子の数をねずみ算的に増幅しながらエネルギーを落としていきます。このうち寿命が短いものはすぐに「崩壊」し、最終的には、1,000億個もの比較的エネルギーが低いミュオン、ニュートリノ、中性子、ガンマ線や電子・陽電子となって数百平方メートルの地上に降り注ぐのです。

この二次宇宙線のシャワーを「空気シャワー」と呼びます。ミュオンや中間子、陽電子は、空気シャワーの観測により発見された粒子であり、宇宙線研究は素粒子物理学の発展に大きな貢献をしてきました。

## メッセンジャーとしての宇宙線

上述のような高エネルギーの一次宇宙線は、太陽系外に起源を持つことがわかっています。では、いったい宇宙のどこにそのような生成メカニズムがあり、どのように地球に到来するのでしょうか。一次宇宙線のエネルギーや化学組成がその手がかりを与えてくれます。

宇宙線のエネルギーや化学組成を測定するためには、地表の広範囲にたくさんの宇宙線検出器を並べ、空気シャワーを観測します。このようにして調べた結果、宇宙から飛来する宇宙線は10の8乗電子ボルトから10の20乗電子ボルト(可視光の1億倍から1垓倍のエネルギー)という幅広いエネルギーでやってくることがわかりました。

宇宙線は、エネルギーが高くなればなるほど、その数を急激に減らし、あるエネルギーを境に存在しなくなります。最も高いエネルギーで到来する一次宇宙線の粒子1個のエネルギーは、なんと電球1個が1秒間に放つエネルギーにも値し、放射性原子核起源の放射線の100兆倍、加速器実験で人工的に作り出せる最高エネルギー粒子の1000万倍のエネルギーにもなります。このようなエネルギーにまで粒子を加速するメカニズムが宇宙のどこに存在するのかは、未だ解明されていません。

比較的エネルギーの低い宇宙線は多数存在しますが、太陽系内や銀河系内の強力な磁場によって進路を曲げられ発生場所の情報も失ってしまいます。これに対し、最高エネルギーの宇宙線は強力な磁場にも進路をほとんど曲げられることなく到来しますが、大変稀少であり100平方キロメートルに年1回ほどしか降らないため、なかなか観測できません。このように様々なチャレンジのある宇宙線研究分野ですが、最新の観測により、重い星が寿命を終える時に起こす「超新星爆発」の際に、高エネルギーの宇宙線がたくさん生まれていることが明らかになってくるなど、宇宙の天体現象が解明されつつあります。

宇宙線研究では、遠い宇宙の彼方で起こっている激しい天体現象のメカニズムを理解することで、究極的には宇宙進化の謎を明らかにすることを目指しています。つまり宇宙線とは、宇宙のさまざまな謎に答えてくれる多大な可能性を秘めた、宇宙から私たち人類に向けて放たれた「メッセンジャー」であるといえます。

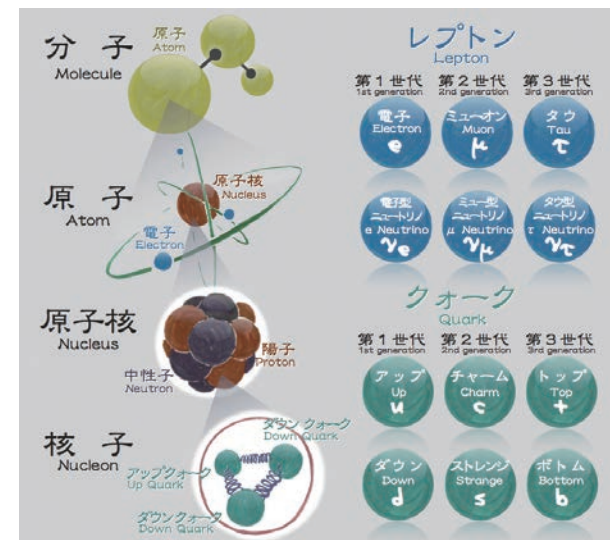


図1 物質をつくる素粒子の種類

Fig.1 Types of elementary particles that constitute ordinary matter

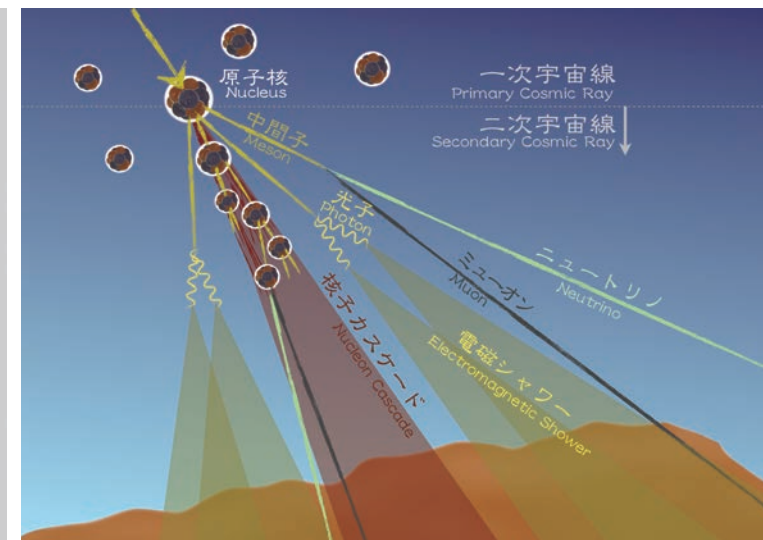


図2 空気シャワーとは、宇宙から降り注ぐ放射線(一次宇宙線)が、大気中の原子核と反応してつくられる二次粒子群のことです。

Fig.2 Air showers are cascades of light particles that are produced in collisions between primary cosmic rays and air molecules.

## High-Energy Particles from Space

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.

These particles 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.

It was not until the early twentieth century that scientists realized high-energy radiation originates not just from radioactive nuclei on earth, but also from outer space. In 1912, an Austrian physicist Victor Hess ascended in a balloon up to the altitude of 5 kilometers, and found that his electroscope discharged more rapidly as he ascended, which he attributed to radiation entering the atmosphere from above. This marked the discovery of cosmic rays.

## Cosmic Ray Air Shower

The flux of cosmic radiation increases sharply with altitude, but it peaks at about 15 kilometers in altitude, dropping sharply at higher altitude. This discovery was made in 1936, and along with other observations by ground-based detectors, indicated that the radiation detected was from secondary particles produced by very high-energy cosmic rays reaching the Earth from space.

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”), which then 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 such as muons, neutrinos, gamma-rays, electrons, and positrons. This cascade of particles is called an “air shower.” A typical air shower develops into hundreds of billions of secondary particles, raining on an area covering several hundred square meters on the ground.

Muons, mesons, and positrons were first detected in air showers, bringing about profound impacts on the field of elementary particles. However, the field of Cosmic Ray Astronomy is yet to see major breakthroughs: there are still so many questions to explore, the most significant of which being, for example, what are the sources of high energy cosmic rays, and how they propagate through space before arriving the Earth.

## Sources of Cosmic Rays

Primary cosmic rays impact on the Earth's atmosphere with a very wide energy spectrum, from  $10^8$  to  $10^{20}$  electron volts. The number of primary cosmic rays decreases exponentially with energy.



宇宙からやってくるメッセンジャーは、前述のような原子核のみならず、最もエネルギーの高い電磁波(光)である「ガンマ線」や、全ての物質を軽々とすりぬけて地球に到来する素粒子「ニュートリノ」などもあり、その特性から原子核宇宙線とは相補的な情報を与えてくれます。困難だったこれらの粒子の観測も近年の技術の進歩により飛躍的に進展し、新たにガンマ線・ニュートリノ天文学が拓けてきました。

この他にも、未知の物質「暗黒物質」の直接探査など、成功すれば物理学に飛躍的な発展をもたらす重要な実験が行われています。現在の宇宙線研究では、こういった多角的なアプローチ「マルチメッセンジャー」による観測を通して、宇宙の謎を解明する世界最先端の研究が行われています。東京大学柏キャンパスにある宇宙線研究所は、このように多岐にわたる数々の宇宙線研究を一括して行っている世界で唯一の研究機関なのです。

代表的な宇宙線検出器は、地表の広範囲に配置された多数の検出器で空気シャワーをとらえる地表宇宙線実験で、その痕跡から一次宇宙線のエネルギーや化学組成を再構築します。目的によりいくつかの種類があります。

The diagram illustrates the vertical distribution of astronomical observation facilities, categorized by the phenomenon they observe and their altitude above the Earth's surface.

観測対象 (Observation Target)	観測施設 (Observation Facility)	高度 (Altitude)
重力波 (Gravitational Wave)	重力波検出装置 (Gravitational Wave Detector)	0 km (Surface)
暗黒物質 (Dark Matter)	暗黒物質検出器 (Dark Matter Detector)	地下 (Underground)
ニュートリノ (Neutrino)	水チェレンコフ望遠鏡 (Water Cherenkov Telescope)	0 km (Surface)
宇宙線・ガンマ線 (Cosmic Ray / Gamma Ray)	空気チェレンコフ望遠鏡 (Air Cherenkov Telescope)	0 km (Surface)
宇宙線・ガンマ線 (Cosmic Ray / Gamma Ray)	空気シャワー検出器 (Air Shower Detector Array)	3 km - 5 km
宇宙線・ガンマ線 (Cosmic Ray / Gamma Ray)	大気蛍光望遠鏡 (Fluorescent Detector)	30 km - 40 km
宇宙線・ガンマ線 (Cosmic Ray / Gamma Ray)	人工衛星・宇宙ステーション (Satellite / ISS)	200 km

(この検出器群を「地表アレイ」と呼びます) し、空気シャワーに含まれる荷電粒子を検出する方法があります。これは他の手法に比べて広範囲の空を天候に関係なく高稼働率で観測できるという利点があるのに対し、宇宙線から生じた荷電粒子であるかどうかの判別がつきにくいという難点があります。

レイの検出器やニュートリノ望遠鏡として活用されています。

その他には、空気シャワー中の電子や陽電子が大気中の窒素分子や分子イオンを励起して発する蛍光をとらえる蛍光望遠鏡もあり、地表アレイと蛍光望遠鏡を組み合わせることで、より解像度の高い探査を行っている探査実験もあります。

A cosmic ray particle of the highest energy has energy that is equivalent to the energy a lightning bolt emits every second—a hundred trillion times the energy of a typical particle emitted by a radioactive nucleus, and ten million times the energy of the highest energy man-made particle accelerator can produce. This indicates that the universe must contain somewhere the mechanisms that can accelerate particles to such enormous energies. Recent studies have found that supernova are one such sources of cosmic rays, but they cannot explain every cosmic ray.

## Gamma-rays, neutrinos, and gravitational waves

Traditionally, cosmic ray is the term given to a high-energy charged particle, such as a nucleus or charged elementary particle, which strikes the Earth from space. Over the past few decades, however, cosmic ray research evolved to embrace broader definition of particles coming in from space, to include gamma-rays—high energy photons, and neutrinos—elusive particles most of which pass through matter unnoticed.

Such messengers bring information unavailable in ordinary cosmic rays. They are abundantly produced in high-energy astrophysical events, and travel straight through space without being affected by galactic magnetic fields to convey information of the environment they were produced. Recent technological developments have overcome many observational difficulties, and brought forth a new era of gamma-ray and neutrino astronomy.

Today, with the new kilometer-scale gravitational wave telescope currently under construction in Kamioka mine, scientists will acquire new “eyes” with which to see the universe. Gravitational waves are ripples in the space-time which propagate through space at the speed of light. Detection of gravitational waves will uncover large portion of the universe that are, with the traditional probes, unobservable; such as, mergers of black-holes and the birth of the universe.

With the addition of neutrino, gamma-ray, gravitational wave, and dark matter experiments to probe a broad range of cosmic events, Institute for Cosmic Ray Research 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.

Many cosmic ray experiments utilize arrays of telescopes and/or particle detectors that cover a large area of ground to detect air showers. Scientists use the data from air showers to reconstruct the primary cosmic ray events and to analyze their energy and chemical composition.

There are multiple types of ground-based cosmic ray telescopes currently in use. The first is called an extensive air-shower array, which measures ionizing events of charged particles passing through the detectors. Air-shower array experiments are sensitive to high-energy cosmic rays and can observe a broad area of the sky at any time.

The second type of ground-based cosmic ray detector is an air Cerenkov telescope. It detects Cerenkov radiation emitted when charged particles in an air shower travel faster than the speed of light in air (light travels slower in a medium than in vacuum). An air Cerenkov telescope is only used during the moon-less nights, but is sensitive to lower-energy cosmic rays.

The third detection method, a Water Cerenkov telescope, detects Cerenkov radiation produced in water instead of air, is also employed in ground-based air shower arrays and underground neutrino experiments.

Another method is to detect the fluorescent glow in atmosphere due to excited nitrogen molecules along the paths of electrons and positrons in the air shower. The method gives high directional resolution, and is therefore often combined with Cerenkov telescopes and air shower arrays.

Balloon experiments and satellite cosmic ray detection methods give complementary data to ground-based cosmic ray observation. By detecting primary cosmic rays from space directly, these high-altitude experiments have made many important contributions in probing the acceleration and propagation mechanism of cosmic rays. With new objectives to investigate dark matter and antimatter, they continue to be essential to our cosmic ray research.



# スーパーカミオカンデグループ Super-Kamiokande Group

## 研究目的と装置

●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1,000メートルにあり、平成8年4月1日に実験を開始しました。実験の目的は、①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、②陽子崩壊の探索による大統一理論の検証、③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であり、素粒子から宇宙まで広い分野の研究ができます。

●実験装置は純水5万トンを満たした円筒形のタンクです(図1参照)。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50センチメートルの光電子増倍管(センサーの一種)が約11,000本取り付けられています。

平成21年度からは茨城県東海村にあるJ-PARC加速器からのニュートリノを観測する、T2K実験が開始されました。平成23年6月には世界で初めてミューニュートリノが電子ニュートリノへと変化した兆候をとらえました。

## 研究の現況

### ●大気ニュートリノ観測によるニュートリノ質量の発見

宇宙から飛んできると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。上空で生まれて下向きに飛んできるとニュートリノは20から30キロメートル飛行してスーパーカミオカンデに到達します。それに対して地球の反対側で生まれてスーパーカミオカンデに到来する上向きのニュートリノは約13,000キロメートルも飛行してきます。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(図2参照)。最近では振動した後のタウニュートリノの観測に成功しています。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ニュートリノと電子との散乱により太陽ニュートリノを観測しているため、事象の方向を使って太陽ニュートリノ事象を同定できます(図3参照)。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。

### ●長基線ニュートリノ振動実験

平成11年から16年まで、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構の加速器で作られたニュートリノを、250キロメートル離れたスーパーカミオカンデで捕らえるという実験(K2K実験)がおこなわれ、ニュートリノ振動を確認しました。

平成21年度には、茨城県東海村の大強度陽子加速器(J-PARC)で生成されたニュートリノをスーパーカミオカンデで捕える、T2K実験が開始されました(図4参照)。T2K実験では、K2K実験より大強度かつエネルギーの揃ったニュートリノを用いることにより、ニュートリノ振動の精密研究を行います。平成23年6月には世界で初めてミューニュートリノが電子ニュートリノへと変化した兆候をとらえました。T2K実験では、たくさんのニュートリノ事象を捉えて、ニュートリノ振動の全容解明に迫ることが期待されます。

### ●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と、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ます。そのための開発研究がおこなわれています。また、スーパーカミオカンデをさらに大型化し、約20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研究開発も進めています。

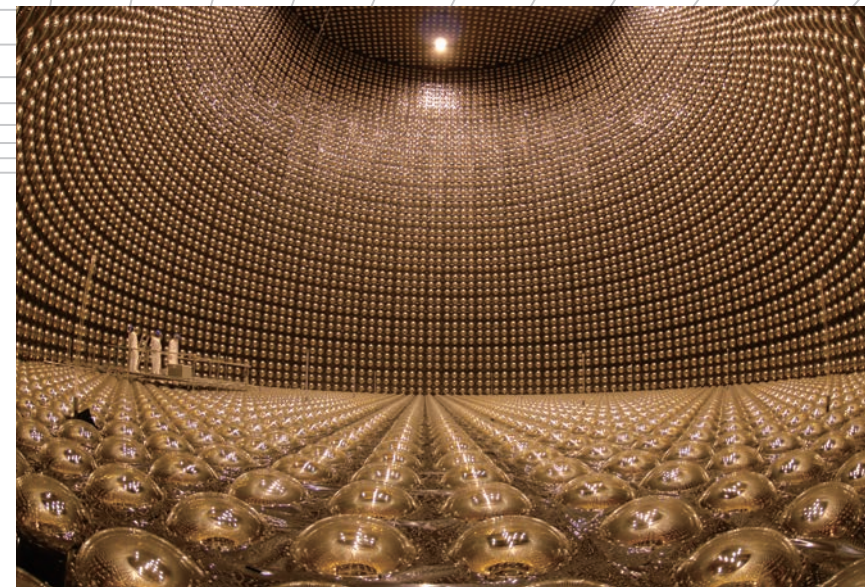


図1 スーパーカミオカンデの内部

Fig.1 Inside of the Super-Kamiokande detector

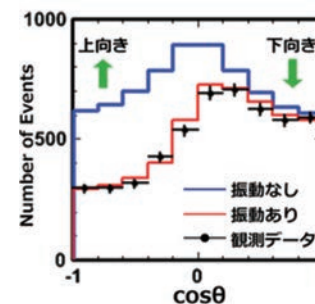


図2 大気ニュートリノの天頂角分布。上向きニュートリノの振動の証拠

Fig.2 Zenith-angle distribution of atmospheric neutrinos, showing evidence of oscillation for upward-going neutrinos.

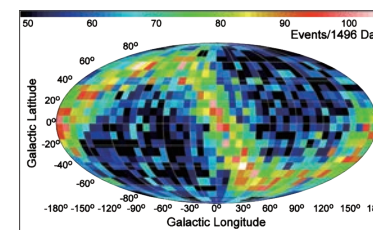


図3 ニュートリノで見た太陽の軌跡

Fig.3 Track of the Sun seen by neutrinos.



図4 東海-神岡間長基線ニュートリノ振動実験(T2K実験)

Fig.4 Tokai-Kamioka long baseline neutrino oscillation experiment (T2K).

## About Super-Kamiokande

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 20-inch 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.” Furthermore, accurate measurements of the solar neutrino flux using neutri-

no-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.

The first accelerator-based long-baseline neutrino-oscillation experiment was performed from 1999 to 2004. A neutrino beam produced by an accelerator located 250 km away at KEK was directed towards Super-Kamiokande during this time period. The K2K experiment was completed successfully and confirmed the neutrino oscillation phenomenon observed in atmospheric neutrino measurements. A new accelerator-based long-baseline neutrino oscillation experiment, the T2K experiment, which utilizes a new accelerator facility located in Tokai village (J-PARC), started in 2009. This accelerator provides a neutrino beam 50-times more intense than that of the K2K experiment. New measurements of neutrinos using this beam will make it possible to reveal hidden properties of the neutrino. For instance, the T2K experiment observed the world's first indication of muon neutrino to electron neutrino oscillation in 2011. 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 one million metric ton water Cherenkov detector, Hyper-Kamiokande, which has 20 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

## T2K Experiment

### 研究目的と装置

ニュートリノ振動現象は、大気ニュートリノや太陽ニュートリノといった天然のニュートリノ観測によって発見され、振動パラメータの測定が行われてきました。一方、大気ニュートリノで示唆されたニュートリノ振動現象を、加速器による人工ニュートリノを用いて世界で初めて検証することに成功したのが、1998年から日本で行われたK2K実験です。また本実験によって、加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験の手法が確立されました。

これまで行われた実験から、ニュートリノ振動を特徴づけるいくつかのパラメータのうち、二つのニュートリノ質量差と三つのニュートリノ混合角について有限値が得られています。最後の未知混合角であった $\theta_{13}$ が有限な値を持つ事による電子ニュートリノの出現現象の発見は、T2Kの当初の目的の一つでありましたが、初期のデータにより成功しました。また複数の原子炉ニュートリノ実験により、有限な $\theta_{13}$ の値が確認されました。この発見を受け、T2K実験はニュートリノとニュートリノの反粒子との性質の違い(CP対称性の破れ)を測定することを目指しています。

T2K実験においても一つの重要な研究課題は、混合角 $\theta_{23}$ 及び質量差 $\Delta m^2_{32}$ の精密測定です。T2K実験においては、大強度のビームを用いることでスーパーカミオカンデにおいて大量のニュートリノ事象を観測でき、これら二つのパラメータの測定精度をこれまでより一桁近く改善することが可能となります。とくに $\theta_{23}$ については、 $\sin^2 2\theta_{23}$ が1に近いことが、大気ニュートリノ観測や他の加速器を用いた長基線ニュートリノ実験からわかっていますが、もしこの値が正確に1であるならば、これまで知られていない対称性が背後に潜んでいる可能性もあり、大変興味深いといえます。

T2K実験では東海村のJ-PARCに設置されている強力な陽子加速器を用いて高輝度のニュートリノビームを生成、実験に用いています。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



J-PARC原子核素粒子実験施設

写真提供：独立行政法人 日本原子力研究開発機構

J-PARC nuclear and particle physics facility

Image Credit: Japan Atomic Energy Agency

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。

### 研究の現況

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なりました。この発見により、将来の粒子・反粒子対称性の破れの実験手法が確立された事と共に、世界に先駆けてその研究が始まったことが示されました。今後も観測ニュートリノ数を増やし、また反ニュートリノを使った測定も実施して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。

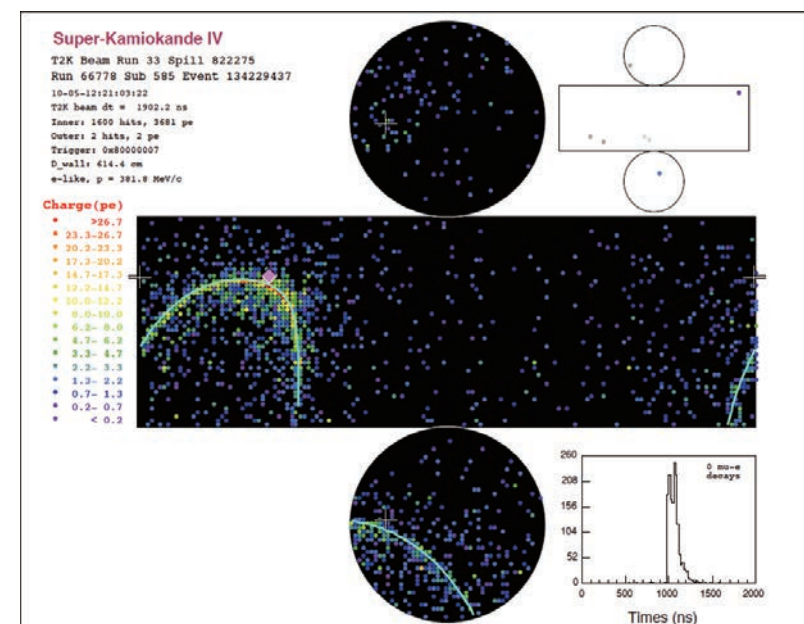


図1 スーパーカミオカンデで観測された、電子ニュートリノ反応候補事象の一つ。円筒形をしたスーパーカミオカンデの展開図で、内壁に配置された光電子増倍管の内、光を捉えたものにとらえた光の強度に応じて色をつけて表示している。水と電子型ニュートリノ反応によって発生した電子が引き起こす電子・陽電子シャワーが発したチェレンコフ光がリング状に捉えられている。

Fig.1 An electron neutrino event candidate observed at Super-Kamiokande. A diffusing ring produced by electron-positron shower is observed.

## T2K Experiment

The K2K experiment established the method of the accelerator-based long baseline neutrino oscillation experiment and successfully confirmed the neutrino oscillation phenomena discovered by natural cosmic neutrinos from earth's atmosphere and the sun. Until now, several experiments have measured all 3 neutrino mixing angles and 2 mass differences using accelerator, atmospheric, solar and reactor neutrinos. The one of original T2K's goals has been already achieved by its initial data, that is to establish electron neutrino appearance phenomena in muon neutrino beam. This result is interpreted by nonzero  $\theta_{13}$ —last unknown neutrino mixing angle—which was also clearly demonstrated by reactor neutrino experiments in 2012. The revised T2K's goal is to explore CP violation in the lepton sector that became theoretically and technically feasible by the established electron neutrino appearance measurement in T2K.

Another important purpose of this experiment is precise measurement of  $\theta_{23}$  and  $\Delta m^2_{32}$  parameters. By high statistical neutrino observation, the precisions of these parameters are expected to be almost one order of magnitude better than before. So far,  $\sin^2 2\theta_{23}$  is consistent with maximum (=1) from the SK, K2K and the MINOS experiments. If  $\sin^2 2\theta_{23}$  is exactly unity, it may suggest an underlying new symme-

try.

The intense neutrino beam is produced by using a new 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 initial peak position of the neutrino beam energy is adjusted to  $\sim 650\text{MeV}$  by setting the off-axis angle to  $2.5^\circ$  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 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 (Figure1). The indication of this electron neutrino appearance were 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. This discovery means that an experimental test of CP violation is actually feasible and that the test is already started. By accumulating anti-neutrino data as well as more neutrino data, T2K aims to find out all unknown quantities of the neutrino world.

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 (Figure1). The indication of this electron neutrino appearance were 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. This discovery means that an experimental test of CP violation is actually feasible and that the test is already started. By accumulating anti-neutrino data as well as more neutrino data, T2K aims to find out all unknown quantities of the neutrino world.



# XMASSグループ

## XMASS Group

### 研究目的と装置

#### ●XMASSグループとその名前

XMASSグループは、ダークマター、低エネルギー太陽ニュートリノ、そしてニュートリノの出ない2重ベータ崩壊の検出を目的として研究を遂行しています。XMASSの名前の由来は、これら3つの目標の共通の省略形です。希ガス液体シンチレータである液体キセノンを使用し、それを神岡鉱山の地下1000メートルに設置して観測する多目的実験です。

#### ●ダークマターとは？

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、宇宙のエネルギーや物質の中に、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。これらの特徴を持つことから、Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) と呼ばれています。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。

#### ●大型極低バックグラウンド検出器

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) 液体、気体、固体の各相が利用できるため放射性的バックグラウンドを極端に少なくできる、(4) 原子番号が大きいため、外部の放射線を外縁部で吸収できるという特徴があります。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。

### 研究の現況

●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。図1はそのイメージ図で835kgの液体キセノンを約642本の光電子増倍管で球状に囲っています。

●XMASSグループでは、この実験に特化した「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(図2)。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。

### これまでの物理成果

XMASS検出器が大型で極低バックグラウンドである利点を活かし、様々なシナリオの暗黒物質探索を行い成果を上げてきました。

- (1) XMASS-Iは、ダークマター直接探索実験の中では最も大質量の検出器ですが、エネルギー閾値が0.3keVと非常に低いため、まずこの特色を生かした解析を行いました。6.7日分のデータによって、ダークマターの信号を捉えたと主張するDAMA/LIBRA 実験の領域を一部排除することになりました(図3)。
- (2) 弾性散乱に限らず、非弾性散乱による探索を行いました。ダークマターによって検出器中のキセノン原子核( $^{129}\text{Xe}$ )が励起され、その際に出る40keVガンマ線を利用して検出します。165.9日のデータを用いて探索が行われ、検出器835kgのうち中心部にある41kgのキセノン(直径30cm)と反応したデータを解析し、非弾性散乱による探索でスピンの依存するダークマターと核子の断面積に対し、初めて制限を与えました(図4)。
- (3) 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(2)の解析に用いた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。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)。この結果は高く評価され、Physical Review LetterのEditors' Suggestionにも選ばれました。(2)

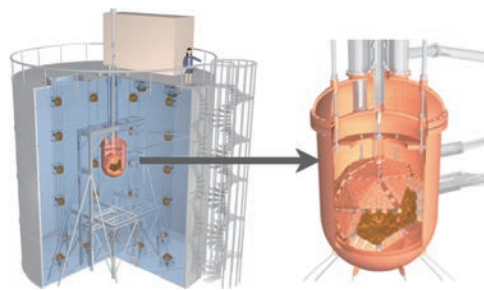


図1 800kg検出器とその水放射線シールドの概観図。直径10m・高さ10mの水タンク側面に20インチ PMTを配置し、中央には液体キセノン検出器が設置されています。

Fig.1 The schematic view of the detector and the water tank. The size of the water tank is  $\phi 10\text{m} \times 10\text{m}$ . The 835 kg LXe detector is immersed in this water tank.

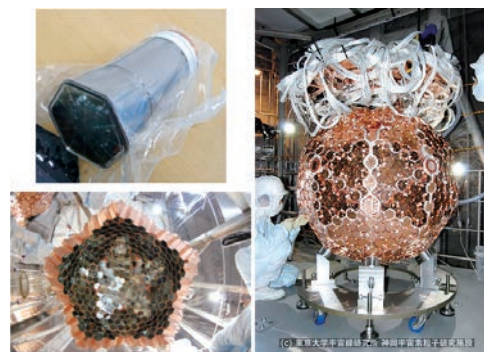


図2 XMASS実験用「極低放射能」光電子増倍管(Hamamatsu R10789)の据付作業の様子。642本の光電子増倍管の取り付け作業が完了。(右写真)

Fig.2 The "ultra low radioactivity" PMT (Hamamatsu R10789) was shown here (Up-left). Assembly of 642 PMTs was completed in 2010. (Right)

と(3)の結果は、XMASS-Iのこのエネルギー領域で世界一バックグラウンドが低いことを証明した、大変重要な成果となりました。

### XMASS実験の将来の展望

XMASS実験ではバックグラウンドを減らす改造をした後、2013年11月から観測を再び開始しています。今回の観測で期待される物理結果の一つにダークマター信号の季節変動による検証があり、大きな検出器で高統計な探索を進め、世界で最も感度のある探索が期待されます。

また、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」の構想も提案しています。検出器の質量は、現在の約5倍にあたる液体キセノン5トンと大型化し、さらに今までの経験を生かして光電子増倍管もより低バックグラウンドになるだけでなく、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)。

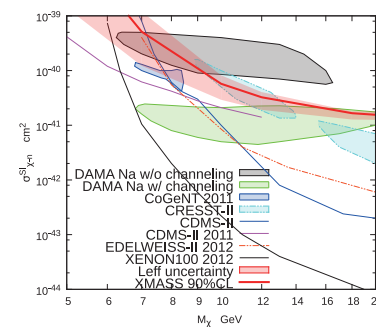


図3 スピンに依存しない場合のWIMP-核子の乱断面積の上限値曲線。バンドで示す領域は不定性によるもの。

Fig.3 Spin-independent elastic WIMP-nucleon cross section as a function of WIMP mass. The effect of uncertainty on the limit is shown in the band.

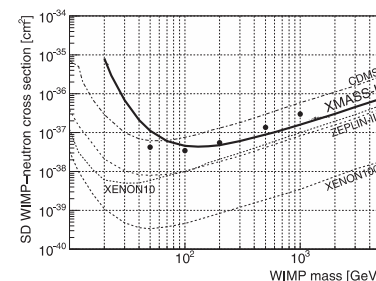


図4 スピンに依存するWIMP-核子断面積。 $^{129}\text{Xe}$ 原子核の非弾性散乱を用いた制限は、原子核の2つのモデルに対して実線と点線で示す。その他の点線は弾性散乱による探索によるもので、非弾性散乱を用いた探索ではXMASSによって、初めて結果が与えられた。

Fig.4 The thick line and the dots represent XMASS limits with two different nuclear models of  $^{129}\text{Xe}$  by inelastic scattering search. The other lines represent experimental constraints on spin-dependent WIMP nucleon cross sections extracted from elastic scattering data. Our own limit is the first derived exclusively from data on inelastic scattering.

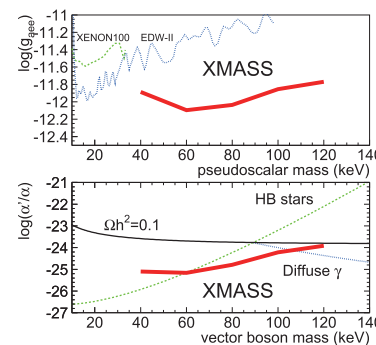


図5 ボゾン型Super-WIMP(上: スピン0の擬スカラー粒子、下: スピン1のベクトル粒子)と電子の結合定数(縦軸)とその質量(横軸)。実線は、宇宙初期に自然に生成されたダークマターが現在の残存量をうまく説明できる結合定数を示す。太線は本実験の結果を示し、他は天体物理に基づいた議論による制限を示す。XENON100、EDW-IIは、他のグループの実験結果を示す。

Fig.5 Limits on coupling constants for electrons and pseudoscalar bosons (top) and electrons and vector bosons (bottom) at 90% C.L. (red line). (Top) XENON100 and EDW-II correspond to constraints obtained by other experiments. (Bottom) 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.



図6 次世代XMASS検出器用に開発中の3インチ光電子増倍管。受光面をドーム型にすることで、検出器の感度を大幅にあげることが期待される。

Fig.6 Newly developed 3inch PMT for next generation XMASS detector. It is expected to improve the sensitivity for dark matter search substantially by using 'dorm' window shape.

### XMASS Experiment

The goals for XMASS project are to detect low energy solar neutrino, dark matter particle, and neutrino-less double beta decay. XMASS derives from

- Xenon detector for Weakly Interacting MASSive Particles (direct dark matter search)
- Xenon MASSive detector for solar neutrino ( $\text{pp}/^7\text{Be}$  solar neutrino)
- Xenon neutrino MASS detector (neutrinoless double beta decay)

This project aims to achieve multi purposes of physics experiment by using liquid xenon (LXe) detectors in the deep underground laboratory at Kamioka mine.

Current evidence indicates that 27% of the mass energy density of the Universe is composed of cold, non-baryonic dark matter, which has thus made up 5-6 times more than baryonic matter. Weakly interacting massive particles (WIMPs) are an attractive candidate, and 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, 3) easy purification of the radioactivity to reduce the internal background by using several methods in the different phases of xenon, and 4) large atomic number to shield radiations from outside of the detector. The first advantage is especially important for the direct dark matter search where we need to observe very small energy deposited by dark matter particles.

In 2007, the first phase of this program started to build 835 kg of LXe detector for the direct dark matter search. Figure 1 shows the schematic view of the detector and the water tank for the radiation shield. In this detector, XMASS-I, the LXe target is surrounded by about 642 "ultra-low-radioactivity" PMTs developed for this experiment with Hamamatsu (Fig. 2). Those PMTs are used to detect the vacuum ultra violet light from the LXe scintillation. To explore dark matter particles, the experiment require sensitivity to low energies ( $<10$  keV) and very low event rates ( $<0.1$  event/kg/day). This requires innovations in the detector design, and considerable attention to their radioactive backgrounds.

Based on the data from XMASS-I, we obtained following results:

- (1) We performed the light mass WIMP analysis by taking the advantage of low energy threshold of 0.3 keVee. 6.7 days of data was analyzed to compute the spin-independent elastic WIMP-nucleon cross section and the result is shown in Fig. 3. The effect of uncertainty on the limit is shown in the band.
- (2) An inelastic channel was explored to search for dark matter particles. By selecting events only at the central part of the detector, a search for dark matter via inelastic scattering of  $^{129}\text{Xe}$  by detecting additional 40 keV gamma-rays was performed. We observed no significant excess in 165.9 live days' data in a spherical fiducial volume of 30cm diameter (41kg of LXe) and derived an upper limit for the spin-dependent WIMP-neutron cross section of  $1.1 \times 10^{-37} \text{cm}^2$  or  $4.2 \times 10^{-38} \text{cm}^2$  (50GeV WIMP), respectively, using the different model of form factors of  $^{129}\text{Xe}$  nuclei in Figure 4.

- (3) 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. Furthermore, there is so far no evidence of SUSY particles at the LHC, and therefore, it is important to investigate various types of dark matter candidates. These facts strengthen an interest to consider lighter and more weakly interacting particles such as super-WIMPs, a warm dark matter candidate. We searched for signatures of bosonic super-WIMPs with same data set as the inelastic search above. For vector bosons, the present experimental limit excludes the possibility that vector super-WIMPs constitute all the dark matter (Fig. 5). This result was published in Physical Review Letters, selected as Editors' Suggestion, and demonstrated our world best background in this energy range.

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 5 ton of liquid xenon and it will deeply explore the SUSY parameter region.



# チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ

## Cherenkov Cosmic Gamma Ray Group

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。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、宇宙における星・銀河の形成史の研究し、さらには宇宙を満たす暗黒物質の探索、究極の物理理論である量子重力理論の検証を行う。

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)によって行われる。その歴史は1989年のWhipple 望遠鏡によるカニ星雲からのガンマ線検出に始まるが、その後の技術的発展にともない、現在では、新しい世代の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。

これまでに確立された技術と経験をもとに、CTA は極めて高い感度と性能をもつようにデザインされている。現在、日米欧の国際協力で、大規模チェレンコフ望遠鏡アレイ Cerenkov Telescope Array (CTA)計画の準備研究を進めている。CTAは、大中小数十のチェレンコフ望遠鏡群の設置により、感度を一桁向上( $1\text{mCrab} \sim 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 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、1,000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。

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 $10^{20}\text{eV}$ 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。以上のように、CTAは高いサイエンスポテンシャル持っており、かつ豊富な経験、実績に裏打ちされた技術により、その実現へ向けて高い Feasibility をもちあわせる。

日本グループは、アレイの中心に配置される大口径チェレンコフ望遠鏡1号基の建設をすすめており、2016年暮れには1号基がカナリア諸島ラパルマに設置され、ファーストライトを迎える。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、 $400\text{m}^2$ 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、この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。

大口径望遠鏡では、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要求される。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。構造はカーボンファイバーによるスペースフレーム構造であり、軽量でかつ剛性を高めるデザインとなっている。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。

チェレンコフ宇宙ガンマ線グループは、カナリー諸島ラパルにある MAGIC望遠鏡により、フェルミガンマ線衛星を使いサイエンスを進めつつ、次世代の国際ガンマ線

天文台CTA建設へ向けて大口径望遠鏡1号基の建設を進めている。この大口径望遠鏡1号基は、カナリー諸島ラパルマのロケムチャチョス天文台で、MAGIC望遠鏡と並んで建設される。



図1 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。チェレンコフ宇宙ガンマ線グループは、カナリー諸島ラパルにあるMAGICとフェルミガンマ線衛星による研究をおこなっている。

Fig.1 The current generation VHE gamma ray observatories, the MAGIC, VERITAS, and H.E.S.S. telescopes. The Cherenkov Cosmic Gamma Ray group works in gamma ray astronomy with MAGIC on La Palma, Canary Islands, and Fermi Gamma Ray Satellite.

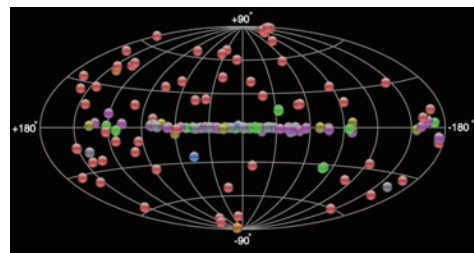


図2 超高エネルギーガンマ線源(>100GeV)を銀河座標系に示す。200に近い銀河内、銀河系外のガンマ線源が H.E.S.S., MAGIC, VERITAS により発見されている。

Fig.2 Very High Energy Gamma Ray Sky (>100GeV). About 200 Galactic and extragalactic sources have been discovered by H.E.S.S., MAGIC and VERITAS. glass on both sides. A surface protection coat consisting of the materials SiO<sub>2</sub> and HfO<sub>2</sub> will be applied to enhance the reflectivity and to elongate the lifetime.

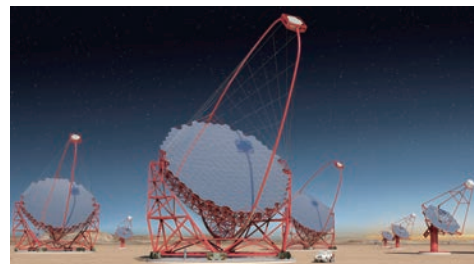


図3 CTA 超高エネルギーガンマ線天文台の想像図。CTA は、大口径(23m)、中口径(12m)、小口径(4m)の三種の望遠鏡から構成され、20GeV から100TeVにわたる広いエネルギー領域で超高エネルギーガンマ線を観測する。

Fig.3 Artist view of the CTA observatory. CTA consists of three types of telescopes, Large Size Telescopes (23m diameter), Mid Size Telescopes (12m) and Small Size Telescopes (4m), and covers the broad energy band from 20GeV to 100TeV.

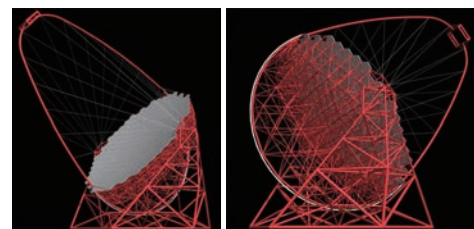


図4 大口径望遠鏡(23m口径)。日本グループは高分解能イメージングカメラ、超高速読み出し回路、高精度分割鏡のデザイン、光学補償装置の量産をすすめている。

Fig.4 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.

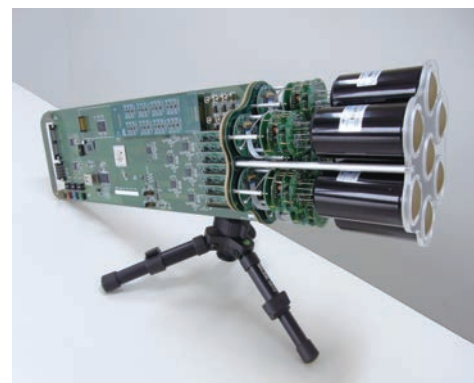


図5 日本グループにより設計、製作された大口径望遠鏡用クラスターモジュール。7本の高量子効率光電子増倍管、高圧回路、プリアンプ、スロー制御回路、超高速DRS4 波形読み出し回路、トリガーからなる。265クラスターモジュールにより大口径望遠鏡のカメラが構成される。

Fig.5 Camera cluster for the Large Size Telescope (LST) developed by CTA-Japan. This cluster consists of seven high quantum efficiency photomultipliers (R1192Q-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.



図6 日本グループ、三光精衛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SiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>の多層保護膜により長寿命、高反射率を実現する。

Fig.6 Prototype of the high precision segmented mirror for the Large Size Telescope (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 SiO<sub>2</sub> and HfO<sub>2</sub> will be applied to enhance the reflectivity and to elongate the lifetime.

## Cherenkov Cosmic Gamma Ray Group

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 ( $1\text{mCrab} \sim 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ), 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 2016, the first LST will make the first light at La Palma in Canaries. 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  $400\text{m}^2$  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 mirrors and active mirror control system.

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/20seconds) for promptly observing GRBs.

The Cherenkov Cosmic Gamma Ray group also makes significant scientific achievements in High Energy Gamma Ray Astronomy with MAGIC on La Palma, Canary Islands, and Fermi gamma ray satellite. The first LST will be constructed at Observatorio del Roque de Los Muchachos, La Palma in Canary Islands, at the same location of the MAGIC telescopes.



# TAグループ Telescope Array Group

## 研究目的と装置

●宇宙線は、宇宙から地球に降り注ぐ高エネルギーの放射線で、主に陽子や原子核などの電荷を持った粒子です。宇宙線は宇宙のあらゆる方向から等しく地球に降り注いでいます。また、宇宙線はエネルギーが10倍になると、それ以上のエネルギーを持つ宇宙線の到来数が100分の1になるという割合で急速に減少します。特に興味深い最高エネルギー領域( $10^{20}$ 電子ボルト、1垓電子ボルト、10000京電子ボルト)では、100平方キロメートルの地表に1年に1例程度しか観測されない極めて稀な現象になります。

●宇宙から地球に到来した極高エネルギーの宇宙線は、大気中の原子核と衝突して多数の二次粒子を生み、それがさらに衝突を繰り返して、最後には1,000億個もの低エネルギー粒子となって地上に降り注ぎます(これを空気シャワーと呼びます)。Telescope Array (TA) 実験では、このような空気シャワーを捕らえて、エネルギーと到来方向を測定し、元の宇宙線が宇宙の何処でどのように発生し、宇宙空間をどのように伝搬して地球に至ったのかを探っています。

●TAが観測対象としている宇宙線のエネルギーは、地球上の人工粒子加速器が生み出すビームの最大エネルギーの1千万倍に相当します。最高エネルギーの宇宙線は、銀河系外の遠い宇宙で発生したガンマ線バーストなどの天体爆発、あるいは回転する巨大なブラックホールを持つ活動銀河核 (AGN) から吹き出すジェット等から生じると考えられています。発生源は未だに特定されていません。

●極高エネルギー宇宙線が伝搬してくる宇宙空間には、ビッグバンの名残である宇宙背景放射が満ちており、陽子宇宙線のエネルギーが1垓電子ボルト程度になると、宇宙背景放射との衝突が急激に増え、衝突で発生するパイ中間子に20%近いエネルギーを持ち去られます。このために、宇宙線の到来数は1垓電子ボルトを超えると急速に減少することが、理論的に予想されています。これを提唱者3人の頭文字を取ってGZK効果と呼びます。このGZK効果を観測して、特殊相対性理論を極高エネルギーで確かめることもTAの重要な研究課題の1つです。

●最高エネルギー宇宙線は、銀河系の持つ磁場でごくわずか、数度のレベルで曲げられる

ことが予想されています。極高エネルギー宇宙線の発生源天体が同定されれば、あるいは到来方向の非等方性が確認されれば、偏向の大きさを測定することによって、伝搬の過程で宇宙線が受けた磁場の強さを確認することができます。銀河系内外の広大な宇宙空間の磁場の分布等については未だ良く分かっていないため、貴重な情報が得られることになります。

## 研究の現況

●平成20年春、TA装置による観測が始まりました。TAは約700平方キロメートル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からなり(図1)、米国ユタ州の砂漠地帯(北緯39度、西経113度、標高は約1400メートル)で、日米韓露とベルギーの5カ国の研究者130人が共同で観測を行っています。

●地表検出器アレイとしては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)を、1.2キロメートル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。シャワー粒子の正確な到来時刻は、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ています。大規模な観測装置ですが、自然環境に負荷を掛けない自立型検出器となっています(図2左)。

●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2右)。地表での粒子の測定に、望遠鏡による大気中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、 $10^{15.6}$ 電子ボルトから $10^{18}$ 電子ボルト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。

●エネルギースペクトルについて：平成26年5月までの6年間に、地表アレイでは2560例の $10^{19}$ 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望遠鏡またはTA地表検出器によって取得された $10^{15.6}$ 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(スペクトルという用語の解説はチベットグループのページを参照)を測定しました(図3)。 $10^{19.74}$ 電子ボルトに折れ曲がりが見られ、過去にAGASAが観測した極高エネルギー宇宙線の超過数は再確認されませんでした。また、 $10^{18.70}$ 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は矛盾がありません。さらに、TALE望遠鏡で、 $10^{16.3}$ 電子ボルトと $10^{17.3}$ 電子ボルト付近にも折れ曲がりが見られました。

●粒子種について：1つの望遠鏡と地表検出器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 $X_{\max}$ のエネルギー依存性を測定しました(図4)。 $10^{18.2}$ 電子ボルト(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。

●異方性について：平成26年5月までの6年間に地表検出器で観測した $10^{19.76}$ 電子ボルト以上の最高エネルギー宇宙線87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。

●将来計画について：地表検出器を500台追加して、2.1キロメートル間隔で設置し、TAの地表検出器アレイが占める面積を4倍(約3000平方キロメートル)に拡張します(TA×4)。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。この建設が今年度から始まります。また、TAサイトにおいて電波による宇宙線観測の試験や新しい検出器のR&Dも行われています。さらに、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をTAの望遠鏡サイトで行っています。また、これまでTALE実験に必要な約100台の地表検出器のうち、部分的に設置し、稼働しています。残りのTALE地表検出器の建設も今年度から始まります。

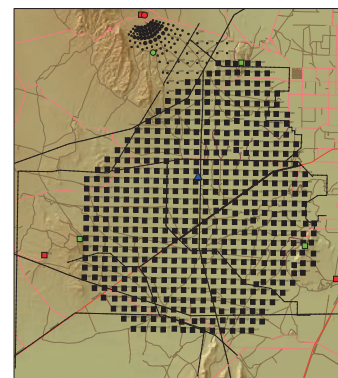


図1 TAの装置を四角形で示し、その北西部にあるTALEを丸で示す。黒は地表検出器を、赤は大気蛍光望遠鏡を示す。緑は通信塔を、青い三角形は中央レーザー装置を示す。

Fig.1 The 507 TA counters are indicated by black boxes and TALE counters are indicated by black circles. Three TA telescope stations are marked by red boxes and one TALE telescope station is marked by a red circle. The communication towers are indicated in green and the Central Laser Facility is marked by a blue triangle.

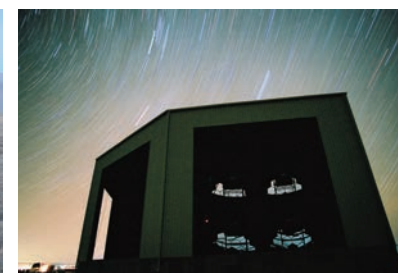


図2 (左図) 砂漠に基盤目状に設置したTAの地表検出器。後方に更に4台が見える。(右図) TA大気蛍光望遠鏡。光電子増倍管によるカメラを用いて空気シャワーからの紫外発光を光速・高感度で撮影する。

Fig.2 (Left) One of the TA ground array detectors deployed in the field. Four more are seen behind. (Right) TA air fluorescence telescopes.

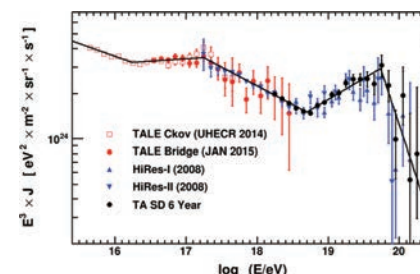


図3 TAの地表検出器(●)とTALEの大気蛍光望遠鏡(●□)で測定した超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトルおよびHiRes-I(▲)、HiRes-II(▼)のエネルギースペクトル。

Fig.3 The energy spectra of UHECR measured by TA surface detector (●) and TALE fluorescence detector (●□) together with those measured by HiRes-I (▲) and HiRes-II (▼).

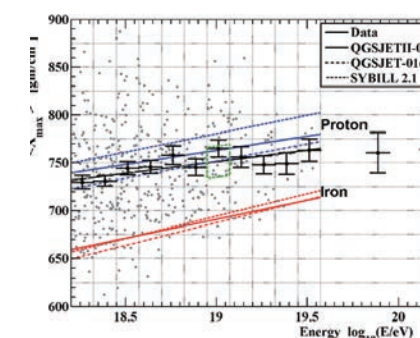


図4 TAで測定した超高エネルギー宇宙線の平均 $X_{\max}$ とエネルギーの関係(●)。青線が陽子モデルで、赤線が鉄モデル。

Fig.4 The average  $X_{\max}$  vs. energy of TA cosmic ray events (●). The blue and red lines denote proton and iron models, respectively.

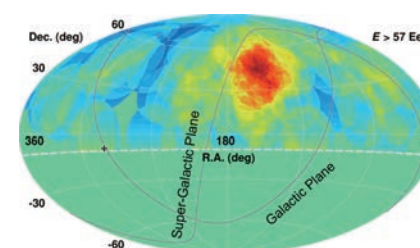


図5 TAで観測した $10^{19.76}$ 電子ボルト以上の宇宙線の到来方向を半径 $20^\circ$ の円でサンプリングした場合の統計的な有意度をプロットした天球マップ(赤道座標表示)。赤線148.4°、赤緯44.5°を中心としたホットスポットが見られ、その最大有意度は5.55σである。一様到来方向分布の場合に、この最大有意度を偶然超える確率は $3.2 \times 10^{-5}$  (4.0σ)である。

Fig.5 Hammer projection of the statistical significance of TA cosmic ray events with  $E > 10^{19.76}$  eV with  $20^\circ$ -radius circle sampling in the equatorial coordinates. The maximum excess appears as a hotspot centered at right ascension of  $148.4^\circ$  and declination of  $44.5^\circ$  with a statistical significance of  $5.55\sigma$ . The chance probability of obtaining this maximum significance for isotropic distribution is  $3.2 \times 10^{-5}$  (4.0σ).

## The Telescope Array

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 3 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  $10^{15.6}$  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 2014, 2560 cosmic ray events above  $10^{19}$  electron volts (eV) have been collected by the TA air shower array. The TA energy spectrum is consistent with highest-energy suppression predicted by Greisen, Zatsepin and Kuzmin (GZK) as shown in Fig.3. TA confirmed a break at  $10^{18.74}$  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  $X_{\max}$  vs energy plot (Fig.4). Using 87 cosmic-ray events with energy  $E > 10^{19.76}$  eV, TA observed a cluster of events (hotspot) with a statistical significance of  $5.55\sigma$ , centered at right ascension of  $148.4^\circ$  and declination of  $44.5^\circ$  (Fig.5). The probability of such a hotspot appearing by chance in an isotropic cosmic-ray sky was  $3.2 \times 10^{-5}$  (4.0σ).

The TA extension (TA×4), 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 will start in 2015.



# チベットグループ The Tibet AS- $\gamma$ Collaboration

## 研究目的と装置

●1912年にオーストリアの物理学者ヘスが、宇宙から飛来する放射線である宇宙線(原子核宇宙線)を発見して約100年が経過しました。しかし、未だに高エネルギーの宇宙線が宇宙のどの天体から飛来しているのか、そしてどのようにして人工の粒子加速器で生み出すことが出来るエネルギーを遙かに越えるエネルギーにまで加速されているのか解明されていません。宇宙から地球に飛来する宇宙線を一次宇宙線(原子核やガンマ線が主)と呼びます。それらは、大気の大気素や酸素の原子核と反応を起こし、二次宇宙線を生み出します。それを構成する粒子はねずみ算的に増大し、直径数百メートルの大きさに広がる空気シャワー(電子、陽電子、ガンマ線、ミューオン、ニュートリノ等からなる)を形成します。この空気シャワーを観測することにより、親の一次宇宙線の飛来方向やエネルギー、原子核の種類やガンマ線との弁別を行うことができます。

●我々は、中国チベット自治区の羊八井高原(ヤンパチン高原、標高4,300メートル)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、太陽フレアからの宇宙線は1億電子ボルト程度のエネルギーなので比較すると非常に高いエネルギー)宇宙線(原子核とガンマ線)の観測を行っています。研究の目的は、

- ①高エネルギーガンマ線を放射している天体の探索および宇宙線の加速起源の同定
- ②超高エネルギー一次宇宙線の化学組成(どの原子核なのか)の解明
- ③超高エネルギー一次宇宙線のエネルギースペクトルを計測することによる宇宙線加速機構の解明
- ④高エネルギー宇宙線による太陽惑星間に広がる磁場構造の研究
- ⑤高エネルギー宇宙線の飛来方向に関する特異性(異方性)の研究

等です(注：飛来量が、どのエネルギー範囲にどのように分布しているのかを表すグラフを、エネルギースペクトルと呼ぶ)。

●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を使用します。具体的には、面積0.5平方メートルのプラスチックシンチレーターを、7.5メートル間隔でほぼ基盤目状に並べ、37,000平方メートル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、これだけ低いエネルギーの空気シャワーを検出出来るのは世界で唯一本装置のみです(図1)。

●空気シャワー観測装置の中心部には、面積が80平方メートルの、鉛とプラスチックシンチレーター製パースト検出器とが設置されています。この装置を空気シャワー装置と連動させることにより、「Knee(ニー)エネルギー領域」と呼ばれる1000兆~1京電子ボルトの領域の一次宇宙線中の陽子及びヘリウム成分が観測出来ます。この領域の宇宙線には、未だ多くの謎が残っており、本装置による解明が期待されています。

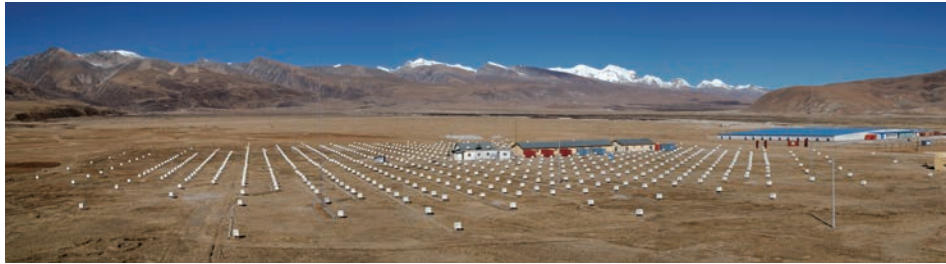


図1 チベット空気シャワー観測装置(標高4,300m、羊八井宇宙線観測所、チベット、中国)

Fig.1 Tibet air shower array, located 4,300m above sea level, Yangbajing, Tibet, China.

## 研究の現状

### ●カニ星雲からの数兆電子ボルト(数TeV)ガンマ線の検出

本空気シャワー観測装置で、カニ星雲から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、平成9年春から活発にフレアを起こした活動銀河核Markarian501、および平成12~13年に活発なフレアを起こしたMarkarian421からも1兆電子ボルト(TeV)以上のガンマ線を検出しました。空気シャワー観測装置は、天候等の気象条件に左右されずに大きな視野で天空を常時監視出来るため、高エネルギーガンマ線を放射する活動天体を観測するのに大変適しています。

### ●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の観測

空気シャワー観測装置により、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を大変良い精度で観測しました(図3)。Kneeエネルギー領域は、超新星爆発の衝撃波による粒子加速の限界や、銀河からの宇宙線の漏れ出し問題を解く重要な鍵を握っている領域です。通常、宇宙線は銀河内の磁場に捕捉されており、他の銀河へは流出しません。ところが、非常に高エネルギーの宇宙線になると銀河磁場を振り切って流出してしまいます。これを銀河からの宇宙線の漏れ出しと呼びます。一方空気シャワー観測装置とその中心に置かれたパースト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。図4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くことが見て取れます。

### ●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います。1755年から始まる活動の山を太陽サイクル1として、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5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

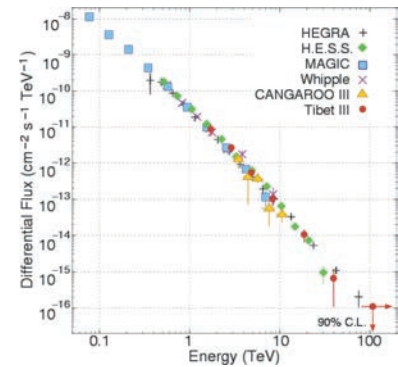


図2 カニ星雲からのTeV領域ガンマ線エネルギースペクトル

Fig.2 Energy spectrum of TeV gamma rays from the Crab Nebula.

23をほぼ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。現在このような観測が出来るのは、世界でも唯一本装置のみです。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

ほぼ等方的な飛来量分布に従う高エネルギー銀河宇宙線の異方性をチベット実験は世界最高の統計精度で観測できます。図6に示すように、太陽を中心とする地球の公転運動に起因する正弦波型の微小な(1万分の1程度)異方性が期待され、それが太陽時(1日を24時間とした)を基準とした宇宙線飛来量の日変化として期待通りに観測することに成功しました。さらに、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飛来量の恒星時(恒星は同じ方角に見える時刻が1日当たり約4分ずつ早くなるため1恒星日≒23時間56分を基準とした)日変化の異方性を高精度で2次元的に測定しました。(図7参照)。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、シグナス領域(白鳥座方向)に新しい銀河宇宙線異方性を発見しました。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。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す。(図8d、e)参照)。そしてそれら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。

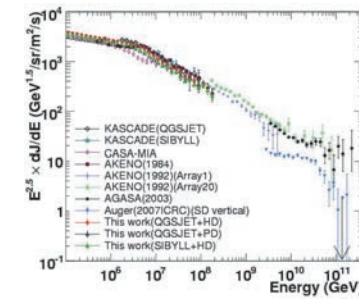


図3 Kneeエネルギー領域以上の宇宙線全粒子エネルギースペクトル

Fig.3 All-particle energy spectrum of primary cosmic rays above "Knee" energy region.

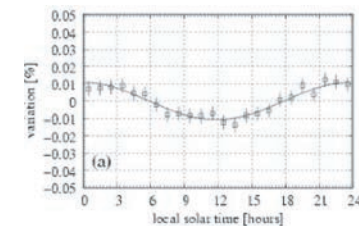


図6 太陽時宇宙線異方性(コンプトンゲッティング効果)の微分値(6-40 TeVの一次宇宙線データ)

Fig.6 Differential variation of primary cosmic ray anisotropy at solar time frame (Compton-Getting effect) between 6-40 TeV.

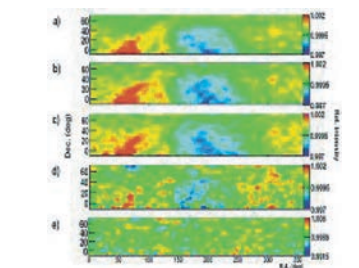


図7 恒星時宇宙線異方性  
上から4, 6.2, 12, 50, 300TeV

Fig.7 Cosmic ray anisotropy at sidereal time frame for 4, 6.2, 12, 50, 300TeV from above.

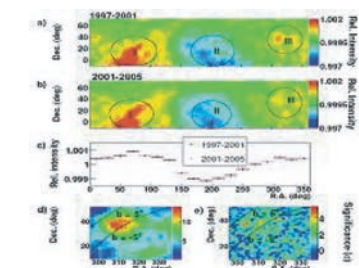


図8 シグナス領域(Ⅲ)のガンマ線点源探索 e)の赤いホットスポットに注目

Fig.8 Search for gamma-ray point sources in the Cygnus region (III). Watch out the hot red spots in e), please.

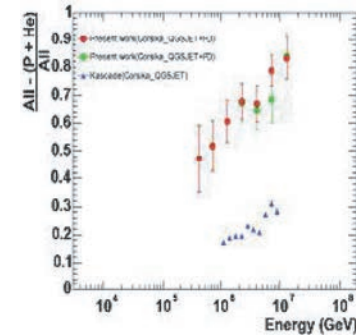


図4 Kneeエネルギー領域一次宇宙線でヘリウムより重い原子核成分の割合のエネルギー依存性

Fig.4 Energy dependence of fraction of nuclei heavier than helium in primary cosmic rays around "Knee" energy region.

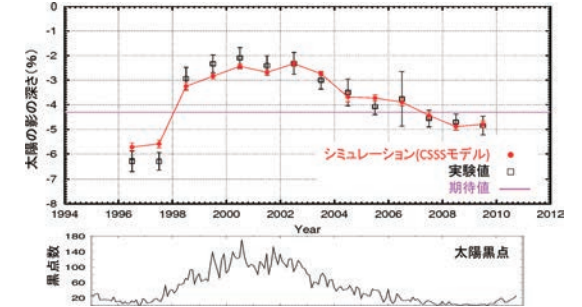


図5 上図は太陽黒点数の年変化、下図は観測された宇宙線中の太陽の影の深さに関するデータとシミュレーションの比較

Fig.5 Lower panel: yearly variation of sun spot numbers. Upper panel: Comparison of Sunshadow depth in cosmic rays between MC simulation and the observed data

## Tibet AS $\gamma$

Tibet air array (Tibet-III) is located at Yangbajing (4,300m a.s.l), Tibet in China.

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<sup>2</sup> 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. The angular resolution of the air-shower array is estimated by the Moon's shadow in cosmic rays to be less than 1 degree, which is the world best performance. At the center of Tibet-III, set up are 80 m burst detectors composed of lead plates and plastic scintillation detectors. We observe the energy spectra of proton and helium components in primary cosmic rays in the "knee" (10<sup>15</sup> - 10<sup>16</sup> eV) energy region by the hybrid experiment with the burst detectors and Tibet-III.

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<sup>15</sup> - 10<sup>16</sup> 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 burst 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 exclusively 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 the highest statistics in the world. We clearly observed a tiny (on the order of 1 in 10 thousand) anisotropy apparently caused by the terrestrial orbital motion around the Sun at the solar time frame. We also 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. 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. On the other hand, 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.



# 「高エネルギー天体」グループ High Energy Astrophysics Group

## 研究目的と現況

●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100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。

●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。

●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上がり、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。

●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(電磁波・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。

●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)に注目した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・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。



図1 高エネルギー粒子加速源として知られるかに星雲像(国立天文台提供)。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ます。

Fig.1 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.

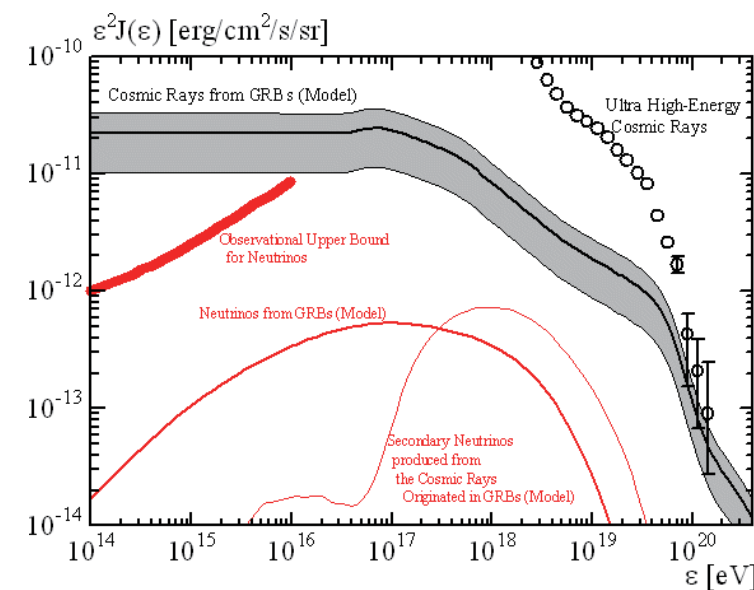


図2 ガンマ線バーストから放出される最高エネルギー宇宙線とニュートリノの見積りを示します。宇宙線の一部を説明しつつ、ニュートリノの観測的制限も避けられています。

Fig.2 Our model for cosmic-ray and neutrino flux from gamma-ray bursts (GRBs). GRBs can partially contribute to the sources of ultra high-energy cosmic-rays, and our model prediction for neutrinos is consistent with the observational upper limit.

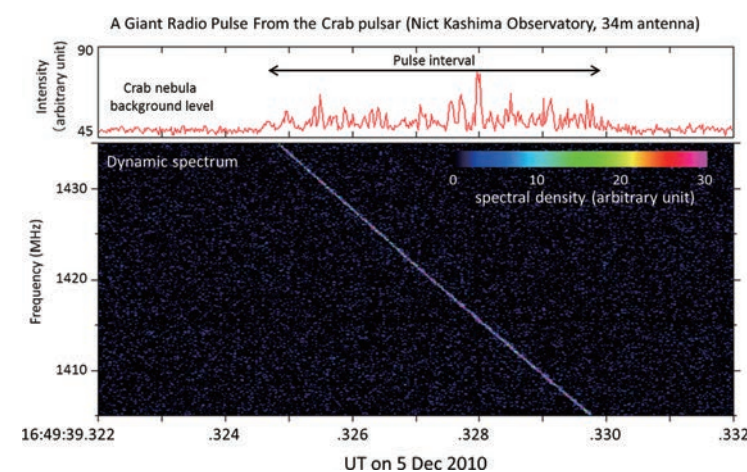


図3 情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター34mパラボラアンテナで観測されたかにパルサーからの巨大電波パルス(GRP)の観測例を示します。図の上段は信号強度の10ミリ秒間の時間変化を示し、左端・右端近くの部分はかに星雲のバックグラウンドレベルを表します。図の中央付近では、バックグラウンドに対して70%ほどの信号強度増大が見られ、GRPの到着を示しています。図の下段はダイナミックスペクトル(横軸：時間、縦軸：周波数)で、星間空間プラズマ中を伝わる際、低い周波数ほど遅れて伝わるというGRPの周波数構造を示しています。

Fig.3 An example of giant radio pulses (GRPs) from the Crab pulsar detected by the 34m antenna at Kashima Space Technology Center of NICT. The top panel shows the intensity time variation for 10ms, where the leftmost and rightmost portions represent the background level determined by the Crab nebula. Up to 70% intensity increases seen for 5ms from 16:49:39.325 UT correspond to the arrival of a GRP. A dynamic spectrum in the bottom panel shows the characteristic frequency structure of GRPs caused by the group-delay effect of free electrons in the interstellar space along the line of sight.

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, nonthermal 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 investigating 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.



# 重力波推進室

## Gravitational Wave Project Office (GWPO)

### 研究の目的

●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出てきます。従って、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。しかし、重力波の直接検出は極めて難しく、その存在は間接的にしか確認されていません。私達の研究の目標は、その重力波を最先端の技術を結集した大型低温重力波望遠鏡により直接検出し、重力波を用いた天文学を開始することです。

●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、それが如何に難しいことかが伺い知れることと思います。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、日本の大型低温重力波望遠鏡計画では、この望遠鏡を地面振動の少ない神岡鉱山地下200メートルの、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。この今までの光学望遠鏡とは全く異なる新しい望遠鏡に、より親しみやすさを感じて頂けることを願い、全国からその愛称を公募し、数多くのご応募の中から、「KAGRA」と命名させて頂きました。

### 研究の現況

●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。今年度はいよいよレーザー干渉計の設置・インス

トールが行われる予定です。レーザー干渉計と関連する機器装置は重要構成部門別に構成される各チームにより開発設計・製作が進んでおり、真空室はほぼ完成しています。また、低温鏡を収納する超高真空槽など大型低温機器も坑内で組立作業が終了しました。さらに、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ています。

●KAGRA計画では、世界に先駆けて、地球から約7億光年の範囲内で発生する重力波の世界初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)と競う一方で、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ための覚書を締結しています。

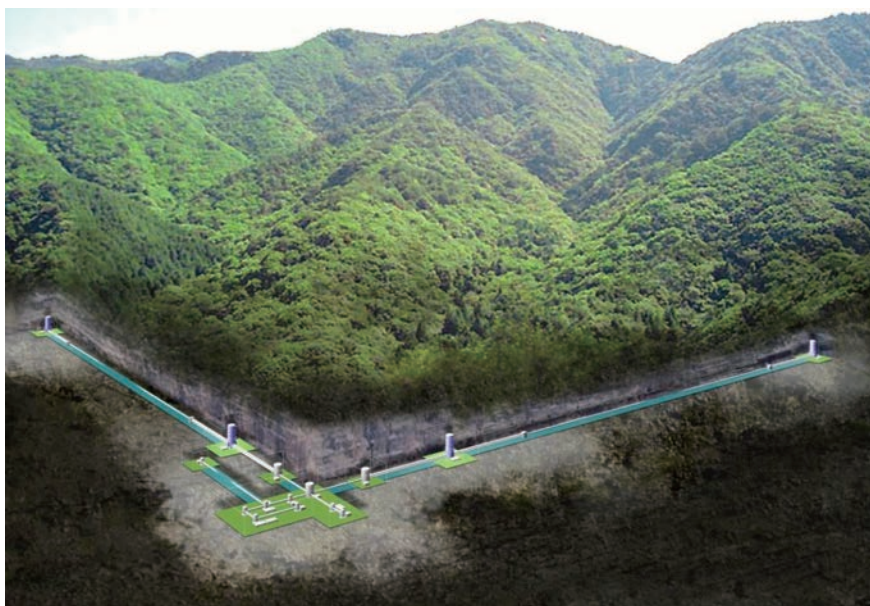


図1 KAGRAの完成予想図

Fig.1 Schematic view of KAGRA planned underground at Kamioka.

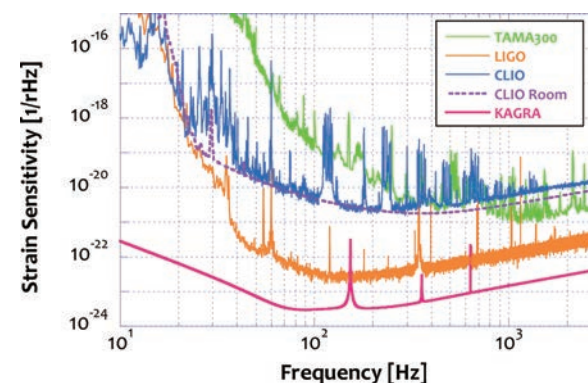


図2 KAGRAのデザイン感度曲線(赤線)とTAMA(緑線)、100メートルプロトタイプ低温干渉計CLIO(青線)の低温感度。紫の破線で示す室温究極感度100Hz付近でわずかに上回っているのは低温鏡による低減効果を現わしている。なお、橙色の線で示したプロットは、現在最も感度が良いとされる米国の計画LIGO(基線長4km)で達成されている感度。

Fig.2 Achieved sensitivities by existing interferometers compared with the design sensitivity of KAGRA (red curve). The vertical axis represents square root of strain noise power density. The green curve is the sensitivity of TAMA (in 2008). The blue one shows that of CLIO (taken in March, 2010). The dotted violet one represents room temperature limit of CLIO. The orange one is that of LIGO at the time of 5<sup>th</sup> science run. The target sensitivity of KAGRA will be achieved by a seismic attenuation system (SAS) that was developed by TAMA interferometer, the cryogenic mirror system that was tested by CLIO, and a high power laser system, the power of which has been attained at a laboratory level.



図3 完成したKAGRA地下空洞。

Fig.3 Excavation of KAGRA tunnel completed.



図4 KAGRA低温鏡懸架系用クライオスタットの完成検査。

Fig.4 Inspection of cryostats for KAGRA cryogenic mirror system.



図5 中央実験エリアに設置された真空槽。

Fig.5 Vacuum chambers installed at the center area of KAGRA tunnel.

### Gravitational Wave Project Office (GWPO)

The gravitational wave group conducts R&D experiments of the Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (nicknamed “KAGRA”) project for the detection of gravitational waves predicted by Einstein. Nobody has succeeded in detecting a wave form in real time, so far. This type of detection has become one of the possible tests to prove Einstein's theory of relativity. The gravitational wave telescope will be used in the future as a tool for observing 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 3km 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.

By the end of the fiscal year of 2013, the tunnel housing KAGRA interferometer has been completed and almost all vacuum parts were manufactured and stored near the construction site in Kamioka. Four cryostats for main mirrors were completed with successful cooling. The optical design of the interferometer was fixed for the initial operational run in 2015. 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, the collaboration with Korean gravitational research group is also ongoing to accelerate the KAGRA subsection's progress.

Figure 2 shows the achieved sensitivities compared with the target one of KAGRA. 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 competing and collaborating with foreign GW detection projects, such as LIGO (USA), VIRGO (Italy-France), GEO (UK-Germany), for the first direct detection of GWs in human history.

For detailed references, please see <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>



# 観測的宇宙論グループ

## Observational Cosmology Group

### 研究目的

●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。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原始銀河、その中でも特に検出しやすいLy $\alpha$ 輝線を出す銀河(LAE)を探索しています。見つけれ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によって星や銀河の誕生の謎に迫っています。さらに、LAEのLy $\alpha$ 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。

### 研究の現況

●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では原始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る可能性もあります。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桁程度探索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を含む原始銀河の探索を行っています。

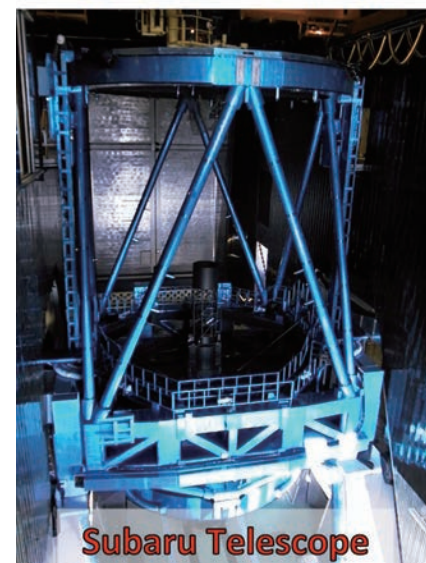


図1 ハワイ島マウナケア山頂に設置された国立天文台の口径8.2mすばる望遠鏡(下)とそのトップリング上に装着されたSuprime-Cam(上)。

Fig.1 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.

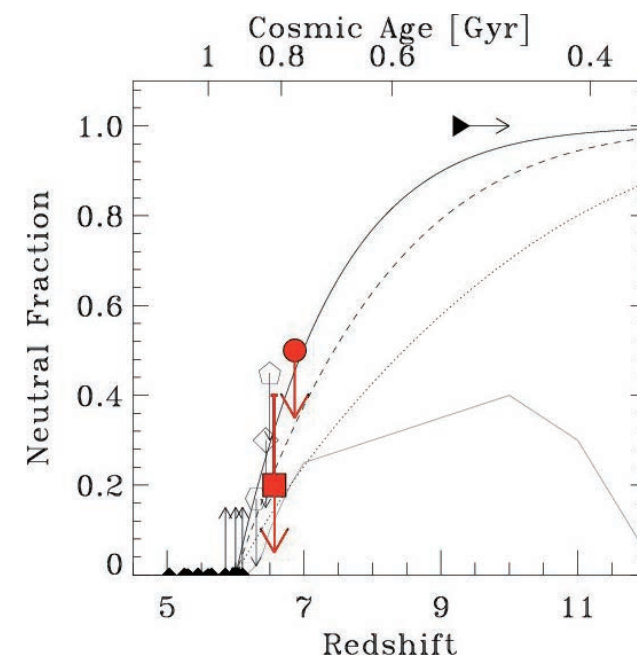


図2 これまでの研究で明らかにされた宇宙再電離の歴史。赤方偏移(横軸)に対する中性水素比(縦軸)の進化。赤印がSuprime-Camの探索から付けられた制限。4つの曲線は異なる理論モデル。いつ、どのように宇宙再電離が進んできたかはまだほとんど分かっていません。

Fig.2 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.

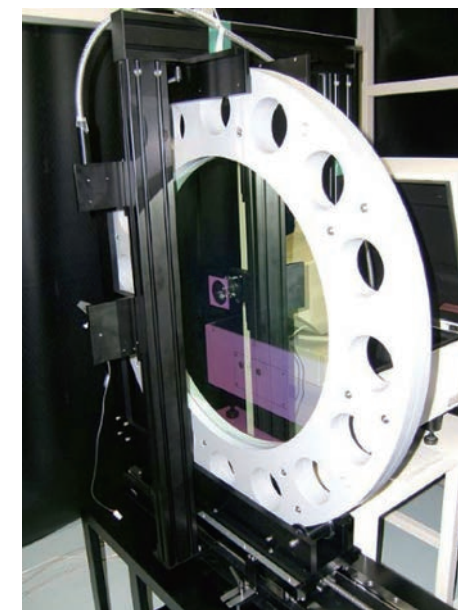


図3 開発中のすばるHSC用狭帯域フィルター (Materion[旧Barr Associates]社と協力)。

Fig.3 Subaru/HSC narrow band filter under development (collaboration with Barr Associates Inc.)

## Observational Cosmology

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 Ly $\alpha$  emitting galaxies (LAEs) at  $z \sim 7$  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  $z \sim 7$ , but that the universe is still highly ionized at  $z \sim 7$ . 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 Ly $\alpha$  emitter, and the total ionizing photons produced by this kind of object 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  $z \sim 7$  with HSC than our previous surveys with Suprime-Cam.



## 研究目的

●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は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モデル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。

●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モデル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モデル・宇宙モデル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。

●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って研究しています。

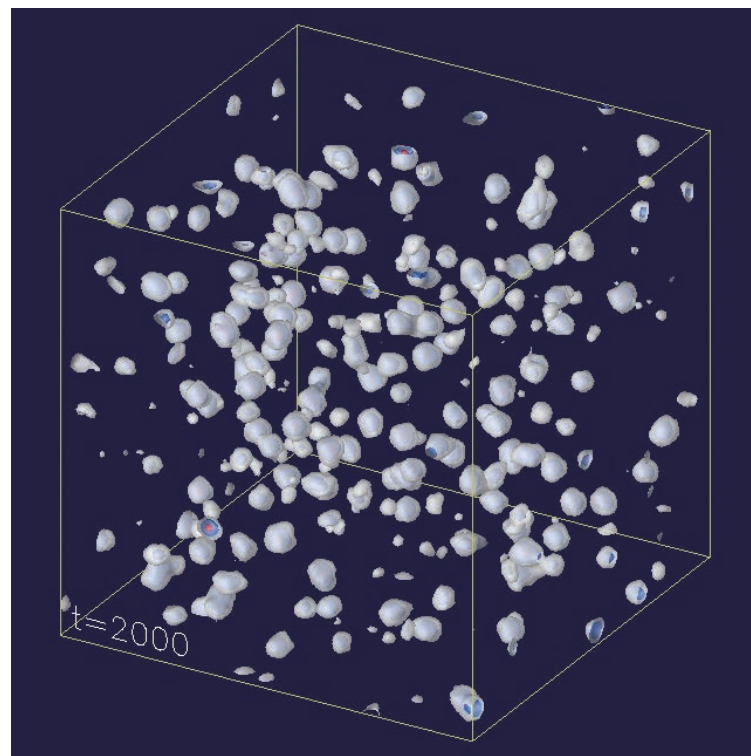


図1 超対称標準理論で予言されるノン・トポロジカルソリトンであるQボールの3次元シミュレーション。  
Fig.1 3D simulation of Q-balls which are non-topological solitons predicted in the minimal supersymmetric standard model.

## Theory

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 passed 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.

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. 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.

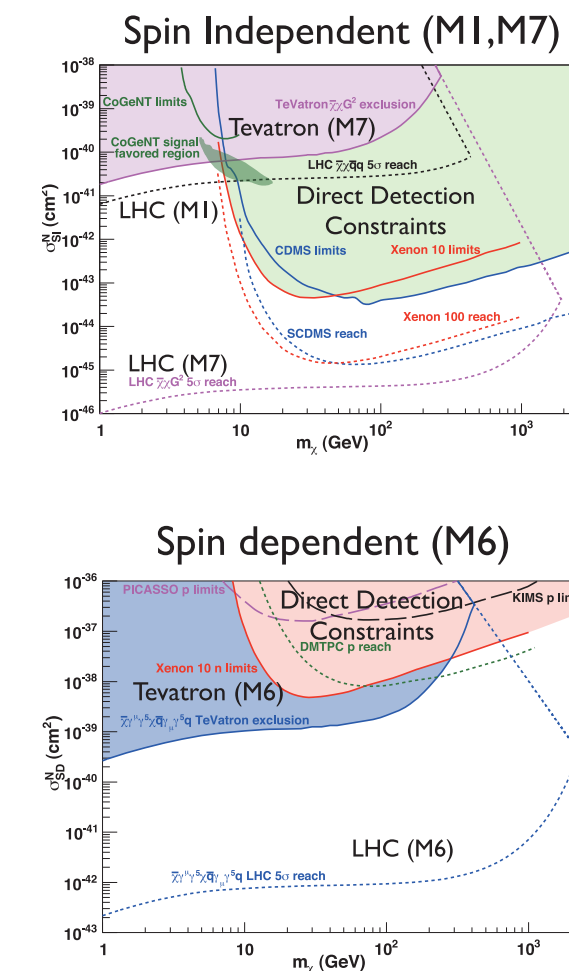


図2 暗黒物質のスピン依存及び非依存な相互作用を通じた直接観測の際に必要な相互作用断面積への上限。横軸は暗黒物質の質量を表す。図は加速器実験からの制限が直接観測の制限と相補的な制限を与えることを示している。また相互作用の種類によっては直接観測よりも厳しい制限を与え得ることが分かる。

Fig.2 Exclusion upper limits on the dark matter-nucleon interaction cross sections relevant for the direct detection experiments of dark matter via the spin-dependent and spin-independent interactions. The figure shows that the constraints from the collider experiments give complementary constraints and sometime outperform depending on the types of the interactions.



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

●宇宙ニュートリノ観測情報融合センターは、大きな成果をあげているニュートリノとそれに関連する研究を進めることを目的として、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全員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られるように、より一層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、長基線ニュートリノ振動実験T2Kや、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、ニュートリノ研究を推進しています。

●平成26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2015年2月21日に開催しました。参加者は33名でした。今回の研究会のテーマは、「ニュートリノと非標準的枠組—ステライルニュートリノ、非標準的相互作用—」として、既に近年の研究で相当理解が進んだ3世代のニュートリノ振動では説明できない現象があるかということを中心にさまざまな研究が報告されました。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26年度は2014年4月12日に開催され、2人の講師によって数学で迫る宇宙の姿や宇宙を満たす衝撃波についての講演があり多くの市民の方々が講演に耳を傾けました。

●本センターは、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26年度はこれらについて合計8件の共同利用研究を受け入れました。

●宇宙ニュートリノセンターでは、本研究所計算委員会と共に、宇宙線研究所の共同利用計算機の運用をしています。平成25年度に更新が行われた計算機システムは安定な運用が行われています。



図1 平成26年4月12日に柏市のアミューズ柏で開催された一般講演会の様子。  
Fig.1 A photo of the public lecture held in Kashiwa on April 12, 2014.

## RCCN

The Research Center for Cosmic Neutrinos (RCCN) was established in April, 1999. The main objective of this center is to study neutrinos based on data from various observations and experiments. In order to promote studies of neutrino physics, it is important to provide the occasion to discuss theoretical ideas and experimental results on neutrino physics. Therefore, one of the most important practical jobs of this center is to organize neutrino-related meetings. On February 21, 2015, we hosted one domestic neutrino workshop on "Neutrinos and its non-standard framework — sterile neutrinos and non-standard interactions —". 33 physicists participated in this meeting.

Members of this center have been involved in the Super-Kamiokande and T2K experiments, carrying out researches in neutrino physics. Also we have been involved in the future project, Hyper-Kamiokande. (Please see the relevant pages for the scientific results.) Atmospheric neutrino data from Super-Kamiokande give one of the most precise pieces of information on neutrino oscillations. With increased data, it is more important to have better predictions of the neutrino flux. Therefore, in addition to data analysis of the above experiments, we work on the calculation of the atmospheric neutrino flux.

It is important to share our scientific achievements with the general public. For this reason, we hold public lectures every year. 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 FY2014 was held on April 12, 2014. Two scientists lectured on the Universe seen by mathematics and the shock waves in the Universe.

Since 2004, RCCN has been acting as a body to accept inter-university programs related to activities in the low-background underground facility and the computer facility in Kashiwa. We accepted 8 programs related to these facilities. In addition, this center, together with the computer committee of ICRR, is in charge of operating the central computer system in ICRR. In FY2014, the computer system has been operated without any serious problems.

# 神岡宇宙素粒子研究施設 Kamioka Observatory

## 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。平成10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。平成13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、平成14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、平成21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研究を行うT2K実験が開始され、平成23年にミュー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)、100メートル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。

## 所在地

住 所：〒506-1205 岐阜県飛騨市神岡町東茂住456  
電 話：0578-85-2116  
F A X：0578-85-2121  
地 理 的 位 置：北緯36度25分26秒、東経137度19分11秒  
海 抜：350m  
研 究 装 置：50,000トン水チェレンコフ装置「スーパーカミオカンデ」  
装置設置場所：池ノ山頂上(海拔1,368m、2,700m.w.e.)直下1,000m  
主 要 岩 石：片麻岩 比重=2.69g/cm<sup>3</sup>

## 交 通

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



研究棟(奥)と電子計算機棟(手前)  
Back: Laboratory Building, Front: Computer Center



隣接する共同利用宿泊施設  
Adjoining joint-use accommodation facilities



施設付近の高原川と池ノ山  
Takahara River and Mt. Ikeno in the vicinity of facilities

## Research at Kamioka Observatory

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. 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 2002 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.

## Location

Address: 456 Higashi-Mozumi, Kamioka-cho, Hida-shi, Gifu Prefecture 506-1205 Japan  
Tel: +81-578-85-2116  
Fax: +81-578-85-2121  
Geographic Location: 36°25'26" N, 137°19'11" E  
Altitude: 350m  
Equipment: 50,000-ton water Cherenkov detector "Super-Kamiokande"  
Location of installed equipment: 1,000m beneath the summit of Mt. Ikeno (altitude: 1,368m, depth: 2,700m.w.e.)  
Primary rock type: gneiss, Specific gravity: 2.69g/cm<sup>3</sup>

## Access

- Toyama Airport → Bus (40min.) → Mozumi Bus Stop → Walk (1min.)
- Toyama Sta. → Bus (70min.) → Mozumi Bus Stop → Walk (1min.)



# 乗鞍観測所 Norikura Observatory



夏季の観測所  
Norikura Observatory in summer

## Research Contents

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.

## Location

Address: Norikuradake, Nyukawa-cho, Takayama-shi, Gifu Prefecture 506-2100 Japan  
Tel: +81-90-7721-5674 +81-90-7408-6224  
Geographic Location: 36°6'N, 137°33'E  
Altitude: 2,770m  
(average atmospheric pressure: 720hPa)  
Equipment: 2 power generators (AC 125kVA)  
Suzuran Lodge: 4306-6 Azumi, Matsumoto-shi, Nagano Prefecture 390-1513 Japan  
Tel: +81-263-93-2211  
Fax: +81-263-93-2213

## 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

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。

## 所在地

住所: 〒506-2100  
岐阜県高山市丹生川町乗鞍岳  
電話: 090-7721-5674 090-7408-6224  
地理的位置: 北緯36度6分、東経137度33分  
標高: 2,770m(平均気圧720hPa)  
設備: 自家発電機 交流125KVA2基  
鈴蘭連絡所: 〒390-1513 長野県松本市安曇4306-6  
TEL: 0263-93-2211 FAX: 0263-93-2213



自家発電機  
Power generator

## 交通

- JR中央本線松本駅→松本電鉄(30分)→新島々駅  
新島々駅→松本電鉄(2時間)→乗鞍岳山頂バスターミナル  
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  
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)



# 明野観測所 Akeno Observatory

## 研究内容

明野観測所では、 $10^{20}$ 電子ボルト(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。

## 所在地

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

## 交通

- JR中央本線韮崎駅→タクシー(25分)



## Research Contents

At the Akeno Observatory, extremely high-energy cosmic rays with energies exceeding  $10^{20}$  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.

## Location

Address: 5259 Asao, Akeno-machi, Hokuto-shi, Yamanashi Prefecture 408-0201 Japan  
Tel: +81-551-25-2301  
Fax: +81-551-25-2303  
Geographic Location: 35°47'N, 138°30'E  
Altitude: 900m (average atmospheric pressure: 910hPa)

## Access

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



観測所(中央右下)とAGASAがあった領域  
Area of Akeno Observatory (bottom right) and AGASA



# チャカルタヤ宇宙物理観測所

## Chacaltaya Observatory of Cosmic Physics

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のチャカルタ山(南緯16°21′、西経68°08′、標高5300m) 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と、日本・ブラジル共同エマルジ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、前者で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います。その研究目的は、 $10^{13}$ 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( $\sim 10^{15}$ 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。現在は、研究対象エネルギー領域を $10^{16}$ 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います。

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 ( $\sim 10^{15}$ 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. Now to investigate the upper limit energy of the galactic origin cosmic rays, we set the energy region of the interest to be above  $10^{16}$  eV.



冬のチャカルタヤ宇宙物理観測所  
Chacaltaya Observatory in winter.



チャカルタヤ宇宙物理観測所の検出器群  
Detector complex of the observatory.

## ◆ 研究所について

- 沿革  
History
- 年表  
Timeline
- 組織・運営  
Organization and Administration
- 各種委員会委員  
Committee Members
- 教職員数・歴代代表者  
Number of Staff and Past Representatives
- 経費・施設  
Research Budget & Facilities
- 共同利用研究・教育  
Inter-University Research and Education
- 国際交流  
International Exchange
- 成果発表と受賞歴  
Achievement Reports and Awards
- 柏キャンパス  
Kashiwa Campus



# 沿革 History

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年にはエマルジ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ジョン・チェンバーができ、昭和56年にはエマルジョン・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-APRC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。



## History

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-Ka-

miokande 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.



# 年表 Timeline

昭和 25 年	1950	朝日学術奨励金によって乗鞍岳に朝日の小屋(木造15坪)建つ
昭和 28 年	1953	東京大学宇宙線観測所となる(8月1日)
昭和 30 年	1955	乗鞍観測所の本館および研究設備が完成する(8月29日開所式)
昭和 31 年	1956	東京大学原子核研究所宇宙線部(空気シャワー部、エマルション部)が発足
昭和 32 年	1957	乗鞍観測所がIGY(国際地球観測年)の観測に参加、空気シャワーの観測を開始する
昭和 33 年	1958	乗鞍のエマルションチェンバーが観測を開始する
昭和 34 年	1959	東京大学原子核研究所が空気シャワー観測を開始
昭和 35 年	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 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
昭和 41 年	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に移管される
昭和 43 年	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
昭和 47 年	1972	専任所長が着任する、ミュートロンの建設が始まる 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
昭和 48 年	1973	超高エネルギー弱相互作用部門が新設される 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
昭和 49 年	1974	専任事務長が着任する
昭和 50 年	1975	ミュートロンが完成する 明野観測所の建設が始まる 超高エネルギー強相互作用部門が新設される
昭和 51 年	1976	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(5月25日) 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
昭和 52 年	1977	明野観測所が附属施設となる(4月18日)
昭和 53 年	1978	明野観測所が開所式を行う(10月6日)
昭和 54 年	1979	明野に1平方kmの空気シャワー装置が完成する 富士山エマルションチェンバー特別設備を建設する 京都にて第16回宇宙線国際会議を開催する(8月)

1950	Asahi Hut (wooden structure; about 50 sq. meters) was constructed on Mt. Norikura based on the Asahi Bounty for Science.
1953	Asahi Hut was incorporated into the Cosmic Ray Observatory, the University of Tokyo (1 Aug.).
1955	The main building and research facilities of the Norikura Observatory were constructed (the opening ceremony was held on Aug. 29).
1956	– The Cosmic Ray Division (composed of Air Shower Section and Emulsion Section) was inaugurated at the Institute for Nuclear Study, the University of Tokyo. The Norikura Observatory participated in IGY (International Geophysical Year) activities, and began air shower observation.
1957	The Norikura Observatory participated in IGY (International Geophysical Year) activities, and began air shower observation.
1958	The emulsion chambers at Norikura Observatory started operation.
1959	– Air shower observation started at the Institute for Nuclear Study, the University of Tokyo.
1960	– The Emulsion Section of the Institute for Nuclear Study, the University of Tokyo, developed a large-size balloon. – International projects of the Japan Society for the Promotion of Science started (international collaboration with India, Brazil and Bolivia).
1966	– 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, the University of Tokyo. – The Emulsion Section of the Institute for Nuclear Study, the University of Tokyo, started observation on Mt. Fuji with emulsion chambers.
1968	A full-time director was appointed.
1972	The construction of MUTRON was commenced. – The cosmic material research section was established in the Cosmic Ray Division of the Institute for Nuclear Study.
1973	The ultra-high energy weak-interaction division was newly established. The international projects of the Japan Society for the Promotion of Science (with India, Brazil and Bolivia) were incorporated.
1974	A full-time chief administrator was appointed.
1975	MUTRON was completed. The construction of the Akeno Observatory started. The ultra-high energy strong-interaction division was newly established.
1976	In the wake of the amendment of the National School Establishment Law, the observatory was reorganized into the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR) (25 Aug.). The ultra-high energy strong-interaction 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	The Akeno observatory was established as one of the ICRR facilities (18 Apr.).
1978	The Akeno Observatory performed the opening ceremony (6 Oct.).
1979	The Akeno 1km <sup>2</sup> air shower detector was completed. The special facility for emulsion chamber on Mt. Fuji was constructed.The 16th International Cosmic Ray Conference was held in Kyoto (Aug.).

昭和 56 年	1981	エマルション・チェンバーによる日中共同研究を開始する
昭和 57 年	1982	宇宙線計測部門(客員)が新設される
昭和 58 年	1983	神岡鉱山で共同実験の陽子崩壊実験を開始する 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
昭和 61 年	1986	将来計画検討小委員会(Ⅰ)が設置される
昭和 62 年	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 明野観測所で100平方kmの広域シャワー観測装置AGASAの建設が始まる 将来計画検討小委員会(Ⅰ)の答申が出る
昭和 63 年	1988	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
平成 元 年	1989	乗鞍で太陽フレアに伴う宇宙線の大幅な増大を観測する(9月29日)
平成 2 年	1990	明野に100平方kmの広域シャワー観測装置 AGASAが完成する
平成 3 年	1991	スーパーカミオカンデの建設が始まる 将来計画検討小委員会(Ⅱ)が設置される
平成 4 年	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 重力波グループが加わる(ミュー中間子測定部門所属) オーストラリアでカンガルー計画が始まる オーストラリアでPSR1706-44からのTeVガンマ線を観測する
平成 5 年	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
平成 6 年	1994	神岡に計算機棟が出来る(1月)、スーパーカミオカンデのための空洞掘削が完了する(6月) 明野で2×10 <sup>20</sup> eVの大シャワーを観測する 外部評価が実施される 神岡で大気ニュートリノ異常の天頂角依存を観測する
平成 7 年	1995	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(4月1日) スーパーカミオカンデが完成式を行う(11月)
平成 8 年	1996	スーパーカミオカンデの本格観測が始まる(4月1日)
平成 9 年	1997	チベットのエアシャワーガンマ線実験装置が完成する
平成 10 年	1998	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に発表される(6月5日) 柏キャンパスの建設が始まる(11月)

1981	Japan-China joint research on emulsion chamber observations started.
1982	The cosmic ray detection division (for guest researchers) was newly established.
1983	The nucleon decay experiment started in the Kamioka Mine as a collaborative research project. The primary cosmic ray research facility (i.e. mass spectrometer etc.) was installed.
1986	The first committee for future projects was organized.
1987	The underground detector at Kamioka observed a neutrino burst from a supernova for the first time in history. The construction of the 100km <sup>2</sup> wide-area air shower detector, AGASA, started at the Akeno Observatory. The first committee for future project submitted an evaluation report.
1988	The underground detector at Kamioka observed a deficit in solar neutrino flux.
1989	A significant increase of cosmic ray intensity coincident with a solar flare was observed at the Norikura Observatory (29 Sep.).
1990	The 100km <sup>2</sup> wide area air shower detector, AGASA, was completed at Akeno.
1991	The construction of Super-Kamiokande was commenced. The second committee for future projects was organized.
1992	The neutrino astrophysics division was newly established, and the cosmic ray detection division (for guest researchers) was discontinued. The gravitational wave group joined in muon measurement division at ICRR. The Cangaroo project started in Australia The Cangaroo observed TeV gamma rays from a pulsar (PSR1706-44).
1993	The construction of air shower gamma ray detector in Tibet started.
1994	A computer center was built at Kamioka Observatory (Jan.). The excavation for SuperKamiokande was completed (Jun.). A giant air shower with energy of 2×10 <sup>20</sup> eV was observed at Akeno An external evaluation of ICRR was conducted. The anomalous zenith angle dependence of the atmospheric neutrinos was observed at Kamioka.
1995	The neutrino astrophysics division was discontinued, and the Kamioka Observatory for Cosmic Elementary Particle Research was established (1 Apr.). The completion ceremony of Super-Kamiokande was held before filling water (Nov.).
1996	The full-scale operation of Super-Kamiokande began (1 Apr.).
1997	The air shower gamma ray detector in Tibet was completed.
1998	The Super-Kamiokande collaboration officially announced the discovery of none-zero neutrino mass (5 Jun.). The construction of the Kashiwa Campus was commenced (Nov.).

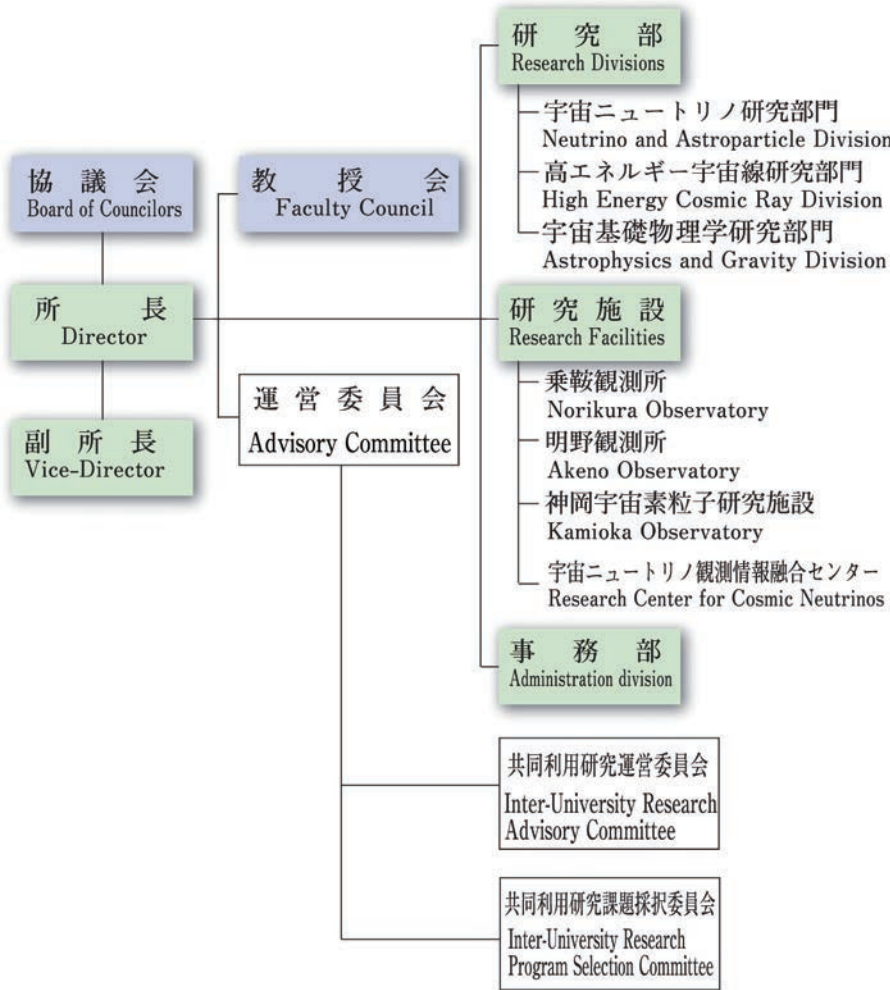


# 組織・運営

## Organization and Administration

平成 11 年	1999	宇宙ニュートリノ観測情報融合センターが新設される（4月1日） オーストラリアでカンガルー計画2が始まる オーストラリアでカンガルー計画3が準備を開始する 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
平成 12 年	2000	柏新キャンパスに全面移転する（2月～3月）
平成 13 年	2001	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こわれる（11月）
平成 14 年	2002	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（12月） スーパーカミオカンデが部分復旧して、実験再開する（12月）
平成 15 年	2003	つくばにて第25回宇宙線国際会議を開催する（8月） テレスコープアレイの建設が始まる カンガルー計画3の4台の望遠鏡が完成する
平成 16 年	2004	国立大学が法人化される（4月1日） 研究所の部門が、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、宇宙基礎物理学研究部門の3研究部門となる（4月1日）
平成 18 年	2006	スーパーカミオカンデが完全復旧される
平成 19 年	2007	将来計画検討委員会（Ⅲ）が設置される 将来計画検討委員会（Ⅲ）の答申が出る（8月31日）
平成 20 年	2008	テレスコープアレイ実験で観測が開始される
平成 22 年	2010	T2K実験の最初のニュートリノをスーパーカミオカンデで観測する 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 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
平成 23 年	2011	重力波推進室が設置される（4月1日） T2K実験が電子ニュートリノ出現現象の兆候を捉える（6月15日） 将来計画検討委員会（Ⅳ）が設置される
平成 24 年	2012	オーストラリアのカンガルー計画終了（3月31日）
平成 26 年	2014	KAGRAのためのトンネル掘削が完了する（7月）

1999	The Research Center for Cosmic Neutrinos was established (1 Apr.). The Cangaroo-2 began operation in Australia. Preparation of the Cangaroo-3 began in Australia.
2000	ICRR moved to the new Kashiwa Campus (Feb.-Mar.).
2001	An accident occurred at the Super-Kamiokande, destroying more than half of the photomultipliers (Nov.).
2002	Professor Emeritus Masatoshi Koshiba won the Nobel Prize in Physics for his pioneering contributions to the detection of cosmic neutrinos, based on outcomes of the Kamiokande experiment (Dec.). The Super-Kamiokande was partially restored, and observation resumed (Dec.).
2003	The 28th International Cosmic Ray Conference was held in Tsukuba (Aug.). The construction of the Telescope Array was commenced. Four telescopes for the Cangaroo-3 Project were completed.
2004	Japanese national universities became independent administrative agencies (1 Apr.). 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 (1 Apr.).
2006	The restoration of the Super-Kamiokande was completed.
2007	The Committee on Future Projects III was established. The Committee on Future Projects III submitted its report.
2008	The Telescope Array experiment started observation.
2010	The Super-Kamiokande detected the first neutrino from the T2K experiment. ICRR became an Inter-University Research Center, renewing its existing function as an inter-university research institute. The Large Cryogenic Gravitational Wave Telescope (LCGT; later named KAGRA) was approved as a Leading-edge Research Infrastructure Program by MEXT. The construction started.
2011	The Gravitational Wave Project Office was established (1 Apr.). The T2K experiment caught a sign of electron neutrino appearance (15 Jun.). The Committee on Future Projects IV was established.
2012	The Cangaroo experiment ended its operation.
2014	The excavation of KAGRA tunnel was completed (Jul.).



### 研究所の運営

●**協議会**：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うちで所長が命じた者、②東大理学系研究科長、東大理事又は副学長（研究担当）、③国立天文台長、高エネルギー加速器研究機構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。

●**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。

●**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（所外が半数以上）で構成されます。

●**共同利用研究運営委員会**：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）。

### Administration of ICRR

#### 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 ICRR).

#### 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).



# 各種委員会委員 Committee Members

## ■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	川村 静児	(Group 1) Prof. Seiji Kawamura 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系研究科長	福田 裕徳	(Group 2) 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	徳宿 克夫	(Group 3) Prof. Katsuo Tokushuku 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) 京都大学大学院理学研究科 教授	中村 卓史	(Group 4) Prof. Takashi Nakamura Graduate School of Science, 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	鳥居 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
名古屋大学大学院理学研究科 教授	杉山 直	Prof. Naoshi Sugiyama Graduate School of Science, Nagoya 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26年4月1日～平成28年3月31日

Term：April 1, 2014 thr. March 31, 2016

オブザーバー：東京大学宇宙線研究所教授 寺澤 敏夫

Observer：Prof. Toshio Terasawa, ICRR, The University of Tokyo

## ■共同利用研究運営委員会委員

Inter-University Research Advisory Committee

所 属 ・ 職 名	氏 名	Members
東海大学理工学部 教授	委員長 西嶋 恭司	Chairperson Prof. Kyoshi Nishijima Dep. of Science, Tokai University
甲南大学理工学部 准教授	山本 常夏	Assoc. Prof. Tokonatsu Yamamoto Dep. of Science, Konan University
名古屋大学太陽地球環境研究所 教授	田島 宏康	Prof. Hiroyasu Tajima Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
京都大学大学院理学研究科 准教授	窪 秀利	Assoc. Prof. Hidetoshi Kubo Graduate School of Science, Kyoto University
信州大学理工学部 教授	宗像 一起	Prof. Kazuoki Munakata Dep. of Science, Shinshu University
神戸大学大学院理学研究科 教授	竹内 康雄 (3号委員)	Prof. Yasuo Takeuchi Graduate School of Science, Kobe University (Group 3)
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 (Group 3)
名古屋大学太陽地球環境研究所 准教授	増田 公明 (3号委員)	Assoc. Prof. Kimiaki Masuda Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University (Group 3)
東京大学宇宙線研究所 教授	寺澤 敏夫	Prof. Toshio Terasawa ICRR, the University of Tokyo
東京大学宇宙線研究所 准教授	瀧田 正人	Assoc. Prof. Masato 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	森山 茂栄	Assoc. Prof. Shigetaka Moriyama ICRR, the University of Tokyo
東京大学宇宙線研究所 准教授	幹事 三代木伸二	Organizer Assoc. Prof. Shinji Miyoki ICRR, the University of Tokyo

任 期：平成26年4月1日～平成28年3月31日

Term：April 1, 2014 thr. March 31, 2016

オブザーバー：宇宙線研究所長 梶田隆章

Observer：Prof. Takaaki Kajita, Director of ICRR, the University of Tokyo

## ■運営委員

Advisory Committee

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
名古屋大学大学院理学研究科 教授	久野 純治	Prof. Junji Hisano Graduate School of Science, Nagoya University
京都大学基礎物理学研究所 教授	柴田 大	Prof. Masaru Shibata Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University
高エネルギー加速器研究機構 教授	羽澄 昌史	Prof. Masashi Hazumi High Energy Accelerator Research Organization
大阪大学大学院理学研究科 教授	岸本 忠史	Prof. Tadafumi Kishimoto Graduate School of Science, Osaka University
東京大学大学院理学系研究科 准教授	横山 将志	Assoc. Prof. Masashi Yokoyama School of Science, the University of Tokyo
大阪市立大学大学院理学研究科 教授	神田 展行	Prof. Nobuyuki Kanda Graduate School of Science, Osaka City University
名古屋大学太陽地球環境研究所 教授	伊藤 好孝	Prof. Yoshitaka Ito Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
大阪市立大学大学院理学研究科 准教授	荻尾 彰一	Assoc. Prof. Shoichi Ogio Graduate School of Science, Osaka City University
信州大学理工学部 教授	宗像 一起	Prof. Kazuoki Munakata Dep. of Science, Shinshu University
東京大学宇宙線研究所 教授	寺澤 敏夫	Prof. Toshio Terasawa ICRR, the University of Tokyo
東京大学宇宙線研究所 教授	川崎 雅裕	Prof. Masahiro Kawasaki ICRR, the University of Tokyo
東京大学宇宙線研究所 教授	大橋 正健	Prof. Masataka Ohashi ICRR, the University of Tokyo
東京大学宇宙線研究所 教授	福島 正己	Prof. Masaki Fukushima 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

任 期：平成26年4月1日～平成28年3月31日

Term：April 1, 2014 thr. March 31, 2016

## ■共同利用研究課題採択委員会委員

Inter-University Research Program Selection Committee

所 属 ・ 職 名	氏 名	Members
大阪市立大学理学研究科 准教授	委員長 荻尾 彰一	Chairperson Assoc. Prof. Shoichi Ogio Graduate School of Science, Osaka City University
山形大学大学院理工学研究科 教授	郡司 修一	Prof. Shuichi Gunji Graduate School of Science and Engineering, 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
名古屋大学太陽地球環境研究所 准教授	増田 公明	Assoc. Prof. Kimiaki Masuda Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
(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 Cosmic Neutrino Research 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 Fundamental Astrophysics Research Division, ICRR, the University of Tokyo
宇宙ニュートリノ研究部門 准教授	幹事 岸本 康宏	Organizer Assoc. Prof. Yasuhiro Kishimoto Cosmic Neutrino Research Division, ICRR, the University of Tokyo
オブザーバー 宇宙ニュートリノ研究部門 准教授	副幹事 早戸 良成	Assistant Organizer Assoc. Prof. Yoshinari Hayato Cosmic Neutrino Research Division, ICRR, the University of Tokyo

# 教職員数・歴代代表者 Number of Staff and Past Representatives

## 教職員数

Number of Staff

(平成27年5月1日現在)

教授 Professors	准教授 Associate Professors	助教 Assistant Professors	研究員 Research Fellows	技術職員 Technical Staff	事務職員 Clerical Employee	非常勤職員 Adjuncts	総合計 Total
10 (0) [1] <0>	14 (0) [3] <0>	30 (2) [0] <0>	9 (3) [0]	10 (1) [0]	11 (6) [0]	42 (34) [0]	126 (46) [4] <0>

( )は女性で内数、[ ]は客員で外数、< >は外国人特任教員で内数

The numbers shown inside ( ), [ ] and < > are numbers of female staff, guest members, and foreign staff respectively.

## 歴代代表者

### ●東京大学宇宙線観測所

所 長	平田 森三	昭和28年 8月 1日～昭和30年 8月31日
所 長	菊池 正士	昭和30年 9月 1日～昭和34年 9月21日
所長事務取扱	野中 到	昭和34年 9月22日～昭和35年 7月31日
所長事務取扱	熊谷 寛夫	昭和35年 8月 1日～昭和35年11月30日
所 長	野中 到	昭和35年12月 1日～昭和45年 3月31日
所 長	菅 浩一	昭和45年 4月 1日～昭和47年 3月31日
所 長	三宅 三郎	昭和47年 4月 1日～昭和51年 5月24日

### ●東京大学宇宙線研究所

所 長	三宅 三郎	昭和51年 5月25日～昭和59年 3月31日
所 長	鎌田 甲一	昭和59年 4月 1日～昭和61年 3月31日
所 長	近藤 一郎	昭和61年 4月 1日～昭和62年 3月31日
所長事務取扱	棚橋 五郎	昭和62年 4月 1日～昭和62年 4月30日
所 長	荒船 次郎	昭和62年 5月 1日～平成 9年 3月31日
所 長	戸塚 洋二	平成 9年 4月 1日～平成13年 3月31日
所 長	吉村 太彦	平成13年 4月 1日～平成16年 3月31日
所 長	鈴木洋一郎	平成16年 4月 1日～平成20年 3月31日
副所長	黒田 和明	平成16年 4月 1日～平成20年 3月31日
副所長	福島 正己	平成20年 4月 1日～平成24年 3月31日
所 長	梶田 隆章	平成20年 4月 1日～
副所長	寺澤 敏夫	平成24年 4月 1日～

### ●乗鞍観測所

所長事務取扱	三宅 三郎	昭和51年 5月25日～昭和52年 2月28日
所 長	近藤 一郎	昭和52年 3月 1日～昭和62年 3月31日
所 長	湯田 利典	昭和62年 4月 1日～平成12年 3月31日
所 長	福島 正己	平成12年 4月 1日～平成15年 3月31日
所 長	瀧田 正人	平成15年 4月 1日～

### ●明野観測所

所 長	鎌田 甲一	昭和51年 4月18日～昭和59年 3月31日
所 長	棚橋 五郎	昭和59年 4月 1日～昭和63年 3月31日
所 長	永野 元彦	昭和63年 4月 1日～平成10年 3月31日
所 長	手嶋 政廣	平成10年 4月 1日～平成14年12月31日
所 長	福島 正己	平成15年 1月 1日～平成24年 3月31日
所 長	佐川 宏行	平成24年 4月 1日～

### ●神岡宇宙素粒子研究施設

施設長	戸塚 洋二	平成 7年 4月 1日～平成14年 9月30日
施設長	鈴木洋一郎	平成14年10月 1日～平成26年 3月31日
施設長	中畑 雅行	平成26年 4月 1日～

### ●宇宙ニュートリノ観測情報融合センター

センター長	梶田 隆章	平成11年 4月 1日～
-------	-------	--------------

## 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, 1984
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	Yoji 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	Masaki Fukushima	Apr. 1, 2008–Mar. 31, 2012
Director	Takaaki Kajita	Apr. 1, 2008–
Vice Director	Toshio Terasawa	Apr. 1, 2012–

### ●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	Masaki Fukushima	Apr. 1, 2000–Mar. 31, 2003
Director	Masato Takita	Apr. 1, 2003–

### ●Akeno Observatory

Director	Koichi Kamata	Apr. 18, 1977–Mar. 31, 1984
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	Masaki Fukushima	Jan. 1, 2003–Mar. 31, 2012
Director	Hiroyuki Sagawa	Apr. 1, 2012–

### ●Kamioka Observatory

Observatory Head	Yoji Totsuka	Apr. 1, 1995–Sep. 30, 2002
Observatory Head	Yoichiro Suzuki	Oct. 1, 2002–Mar. 31, 2014
Observatory Head	Masayuki Nakahata	Apr. 1, 2014–

### ●Research Center for Cosmic Neutrinos

Center Chief	Takaaki Kajita	Apr. 1, 1999–
--------------	----------------	---------------



# 経費・施設 Research Budget & Facilities

## 歳出決算額 Annual Expenditures 千円 thousand yen

区分 Category	平成22年度 FY2010	平成23年度 FY2011	平成24年度 FY2012	平成25年度 FY2013	平成26年度 FY2014
人件費 Personal Expenses	576,000	653,000	658,000	687,000	706,000
物件費 Non-personal Expenses	1,048,000	1,400,000	1,172,000	1,034,000	1,189,000
合 計 Total	1,624,000	2,053,000	1,830,000	1,721,000	1,895,000

## 外部資金等 External Funds, etc 千円 thousand yen

区分 Category	平成22 年度 FY2010		平成23 年度 FY2011		平成24 年度 FY2012		平成25 年度 FY2013		平成26 年度 FY2014	
	件数 Quantity	受入金額 Amount Received	件数 Quantity	受入金額 Amount Received	件数 Quantity	受入金額 Amount Received	件数 Quantity	受入金額 Amount Received	件数 Quantity	受入金額 Amount Received
民間等との共同研究 Joint Research with the Private Sector	1	1,000	1	500	0	0	1	3,000	1	300
受託研究 Entrusted Research	2	38,000	1	29,239	0	0	2	36,321	2	38,250
奨学寄付金 Donation for Scholarly Development	3	760	0	0	1	85	1	364	1	181

## 科学研究費助成事業 Grants-in-aid for Scientific Research 千円 thousand yen

研究種目 Research classes	平成22年度 FY2010		平成23年度 FY2011		平成24年度 FY2012		平成25年度 FY2013		平成26年度 FY2014	
	件数 Quantity	受入金額 Amount Received	件数 Quantity	受入金額 Amount Received	件数 Quantity	受入金額 Amount Received	件数 Quantity	受入金額 Amount Received	件数 Quantity	受入金額 Amount Received
特別推進研究 Specially Promoted Research	1	112,100	1	103,300	2	187,300	2	168,100	3	191,800
学術創成研究 Creative Scientific Research	1	99,700	1	72,100	0	0	0	0	0	0
新学術領域研究 Scientific Research on Priority Areas	0	0	0	0	0	0	1	10,000	3	80,700
特定領域研究 Particular Field Research	1	1,600	1	1,700	0	0	0	0	0	0
基盤研究(S) Scientific Research (S)	2	52,800	2	47,900	1	10,700	1	10,700	0	0
基盤研究(A) Scientific Research (A)	3	19,400	4	34,800	4	72,200	4	47,000	3	13,300
基盤研究(B) Scientific Research (B)	1	5,100	5	33,200	4	12,700	5	15,800	3	15,200
基盤研究(C) Scientific Research (C)	6	6,200	5	4,800	4	3,700	5	6,800	5	6,100
若手研究(A) Grant-in-Aid for Young Scientists (A)			1	2,900	1	5,600	2	12,700	2	9,900
若手研究(B) Grant-in-Aid for Young Scientists (B)	6	9,300	4	5,100	3	2,700	5	6,000	8	8,000
挑戦的萌芽研究 Challenging Exploratory Research	2	1,000	4	5,900	6	9,000	4	4,700	2	3,400
研究活動スタート支援 Research Activity Start-up					1	1,200	1	800	0	0
合 計 Total	23	307,200	28	311,700	26	305,100	30	282,600	29	328,400

## 所在地及び土地・建物面積 Locations and Land/Building Areas 所在全国 Locations of Facilities

施 設 Facilities	出所在地・電話番号 Location and Telephone Number	土地 Land Area (m <sup>2</sup> )	建物 Building Area (m <sup>2</sup> )
柏キャンパス Kashiwa Campus	千葉県柏市柏の業5-1-5 TEL：04-7136-3102(総務係) 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba Prefecture, Japan TEL:+81-47136-3102	313,391 (柏キャンパス全体)	7,185
神岡宇宙素粒子研究施設 Kamioka Observatory	岐阜県飛騨市神岡町東茂住456 TEL：0578-85-2116 456 Higashimozumi, Kamioka-cho, Hida-shi, Gifu Prefecture, Japan TEL: +81-578-85-2116	95,523 (借入93,118)	2,195 (借入140)
乗鞍観測所 Norikura Observatory	岐阜県高山市丹生川町乗鞍岳 TEL：090-7721-5674 Mt. Norikura, Nyukawa-mura, Ohno-gun, Gifu Prefecture, Japan TEL:+81-90-7721-5674	59,707 (借入)	1,655
鈴蘭連絡所 Suzuran Lodge of Norikura Observatory	長野県松本市安曇鈴蘭4306-6 TEL：0263-93-2211 4306-6 Azumi Suzuran, Minamiazumi-gun, Nagano Prefecture, Japan TEL:+81-263-93-2211	2,203 (借入)	182
明野観測所 Akeno Observatory	山梨県北社市明野町浅尾5259 TEL：0551・25-2301 5259 Asai, Akeno-machi, Kitakyomura-gun, Yamanashi Prefecture, Japan TEL: +81-551・25-2301	18,469 (借入)	2,843



# 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26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。

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 2014.

平成26年度利用状況 Joint-Use in FY2014	申請件数 Number of Applications	採択件数 Number of Successful Applications	延べ研究者数 Number of Total Researchers
【協力研究】 宇宙ニュートリノ研究部門 Neutrino and Astrophysics Division	39 (38)	39 (38)	839 (833)
高エネルギー宇宙線研究部門 High Energy Cosmic Ray Division	48 [10]	48 [10]	1001 [75]
宇宙基礎物理研究部門 Astrophysics and Gravity Division	24	24	543
宇宙ニュートリノ観測情報融合センター Research Center for Cosmic Neutrinos	8	8	91

( )内：神岡施設、[ ]内：乗鞍観測所

## 大学院教育 Education

東京大学宇宙線研究所は、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。

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.

	平成23年度 FY2011	平成24年度 FY2012	平成25年度 FY2013	平成26年度 FY2014	平成27年度 FY2015
修 士 Master's course	14 (0)	19 (0)	27 (4)	30 (5)	30 (3)
博 士 Doctor's course	15 (2)	12 (2)	16 (1)	17 (0)	22 (2)
合 計 Total	29 (2)	31 (2)	43 (5)	47 (5)	52 (5)

( )内は女性で内数

The number in parentheses “( )” represents the number of female students.



# 国際交流 International Exchange

## 国際協力研究プロジェクト

### International Projects

❶ 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.

❷ 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.

❸ 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.

❹ また、神岡の地下実験には、アメリカから多くの研究者が参加しています。

The underground experiments at Kamioka are joined by many researchers from USA.

最近国際学術交流協定を締結した大学および学部は、表1の通りです。

Recent agreements on international academic exchange are listed on Table 1.

## 外国人研究者との人的交流

### International Exchange

共同利用研究に参加している外国人研究者の数は平成26年度で延べ2,087名に上ります。最近の外国人研究者の受入数は、表2の通りです。

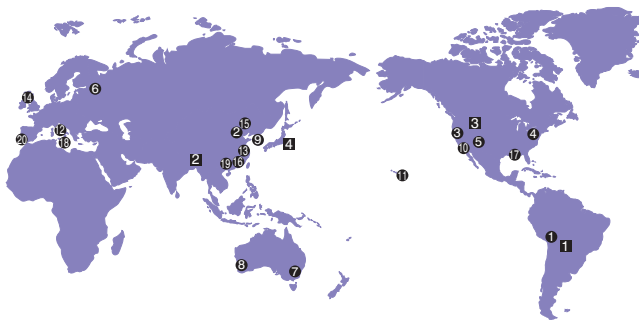
A total of 2,087 foreign researchers have joined ICRR inter-university research projects by 2014. Recent data on the number of accepted foreign researchers are given in Table 2.

[表2] 来日外国人 Table 2 Accepted Researchers	2010	2011	2012	2013	2014
外国人研究員 (文部科学省事業分) Foreign researchers (MEXT projects)	8	8	1	0	0
外国人研究者(学振招聘分) Foreign researchers (Appointed by the Japan Society for the Promotion of Science)	0	4	14	21	23

(平成26年度分 国際研究交流状況調査より)

[表1] 国際学術交流協定締結機関名 Table 1 Academic Exchange Agreements		
1981年	ボリビアサンアンドレス大学(ボリビア) Universidad Mayor de San Andrés (Bolivia)	❶
1995年	中国科学院高能物理研究所(中国) The Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences (China)	❷
1995年	ユタ大学理学部(アメリカ) College of Science, University of Utah (US)	❸
1995年	カリフォルニア大学アーバイン校物理科学部(アメリカ) School of Physical Sciences, the University of California, Irvine (US)	❹
1995年	ボストン大学大学院文理学研究科(アメリカ) Graduate School of Art and Sciences, Boston University (US)	❺
2001年	ロシア科学アカデミー原子核研究所(ロシア) INR, Russian Academy of Science (Russia)	❻
2001年	アデレード大学物理数学部(オーストラリア) University of Adelaide (Australia)	❼
2001年	西オーストラリア大学生命物理科学部(オーストラリア) Faculty of Life and Physical Sciences, the University of Western Australia (Australia)	❽
2009年	ソウル大学校自然科学大学(韓国) College of Natural Science, Seoul National University (Korea)	❾
2009年	カリフォルニア工科大学LIGO研究所(アメリカ) CIT LIGO Laboratory, California Institute of Technology (US)	❿
2010年	ハワイ大学ヒロ校(アメリカ) The Department of Physics and Astronomy, the University of Hawaii at Hilo (US)	⓫
2011年	バーゴ共同研究組織(イタリア) European Gravitational Observatory / The Virgo Collaboration (Italy)	⓬
2011年	上海師範大学(中国) The Shanghai United Center for Astrophysics Shanghai Normal University (China)	⓭
2011年	グラスゴー大学重力研究所(イギリス) Institute for Gravitational Research, University of Glasgow (US)	⓮
2011年	国立清華大学理学部(中国) College of Science, National Tsing Hua University (China)	⓯
2012年	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) The SICCAS-GCL Research & Development Center, The Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences (China)	⓰
2012年	ルイジアナ州立大学理学部(アメリカ) College of Science, Louisiana State University (US)	⓱
2012年	サニオ大学工学部(イタリア) Department of Engineering, The University of Sannio at Benevento (Italy)	⓲
2012年	中国科学院国家天文台(中国) National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences (China)	⓳
2013年	マドリード自治大学理学部(スペイン) The Faculty Sciences, Autonomous University of Madrid (Spain)	⓴

●は協定締結機関 ■は海外における国際協力研究プロジェクト



# 成果発表と受賞歴 Achievement Reports and Awards

## 国際会議及び国際研究集会の開催

東京大学宇宙組研究所は、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。

## International Conferences and Workshops

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.

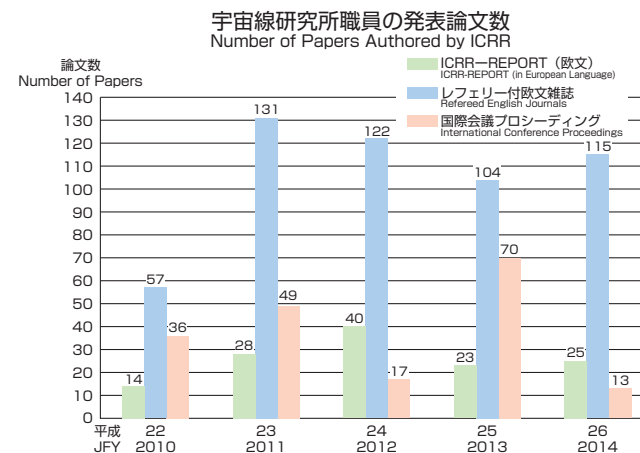
<ul style="list-style-type: none"> <li>●国際ワークショップ 「高エネルギー宇宙のエネルギー収支」 2006年(H18) 2/22~24 (千葉) 126名</li> <li>●国際ワークショップ(主催) 「J-PARC ニュートリノビームに対する韓国遠隔検出器」 2006年(H18) 7/13~14 (韓国) 61名</li> <li>●国際ワークショップ 「次世代核子崩壊とニュートリノ検出器2007」 2007年(H19) 10/2~5 (静岡) 102名</li> <li>●テレスコープアレイ(TA) 完成記念講演会および祝賀会 2008年(H20) 8/25 (千葉) 101名</li> <li>●第58回 藤原セミナー 「重力波観測のための世界規模ネットワーク」 2009年(H21) 5/26~29 (神奈川) 84名</li> <li>●重力波国際会議 「Gravitational-Wave Advanced Detector Workshop, GWADW2010」 2010年(H22) 5/16~21 (京都) 107名</li> <li>●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」 2010年(H22) 12/10~12 (名古屋) 114名</li> <li>●伊日共同ワークショップ 2011年(H23) 10/4~5 (千葉) 39名</li> <li>●第2回 日韓KAGRAワークショップ 2012年(H24) 5/28~29 (千葉) 26名</li> <li>●第1回 ELiTES重力波国際会議 2012年(H24) 10/3~4 (千葉) 80名</li> <li>●第3回 日韓KAGRAワークショップ 2012年(H24) 12/21~22 (韓国) 20名</li> <li>●第4回 日韓KAGRAワークショップ 2013年(H25) 6/10~11 (大阪) 34名</li> <li>●第5回 日韓KAGRAワークショップ 2013年(H25) 11/29~30 (韓国) 36名</li> <li>●第2回 ELiTES重力波国際会議 2013年(H25) 12/4~5 (東京) 80名</li> <li>●CTA LST国際会議 2014年(H26) 1/14~17 (千葉) 83名</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feb. 22-24, 2006 International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe (Chiba), 126</li> <li>Jul. 13-14, 2006 2nd International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutron Beam (Korea), 61</li> <li>Oct. 2-5, 2007 Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detector 2007 (Shizuoka), 102</li> <li>Aug. 25, 2008 Inauguration Ceremony and Symposium of Telescope Array (Chiba), 101</li> <li>May 5, 2009 58th Fujihara seminar: World-wide Network for Gravitational Wave Observation (Kanagawa), 84</li> <li>May 16-21, 2010 Gravitational-Wave Advanced Detector Workshop, GWADW 2010 (Kyoto), 107</li> <li>Dec. 10-11, 2010 International Symposium on the Recent Progress of Ultra High Energy Cosmic Ray Observation (Nagoya), 114</li> <li>Oct. 4-5, 2011 Italy-Japan workshop (Chiba), 39</li> <li>May 28-29, 2012 2nd Korea Japan workshop on KAGRA (Chiba), 26</li> <li>Oct. 3-4, 2012 ELiTES 1st General Meeting (Tokyo), 80</li> <li>Dec. 21-22, 2012 3rd Japan Korea workshop on KAGRA (Seoul), 20</li> <li>Jun. 10-11, 2013 4th Korea Japan workshop on KAGRA (Osaka), 34</li> <li>Nov. 29-30, 2013 2nd Korea Japan workshop on KAGRA (Seoul), 36</li> <li>Dec. 4-5, 2013 ELiTES 2st General Meeting (Tokyo), 80</li> <li>Jan. 14 2014 CTA LST General Meeting (Chiba), 83</li> </ul>
---	---

## 論文

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、レフリー付欧文雑誌、ICRR Report (欧文) 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。

## Academic Papers

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.





# 柏キャンパス Kashiwa Campus

## 論文以外の刊行物

東京大学宇宙線研究所では、論文以外にも、研究所の内容や研究活動を広く紹介するために、以下のような刊行物を発行しています。

	発行回数	内 容
研究所要覧	和文 年1回	研究所の活動の1年間のまとめ
研究所紹介パンフレット	和文 随時	一般向け研究所紹介パンフレット
ICRR Annual Report	英文 年1回	研究所の活動の1年間のまとめ
ICRR Report	英文 随時	研究部からの研究報告
ICRR ニュース	和文 年4回	研究所の最新のニュース

## Other Publications

The table below lists various brochures and documentations ICRR publishes on regular basis to publicize the research activities carried out at ICRR.

ICRR Catalogue (Japanese) Annually Summery of annual activities of ICRR
ICRR Brochure (Japanese) As needed Brochure on ICRR research activities for general readers
ICRR Annual Report (English) Annually Summery of annual activities of ICRR
ICRR Report (English) As Needed Research Report from Researching Divisions
ICRR News (Japanese) Quarterly News from ICRR

受賞歴 (過去10年)	●平成19年(2007)	ベンジャミンフランクリンメダル 戸塚洋二 ニュートリノに質量があることの発見
	●平成20年(2008)	井上學術賞 中畑雅行 太陽ニュートリノの観測とニュートリノ振動の研究
	●平成20年(2008)	地球化学研究協会奨励賞 宮原ひろ子 宇宙線生成核種による太陽活動史の研究
	●平成22年(2010)	井上研究奨励賞 西野玄記 スーパーカミオカンデにおける荷電レプトンとメソンへの核子崩壊の探索
	●平成22年(2010)	戸塚洋二賞 梶田隆章 大気ニュートリノ振動の発見
	●平成23年(2011)	ブルーノ・ボンテコルボ賞 鈴木洋一郎 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
	●平成23年(2011)	戸塚洋二賞 中畑雅行 長年に亘る太陽ニュートリノと振動の研究
	●平成23年(2011)	日本物理学会若手奨励賞 佐古崇志 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
	●平成24年(2012)	戸塚洋二賞 福来正孝 レプトン起源の宇宙のバリオン数非対称機構の提唱
	●平成24年(2012)	日本学士院賞 梶田隆章 大気ニュートリノ振動の発見
	●平成24年(2012)	文部科学大臣表彰若手科学者賞 宮原ひろ子 太陽活動および宇宙線が気候に及ぼす影響の研究
	●平成24年(2012)	素粒子メダル奨励賞 伊部昌宏 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
	●平成25年(2013)	ティンズリー・スカラー・アワード(銀河系外天文学) 大内正己 遠方宇宙観測による広範囲な研究
	●平成25年(2013)	ヨド貴 永野元彦 最高エネルギー宇宙線分野における先駆的研究
	●平成25年(2013)	ジュセッペ・ヴァンナ・ココニ 鈴木洋一郎 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
	●平成25年(2013)	ユリウス・ヴェス賞 梶田隆章 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
	●平成26年(2014)	湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞 川崎雅裕 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
	●平成26年(2014)	文部科学大臣表彰若手科学者賞 大内正己 可視光広域深探査による宇宙進化の研究
	●平成27年(2015)	戸塚洋二賞 塩澤真人 加速器ミュ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

## Awards (in the past decade)

- 2007 Benjamin Franklin Medal in Physics / Yoji Totsuka Discovery of the Neutrino mass
- 2008 Inoue Prize for Science / Masayuki Nakahata Solar neutrino detection and Research of neutrino oscillation
- 2008 Young Scientist Award of the Geochemistry Research Association / Hiroko Miyahara Study of the long-term solar variations using cosmogenic nuclide
- 2010 Inoue Research Award for Young Scientist / Haruki Nishino Search for Nucleon Decay into Charged Antilepton plus Meson in Super-Kamiokande
- 2010 Yoji Totsuka Prize / Takaaki Kajita Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillation
- 2011 Bruno Pontecorvo Prize / Yoichiro Suzuki Discovery of atmospheric and solar neutrino oscillations in the Super-Kamiokande experiment
- 2011 Yoji Totsuka Prize / Masayuki Nakahata Study of the solar neutrino and its oscillations
- 2011 Young Scientist Award of the Physical Society of Japan / Takashi Sako Study on the High-Energy Cosmic Ray Anisotropy with the Tibet Air-Shower Array
- 2012 Yoji Totsuka Prize / Masataka Fukugita Pointing out a mechanism to generate cosmological baryon number violation originated by lepton
- 2012 Japan Academy Prize / Takaaki Kajita Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations
- 2012 MEXT Young Scientists' Prize / Hiroko Miyahara Study for Solar activities and its effects
- 2012 Young Scientist Award in Theoretical Particle Physics / Masahiro Ibe Sweet Spot Supersymmetry
- 2013 Extragalactic Tinsley Scholar Award / Masami Ouchi Extensive work on distant galaxies and cosmological events in the early universe
- 2013 Yodh Prize / Motohiko Nagano Pioneering leadership in the experimental study of the highest cosmic rays
- 2013 Giuseppe and Vanna Cocconi Prize / Yoichiro Suzuki Outstanding contributions to the solution of the solar neutrino puzzle by measuring the flux of all neutrino flavors
- 2013 Julius Wess Award / Takaaki Kajita Discovery of Atmospheric Neutrino Oscillations with the Super-KAMIOKANDE Experiment
- 2014 Yukawa-Kimura Prize / Masahiro Kawasaki Supergravity and nucleosynthesis
- 2014 MEXT Young Scientists' Prize / Masami Ouchi Pioneering studies into the early universe through wide-field multi-wavelength observations
- 2015 Yoji Totsuka Prize / Masato Shiozawa Observation of electron neutrino appearance in an accelerator muon neutrino beam

## 宇宙線研究所修士博士研究発表会所長賞

- |              |   |  |
|--------------|---|--|
| ●平成24年(2012) | 関口 貴令                                       | 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   |
| ●平成25年(2013) | 博士部門 / 齋川 賢一<br>修士部門 / 三上 諒                 | アクション暗黒物質の熱化過程の解析<br>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  |
| ●平成26年(2014) | 博士部門 / 北嶋 直弥<br>修士部門 / 亀谷 功                 | 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<br>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                                  |
| ●平成27年(2015) | 博士部門 / 陳 タン<br>修士部門 / 佐々木健斗<br>ポスター / 山田 将樹 | 重力波望遠鏡KAGRAのための低温懸架システムの研究<br>フェルミバブルにおける乱流加速と放射<br>Gravitational waves as a probe of supersymmetric scale |

## ICRR Graduate Student Workshop Best Presentation Awards

- 2012 Takanori Sekiguchi Modeling and Simulation of Vibration Isolation System for Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope (LCGT)
- 2013 Doctor/Ken-ichi Saikawa Thermalization of axion dark matter  
Master/Ryo Mikami Giant Radio Pulses from the Crab Pulsar: Study of Radiation Mechanism with Simultaneous radio and hard x-ray observations
- 2014 Doctor/Naoya Kitajima Primordial blackhole formation and gravitational wave production in a curvaton model  
Master/Isao Kametani East-West Effect of Atmospheric Neutrinos And Effect of Solar Activities On The Flux Of Atmospheric Neutrino
- 2015 Doctor/Chen Dan Studies on the cryogenic suspension system for KAGRA  
Master/Kento Sasaki Turbulent acceleration and radiation in Fermi bubble  
Poster/Masaki Yamada Gravitational waves as a probe of supersymmetric scale

## 所在地

- 住所：〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5

- 電話：04-7136-3102 (総務係)

## 交通

- つくばエクスプレス柏の葉キャンパス駅からバス利用の場合  
柏の葉キャンパス駅西口1番乗場から東武バス  
「流山おおたかの森東口」「江戸川台駅」行きに乗り約10分、  
「東大前」で下車

- 柏の葉キャンパス駅から徒歩の場合  
柏キャンパスへは約25分

- JR柏駅からバス利用の場合  
柏駅西口2番乗場から東武バスで  
「国立がんセンター」「江戸川台駅東口」行きに乗り約25分、  
「柏の葉公園」経由の場合は、「東大前」で下車  
「税関研修所」経由の場合は、「国立がんセンター」で下車

## Location

- Address: 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba Prefecture, 277-8582, Japan

- Tel: +81-4-7136-3102

## Access

- Kashiwanoha Campus Sta. of Tsukuba Express Line  
→Tobu bus for “West Exit of Nagareyama Otakano-mori Sta” or “Edogawadai Sta” (approx. 10min)

- 25min.walk from Kashiwanoha Campus Sta

- Kashiwa Sta. of JR Joban Line → Tobu Bus for “National Cancer Center” or “West Exit of Kashiwa Sta” (approx. 10 min)

- 5 min. by car from Joban Freeway’s “Kashiwa Exit”

- About 3 min. by car from Route 16 (Entrance of Toyofuta Industrial Park)

