

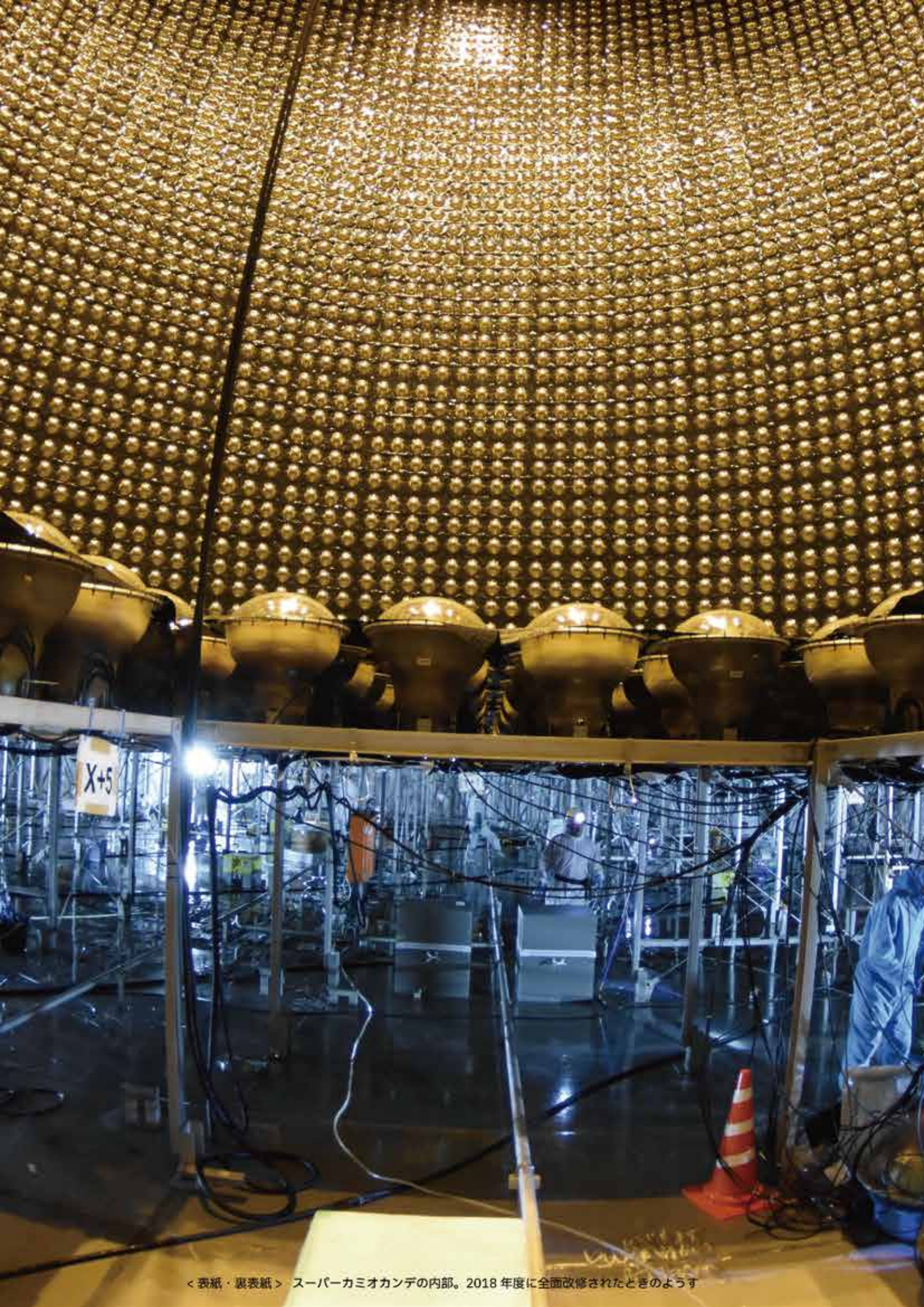
東京大学

宇宙線研究所

2024年
要覧

ICRR CATALOGUE 2024

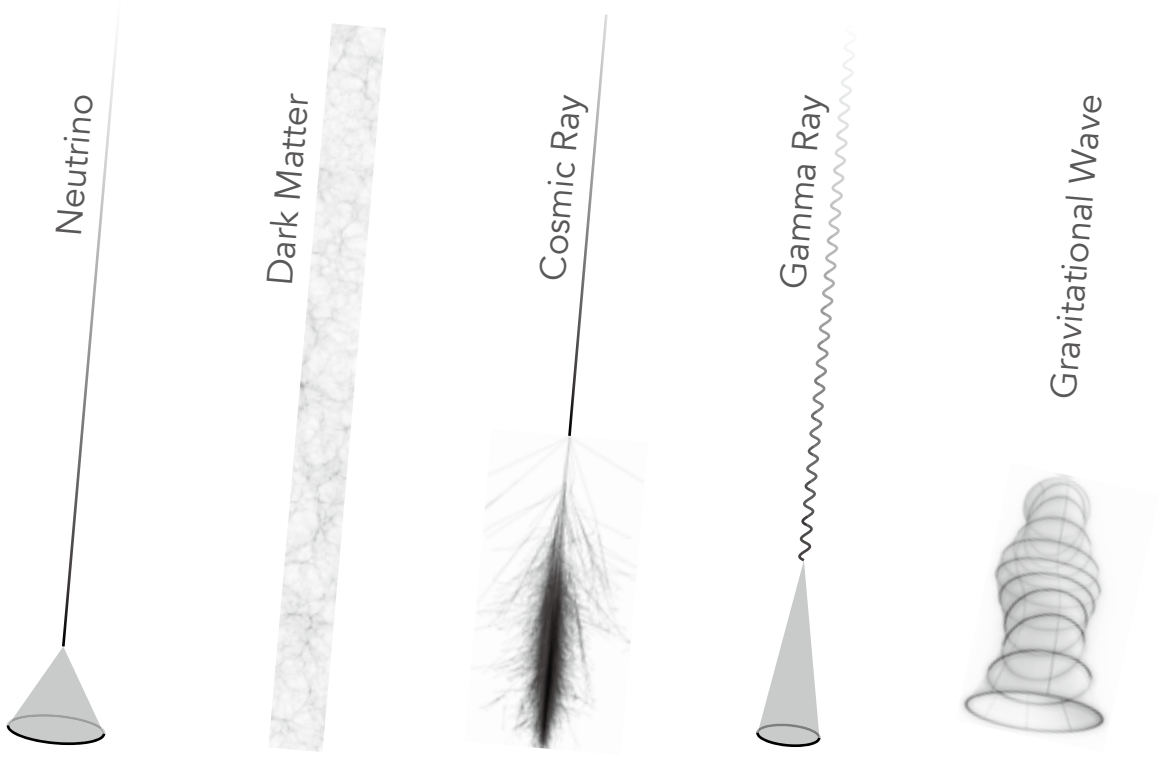
Institute for Cosmic Ray Research
The University of Tokyo



< 表紙・裏表紙 > スーパーカミオカンデの内部。2018 年度に全面改修されたときのようす

Explore
the Universe and Elementary Particles
with “Multi-Messengers”

東京大学宇宙線研究所は、
宇宙から飛来する「マルチメッセンジャー」の観測をとおして、
もっとも大きな宇宙と、もっとも小さな素粒子の神秘にせまります。





1

研究内容について　*RESEARCH PROJECT*

04 所長あいさつ — From the Director
08 宇宙線とは？ — What are Cosmic Rays?

宇宙ニュートリノ研究部門 — *Neutrino and Astroparticle Division*
12 スーパーカミオカンデグループ — Super-Kamiokande Group
16 T2K グループ — T2K Group
20 ハイパーカミオカンデグループ — Hyper-Kamiokande Group
24 XMASS / XENON グループ — XMASS / XENON Group

高エネルギー宇宙線研究部門 — *High Energy Cosmic Ray Division*
28 チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ — Cherenkov Cosmic Gamma Ray Group
32 テレスコープアレイグループ — Telescope Array Group
36 チベットグループ — Tibet ASγ Group
40 高エネルギー天体グループ — High Energy Astrophysics Group

宇宙基礎物理学研究部門 — *Astrophysics and Gravity Division*
44 重力波グループ — Gravitational Waves Group
48 観測的宇宙論グループ — Observational Cosmology Group
52 理論グループ — Theory Group

2

実験施設について　*FACILITIES*

58 主な実験施設、附属施設など — Experimental Facilities
60 神岡宇宙素粒子研究施設 — Kamioka Observatory
61 重力波観測研究施設 — KAGRA Observatory
62 カナリア高エネルギー宇宙物理観測研究施設 — High Energy Astrophysics facility in Canarias
63 宇宙ニュートリノ観測情報融合センター — Research Center for Cosmic Neutrinos
64 乗鞍観測所 — Norikura Observatory
65 明野観測所 — Akeno Observatory
66 チャカルタヤ宇宙物理観測所 — Chacaltaya Observatory

3

研究所について　*INFORMATION*

70 沿革 — History
72 年表 — Timeline
75 機構 — Organization
76 委員会 — Committees
78 教職員 — Staff
79 予算 — Budget
80 共同利用研究・教育 — Inter-University Research and Education
81 国際交流 — International Exchange
82 広報 — Public Relations
84 成果発表 — Achievement Reports
85 受賞歴 — Awards
87 アクセス — Access


東京大学
宇宙線研究所所長
荻尾 彰一

「宇宙線」とは、宇宙を飛び交う高いエネルギーの粒子ですが、1912 年に発見されて以来、その起源と加速メカニズムの解明を目指して多くの研究が進められてきています。当初の宇宙線研究においては、「宇宙線」とは陽子やヘリウム原子核などの荷電粒子を指す狭い意味の言葉でしたが、近年ではニュートリノ、ガンマ線、重力波（重力子）といった電荷をもたない素粒子も「宇宙線」に加えられ、幅広い研究が進められてきています。宇宙線は、地球の規模以上の長距離を飛んできたり、極めて高いエネルギーまで加速されていたりするため、地上の加速器実験ではできないような素粒子に関する研究も行うことができます。宇宙線研究所では宇宙線を使って、宇宙と素粒子の根源的な研究を行っています。

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 年に旧原子核研究所の一部の部門の移管とあわせて現在の名称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。研究所には、宇宙ニュートリノ、高エネルギー宇宙線、宇宙基礎物理学の各研究部門があり、研究スタッフはどれかの研究部門に所属して研究を行っています。研究所は東大の柏キャンパス内にありますが、それと共に研究所は国内に 4 か所の観測施設（神岡宇宙素粒子研究施設、重力波観測研究施設（以上、岐阜県飛騨市の神岡地下）、乗鞍観測所（乗鞍岳 2,770m 地点）、明野観測所（山梨県の明野高原））と 1 つの研究センター（宇宙ニュートリノ観測情報融合センター（柏））、海外に 4 か所の観測拠点（チベット·ヤンパーチンの高原（4,300m）、アメリカ·ユタの砂漠、スペイン・カナリア諸島ラパルマ（カナリア高エネルギー宇宙物理観測研究施設）、ボリビア・チャカルタヤ山）を持っています。このように研究所では観測しようとする宇宙線の観測に最も適した場所を世界中から探し、そこで研究を行っています。宇宙線研究所は国際共同利用·共同研究拠点として、毎年 150 件以上の共同利用研究が国内外の宇宙線関連研究分野の研究者の方々によって行われてきています。したがって、宇宙線研究所の研究成果は国内外の宇宙線研究者との共同研究の成果であると言えます。これらの共同研究を通して素晴らしい成果があがっています。

宇宙線研究所での近年の研究では、感度の高い観測を行うために、大型の装置を使った観測が行われています。神岡宇宙素粒子研究施設では、地下 1,000m に設置された 5 万トンの大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置（スーパーカミオカンデ）により観測を行っており、宇宙線が大気中で作るニュートリノや太陽からのニュートリノを観測するとともに、東海村で人工的に作ったニュートリノを神岡で受ける実験（T2K 実験）も進めています。同じ神岡の地下では、3km の腕の長さを持つレーザー干渉計（大型低温重力波望遠鏡（KAGRA））が重力波の観測を目指して感度を向上させています。スペインのラパルマ島には超高エネルギーガンマ線をとらえるためのチェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA）が建設されており、直径 23m の大口径望遠鏡 1 号基が既に観測を開始しています。アメリカのユタ州には約 700km^2（約 3,000 km^2 に拡張中）に粒子検出器を配置して、最も高いエネルギーを持つ宇宙線を探る研究を行っています。このように宇宙線研究所では驚くほど大規模な実験装置によってさまざまな宇宙線観測を行っています。

スーパーカミオカンデ（SK）は、1998 年に「大気ニュートリノ振動の発見」という大きな成果をあげ、その研究を主導した梶田隆章先生は 2015 年にノーベル物理学賞を受賞されました。その後も SK は 2001 年に「太陽ニュートリノ振動の発見」、2011 年に「T2K による第 3 の振動の発見」といった成果をあげ、ニュートリノの質量、混合を解明してきました。あと「CP 位相角」が測定されれば、（質量の絶対値を除き）ニュートリノの質量・混合構造の全貌が解明されます。この CP 位相角は単なる素粒子の性質にとどまらず、それが有限値を持てば、なぜこの宇宙には「物質」は存在するが「反物質」が存在しないのかという「物質優勢の謎」を解くことができると考えれています。CP 位相角の測定のためには、スーパーカミオカンデの約 10 倍となる次世代の測定器（ハイパーカミオカンデ）が必要です。そのため、宇宙線研究所では、カブリ数物連携宇宙研究機構、理学系研究科、地震研究所と共に次世代ニュートリノ科学連携研究機構を立ち上げ、この組織を中心にハイパーカミオカンデを推進していくことになりました。2027 年の実験開始を目指して、次世代ニュートリノ科学連携研究機構は、共同ホスト機関である高エネルギー加速器研究機構と協力し、ハイパーカミオカンデの建設を進めています。

次世代ニュートリノ科学連携研究機構に対して、ニュートリノ・ガンマ線・重力波・宇宙線・電磁波（電波・光赤外・X 線）による多様な観測を連携したマルチメッセンジャー天文学の推進を目標に加え、高エネルギー突発天体事象の連携観測研究体制を加えた新しい組織、「次世代ニュートリノ科学·マルチメッセンジャー連携研究機構」へと発展させ、2023 年 10 月から新組織が動き出しました。

宇宙線研究所にとって重要な科学的成果を出し続けていくことが大切です。そのためには私たちの研究をより広い研究者コミュニティーや一般社会の方々に知ってもらうことが大切だと思います。本冊子は宇宙線研究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。

From the Director

"Cosmic rays" are particles that travel across the universe with high energy. Since they were discovered in 1912, various research has been carried out with the aim of elucidating their origins and acceleration mechanisms. In the initial cosmic ray research, "cosmic rays" had a narrow definition; charged particles such as protons and helium nuclei, but in recent years, uncharged elementary particles such as neutrinos, gamma rays and gravitational waves (gravitons) are also considered to be "cosmic rays," broadening the scope of cosmic ray research. Since cosmic rays travel over long distances, larger than the size of the earth, and are accelerated to extremely high energies, they facilitate research on elementary particles that cannot be conducted in accelerator experiments on the ground. ICRR conducts fundamental research on the universe and elementary particles using cosmic rays.

The history of ICRR began with a cosmic ray observation hut called Asahi Hut on Mt. Norikura at an altitude of 2,770m. This small hut, built in 1950 with science project funding from the Asahi Shimbun, 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 was then reorganized to become 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.

ICRR has three research divisions—the Neutrino and Astroparticle division, the High Energy Cosmic Ray division, and the Astrophysics and Gravity division—in order to conduct these scientific activities effectively. ICRR has four observatories in Japan; Kamioka Observatory (underground in Kamioka, Gifu Prefecture), KAGRA Observatory (underground in Kamioka, Gifu Prefecture), Norikura Observatory (2,770 meters alt., Mt. Norikura, Gifu Prefecture) and Akeno Observatory (Yamanashi Prefecture), and one research center (Research Center for Cosmic Neutrinos, Kashiwa, Chiba Prefecture). In addition, there are four observation facilities outside Japan, located in Utah, USA, Yangbajing in Tibet, China, High Energy Astrophysics Facility in Canarias (La Palma, Spain), and Chacaltaya, Bolivia. ICRR is an “International Joint Research/Usage Center,” which is a system of the Japanese government, and over 150 inter-university research programs have been carried out at ICRR by cosmic ray researchers in Japan and other countries. We note that most of the scientific outcomes from this institute are the results of the collaborative efforts by researchers from many institutions around the world. Great results have been achieved through this joint research.

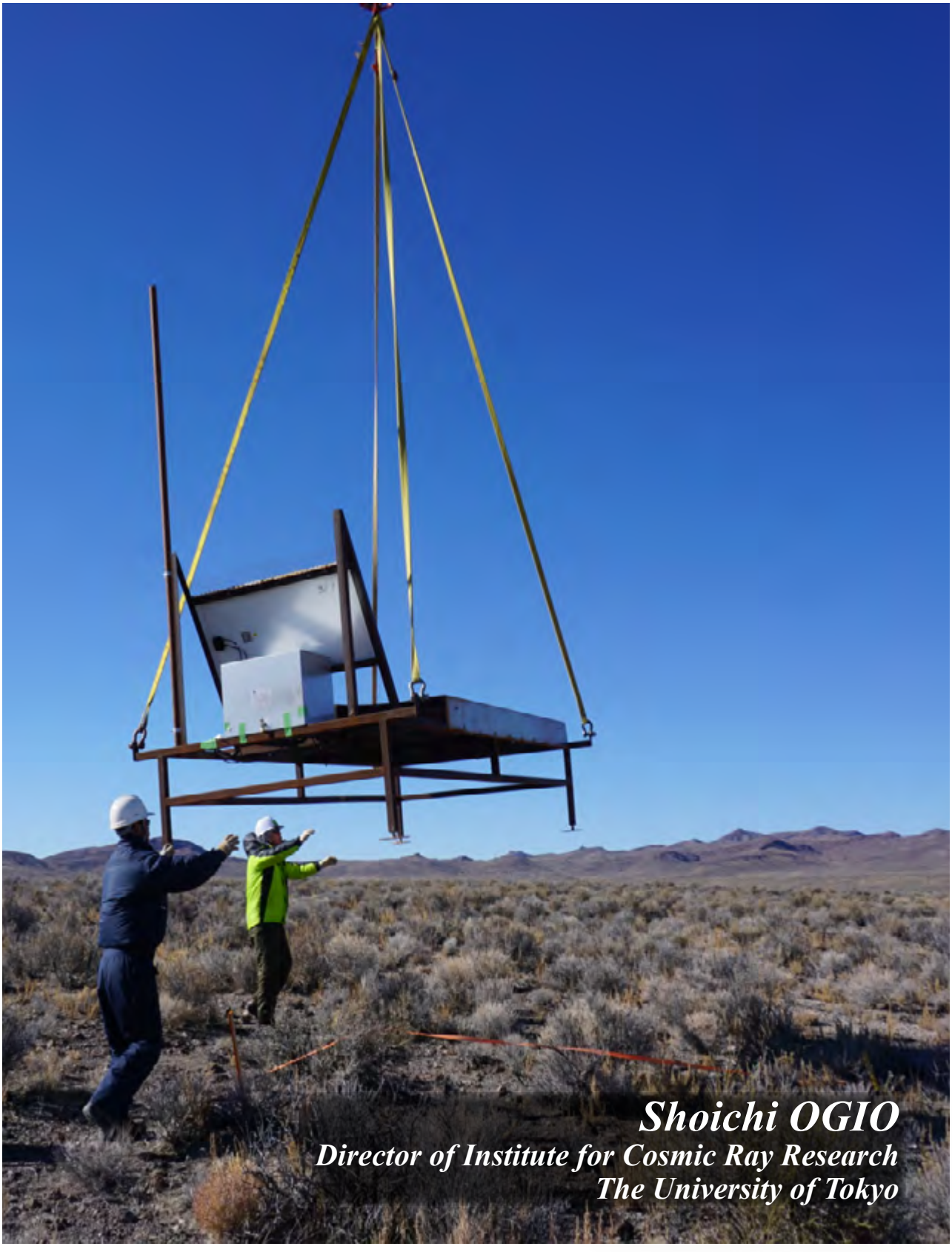
In recent cosmic ray research at ICRR, observations using large-scale equipment have been carried out in order to make highly sensitive observations. At Kamioka Observatory, observations are being carried out using a 50,000-ton water Cherenkov detector (Super-Kamiokande) installed 1000 m underground, observing neutrinos produced by cosmic ray interactions in the atmosphere and neutrinos from the sun. In addition, an artificial neutrino experiment from Tokai to Kamioka (T2K) is also conducted. In the same mountain at Kamioka, a laser interferometer (Large-scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope (KAGRA)) with an arm length of 3 km was constructed for gravitational wave observation. Large-sized Telescopes (LSTs) with a diameter of 23 m are being constructed at La Palma, one of Spain’s Canary Islands for the Cherenkov Telescope Array (CTA) project for the observation of very high energy gamma rays. The first telescope has already started observations. In Utah, USA, particle detectors are placed on about 700 square kilometers (expanding to about 3000 square kilometers) to search for the highest energy cosmic rays. In this way, observations of various cosmic rays have been conducted with surprisingly large-scale experimental equipment in ICRR.

Super-Kamiokande (SK) discovered atmospheric neutrino oscillations in 1998 and Professor Takaaki Kajita, who led the research, received the Nobel Prize in Physics in 2015. Since then, SK has achieved results such as "discovery of solar neutrino oscillation" in 2001 and "discovery of third oscillation by T2K" in 2011, and has elucidated the mass and mixing of neutrinos. If the "CP phase angle" is measured, the whole picture of the neutrino mass-mixing structure will be clarified (except for the absolute value of mass). This CP phase angle is more than just a property of elementary particles. If it has a finite value, it solves the "matter-dominant mystery" of why "matter" exists but "antimatter" does not exist in the universe. To measure the CP phase angle requires a next-generation experiment (Hyper-Kamiokande), which is about ten times larger than Super-Kamiokande. In order to realize Hyper-Kamiokande, ICRR and Kavli-IPMU, the school of Science and the Earthquake Research Institute of The University of Tokyo, have created a new organization, called “Next-Generation Neutrino Science Organization.” The construction of Hyper-Kamiokande facilities is steadily in progress lead by The University of Tokyo and KEK. We will start the experiment in 2027.

In October 2023, the Next-Generation Neutrino Science Organization was reorganized into the “Next-generation Neutrino Science and Multi-messenger Astronomy Organization” to expand our research activities into the field of multi-messenger astronomy. The new NNSO is going to promote the multi-messenger astronomy with our colleagues to coordinate collaborative research with disparate “messengers”, multi-wavelength and multi-

-particle signals such as neutrino, gamma rays, gravitational wave, cosmic rays and electro-magnetic waves (Radio, Optical/Infrared, X Ray)..

It is important for ICRR to continue delivering scientific results of high standards. For that purpose it is important to share our scientific achievements with the scientific community and the general public. This booklet summarizes the present activities at ICRR for such readers. We hope that it serves its purpose.



Shoichi OGIO
Director of Institute for Cosmic Ray Research
The University of Tokyo



オーストリアの科学者ヘスは気球に乗って大空に飛び立ち、放射線を測定した
Austrian physicist Victor Hess ascended in a balloon up to the sky and measured radiations.

宇宙から降り注ぐミクロな粒子

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

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

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

1000 億の粒の雨「空気シャワー」

1936 年、宇宙線の線量は高度 15 km ほどでピークとなり、それより高い場所では急速に減少することが測定されました。これは何を意味しているのでしょうか。つまり、これまで検出されていた宇宙線は、宇宙から地球にやってきた高エネルギーの宇宙線が地球の大気と衝突して生じた粒子だったのです。宇宙に起源を持つものを「一次宇宙線」、大気と衝突して生じる大量の粒子を「二次宇宙線」と呼びます。

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

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

宇宙からのメッセンジャー

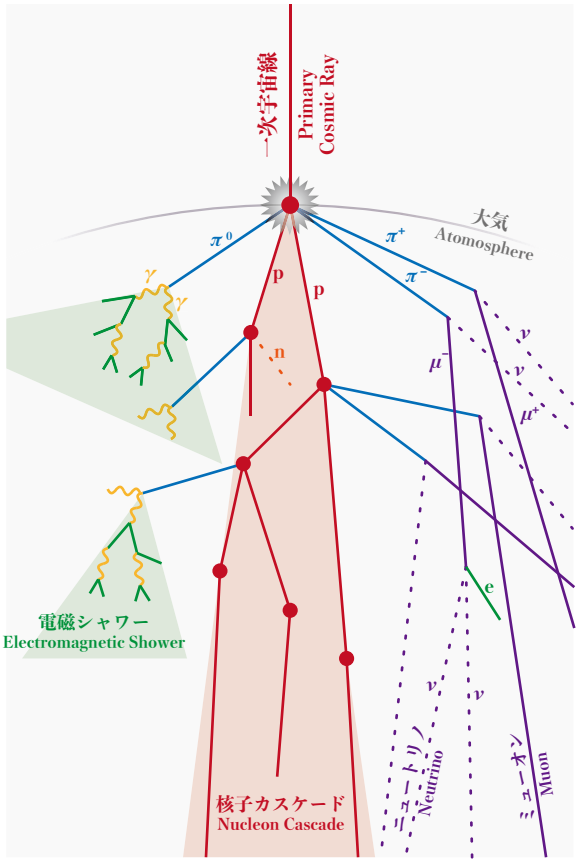
大きなエネルギーを持つ一次宇宙線は、太陽系の外からやってきます。空気シャワーの観測により、宇宙線のエネルギーは 10 の 8 乗電子ボルトから 10 の 20 乗電子ボルトと、大きな幅があることが分かりました。最も高いエネルギーを持つ宇宙線は、加速器実験で人工的に作り出せる最大のエネルギー（14 TeV）の 1000 万倍にもなります。いったいどのように粒子をこんなエネルギーにまで加速しているのでしょうか？ まだ謎に包まれています。

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

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

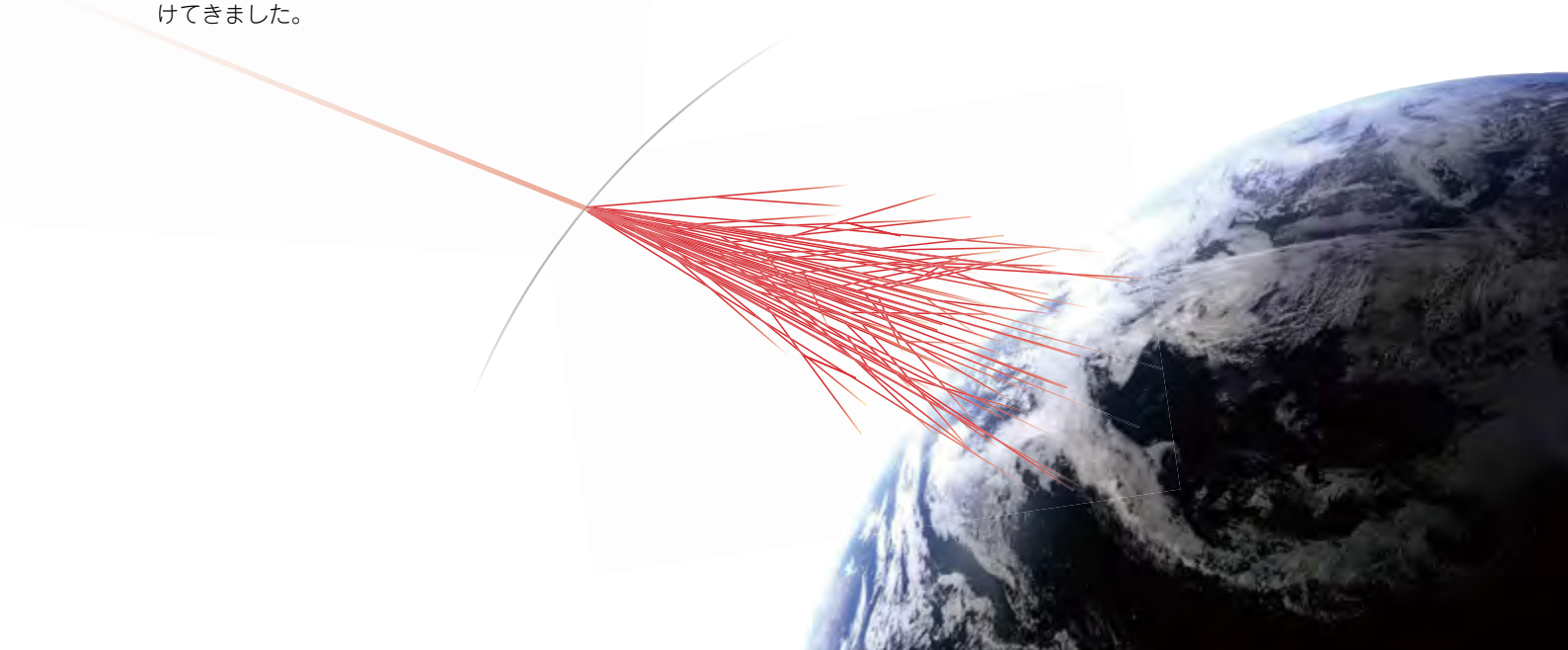
ニュートリノ、重力波、ガンマ線……「マルチメッセンジャー」で宇宙を探査

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



宇宙から降り注ぐ放射線（一次宇宙線）が、大気中の原子核と衝突し、二次宇宙線として「空気シャワー」を生み出す。
Radiations originating from space (primary cosmic ray) produce air showers, as secondary cosmic ray, in collisions with air molecules.

- 陽子 Proton
- 中性子 Neutron
- ガンマ線 Gamma ray
- 電子 Electron
- パイ中間子 Pion
- ミューオン Muon
- ニュートリノ Neutrino



メッセンジャーのひとつの重力波は、アインシュタインが 100 年前に考えた一般相対性理論が提唱する物理現象のうち、観測できていなかった唯一の現象でした。しかし、ついに 2016 年 2 月、人類史上初めて重力波を直接検出したと発表がありました。人類は電磁波と素粒子に加え、新たに宇宙を調べる扉を開いたのです。宇宙線研究所でも、大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」の建設を 10 年がかりで進め、2019 年 10 月に完成。2020 年 2 月から本格運転を開始しました。重力波とは、非常に重い天体が動くときに生じる空間のゆがみが、宇宙空間を波のように伝わる現象のことです。重力波の観測により、重たい天体が合体する様子や、宇宙初期に急激に膨張したインフレーションなど、原子核や素粒子では捉えられない、最深部の宇宙の姿を直接観察する可能性を秘めています。私たちは今後、LIGO(米国)、Virgo(欧州) に関わる研究者との共同観測により、多くの重力波を観測し、重力波天文学を構築していくことを楽しみにしています。

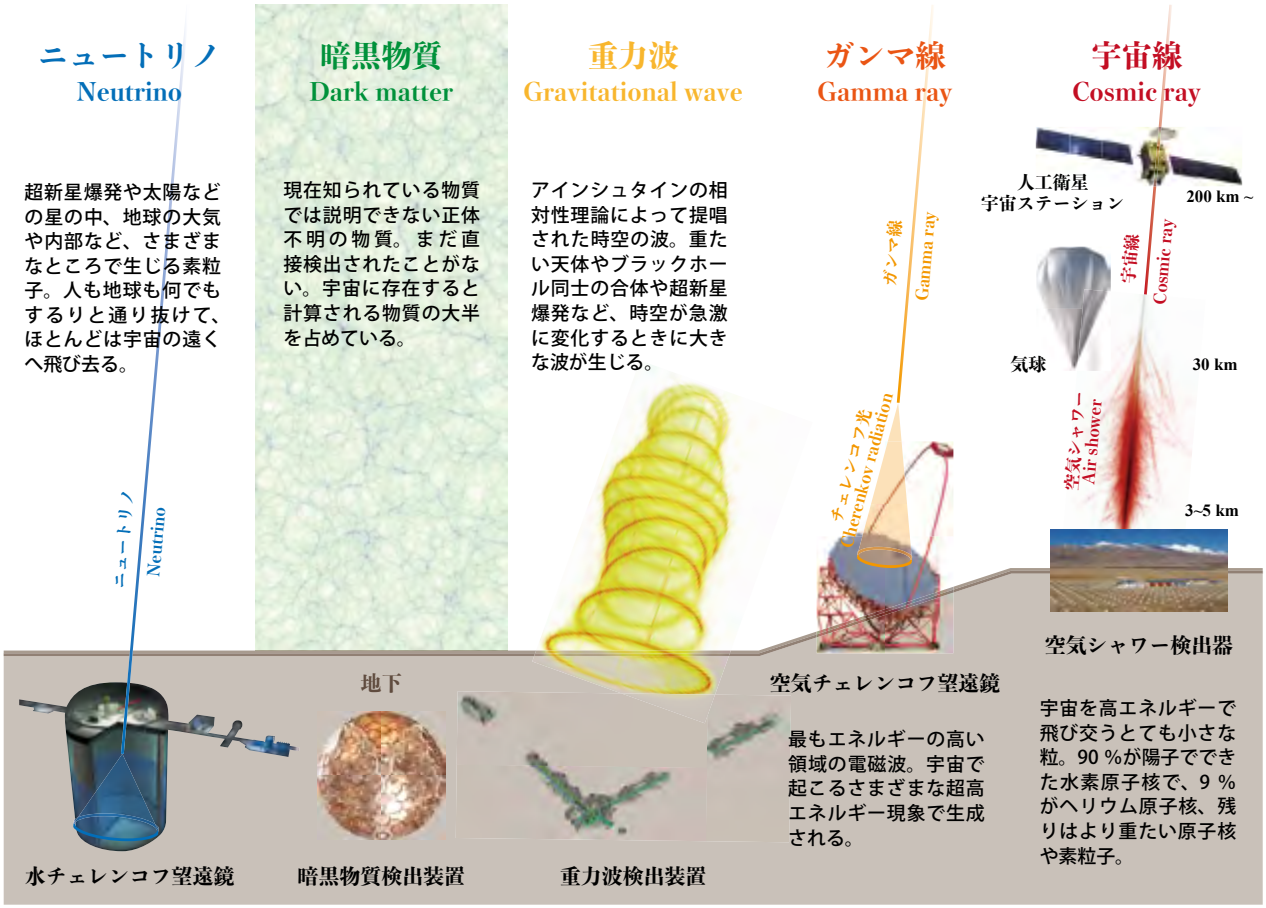
宇宙線研究所ではこのように、宇宙の謎を解くために多角的なアプローチを用いており、「マルチメッセンジャー」と呼んでいます。宇宙線研究所は、多様な手段を用いて一括して宇宙線研究に挑むユニークな研究機関です。

High-Energy Particles from Space

In 1912, an Austrian physicist, Victor Hess took a balloon flight in order to investigate radiation intensity in the sky. In those days, high-energy radiation was thought to be coming from the Earth and he predicted radiation intensity would decrease with altitude. But his experiment showed that radiation intensity increased as he went up to the sky. Then the question arose: Is radiation entering the atmosphere from above as well? This is the very beginning of cosmic ray research.

Cosmic rays are high-energy particles that strike the Earth from all directions. They are likely to originate somewhere in outer space and travel to the Earth at almost the speed of light. Cosmic rays pass through our bodies every second and some of them even penetrate deep into solid rock.

They are the same nuclei and particles which compose the matter we can see every day. About 90 percent of the cosmic rays are hydrogen nuclei (namely protons), 9 percent of them are helium nuclei, and the rest are heavier nuclei and elementary particles such as electrons and positrons.



宇宙線を観測するさまざまな手段
Methods of cosmic ray detection

Rain of Hundred Billions of Particles, "Air Shower"

In 1936, it was found that the intensity of cosmic radiation reached a peak at about 15 kilometers in altitude and dropped sharply with increasing altitude. Why did it happen? In fact, the detected radiation turned out to be secondary particles produced by collisions between high-energy cosmic rays from space and the atmosphere of the Earth. Cosmic rays originating in space are called "primary cosmic rays," and the others are called "secondary cosmic rays."

A primary cosmic ray arriving at the Earth's atmosphere to the Earth collides with an air molecule, which breaks apart the nucleus of the molecule and produces multiple high-energy particles called "mesons." Then these particles fly apart at almost the speed of light, and further strike the surrounding air molecules, producing more particles. The chain reaction quickly grows and most of the product particles soon decay into many types of lighter particles such as muons, neutrinos, gamma-rays, electrons, and positrons. Finally, the primary cosmic ray develops into hundreds of billions of secondary particles, pouring down on an area covering several hundred square meters on the ground. This cascade of particles is called an "air shower." Muons, mesons, and positrons were discovered in air showers. Cosmic ray research made a great contribution to elementary particle physics in its early history.

Messenger from Space

High-energy primary cosmic rays come from outside the solar system. Observation of air shower tells us the fact that primary cosmic rays striking the Earth's atmosphere have a very wide energy spectrum, ranging from 10^8 to 10^{20} electron volts. Extremely high energy cosmic rays have ten million times as much energy as the largest man-made particle accelerator can produce (14 TeV). How cosmic rays can be accelerated to such extremely high energy is still a mystery.

Before arriving at the Earth, low-energy cosmic rays are bent many times by galactic magnetic fields. On the other hand, extremely high-energy cosmic rays arriving at the Earth experience less bending in the magnetic fields, and therefore they travel straight to the Earth. That's the reason why we can find out the right directions from which they arrive. The Ultra-High-Energy cosmic rays ($>10^{19}$ eV) are coming only about once a year on an area covering hundred square kilometers on the Earth. Just for comparison, the area inside the JR Yamanote Line in Tokyo is approximately 63 square kilometers.

According to the recent studies, a supernova explosions, which occurs during the last stellar evolutionary stages of the life of a massive star, is likely to be among such sources of cosmic rays. One of the main purposes of cosmic ray research is to understand the mechanisms of very high-energy astrophysical events far from the Earth, with which we might be able to uncover the mysteries of the evolution of the Universe. Cosmic rays are "messenger" that convey messages from the universe out of our reach, with a great potential to bring answers to questions that are asked in a wide range of fields in physics and astronomy.

Gamma-rays, Neutrinos, and Gravitational Waves, A Unique Research Institute Exploring Universe with "Multi-Messenger"

Not only the nucleus is a messenger with information from space, but also the followings are such messengers: gamma-rays (high energy photons), neutrinos (elusive particles most of which pass through matter without interaction), gravitational waves (ripples in the fabric of space-time), and dark matter (as-yet-unidentified matter). Many technologies have been developed for the detection of gamma-rays and neutrinos, and new fields of gamma-ray astronomy and neutrino astronomy have been opened to researchers.

The existence of gravitational waves was predicted by Albert Einstein 100 years ago in his theory of general relativity and has long been the final missing piece that completes the discovery of what he predicted on the basis of this theory. In 2015, LIGO (USA) and Virgo (Europe) detected gravitational waves for the first time in human history. It was a giant step for humankind because we acquired a novel probe for astronomical observations in addition to electromagnetic waves and particles. Also in Japan, Large-scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope "KAGRA", hosted by ICRR, KEK and NAOJ, was completed in October 2019 after 10 years of construction and started its operation in February 2020. Gravitational waves are ripples in space-time which propagate at the speed of light. Detection of gravitational waves will reveal aspects of the Universe that are, with the traditional probes, unobservable such as mergers of black-holes and the birth of the Universe. We are looking forward to seeing the signals of gravitational waves and promoting gravitational wave astronomy hand in hand with researchers of both LIGO and Virgo.

ICRR explores the frontier of the cosmic ray physics, astrophysics and elementary particle physics based on the coordinated observation and interpretation of "multi-messenger" signals such as cosmic rays, gamma rays, neutrinos, gravitational waves, and dark matter. ICRR at The University of Tokyo continues to be a unique research institute that hosts a comprehensive array of leading cosmic ray research programs.

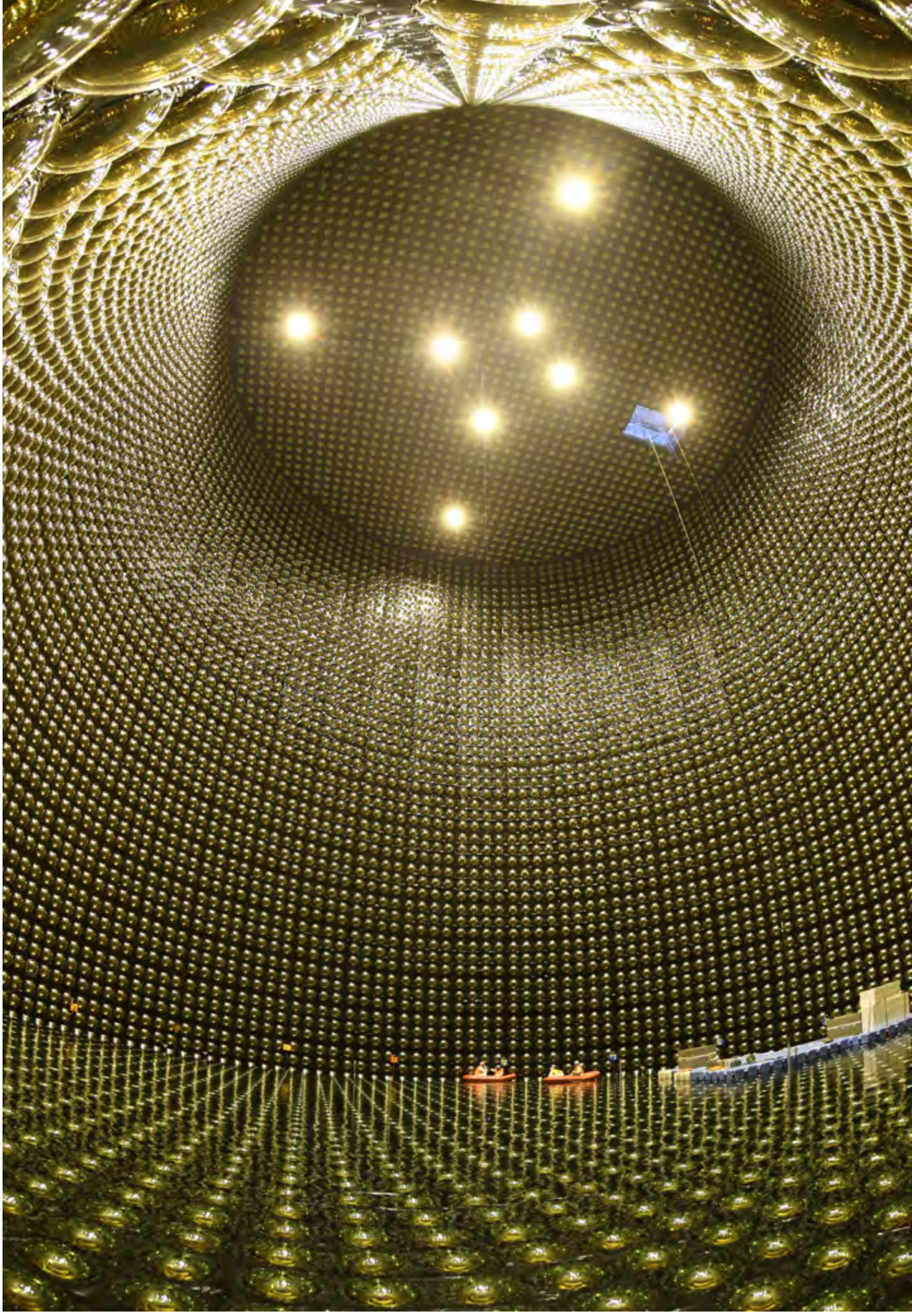


図1 スーパーカミオカンデの内部
Inside of the Super-Kamiokande Detector

研究の目的

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

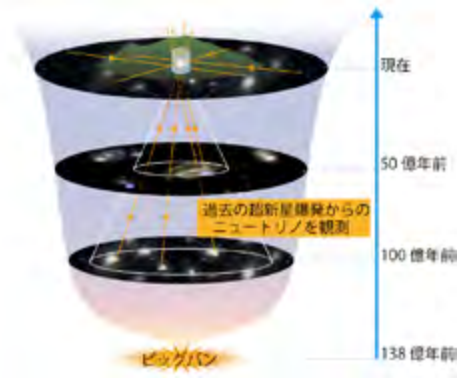
実験装置

スーパーカミオカンデは岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山の地下 1000 メートルにある、5 万トンの水を満たした円筒形のタンクです（図 1）。荷電粒子が水中を超光速で走るときに発せられる、チェレンコフ光という青白い微かな光を捕えるため、タンク内面には直径 50 cm の光電子増倍管（センサーの一種）が約 1 万 1000 本取り付けられています。平成 8 年 4 月 1 日に実験を開始し、現在まで 20 年以上続けています。2020 年に、純水中にガドリニウムを導入し、中性子の同時計測能力を大幅に向上させるアップグレードを実施、新生スーパーカミオカンデとして稼働を開始しました。

研究内容

大気ニュートリノ観測によるニュートリノ質量の発見

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



太陽ニュートリノ観測とニュートリノ振動

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

陽子崩壊探索実験

物質を構成する陽子は、陽子の仲間（バリオン）の中で最も軽いので、未来永劫壊れることなく安定していると考えられてきました。しかし、素粒子の大統一理論は、陽子が他の種類（中間子や電子の仲間）のより軽い粒子へ壊れることを予言しています。予言される陽子の寿命は宇宙の年齢よりもはるかに長いのですが、たくさんの陽子を集めてその中のいくつかが壊れれば、長い時間を待たなくても陽子の寿命を見積もることができます。スーパーカミオカンデの中には 5 万トンの純水が蓄えられていますが、この有効体積中には 7×10^{33} 個の陽子が含まれています。20 年以上も観測を継続していますが、陽子が壊れた証拠はまだ得られていません。陽子が壊れなかったという観測結果から、陽子の寿命は少なくとも 10^{34} 年以上と推定されています。もし陽子崩壊が観測されれば、素粒子の大統一理論研究への突破口になります。最も有力な壊れ方の候補は、陽子が π^0 中間子と陽電子（電子の反粒子）に壊れるモードです。スーパーカミオカンデでは 3 つの電子型のリングが観測されるはずです（図 4）。

超新星背景ニュートリノ探索

宇宙の初期から起きてきた超新星爆発によって蓄積されたニュートリノ（超新星背景ニュートリノ）は、これまでもスーパーカミオカンデタンク内で年に数回程度反応していたはずですが、ノイズとの区別ができませんでした。しかし、2020 年から中性子捕獲に優れるガドリニウムを純水に導入したことで、中性子の同時計測能力が大幅に向上しました。これにより反電子ニュートリノによる反応を選び出すことが可能となりました。2022 年度までにガドリニムの濃度を 0.03% まで上昇させ、75% の中性子捕獲効率を実現しており、7 ～ 8 年の観測で超新星背景ニュートリノの世界初観測が可能となると期待されます。

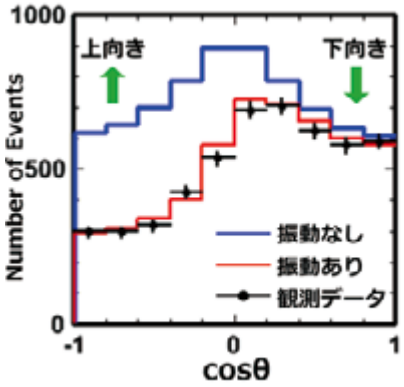


図 2　大気ニュートリノの天頂角分布。上向きニュートリノの振動の証拠
Zenith-angle distribution of atmospheric neutrinos, showing evidence of oscillation for upward-going neutrinos

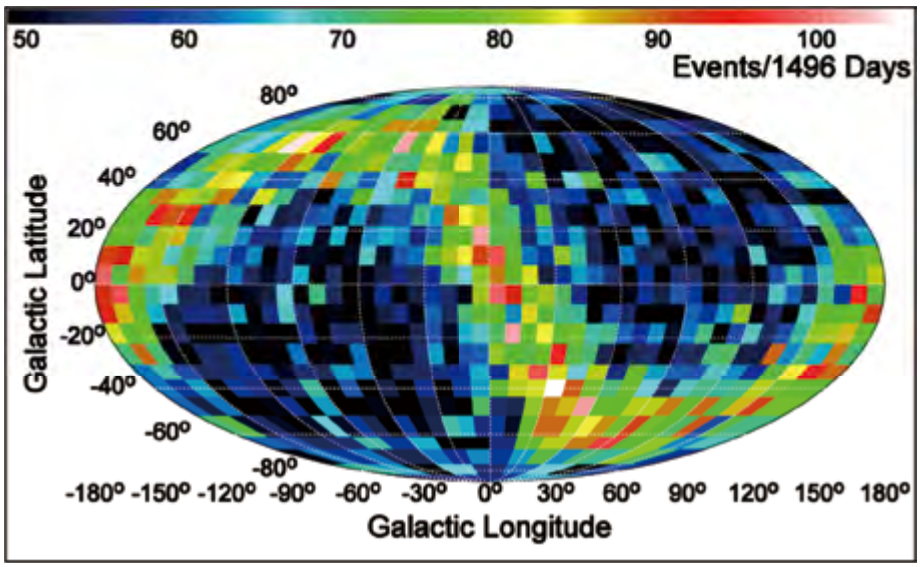


図 3　ニュートリノで見た太陽の軌跡
Track of the Sun seen by neutrinos

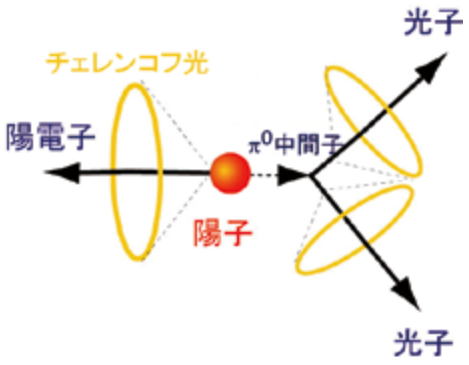


図 4　陽子が陽電子と π^0 中間子に崩壊する様子
A proton decays to a positron and a neutron pion

Super-Kamiokande





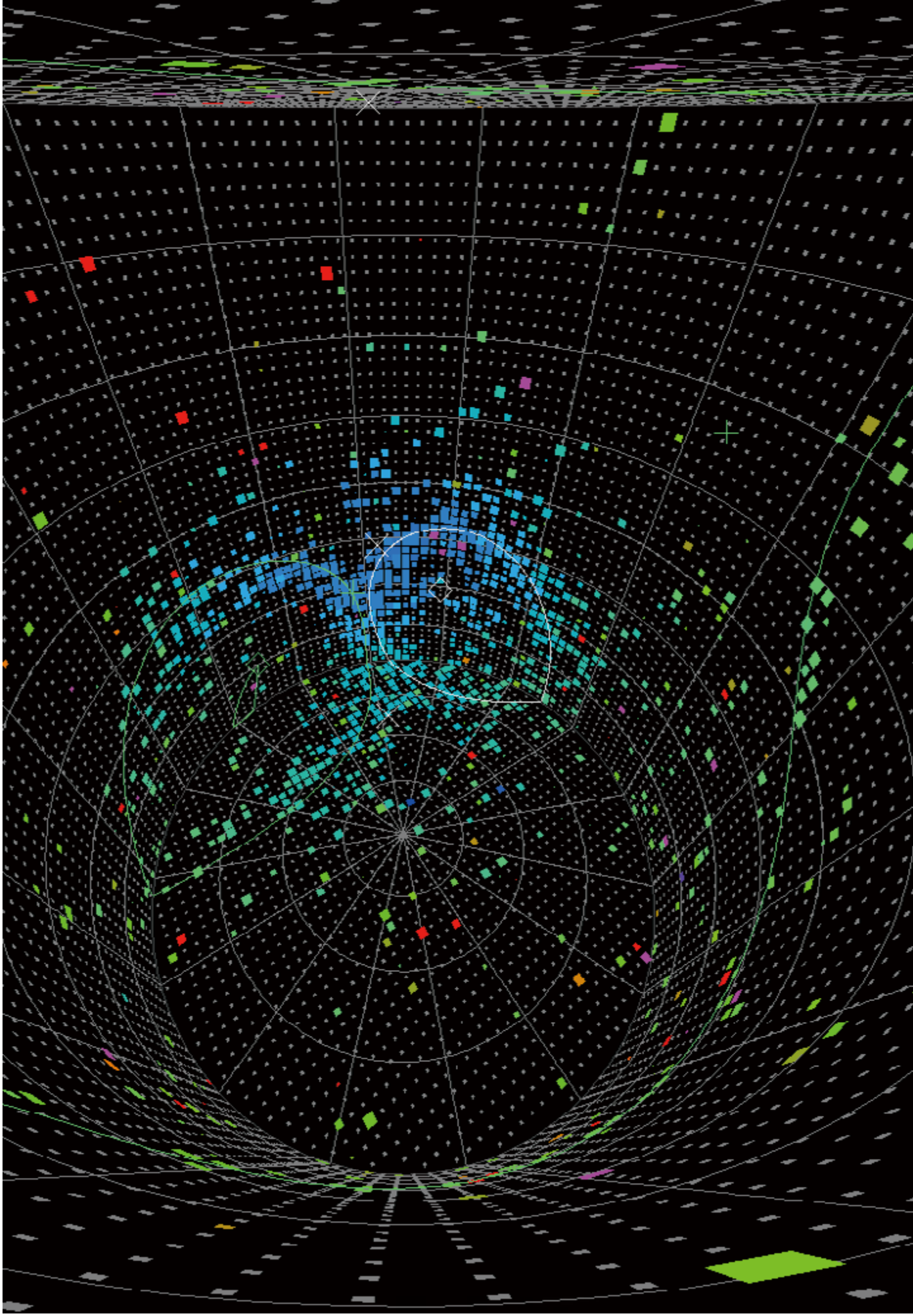


The purpose of Super-Kamiokande (SK) is to study elementary particle physics and astrophysics through neutrino detection and nucleon decay searches.

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

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

The neutrinos emitted from all of the supernovae since the onset of stellar formation have suffused the universe. This thusfar unobserved flux is referred as the “relic” supernova neutrinos. The flux of the supernova relic neutrinos is expected to be several tens per square centimeter per second. In order to separate these signals from the much more common solar and atmospheric neutrinos and other backgrounds, SK added water soluble gadolinium (Gd) salt to the pure water and 0.03% Gd concentration has achieved in 2022. This upgrade enables it to identify low energy anti-neutrinos for the world's first observation of the relic supernova neutrinos via inverse beta-decay. Also, this upgrade helps in improving the capability to study the ordering of the neutrino mass, matter-antimatter asymmetry and proton decay.



T2K

研究の目的

◆ミューオンニュートリノビームからの電子ニュートリノの出現現象の精密測定を通して、θ_{13}の値の測定やニュートリノと反ニュートリノの性質の違い (CP 対称性の破れ) を探索する。

◆ミューオンニュートリノ消失の観測により、混合角θ_{23}及び質量差Δm^2_{32}を精密に測定する。

実験装置

T2K 実験では、東海村の J-PARC に設置されている大強度陽子加速器により生成する高輝度ニュートリノビームを用います。また振動後のニュートリノを観測するために、ニュートリノ源から 295km 離れた岐阜県飛騨市にあるスーパーカミオカンデを用いています。T2K 実験用ニュートリノビームラインのデザインには、オフアクシス (非軸) ビームというアイデア（Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment, BNL E889proposal, (1995)）が取り入れられました。ビームの方向をスーパーカミオカンデからわざとずらすことにより、エネルギーの広がりの小さいニュートリノビームを効率的に生成することが可能となります。T2K 実験開始時はスーパーカミオカンデにおいてニュートリノ振動の効果が最大となるよう、ビームの方向がスーパーカミオカンデから 2.5 度ずれた方向となるように機器が設置されました。このとき、スーパーカミオカンデにおけるニュートリノエネルギーの中心値はおよそ 650MeV となります。生成するニュートリノはほぼミューオンニュートリノであり、電子ニュートリノの混入はエネルギーピーク近傍で 0.4% 程度しかないと見積もられています。この T2K ニュートリノビームラインが生成するビームは、K2K 実験と比較して 2 桁近い大強度を達成することを予定しています。スーパーカミオカンデにおいては、2008 年にデータ収集電子回路装置を更新し、安定した高精度観測ができるように準備を行いました。また加速器ニュートリノビームの時間情報をリアルタイムに転送し、スーパーカミオカンデの T2K ニュートリノ事象選択を行うシステムを作りました。

研究内容

ニュートリノと反ニュートリノの性質の違いを探索

J-PARC の陽子加速器システムと T2K 実験のニュートリノビームラインの建設は 2009 年春に完了し、2010 年 1 月より本格運用が開始されました。2010 年 2 月 24 日にはスーパーカミオカンデにおいて加速器（J-PARC）からのニュートリノ反応事象を初めて観測しました。さらに東日本大震災で 2011 年 3 月 11 日に加速器が停止する直前までに取得したデータを解析して、ミューニュートリノが電子ニュートリノに変化した兆候である電子ニュートリノ候補事象 6 個（図 1）を世界で初めてとらえたことを発表しました。東日本大震災からの加速器施設の復旧を終え、2012 年に実験を再開し、2013 年には電子ニュートリノ事象を 28 個に増やし、電子ニュートリノ出現の現象をより確実なものとしました。

また、2014 年からは反ミューニュートリノビームを用いた実験も開始し、反ミューニュートリノの消失を確認、さらに反電子ニュートリノの候補事象も確認しています。これまでの観測の結果、CP 対称性が破れている可能性が明らかになり、2020 年にその結果を論文として発表しました。一方で、もし CP 対称性が守られていても、実験を 100 回行ったとき、5 回はこのような観測結果となる可能性があるため、今後も実験を継続します。現在は、J-PARC 加速器のニュートリノビーム強度増強と東海村のニュートリノ検出器の改良が進められております。これらの改良に加え、スーパーカミオカンデに導入された Gd による高精度な中性子の情報を加えることで、ニュートリノ振動の全容解明を世界に先駆けて行っていくことを目指します。



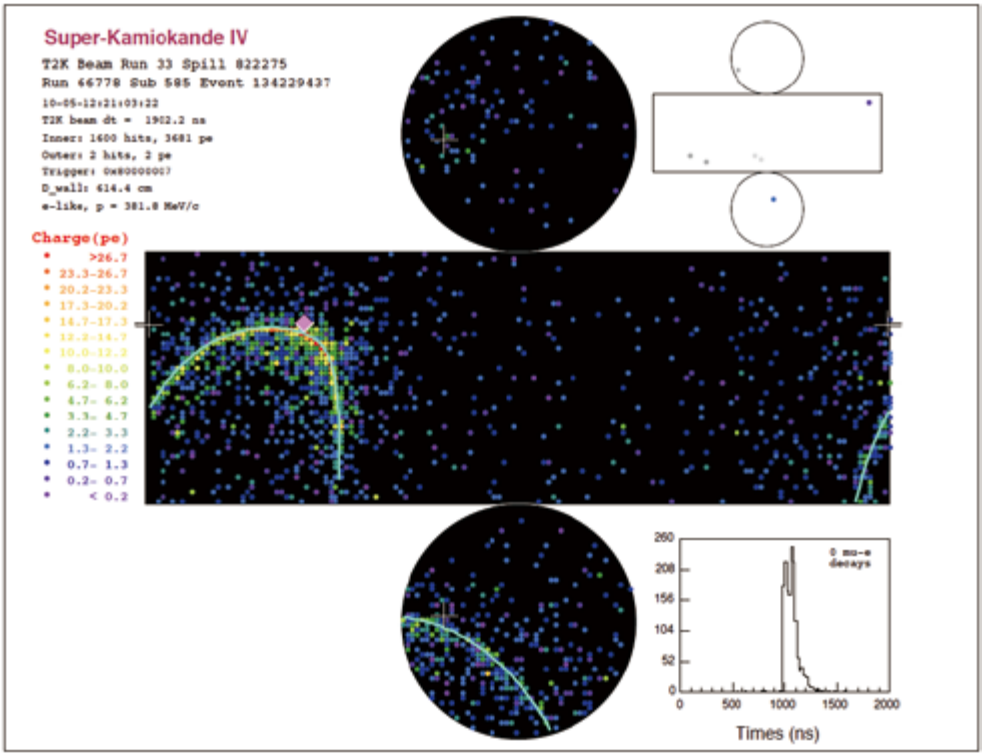


図 1　スーパーカミオカンデで観測された、電子ニュートリノ反応候補事象の一つ。円筒形をしたスーパーカミオカンデの展開図で、内壁に配置された光電子増倍管の内、光を捉えたものにとらえた光の強度に応じて色をつけて表示している。水と電子型ニュートリノ反応によって発生した電子が引き起こす電子・陽電子シャワーが発したチェレンコフ光がリング状に捉えられている。
An electron neutrino event candidate observed at Super-Kamiokande. A diffusing ring produced by electron-positron shower is observed

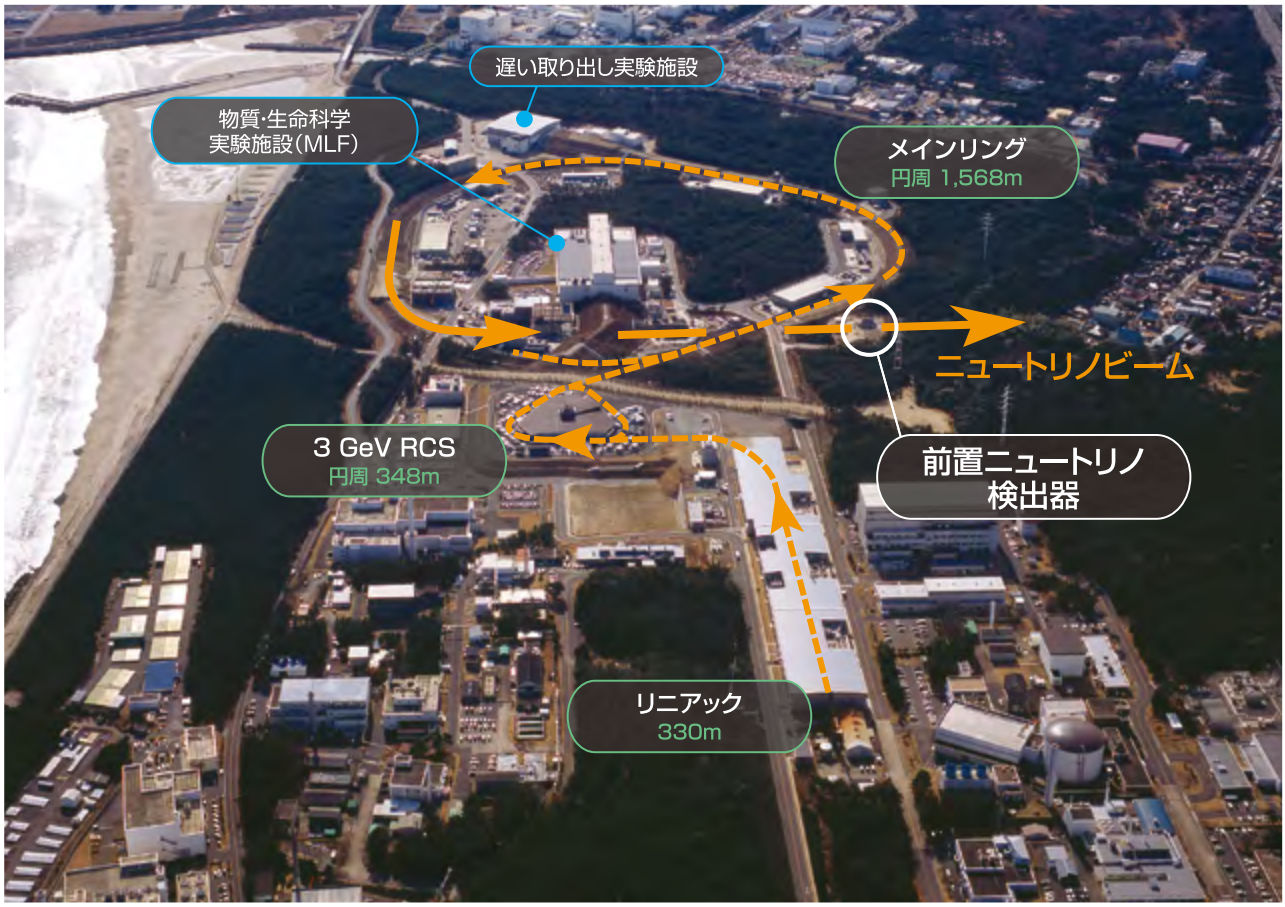
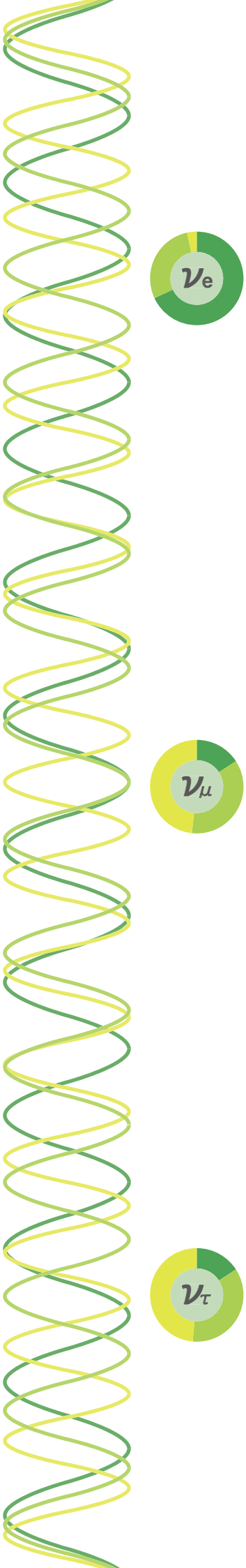


図 2　J-PARC 原子核素粒子実験施設　J-PARC nuclear and particle physics facility　© JAEA

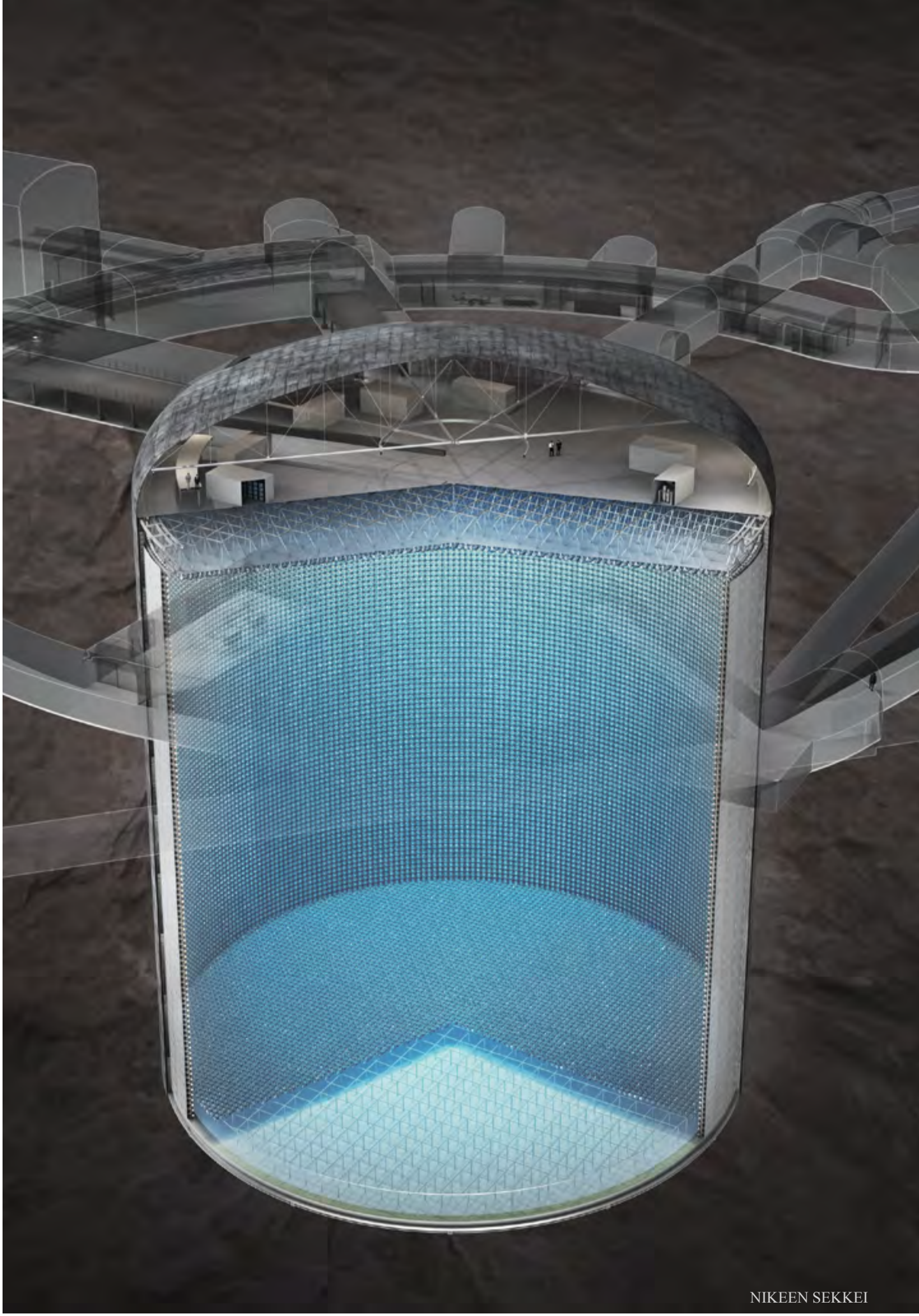


T2K

The T2K experiment is studying the oscillation of neutrinos using a beam of neutrinos produced by an accelerator. The main goal of the experiment is the precise measurement of the appearance of electron neutrinos through the oscillations of the muon neutrinos from the beam, initially to realize the first measurement of the appearance of a flavor of neutrino through oscillation, and at the same time measure one of the parameters describing neutrino oscillations, θ_{13}. The study of the differences between the appearance of electron neutrinos and antineutrinos then allows to search for CP violation in the leptonic sector. A second important goal of the experiment is the precise measurement of the parameters θ_{23} and Δm^2_{32} via the disappearance of muon neutrinos through oscillations.

An intense neutrino beam is produced using the high intensity proton accelerator complex (JPARC) constructed at the JAEA site in Tokai village. The neutrinos travel for 295km before reaching Super-Kamiokande (SK), where they can be detected after oscillations. T2K uses the off-axis beam technique, allowing to produce efficiently a neutrino beam with narrow energy spread from a 30GeV proton beam. The peak of the neutrino beam energy is adjusted to ~650 MeV by setting the off-axis angle to 2.5°, which maximizes the neutrino oscillation effects at the SK detector while reducing background. The beamline settings can be changed to produce either a mainly neutrino or mainly anti-neutrino beam, which allows to study the differences between the oscillations of neutrinos and antineutrinos. The timing of the neutrino beam is transmitted to SK using a GPS based system, and used to select the T2K events in the detector.

T2K started taking data in January 2010, and the first neutrino event from the J-PARC beam was observed in SK on February 24th 2010. Data taking was interrupted by the March 11th 2011 earthquake, but at this time T2K had already recorded 88 neutrino events, including 6 electron neutrino candidates (Figure 1) which allowed to publish the first indication of electron neutrino appearance in June 2011. Data taking resumed in January 2012, and T2K established the existence of the electron neutrino appearance in 2013 after having accumulated 28 candidate events.
From 2014, T2K started taking data using an anti-neutrino beam, and confirmed the disappearance of muon antineutrinos through oscillations. Candidate events for the appearance of electron anti-neutrinos were also found. Additionally, T2K published in 2020 an indication that CP symmetry is not conserved in neutrino oscillations, with the probability of the observations being the results of a random fluctuation if CP symmetry was conserved being less than 5%.
T2K is upgrading its beam line and near detector complex, which will allow it to keep playing a leading role in the study of the full picture of neutrino oscillations.



Hyper-Kamiokande

研究の目的

◆ニュートリノ振動研究
J-PARC 加速器や大気・太陽からのニュートリノを精密に測定し、ニュートリノの未知の CP 対称性の破れや質量階層構造など、ニュートリノ振動に関わるニュートリノの性質の全容を解明する。

◆ニュートリノ天文学
超新星爆発や太陽など宇宙天体からのニュートリノを観測し、重い星が最期に爆発するメカニズムや太陽エネルギーが放出される仕組みを明らかにする。また、宇宙誕生以来ばらまかられてきた過去の超新星爆発のニュートリノを検出・測定し、星が作られてきた歴史を探る。

◆陽子崩壊探索
大統一理論が予測する寿命範囲を探る世界最高感度での探索を行い、世界初の陽子崩壊の発見と標準模型を超える新たな素粒子物理学の枠組みの開拓を目指す。

計画概要

宇宙線研究所が国際協力により推進してきた大型水チェレンコフ装置実験「スーパーカミオカンデ」は、ノーベル物理学賞につながる素粒子ニュートリノの質量の発見を成し遂げ、基礎科学としての素粒子物理学及び宇宙素粒子物理学を牽引してきました。一方で、ニュートリノが他の素粒子に比べて 100 万倍以上軽い理由や、宇宙が現在の姿になった原因がニュートリノの性質にある可能性など、深淵な謎が新たに生まれています。ニュートリノ研究は次世代の素粒子・宇宙物理学への突破口として世界的に大きな関心を集めており、次期基幹実験「ハイパーカミオカンデ」の早期実現が世界中の研究者により求められています。

ハイパーカミオカンデ計画は世界 22 か国の研究者が参加する国際共同実験であり、東京大学と高エネルギー加速器研究機構を中核機関とし、日本が誇る高い実験技術を用いることによりスーパーカミオカンデの 10 倍規模となる超大型検出器（図 1）を設置し、1.3MW に増強した J-PARC 加速器ニュートリノビームを組み合わせます。岐阜県飛騨市神岡町のスーパーカミオカンデから南に約 8 km（J-PARC から 295 km）、地下 600 m の位置を建設候補地とし、直径 68 m ×高さ 71 m の水槽を設置します。装置内に蓄えられる超純水の総質量は 26 万トン、うち観測に用いる有効質量が 19 万トンとなります。水槽内壁には従来の 2 倍の感度を持つ高性能光センサー（図 2）を備え、ニュートリノ反応から生じる微弱な光を高い精度で計測します。

本計画は、日本学術会議の提言「第 23 期学術の大型研究計画に関するマスタープラン（マスタープラン 2017, 平成 29 年 2 月 8 日公開）」において、特に速やかに推進すべき計画「重点大型研究計画」の 1 つとされています。さらに、文部科学省による大型プロジェクトの推進に関する基本構想「ロードマップ 2017」に、優先度の高い計画の一つとして掲載されています。一方米国では、LBNF/DUNE 計画と呼ばれるプロジェクトが認められ、ハイパーカミオカンデに先んじて建設が進められています。宇宙線研究所の将来計画検討委員会による報告（平成 29 年 3 月公開）では、ハイパーカミオカンデを所の次期主要プロジェクトとして適切な計画と認め、速やかに実現を目指すべきであると判断されています。2020 年に日本での予算措置により正式にプロジェクトが開始され、2027 年からの観測開始を予定しています。

研究内容

本実験構想は、「宇宙初期を司る究極の自然法則はどのようなものか」さらに「人はどこから来てどこに行くのか」といった、人類にとって根源的な問いに挑戦します。具体的には、以下に示すような３つの研究の柱により素粒子物理学・原子核物理学・宇宙物理学・天文学を総合的に推進します。ハイパーカミオカンデはこれらを全て可能にする唯一の実験計画であり、現行スーパーカミオカンデとも質の異なる豊富な研究課題と高い発見能力を持っています。

ニュートリノ振動研究

ハイパーカミオカンデでは、J-PARC 加速器ニュートリノと宇宙ニュートリノの精密測定により、ニュートリノ振動に関わるニュートリノの性質の全容解明を行います。ビッグバン理論の期待に反して「宇宙がなぜ物質で満たされていて反物質がないのか」、という根源的な問題がニュートリノによって解ける可能性が指摘されており、その理解の鍵となる CP 対称性の破れの測定が研究目的の一つとなります（図３）。さらに、ニュートリノの質量階層構造などの質量・混合パラメータの決定を通して、ニュートリノの性質の背後にある未知の法則の理解につなげます。

ニュートリノ天文学

超新星爆発は、地球や人間のいわば原材料になる重い元素を宇宙にばらまく役割があるとされている一方で、星の自己重力に反して爆発が成功する仕組みはいまだに理解されていません。ハイパーカミオカンデでは、超新星爆発の内部から飛来する大量のニュートリノを観測することにより時々刻々の天体内部の様子を調べ、爆発の仕組みを解明することが期待されています。さらに宇宙初期の超新星爆発からのニュートリノを測定し、星やブラックホール誕生の歴史の解明に挑戦します。KAGRA などによる重力波観測との連携も視野に入れています。

陽子崩壊探索

ハイパーカミオカンデでは、「物質が永遠に不滅かどうか」という宇宙の運命に対する問いにも挑戦します。元素の構成要素である陽子が崩壊する、すなわち寿命を持つことを発見できれば、宇宙の物質は永遠ではないということを証明するのと同時に、素粒子と力の大統一理論の確認となり、素粒子物理学のパラダイムシフトとなりえます。図４に示すように、ハイパーカミオカンデは発見寿命感度を 10^{35} 年まで伸ばすことができ、大統一理論で新たに導入される超重ゲージ粒子の質量が、期待されるように 10^{16} GeV/c^2 近くであれば、陽子崩壊が発見される可能性は高いです。

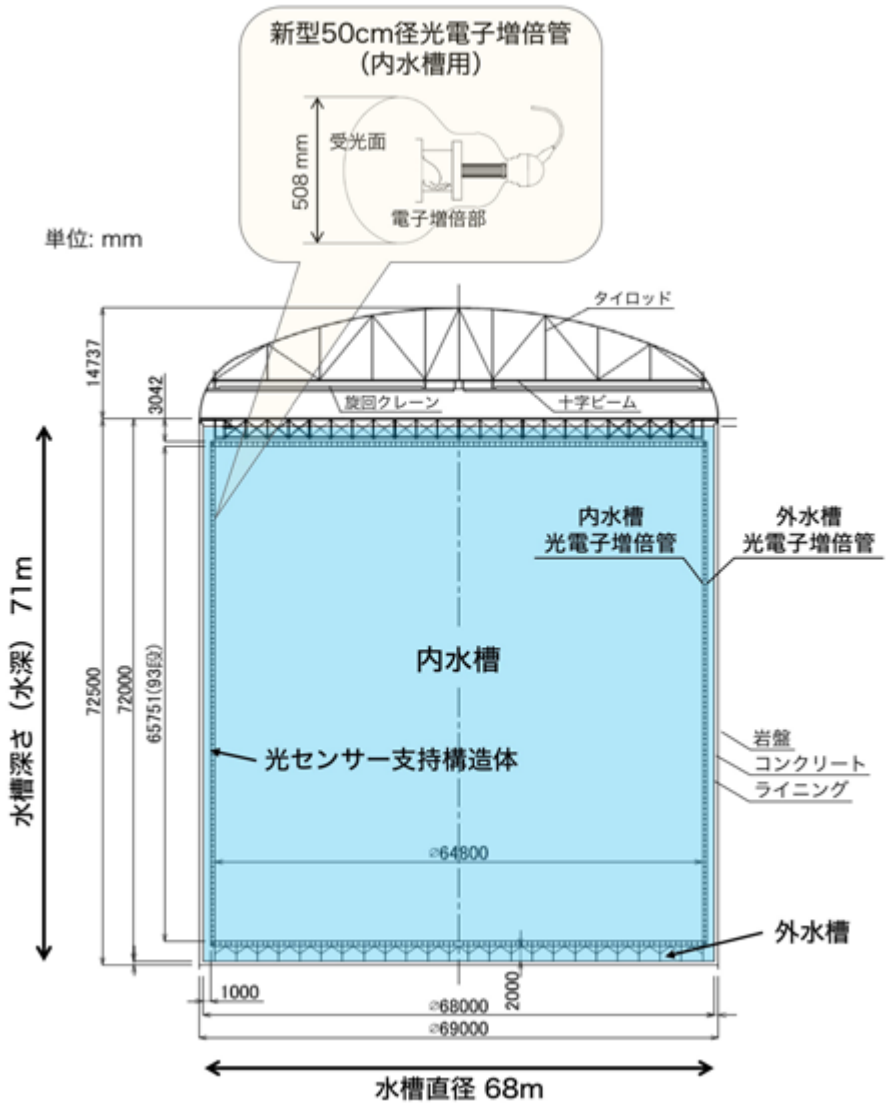


図 1 ハイパーカミオカンデ装置の概念図　　Schematic view of the Hyper-Kamiokande

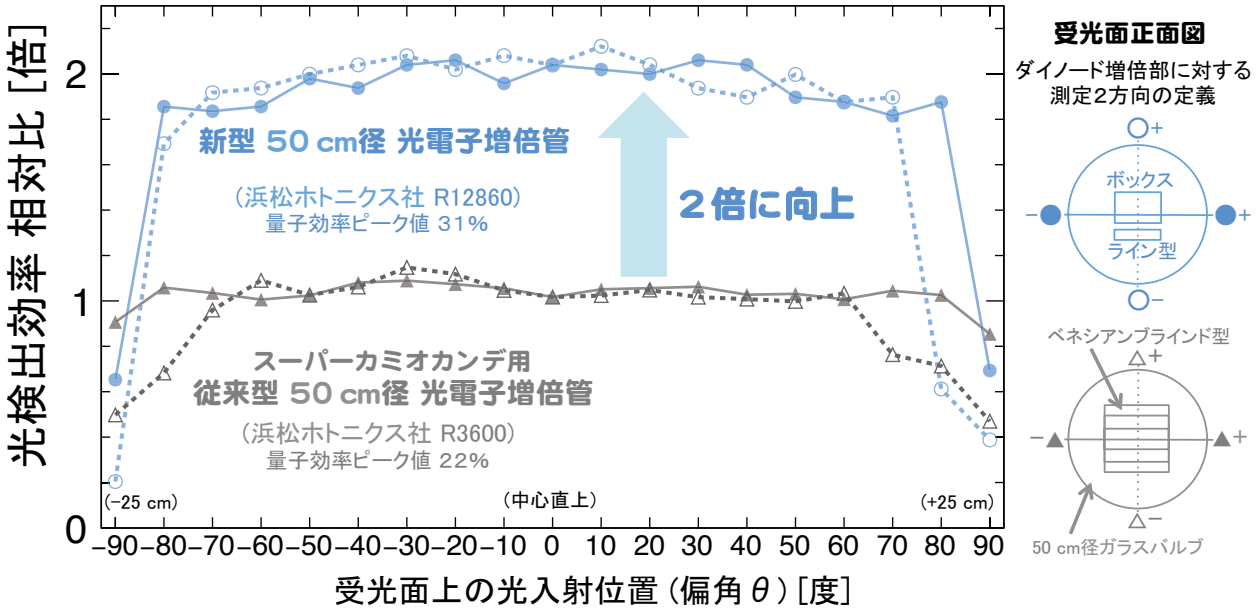


図 2　現行（黒）と新型（青）光検出器の検出効率の比較
Single-photon detection efficiency for the photo-sensors used in the running Super-Kamiokande (black) and those for the Hyper-Kamiokande (blue)

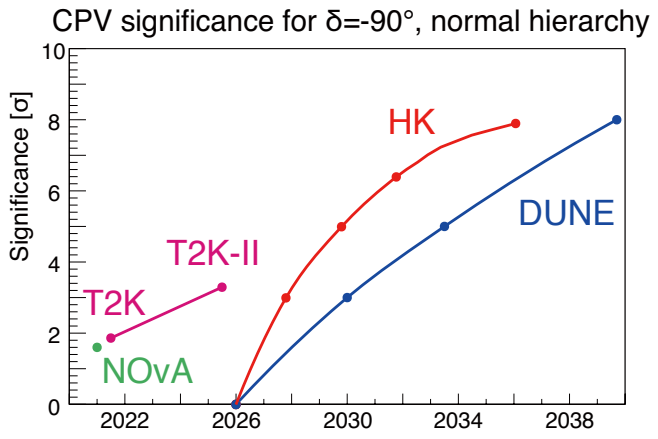


図 3 CP の破れの発見能力（有意度）をハイパーカミオカンデ（HK）と米国計画（DUNE）、現行実験（T2K、NOvA）で比較したもの。横軸は年。
Expected significance of CP violation observation for Hyper-Kamiokande (HK), US-based project (DUNE), running experiments (T2K, NOvA). X-axis is year.

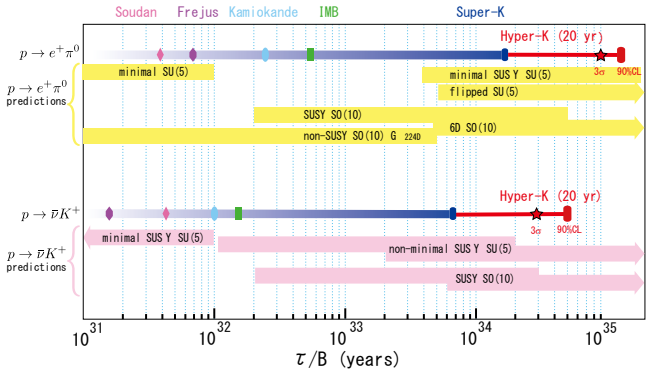


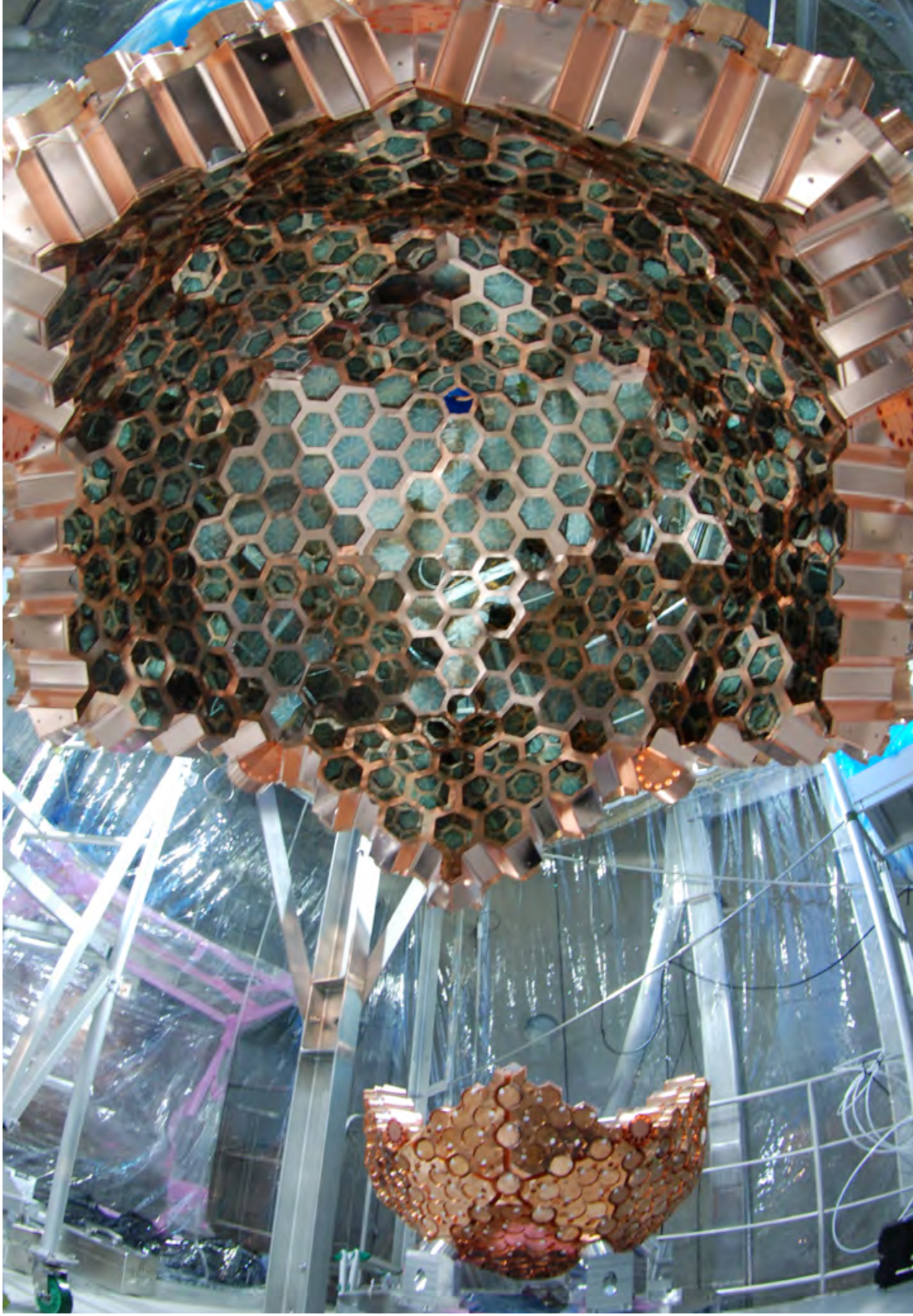
図 4 核子崩壊の発見寿命感度（図中の赤い星印）と、スーパーカミオカンデ実験などによる下限値。バンドは大統一理論の予言範囲。横軸は、各崩壊モードでの核子寿命（核子寿命を分岐比 B で割ったもの）である。
Hyper-K's discovery reaches for nucleon decays (red stars) compared with the experimental limits obtained by Super-K and other past experiments. Bands show predictions by various grand unified theories. X-axis shows nucleon lifetime divided by the branching ratio.

Hyper-Kamiokande or Hyper-K is a straightforward extension of successful water Cherenkov detector experiment Super-Kamiokande. It employs well-proven and high-performance water Cherenkov detector technology with established capabilities of neutrino oscillation studies by accelerator neutrinos, proton decay searches, and precision measurements of solar and Supernova neutrinos. Hyper-Kamiokande will provide major new capabilities to make new discoveries in particle and astroparticle physics thanks to an order of magnitude increase in detector mass and improvements in photon-detection system along with the envisioned J-PARC Megawatt-class neutrino beam.

An international Hyper-Kamiokande collaboration has been formed to carry out the experiment which consists of about 500 researchers from 22 countries. The University of Tokyo and the High Energy Accelerator Research Organization KEK have signed a MoU affirming cooperative promotion of the Hyper-K project.

The Hyper-K detector is filled with 260 kilotons of ultrapure water, which serves an order of magnitude larger fiducial mass of 190 kilotons than Super-K's. The inner detector volume is monitored by newly developed 50cm PMTs with twice higher photon detection sensitivity.

The Hyper-K and J-PARC neutrino beam measurement of neutrino oscillation is more likely to provide a 5-sigma discovery of CP violation than any other existing experiment. Hyper-K will also be the world leader for nucleon decays. The sensitivity to the partial lifetime of protons for the decay modes of $p \to e^+\pi^0$ is expected to exceed 10^{35} years. This is the only known, realistic detector option capable of reaching such a sensitivity for the $p \to e^+\pi^0$ mode. Finally, the astrophysical neutrino program involves precision measurement of solar neutrinos and their matter effects, high-statistical Supernova burst and Supernova relic neutrinos.



XMASS / XENON

図 1　光電子増倍管が並ぶ検出器の内部 (写真上)
Fig. 1 Inside of the XMASS Detector

研究の目的

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

背景

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

実験装置

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

これまで、約 1 トンの液体キセノンを用いた XMASS-I を運転してきました (図 1、2)。XMASS-I は運転開始当時世界最大で、世界初の水放射線シールドを備え、光センサーも世界一放射性不純物が低いものでした。5 年間のデータ収集を完了し、全データを解析して結果をまとめたところ、ダークマター発見の信号は残念ながら見えませんでした。そこでイタリアで建設が進められていた約 10 トンの液体キセノンを用いる XENONnT 実験に参加し、より高い感度での探索を始めています。XENONnT が用いている液体キセノン TPC(図 3) では、ダークマターが引き起こすと考えられる原子核を反跳する現象と、検出器内の放射性不純物によるガンマ線等によるノイズや太陽ニュートリノ等で生じる電子を反跳する現象を区別できるため、さらなる感度向上が見込めます。日本グループが持ち込んだ技術で、検出器の性能を最高に発揮させることができ、かつ対策が難しいノイズ（中性子によるノイズ）を低減し発見の切り札としたいと考えています。

研究内容

XMASS 実験 :
XMASS-I の全データを用いたダークマターの探索

XMASS-I では、約 1 トンの液体キセノンを用いて 5 年に渡る長期データを取得しました。トンスケールの検出器をこのような長期に渡って運転してきた例は他になく、ダークマター由来の信号を含んでいる可能性があります。それを調べるためのデータの解析方法には２つの方法があります。１つは、検出器由来のノイズを定量的に見積もり、それよりも有意に超過が見られる現象をダークマター由来の信号として捉える方法。もう１つは、ダークマターの衝突頻度が季節によって変動することを利用して、何年もの長期に渡るデータに変動が見られるかどうかを調べる方法です。季節によって変動する理由は、地球が太陽系の周りを公転しながら太陽系が銀河の中を高速で移動しているためです。我々は、2013 年 11 月から 2019 年 2 月までのおよそ 5 年間のデータを上の２つの方法で解析しました。残念ながら２つの方法のどちらも、誤差の範囲でダークマターの存在を示す証拠は得られませんでした。図 4 は、それらの解析結果を示しています。結果として、ノイズとして期待される量以上の現象は見られませんでした。発見には至りませんでしたが、これほど大量の液体キセノンを長期に渡って観測した例はなく、XMASS-I からのユニークな最終結果として成果をまとめ、出版することができました。

XENON 実験 :
XENONnT 実験における原子核反跳を起こすダークマターの初の探索結果

XENONnT 実験は世界最大級の液体キセノンを用いたダークマター探索実験であり、2022 年にアクシオンなど未知粒子の探索結果を公表しました。そして 2023 年には、同時期に取ったデータを用いて、原子核反跳を起こす Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) と呼ばれるダークマターの初の探索結果を公表しました。有感領域にある 5.9 トンの液体キセノンを用いて、約 1 トン・年の暴露量をもとに探索をおこないました。前身の XENON1T 検出器に比べても、液体キセノンに混入している ^{85}Kr や ^{222}Rn による背景事象を 5 分の 1 程度に減らすことに成功したことや、中性子による背景事象も日本グループが協力して導入した中性子カウンターを用いて約半分に減らすことができたことが注目に値します。得られたデータには、背景事象を超える事象が見られなかったため、図 5 に示すように WIMP と核子の散乱断面積として 90% 信頼度で 2.58×10^{-47}cm^2 (28 GeV/c^2 において) の上限値を得ることができました。このデータの暴露量は、前身の XENON1T 実験で得られた暴露量とほぼ同じですが、今回の結果の方が感度も高く実験で得られた制限も厳しいものでした。現在さらに長期のデータを取得しており、かつ中性子カウンターの性能を最大化するために硫酸ガドリニウムを導入し実験を進めています。近いうちにダークマターの信号が得られることが期待されています。

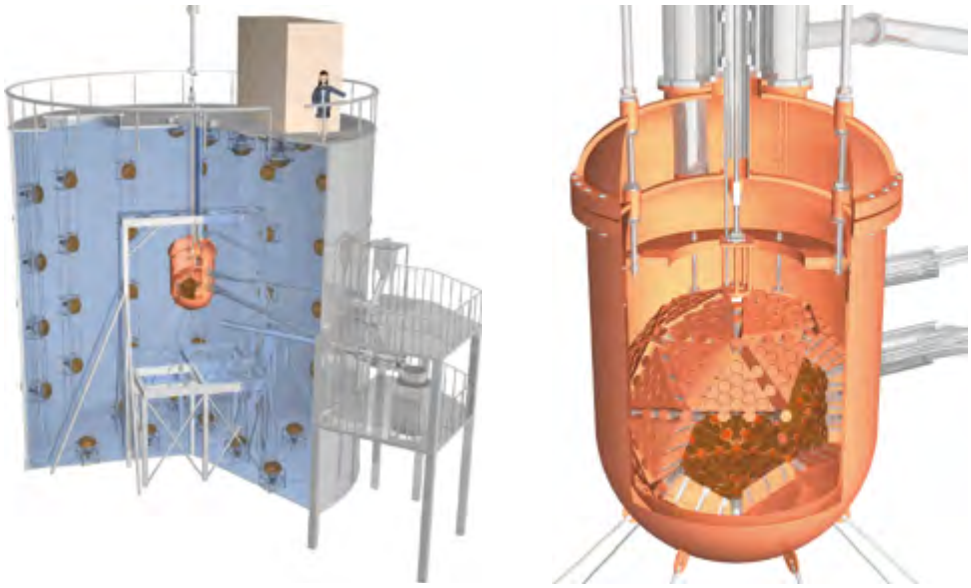


図２　水放射線シールドの概念図（左）と液体キセノン検出器 (右)
Fig.2 The schematic view of the water shield (left) and liquid xenon detector (right).

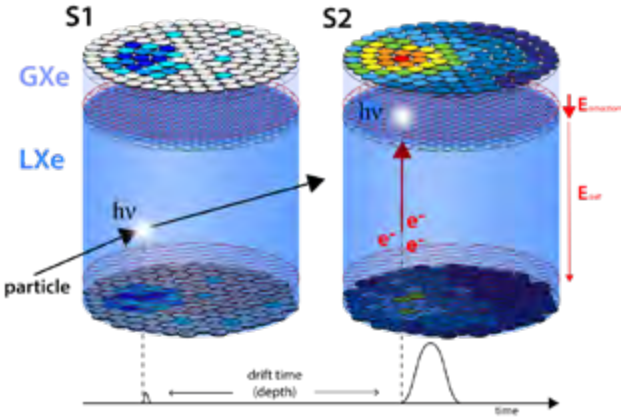


図 3 XENON 検出器の動作原理。XENON グループ提供。
Fig. 3 Operation principle of XENON detector. Courtesy of XENON group.

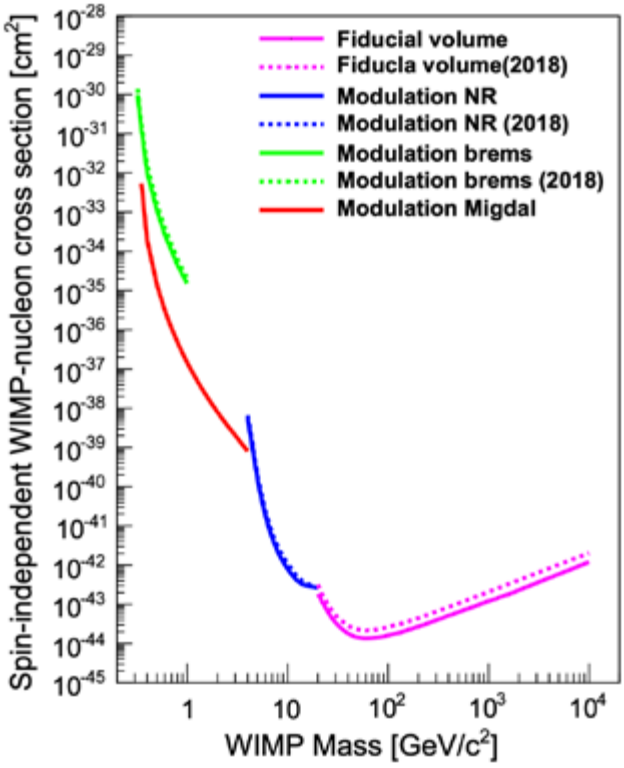


図 4 XMASS のデータ解析から得られたダークマターと核子の相互作用断面積への制限。実線は有効体積内での探索結果 (紫)、原子核反跳による GeV を超える質量の季節変動による探索結果 (青)、ミグダル効果 (赤) や制動放射 (緑) を通じた GeV 以下の質量の季節変動による探索結果を示す。点線は初期データを用いた過去の結果。
Fig.4 Limits obtained from the various XMASS analyses. Solid lines show the new results using the full XMASS-I data sets and consist of the fiducial volume analysis (purple), the multi-GeV modulation analysis via nuclear recoil (blue), and the sub-GeV modulation analysis via Migdal effect (red) and Bremsstrahlung (green). The dotted lines show our earlier results.

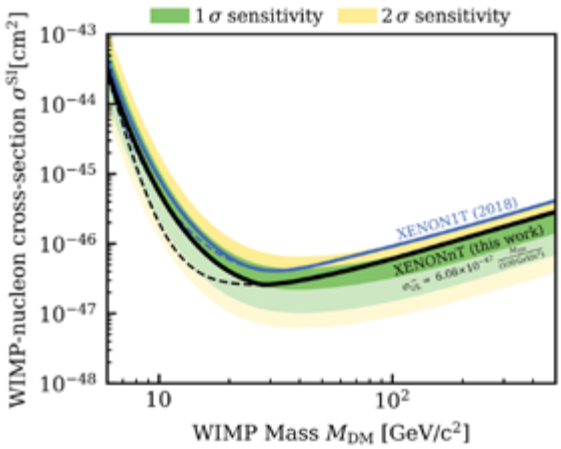
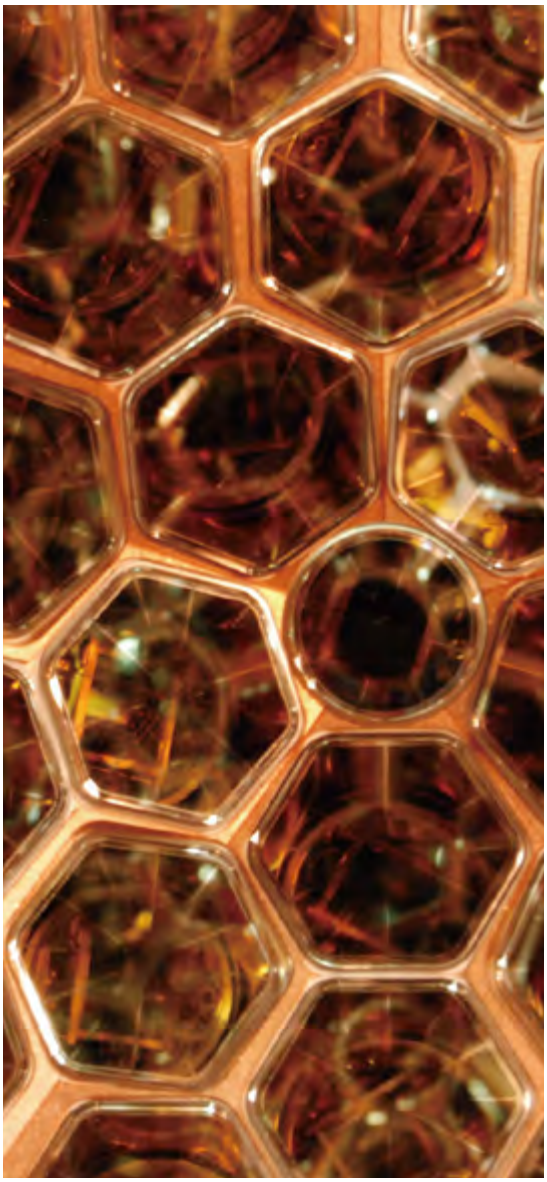
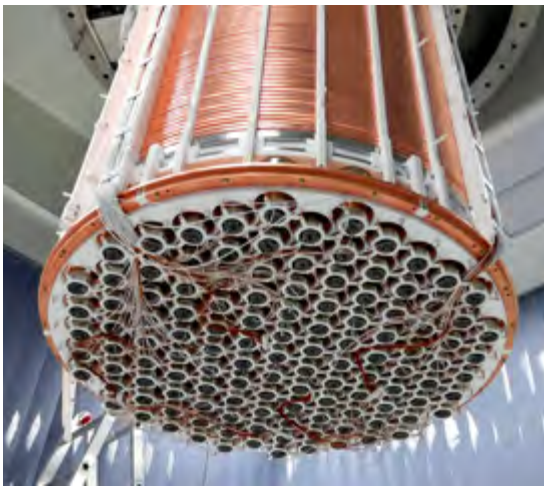


図 5 スピンに依存しない WIMP- 核子相互作用への 90% 信頼度の上限値 (黒実線)。緑のバンド (1 σ) や黄色いバンド (2 σ) は感度を示し、薄い色の領域は統計の変動によって平均的な感度よりもよりよい結果がでる領域を示している。
Fig. 5 Upper limit on spin-independent WIMP-nucleon cross section at 90% confidence level (full black line) as a function of the WIMP mass. The 1σ (green) and 2σ (yellow) sensitivity bands are shown as shaded regions, with lighter colors indicating the range of possible downward fluctuations.





The XMASS program aims at detecting low-energy solar neutrino, dark matter particles, and neutrino-less double beta decay. Current evidence indicates that only 5 % of the mass and energy density of the Universe is composed of baryonic matter, and dark matter makes up about 27 %. One of the attractive dark matter candidates is Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs). They may be detectable via rare elastic scattering interactions that deposit a few tens of keV in target nuclei.

The advantages of using liquid xenon (LXe) detector are the followings, 1) high light yield, 2) scalability of the size up to tons of mass, and 3) large atomic number to shield radiations from outside of the detector. Figure 2 shows the schematic view of the detector. The LXe target is surrounded by about 642 ultra-low-radioactivity PMTs suitable for this experiment (Fig. 1). Based on the full data set over the 5-years operation of XMASS-I from November 2013 to February 2019, we searched for WIMPs by the following methods. They provide new constraints on the WIMP dark matter particles using the single-phase LXe detector.

(1) We searched for any significant excess caused by dark matter particles by estimating background events quantitatively and comparing the observed data. As we could not find any excess, we obtained a limit shown in Figure 4 with a magenta solid line.

(2) Since we expect an annual variation of dark matter flux caused by the solar system's movement in the Galaxy and the earth around the sun, we analyzed the full data to see if we could observe any seasonal modulation of the event rate. Since no significant modulations were observed in any energy ranges, the limits with blue, green, and red solid lines in Figure 4 were obtained. These analysis results provided unique and final results from XMASS-I.

Since the XMASS-I experiment did not show any significant signal, XMASS members started to join the XENONnT experiment, which is under operation in Italy and uses about 10 tons of liquid xenon. We expect the liquid xenon TPC (Fig. 3) used in XENONnT further improves sensitivity because it can distinguish between nuclear recoils caused by dark matter particles and background events due to radioactive impurities in the detector. We hope that the technology brought by the Japanese group will enable us to maximize the detector's performance by reducing the background caused by neutrons through the neutron veto (NV).

The XENONnT experiment started to provide the world's best quality of data and results, as shown in Fig. 5. XENONnT continues to take data with a further reduced ^{222}Rn background. Subsequent data taking is planned with NV operating as designed, with Gd-sulphate-octahydrate loaded into the water to increase the neutron tagging efficiency to 87%.



Cherenkov Telescope Array

研究の目的

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

実験装置

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

CTA は大口径（23 m）、中口径（12 m）、小口径（4 m）のチェレンコフ望遠鏡群で構成される。感度を一桁向上する（1 mCrab ～ 10^{-14} erg/s cm^2 を達成）とともに、観測可能なエネルギー領域を 20 GeV-300 TeV と拡大し、高エネルギーガンマ線天文学を飛躍的に発展させるものである。この計画が実現すれば、1000 を超える超高エネルギーガンマ線天体の発見が期待される。

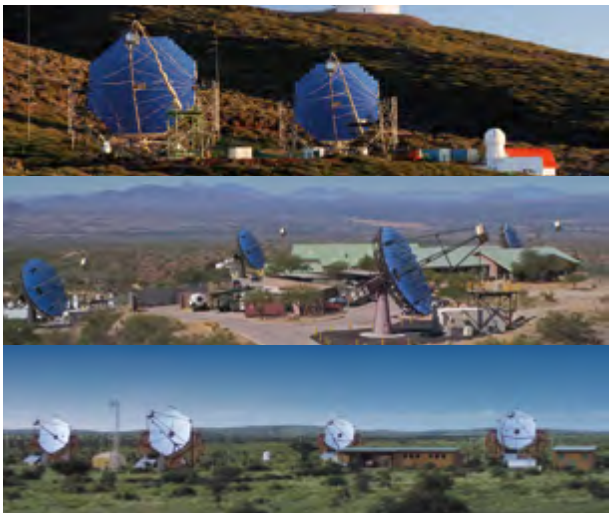


図 1 現在稼働中の超高エネルギーガンマ線望遠鏡。写真上から MAGIC, VERITAS, H.E.S.S.
The current generation VHE gamma ray observatories, the MAGIC, VERITAS, and H.E.S.S. telescopes

研究内容

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

CTA 大口径望遠鏡の建設

日本グループは、アレイの中心に配置される大口径望遠鏡 4 基の建設を進めている。2018 年 10 月には 1 号基がカナリア諸島ラパルマに完成し、12 月にファーストライトを迎えた。2020 年代初頭には全 4 基での観測をスタートさせる予定だ。大口径望遠鏡は 20 GeV から 1000 GeV 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 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。日本グループは大口径望遠鏡に搭載する光センサー（光電子増倍管）、超高速読み出し回路、分割鏡、光学補償装置の量産を進めている。

大口径望遠鏡は、ガンマ線バースト等の種々のトランジェントな現象を捉えるために、高速回転により瞬時に源を視野内に捕らえることが求められる。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 23 m口径の大口径望遠鏡の詳細デザインを行い、1 号基に反映させた。カーボンファイバーチューブによるスペースフレーム構造で、軽量でかつ丈夫。ガンマ線バーストの follow up 観測を可能にするため、総重量をおよそ 100 トンと軽量化し、わずか 20 秒で 180 度回転し、目標の天体を捉えることが可能となっている。

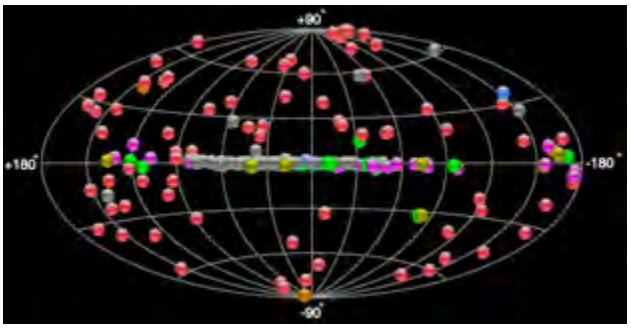


図 2 超高エネルギーガンマ線源 (>100GeV) を銀河座標系に示したもの。200 以上の銀河内、銀河系外のガンマ線源が発見されている (TeVCAT カタログより引用)。
Very High Energy Gamma Ray Sky (>100GeV). More than 200 Galactic and extragalactic sources have been discovered. (Excerpted from the Catalogue of TeVCAT)

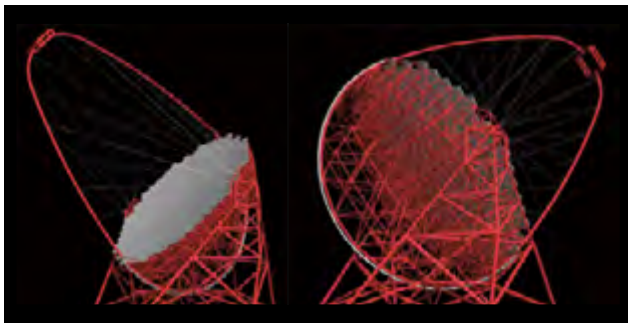


図 3 大口径望遠鏡（23m 口径）。日本グループは高分解能イメージングカメラ、超高速読み出し回路、高精度分割鏡のデザイン、光学補償装置の量産をすすめている。
Large Size Telescope (23m diameter) designed by Max Planck Institute for Physics. CTA Japan is contributing to the design and production of the imaging camera at the focal plane, ultrafast readout electronics, high precision segmented mirrors and active mirror control system for Large Size Telescopes.

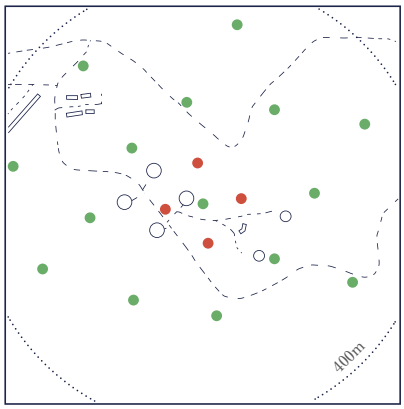


図 4 日本グループが設計と製作を担当したカメラクラスターモジュール。７本の高量子効率光電子増倍管、高圧回路、プリアンプ、スロー制御回路、超高速 DRS4 波形読み出し回路、トリガーからなる。265 個を集めて大口径望遠鏡のカメラになる。
Camera cluster for the Large Size Telescope (LST) developed by CTA-Japan. This cluster consists of seven high quantum efficiency photomultipliers (R11920-100), CW High Voltages, pre-amplifier, Slow Control Board, DRS4 Ultra fast waveform recording system and Trigger. The LST camera can be assembled with 265 of these clusters, cooling plates and camera housing.



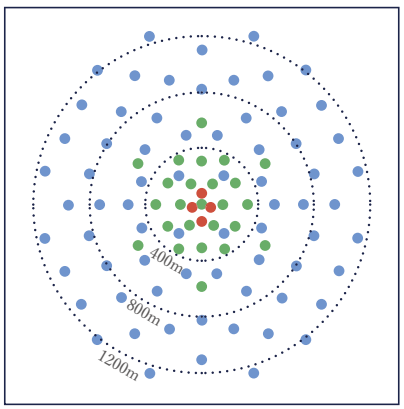
図 5 日本グループ、三光精衡所により試作された大口径望遠鏡用の高精度分割鏡。ミラーは 60mm 厚のアルミハニカムを 3mm のガラスではさんだサンドイッチ構造である。鏡表面は SiO2, HfO2 の多層保護膜により長寿命、高反射率を実現する。
Prototype of the high precision segmented mirror for the LST developed by CTA-Japan in cooperation with Sanko Co.LTD. The mirror is made of a 60mm thick aluminum honeycomb sandwiched by 3mm thin glass on both sides. A surface protection coat consisting of the materials SiO2 and HfO2 will be applied to enhance the reflectivity and to elongate the lifetime.

北半球サイト
スペイン・カナリー諸島ラパルマ



● 大口径望遠鏡（23m） 4 基
● 中口径望遠鏡（12m）15 基

南半球サイト
チリ・パラナル



● 大口径望遠鏡（23m） 4 基
● 中口径望遠鏡（12m）25 基
● 小口径望遠鏡（4m） 70 基

〈Left〉
Site in Northern Hemisphere
La Palma in Canary Islands, Spain

〈Right〉
Site in Southern Hemisphere
Paranal, Chile

● LST (Large Size Telescope)
● MST (Mid Size Telescope)
● SST (Small Size Telescope)

図 6 各サイトにおける望遠鏡の配置図
Telescope arrangement of each site

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 100 GeV to 10 TeV 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 more than 200 Galactic and extragalactic sources of various types to date.

CTA is designed to achieve superior sensitivity and performance, utilizing established technologies and experience gained from the current IACTs. The project is presently in its preparatory phase, with international efforts from Japan, US and the EU. It will consist of several 10s of IACTs of three different sizes (Large Size Telescopes, Mid Size Telescopes, and Small Size Telescopes). With a factor of 10 increase in sensitivity (1m Crab ~ 10^{-14} erg/s cm^2), together with much broader energy coverage from 20 GeV up to 300 TeV, 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-stand 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 October 2018, construction of the first LST completed at La Palma in Canaries and made the first light in December. Operation with the four LST array will be realized in the first half of 2020s. The LST covers the low energy domain from 20 GeV to 1000 GeV and is especially important for studies of high redshift AGNs and GRBs. The diameter and area of the mirror is respectively 23 m and 400 m^2 to achieve the lowest possible energy threshold of 20 GeV. 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 23 m diameter telescope structure, based on a carbon fiber tube space frame. The LSTs require very fast rotation (180 degrees/20 seconds) for promptly observing GRBs.





Telescope Array

研究の目的

◆最高エネルギー宇宙線の発生源を探る
◆最高エネルギー宇宙線はどんな粒子なのかを探る
◆宇宙線のエネルギーの限界を探り、その到来頻度を精度よく測定する

実験装置

テレスコープアレイ（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で構成されます。米国ユタ州の砂漠地帯（北緯 39 度、西経 113 度、標高約 1400 メートル）で、日米韓露、ベルギー、チェコ、スロベニア、ポーランド、台湾の 9 つの国と地域の研究者約 150 人が共同で観測を行っています。

3 平方メートルの大きさのシンチレーター（宇宙線が通過すると発光する物質を用いて作られた検出器）地表検出器 507 台を、1.2 キロメートル間隔で格子状に並べました。観測データは長距離無線 LAN ネットワークを使って取得しています。超高エネルギー宇宙線が大気に入射すると多数の二次粒子を生成して地表に達します（これを空気シャワーといいます）。空気シャワー粒子の到来時刻は、全地球測位システム（GPS）で測定し、装置の運転に必要な電力は太陽電池で供給します。自然環境に負荷を掛けない自立型検出器です（図 1 ㊤）。

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大気中で引き起こすわずかなシンチレーション光を撮像しています（図 1 ㊦）。地表での空気シャワーの横広がりの測定に、望遠鏡による大気中での空気シャワーの縦方向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、空気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 10 台を 2013 年に追加し、$10^{15.6}$ 電子ボルト ~10^{18} 電子ボルト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行っています。空気シャワーの方向を精度よく測定して粒子識別能力を高める望遠鏡と地表検出器による同時ハイブリッド観測のために、TALE サイトに地表検出器を 2018 年に 80 台（400 メートルあるいは 600 メートル間隔）、2022 年に 50 台（100 メートル間隔）を追加設置しました。

後で述べる TAx4 を含めた実験装置の全体の配置図を、図 2 に示します。

研究内容

TA 実験は 2008 年の定常観測開始以来、10^{18} 電子ボルト以上の極高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル、原子核組成、到来方向異方性などの観測結果を発表してきました。さらに、低エネルギー側への感度拡張である TALE 実験を進めて 2018 年から観測を開始し、その成果も国際会議等で発表しています。以下では、近年の 2 つの成果を紹介します。

TA 実験史上最高エネルギー宇宙線「アマテラス粒子」の検出

2021 年 5 月 27 日の明け方に 2.44 × 10^{20} 電子ボルト（244 エクサ電子ボルト = 244 EeV））の宇宙線空気シャワーを検出しました。これは、15 年間の TA 実験の定常運用の中で最大エネルギー事象であり、1991 年に検出された観測史上最大のエネルギーの宇宙線（オーマイゴッド粒子、320 EeV）に匹敵するものでした。これほどの極限的高エネルギーの宇宙線が天体起源である場合、その候補は活動銀河中心核の超巨大ブラックホール、爆発的星形成銀河など激烈な天体現象に限られ、なおかつ地球近傍（約 1.5 億光年以内）に限られる、と予想されています。しかし、今回のアマテラス粒子は宇宙大規模構造の局所的空洞と呼ばれる近傍候補天体のない方向から到来しており、さらに TA 実験で報告された 57 EeV 以上の宇宙線の過剰（ホットスポット）とも、おとめ座銀河団にある楕円銀河（M87）とも異なる方向から到来していました。

最高エネルギー領域における宇宙線原子核組成

従来、宇宙線の粒子種（原子核種）の決定は大気蛍光望遠鏡による空気シャワーの縦方向発達の観測を用いて行われてきました。この方法には、大気蛍光望遠鏡による観測が月の出ていない晴天夜に限られることから観測統計量が地表検出法の約 10% しかない、という欠点がありました。そこで、地表検出器アレイによる、大気蛍光観測の 10 倍という、豊富な観測データの到来方向分布と宇宙の物質構造をなす銀河の分布を比較するという新しい原子核組成決定法を開発し、TA 実験 14 年分の観測データに適用して、原子核組成を決定しました。結果として、10^{20} 電子ボルト（100 EeV）以上では、宇宙磁場による最高エネルギー宇宙線の発生源からの偏向が非常に大きい可能性が示され、このことは最高エネルギーの宇宙線が大きな電荷を持つ重い原子核であることと矛盾がない、ことが示されました。

拡張および検出器の開発・試験など

地表検出器を最終的に 500 台追加して、約 2.1 キロメートル間隔で設置し、TA の地表検出器を展開する領域を約 4 倍（約 3000 平方キロメートル）に拡張する予定です（TAx4）。これによりデータの取得ペースを加速して、ホットスポットの兆候を高統計で確実に確認し、詳細に最高エネルギー宇宙線の起源を探るのが目的です。この建設は 2015 年度から始まり、まず 2019 年 2 月と 3 月に 257 台の設置を行い、宇宙線データを収集しています。さらに 2

図 1 ㊤ 後に述べる TAx4 の拡張工事で新たに設置された地表粒子検出器のひとつ。㊦ TA 大気蛍光望遠鏡と建物。光電子増倍管によるカメラを用いて空気シャワーからの紫外発光を高速・高感度で撮影する。
(Top) One of the TAx4 ground array detectors newly deployed in the field. (Bottom) TA air fluorescence telescopes.

か所に大気蛍光望遠鏡を建設し、観測を行っています。

TA サイトでは新しい宇宙線観測装置の R & D を行っています。例えば、最高エネルギー宇宙線の空気シャワーを国際宇宙ステーションから観測する JEM-EUSO 計画の試作機や新型望遠鏡の試験観測も TA サイトで行っています。さらに学際的な研究として、TA サイトに設置した雷検出器で検出した雷と同期して観測した TA の地表検出器のデータを用いて、雷放電の詳細な研究を行っています。

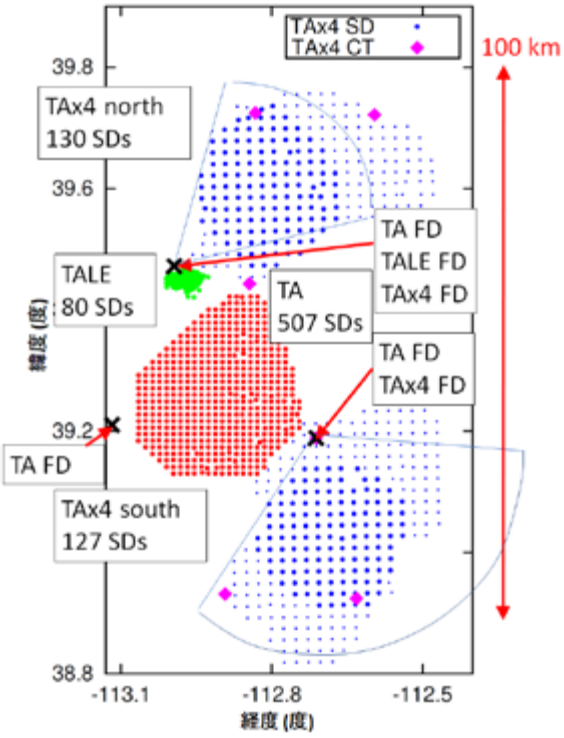


図 2 TA、TALE、TAx4 の 配置図。
赤丸印が TA 地表検出器アレイ。緑印が TALE 地表検出器アレイ。青丸印が設置した TAx4 地表検出器アレイ（青点印が未設置部分）。黒い×印が大気蛍光望遠鏡サイト。
Layout of TA, TALE and TAx4
Red circles denote the TA surface detectors. Green circles represent TALE surface detectors. Blue circles and dots denote TAx4 surface detectors that have already been deployed and have not yet been deployed, respectively. Three black cross marks represent the fluorescence telescope sites.

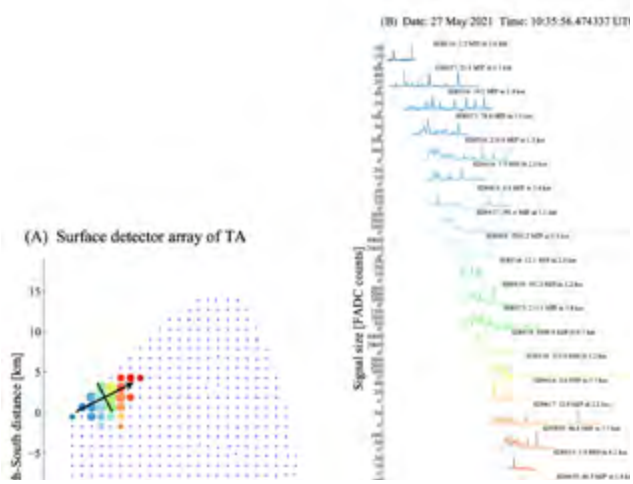


図 3　2021 年 5 月 27 日に TA 実験地表検出器（SD）アレイで観測された TA 実験史上最高エネルギーイベント。(A) TA 実験 SD アレイの地図。各ドットは SD の位置を示す。黒い矢印は、地上に投影されたシャワーの方向を示す。色の付いた円の大きさは各 SD で検出された粒子数を表し、色は最も早い検出器からの相対時間を示す。(B) 各 SD で記録された検出器信号波形をシャワー軸からの距離ごとに示す。
The highest energy particle event observed by TA SD array on 27 May 2021. (A) A map of the TA SD. Each dot indicates the location of a SD station. The size of the colored circles is proportional to the number of particles detected by each station and the color denotes the relative time from the earliest detector. (B) The corresponding detector waveforms for each station are shown with distance from the shower axis indicated.

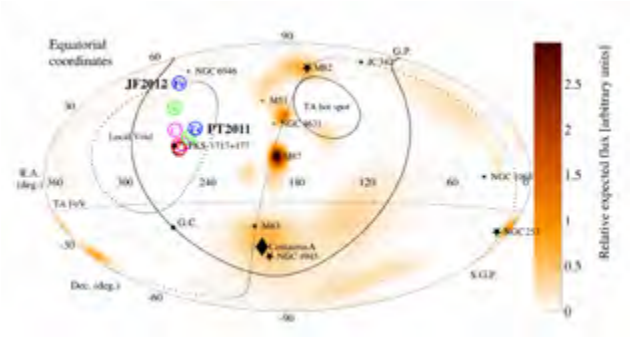


図 4 244 EeV の最高エネルギーイベントの到来方向（○）と銀河磁場による偏向を考慮した場合の源の方向（色は、水素、炭素、シリコン、鉄の原子核を仮定した場合）。背景にあるオレンジ色の濃淡は、近傍起源候補天体から期待される宇宙線相対量。
The arrival direction of the highest energy event at 244 EeV（○）and the direction of the source when deflection by the Galactic magnetic field is taken into account (colors assume hydrogen, carbon, silicon and iron nuclei). The orange shading in the background is the cosmic ray relative abundance expected from candidate nearby source sources.

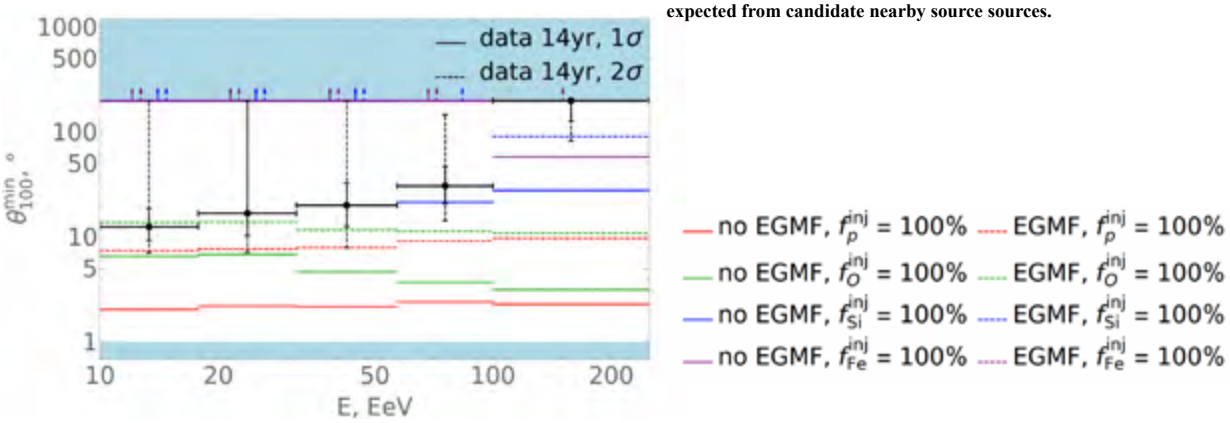


図 5 宇宙線の偏向角 θ_{100} を、TA 実験 14 年の観測から推定した値（●）と、シミュレーションによって推定した値（色付き横線）。色と線の形状は、原子核組成（水素、酸素、シリコン、鉄）と計算で仮定した銀河間磁場の強さ（実線＝ゼロ、点線＝非常に強い（1.7 nG））を表している。観測結果は 50 EeV 以下では軽い原子核と、100 EeV 以上では鉄のような重い原子核とよく合っている。
Cosmic ray deflection angle θ_{100} estimated from observations from 14 years of TA experiments (●) and from simulations (coloured horizontal lines). The colours and line shapes represent the nuclear composition (hydrogen, oxygen, silicon and iron) and the strength of the intergalactic magnetic field assumed in the calculations (solid line = zero, dotted line = very strong (1.7 nG)). The observations fit well with lighter nuclei below 50 EeV and with heavier nuclei such as iron above 100 EeV.

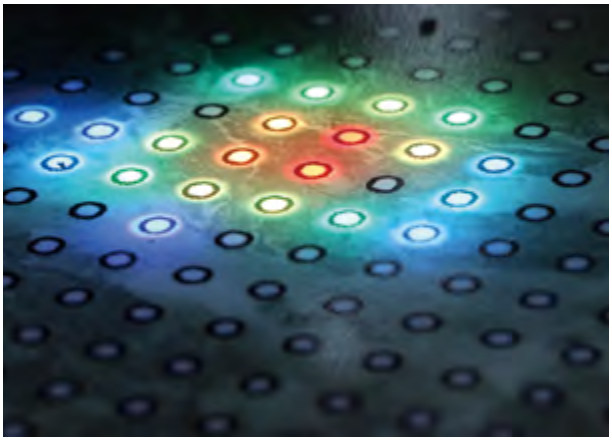
The Telescope Array (TA) was built to study the origin and nature of Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECRs) in Utah, USA. It is composed of a ground array of 507 scintillation counters and three batteries of air fluorescence telescopes overlooking the array from the periphery. The accuracy of measurements is greatly improved by observing the same event by the telescope and the ground array at the same time. The sensitivity of TA is an order of magnitude larger than that of AGASA, a predecessor of TA, which had been operated until 2004 in the Akeno observatory in Yamanashi, Japan. The large sensitivity and the precision of TA help to improve the association of high energy cosmic rays with the potential astronomical sources in the universe. The TA has been operated by the international collaboration of Japan, USA, Korea, Russia, Belgium, Czech, Slovenia and Poland. Observations by TA began in the spring of 2008. The TALE is the TA Low-energy Extension down to $10^{15.3}$ electron volts (eV), which aims at studying the transition of galactic cosmic rays to extragalactic cosmic rays. On the northern TA side, the 10 TALE telescopes are in operation and the array of 130 TALE surface detectors is in stable operation. The important subject of the TALE surface detector is to provide the information near the shower core position on the ground to determine the shower axis better for the precise measurement of Xmax.

Since the TA experiment started routine observations in 2008, the results of observations of energy spectra, nuclear composition and direction-of-arrival anisotropy of extremely high-energy cosmic rays above 10^{18} eV have been published. Furthermore, the TALE experiment, an extension of the sensitivity to the low-energy, started observations in 2018, and its results have also been presented at international conferences. In the following, two recent results are presented.

A cosmic ray air shower of 2.44 x 10^{20} eV (244 exa-electron volts = 244 EeV, called “Amaterasu” particle) was detected at dawn on 27 May 2021. This was the largest energy event in the 15 years of operation of the TA experiment and was comparable to the highest energy cosmic ray detected in 1991 (“Oh My God” particle, 320 EeV) in the history of observations. If cosmic rays of such extreme high energy are of astronomical origin, the candidates are expected to be limited to intense astronomical phenomena such as supermassive black holes of Active Galactic Nuclei and/or Star-Burst Galaxies, and to the vicinity of the Earth (within about 150 million light years). However, the Amaterasu particles arrived from a direction where there are no nearby candidate objects, called Local Void in the large-scale structure of the Universe, and from a different direction from the cosmic ray excess above 57 EeV reported by the TA experiment (called “Hot Spot”) and from the elliptical galaxy (M87) in the Virgo cluster.

Conventionally, the particle species (nuclear species) of cosmic rays have been determined using observations of the longitudinal development of air showers with atmospheric fluorescence detectors (FDs). This method has the disadvantage that observations with FDs are limited to clear nights with no moon, and the observation statistics are only about 10% of those of the SD array method. A new method for determining nuclear composition was therefore developed using the abundance of data from the SD array, which is ten times richer than FD observations, and applied to 14 years of TA observations to determine nuclear composition. The results show that, above 10^{20} eV (100 EeV), the deflection of the highest energy cosmic rays from their source by the cosmic magnetic field may be very large, and that this is consistent with the highest energy cosmic rays being heavy nuclei with large electric charges.

The TA extension (TAx4), which will quadruple the TA effective area, aims at confirming the above-mentioned hotspot and studying energy spectrum, composition and other anisotropies of arrival directions of UHECRs in the highest-energy region precisely. Totally 257 surface detectors were deployed in February and March of 2019. Two telescope stations were constructed and they started cosmic-ray observations.







Tibet AS γ

研究の目的

◆高エネルギーガンマ線を放射している天体を探索し、宇宙線の加速起源を明らかにする
◆超高エネルギー一次宇宙線の化学組成（どの原子核なのか）を解明する
◆超高エネルギー一次宇宙線のエネルギースペクトル（分布）を計測し、宇宙線の加速機構を解明する
◆高エネルギー宇宙線により太陽惑星間に拡がる磁場構造を調べる
◆高エネルギー宇宙線の飛来方向に関する特異性（異方性）を調べる

実験装置とその改良

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

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

研究内容

高エネルギーガンマ線の検出

空気シャワー観測装置で、かに星雲から TeV(=1 兆電子ボルト) 領域のガンマ線を検出しました（図 1 ）。空気シャワー観測装置による高エネルギーガンマ線の検出は世界で初めてです。また、活動銀河核の Mrk421 や Mrk501 などからのガンマ線検出にも成功しています。さらに、2019 年には、かに星雲から 100 TeV を超えるガンマ線の検出に世界で初めて成功し、新しいエネルギー領域（sub-PeV）のガンマ線天文学の扉を開きました。引き続き、2021 年には銀河面に沿って sub-PeV 領域の拡散ガンマ線を発見しました (図 2)。これは、宇宙線起源の sub-PeV 領域ガンマ線の世界初検出であり、宇宙線を PeV エネルギー領域まで加速している宇宙線加速器（PeVatron）が銀河系内にあることを示す初めての実験的証拠です。2021 年には超新星残骸 G106.3+2.7 と分子雲の重なった領域から世界で初めて sub-PeV 領域ガンマ線を検出するとともに、白鳥座方向の Cygnus OB 1 と OB 2 領域、HESS J1843-033、J1849-000 方向から sub-PeV 領域ガンマ線を検出することに成功しました。G106.3+2.7 は PeVatron の一番良い候補の一つとなっています。

Knee エネルギー領域の一次宇宙線のエネルギースペクトルの観測

Knee エネルギー領域（1000 兆電子ボルト～ 1 京電子ボルト）の一次宇宙線のエネルギースペクトルを大変良い精度で観測しました（図 3)。Knee エネルギー領域のエネルギースペクトルの折れ曲がりは、超新星爆発の衝撃波による粒子加速の限界や、銀河系からの宇宙線の流出問題を解く重要な鍵を握っています。一方空気シャワー観測装置とその中心に置かれた空気シャワーコア検出器と呼ばれる装置との連動実験からは、宇宙線を構成する原子核成分の内、陽子やヘリウムに関するエネルギースペクトルが得られていますが、図 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る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おり、2008 年から太陽サイクル 24 に入りました。チベットの空気シャワー観測装置は精巧に作られているため、銀河宇宙線による太陽と月（いずれも視直径約 0.5°）の影を鮮明に捉えることが出来ます。銀河宇宙線中の太陽の影は、太陽活動によって変化する太陽惑星間の磁場の影響を受けて、その深さや位置が変化します。図 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 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。この実験により、今まで観測方法が無かった太陽惑星間の磁場構造についても貴重なデータが得られるものと期待されています。

銀河宇宙線の異方性

ほぼ等方的に飛来する、数兆電子ボルト（数 TeV）から数百兆電子ボルト（数百 TeV）のエネルギーを持つ宇宙線の恒星時異方性を高精度で 2 次元的に測定しました。良く知られた 0.2 % 程度の恒星時異方性（Tail-in や Loss Cone）の他に、白鳥座方向（シグナス領域）に新しい銀河宇宙線異方性を発見しました（図 6）。さらに、シグナス領域に数個のホットスポットがあることが判明し、新しいガンマ線放射天体の可能性が示唆されました。そしてそれは米国のミラグロ実験によって確認され、我々の観測の正しさが検証されました。また、銀河回転運動に起因する見かけの恒星時異方性（約 0.1 %）が観測されなかったことにより、銀河宇宙線が局所的な銀河磁場と共回転していることが示されました。

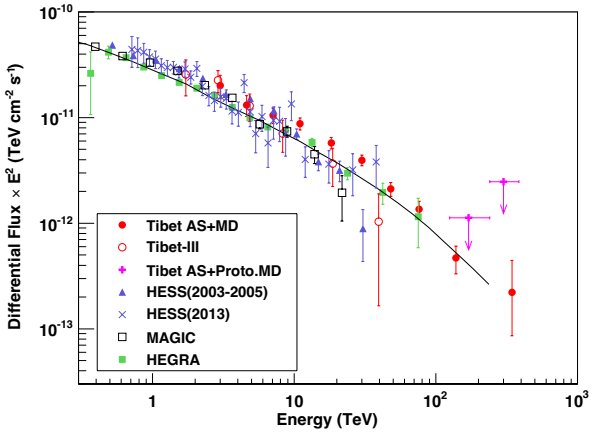


図 1 かに星雲からの超高エネルギー領域ガンマ線エネルギースペクトル
Energy spectrum of very high energy gamma rays from the Crab Nebla.

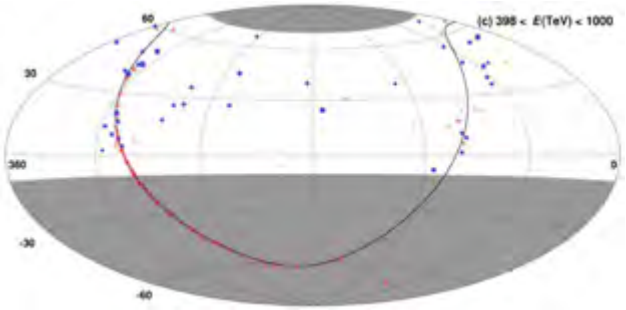


図 2 チベット空気シャワー観測装置と地下ミューオン観測装置の連動実験により観測された 400 TeV 以上のガンマ線の飛来方向（青丸：赤道座標）。黒実線は銀河面、赤×印は既知の TeV ソースの位置を示す。灰色は視野外。
Projection of Gamma ray events with energy more than 400TeV observed jointly by the Tibet AS and underground muon detector (blue spot: equatorial cordinates) . Black solid line : Galactic Plane, red x point : known sources with energy more than 1 TeV, gray zone : out of sight.

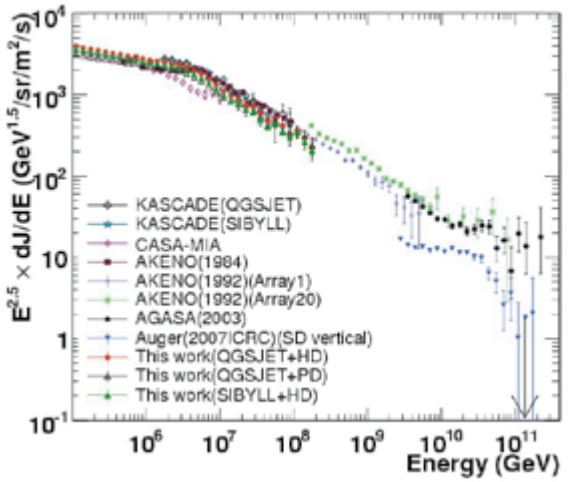


図 3 Knee エネルギー領域以上の宇宙線全粒子エネルギースペクトル
All-particle energy spectrum of primary cosmic rays above “Knee” energy region.

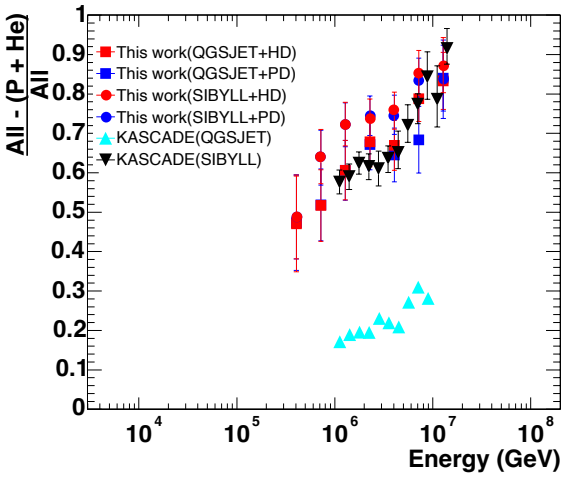


図 4 Knee エネルギー領域一次宇宙線中でヘリウムより重い原子核成分の割合のエネルギー依存性
Energy dependence of fraction of nuclei heavier than helium in primary cosmic rays around “Knee” enegy region.

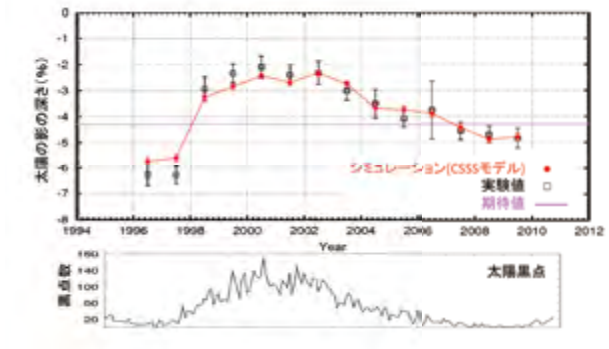


図 5 観測された宇宙線中の太陽の影の深さに関するデータシミュレーションの比較㊤と、太陽黒点数の年変化㊦
Comparison of Sun shadow depth in cosmic rays between MC and simulation and the observed data. (Top) Yearly variation of sun spot numbers. (Bottom)

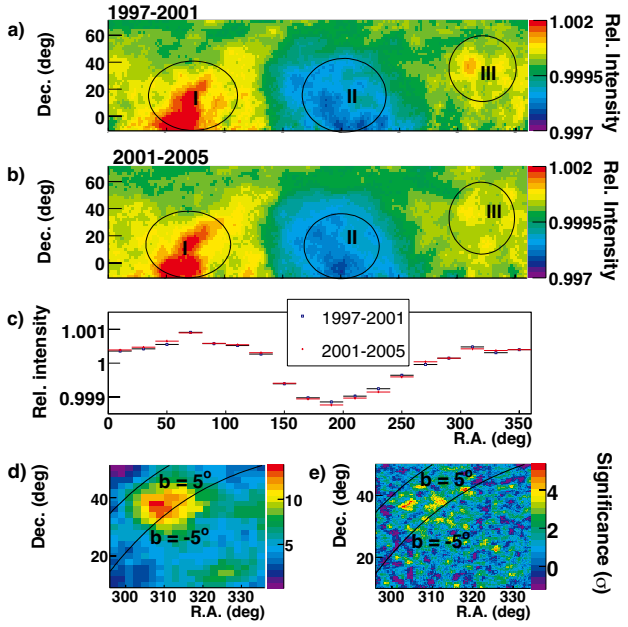


図 6 シグナス領域（Ⅲ）のガンマ線点源探索（e の赤いホットスポットに注目）
Search for gamma ray point sources in the Cygnus region (Ⅲ). Watch out the hot red spots in e), please.



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

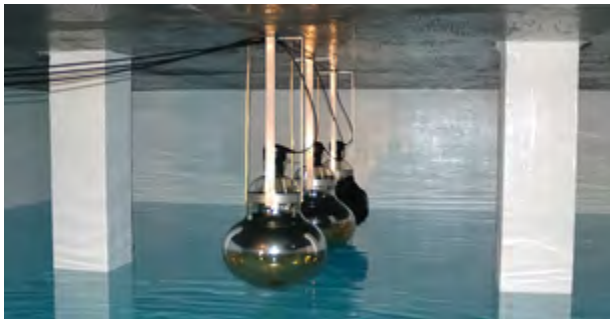
We constructed large underground muon detectors (MD: approximately 4000 m^2) under Tibet-III to locate yet-unknown cosmic ray accelerator (PeVatron) producing gamma rays at 100 TeV energies. We also set up new air shower core detectors (YAC) in order to more precisely measure the knee position of proton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

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. In 2019, we announced successful detection of photons beyond 100 TeV from Crab for the first time, openning a new energy window (sub-PeV) in gamma ray astronomy. Subsequently, in 2021, we discovered sub-PeV diffuse gamma rays from the galactic disk. This is not only the first detection of sub-PeV gamma rays of cosmic ray origin, but also gives the first experimental evidence that cosmic ray accelerators which accelerate cosmic rays up to PeV energies (PeVatrons) really exist in our galaxy. In 2021, we also succeeded in the first detection of sub-PeV gamma rays from an overlapping region between a supernova remnant G106.3+2.7 and a molecular cloud as well as in detection of sub-PeV gamma rays from the Cygnus OB1 and OB2 in the constellation Cygnus. Thus, G106.3+2.7 is one of the best candidates of a PeVatron.

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

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

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





High Energy Astrophysics

研究の目的

◆高エネルギー天体での粒子加速と放射機構を理論的に解明する
◆相対論的ジェットの生成・加速機構を解明する

宇宙には光速に近い速さで飛び回っている粒子が存在し、そのエネルギーは 100 万〜 10 億電子ボルト未満から 1 垓（1 兆の 1 億倍）電子ボルト超まで、十数桁以上に渡ります。それらは宇宙線として地球に飛来し直接観測されることもあれば、それらの放つエックス線、ガンマ線、ニュートリノの観測により間接的に存在が 知られることもあります。こうした宇宙線粒子は高エネルギー天体現象に伴い加速・生成されていると考えられていますが、その詳細には未知の部分が沢山残っており、我々「高エネルギー天体グループ」の研究ターゲットになっています。

背景

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

研究内容

高エネルギー天体現象による宇宙線の加速過程の探索

宇宙線の加速過程・放射過程の舞台となる高エネルギー天体現象として、超新星爆発・パルサー磁気圏（図 1）、マグネター（超強磁場中性子星）の巨大フレア、銀河中心ブラックホールから噴き出すジェット、星形成銀河、正体不明のガンマ線バースト、銀河団などを挙げることができます。近年の Fermi 衛星や地上チェレンコフ望遠鏡の活躍により、こうした天体からのガンマ線観測は、目覚ましい発展を遂げています。また IceCube のような巨大設備の稼動が始まってニュートリノの検出効率があがり、その起源天体を探るうえで十分な量のサンプルが取れる日が近づいています。

我々のグループでは、伝統的な衝撃波による粒子加速過程だけではなく、乱流による比較的遅い加速過程を考え、活動銀河核ジェットやガンマ線バーストなどに適用する研究を進めています。また、こうした天体から放出されるガンマ線、宇宙線、ニュートリノなどの量を定量的に見積った上で観測と比べるなど（図 2）、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。

活動銀河核、ガンマ線バースト、パルサー風、超新星残骸などでの未解決問題

高エネルギー天体における謎は、宇宙線粒子の加速だけではありません。活動銀河核から噴き出している相対論的なジェットはどのように加速されているのか？　ガンマ線バーストからの非常に明るいガンマ線放射は、どのような機構で放たれているのか？　パルサー風はどのように磁場エネルギーを運動エネルギーに転換し、超相対論的な流れを実現しているのか？　超新星残骸やガンマ線バーストの残光における衝撃波では、どのように磁場が増幅されているのか？　天体で生まれた相対論的粒子は、我々の銀河系内の星間空間をどのように伝播し、銀河系外へ逃げていくのか？　こうした課題は未解決問題として残されており、我々の研究テーマとなっています。これほど基礎的な段階から解明されていない学問分野は、地球上で観察・実験されている事象にはないでしょう。知のフロンティアとして、上記の課題に取り組むことは大変意義深いと考えています。

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る。©NAOJ
A Subaru image of the Crab nebula, which is known as an efficient particle accelerator. A rotating neutron star, the Crab pulsar, which was created after the supernova explosion in 1054 A.D, is at the center of the nebula and known to provide energy throughout the nebula.

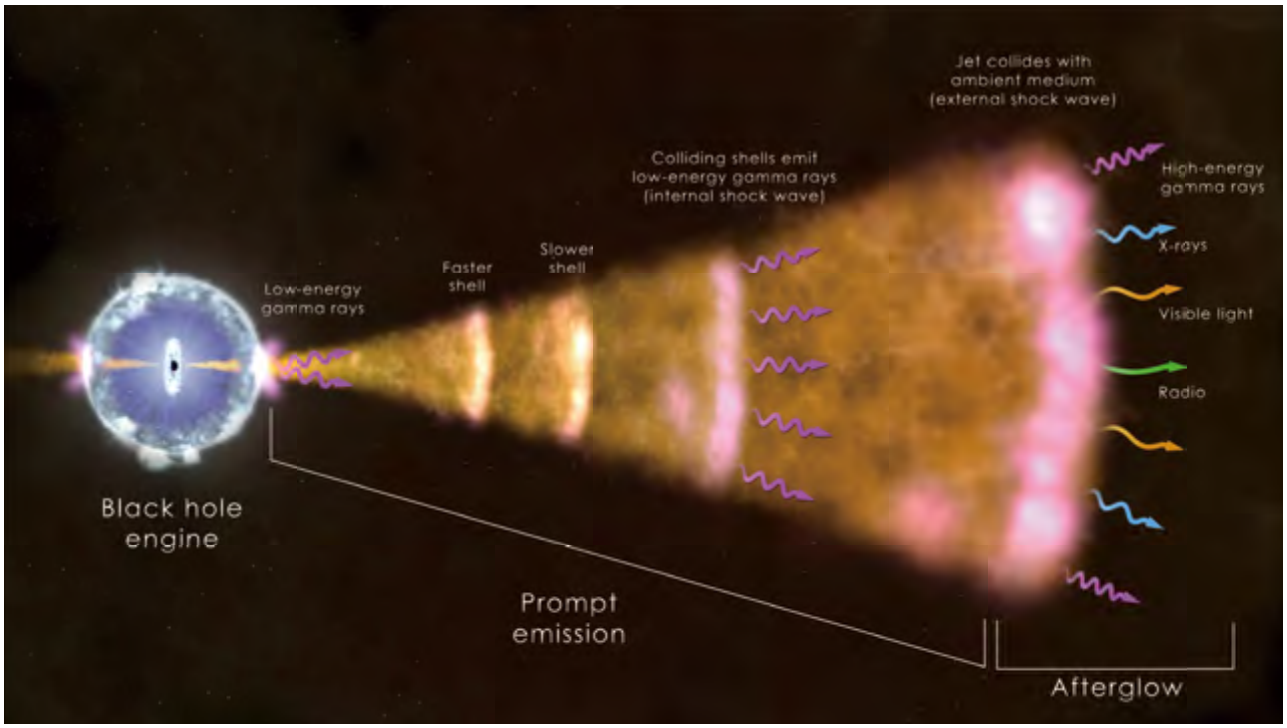


図 2 ガンマ線バーストの想像図。巨星がその寿命に至り、中心核が重力崩壊を起こし、ブラックホールを形成する。そこへ星のガスが降着し、細く絞られた相対論的なジェットを放つ。ジェットは星表面を突き破り、星間空間へ飛び出す。そこで衝撃波を形成し、数十秒間に渡ってガンマ線を放ったり、徐々に暗くなる電波から X 線での残光を放ったりする。©NASA's Goddard Space Flight Center

Description of gamma-ray burst. When the collapse of a very massive star at the end of its life forms a black hole. Gas in the star accretes onto the black hole. Then, the black hole produces well-collimated relativistic jets. The jets break out the surface of the star, and propagate in the interstellar space. Shocks formed in the jets or interstellar medium are considered to be responsible for the prompt gamma-ray emission and the afterglow emission, respectively.

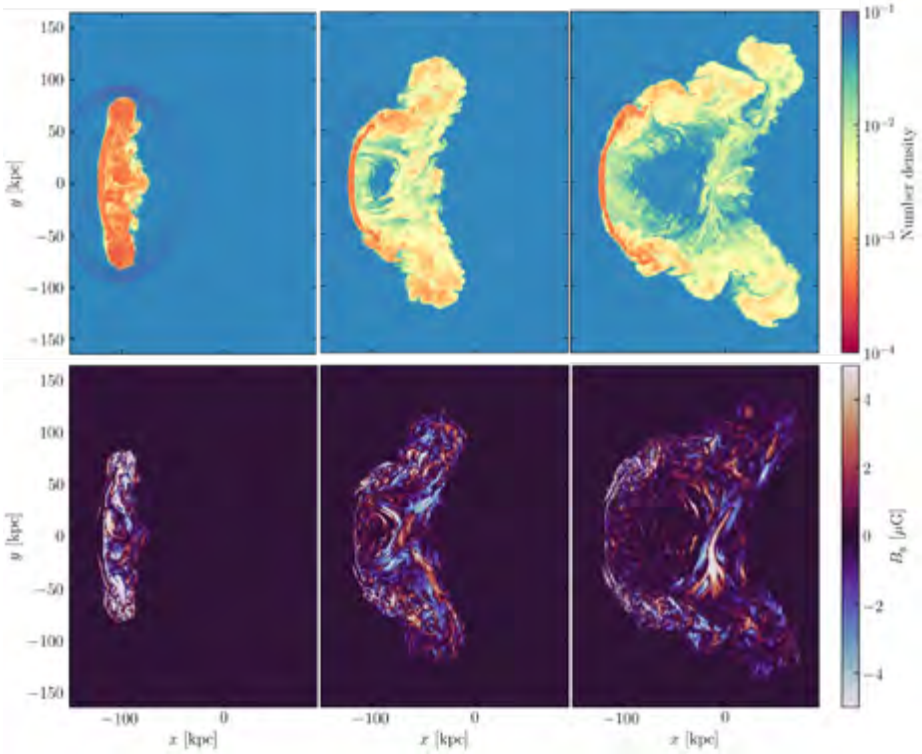
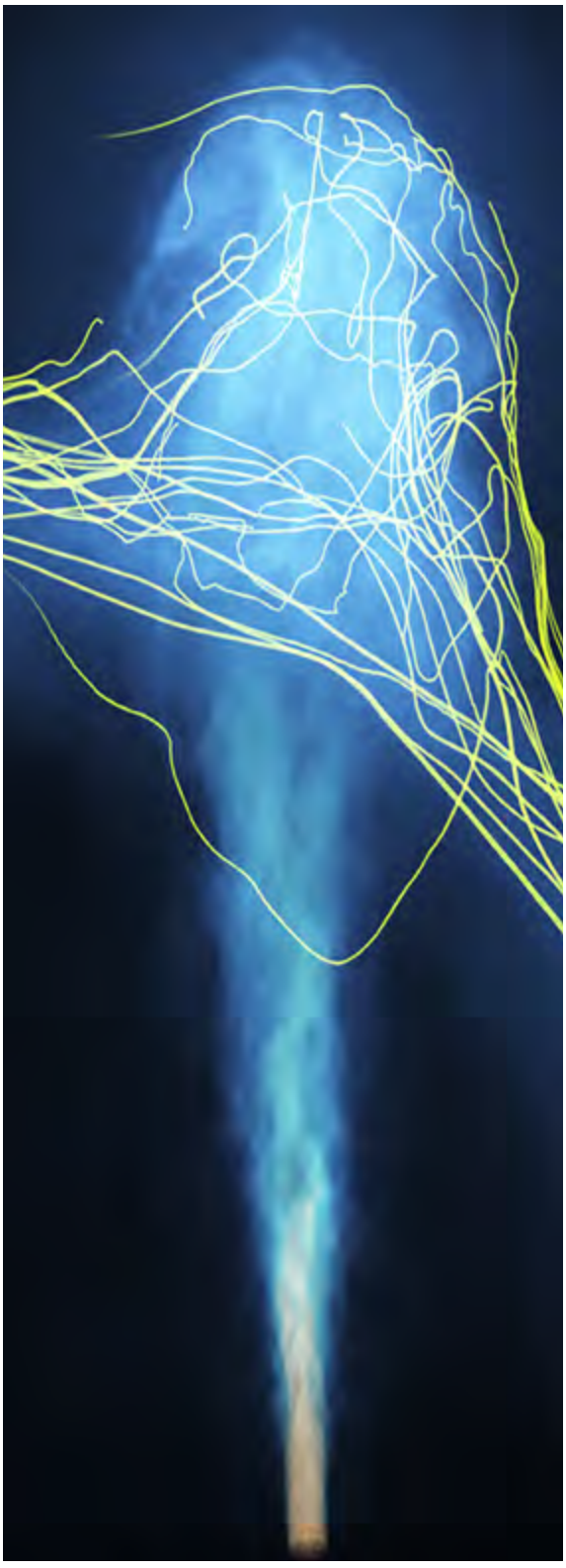


図 3 銀河中心ブラックホールから噴出するジェットのシミュレーション。上はガス密度、下は磁場の値を示している。この銀河は銀河団中を運動しており、ジェットは銀河団ガスを向かい風として受け、右側に流され、曲げられている。ここで励起された乱流が高エネルギー粒子を加速し、電波やニュートリノなどが放射される。

Simulation of a jet from a super massive black hole at the center of a galaxy. The upper panel shows the gas density and the lower panel shows the magnetic field.The galaxy is moving in a galaxy cluster, so that the jet is swept and bent to the right by the ram pressure of the intara cluster medium. The turbulence excited here accelerates energetic particles, which can emit radio waves or neutrinos.



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

Targets of our current study include supernova explosions/pulsar magnetospheres (Fig. 1), giant flares of magnetars, jets from active galactic nuclei, star-burst galaxies, mysterious gamma ray bursts, and galaxy clusters. We have studied not only the models based on standard DSA theory, but also a relatively slow acceleration model via plasma turbulences, which has been applied to the relativistic jets from active galactic nuclei, or gamma-ray bursts. We have also estimated emissions of gamma-rays, cosmic-rays, and neutrinos from high-energy astronomical objects, and compare our results with observational constraints (Fig. 2).

The open problems in high-energy astrophysics are not only the acceleration mechanism of cosmic rays. How are relativistic jets from active galactic nuclei accelerated? How are very bright gamma-ray emissions emitted in gamma-ray bursts? How is the magnetic energy of the pulsar winds converted into the kinetic energy to form ultra-relativistic outflows? How are magnetic fields amplified in shocks in supernova remnants or afterglows of gamma-ray bursts? How do relativistic particles propagate in interstellar space and escape from the galactic plane? Those problems remain unsolved, and are our research themes. In phenomena observed or experimented on earth, there may be no research field that is not fundamentally understood like high-energy astrophysical phenomena. Thus, study of the above unsolved problems are very exciting and important to expand our knowledge of the universe.



KAGRA

研究の目的

◆大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」を用いて重力波を直接検出し、重力波観測ネットワークの一員として、重力波天文学を進める
◆一般相対性理論を検証する
◆電磁波では見えない現象を重力波でとらえる
◆重力波の発生を他の天体観測グループに伝えて、いち早く同じ天体を観測してもらう
◆重力の強い場所と弱い場所での物理現象を比較して差がないか調べる

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。物体が加速度運動すると、周囲の空間を歪めながら移動するので、その歪みが遠方まで伝わります。伝わる速さは光の速さと同じ速さと考えられています。これが重力波です。超新星爆発やブラックホールの形成など、強い重力場での一般相対性理論の検証は、唯一重力波によってのみ可能です。また、可視光、電磁波、ニュートリノと拡がってきた天体観測の手段に新たに重力波が加われば、今まで観測不能であった星や宇宙の情報が得られる可能性があり、重力波を検出することには非常に重要な意味があります。そしてついに、アメリカのLIGOグループの2台の重力波望遠鏡が、2015年9月14日に、人類史上初めて、連星ブラックホールの合体から発生した重力波の直接観測に成功し、重力波天文学の幕が切って落とされました。その後も重力波イベントが次々と観測され、2017年8月17日、イタリアのVirgoとの国際共同観測で連星中性子星の合体イベントもとらえられるなど、2020年3月までにLIGOとVirgoにより90の重力波イベントが観測されています。

実験装置

重力波が到達すると、二つの物体間の距離が変化します。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本に重ねます。光路長に応じて、重なり方が変化し、それが光の干渉縞となって観測されます。もし光路長が重力波によって変化したとすると、その干渉縞が明滅し始めます。このわずかな明滅を利用して、重力波の存在を検出します。望遠鏡の感度を高めるには、干渉計の光路を長くすることと、様々な振動雑音を極限まで取り除くことが必要です。特に地面の振動は、重力波以外の光路長を変えてしまう原因となるので、極限までの振動抑制が必要となります。そのために、日本のKAGRAでは、この望遠鏡を地面振動の少ない神岡鉱山地下200 mの、L字型に直交する長さ3 kmのトンネル二本の中に設置しています。さらに、サファイア鏡など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ます。

研究の現況

高性能防振装置やサファイア鏡の開発

KAGRA計画は2010年から文部科学省の最先端研究基盤事業の一つとして建設が開始され、現在は大規模学術フロンティア促進事業として推進されています。2012年に開始された空洞掘削は2014年3月末に完成し、2014年度は、電気工事・冷却水等の配管工事・真空装置の設置土台工事等、空洞内整備が行われました。2015年度には、レーザー干渉計の設置・インストールが行われ、第一期実験施設を完成させた後、2016年3月から4月にかけて、初めてのレーザー干渉計の試験運転を行いました。そして2019年にはすべての機器がインストールされました。同年10月にはLIGO、Virgoとの研究協定の調印を行い、2020年2月、観測を開始しました。こののち、LIGO、Virgoとの同時重力波観測をめざし、感度を向上させていきます。また、本計画の特徴であり、先進的な挑戦でもある地下環境の利用と装置と低温化に関し、同様のテーマを共有するヨーロッパの次世代重力波望遠鏡計画EGOとの間で2012年に開始した国際共同研究では重要な研究成果が上がっています。さらに、KAGRA計画における各重要構成部門の推進を加速させるために、韓国などアジアの重力波研究グループとの共同研究も拡大し、KAGRA Scientific Congress(KSC)が創設されました。

7億光年の範囲で発生する重力波検出を目指す

KAGRA計画では、地球から約7億光年の範囲内で発生する重力波の直接検出を目指し、アメリカやヨーロッパの重力波望遠鏡計画（LIGO計画、VIRGO計画、GEO計画）と、重力波天文学の創生という人類共通の目標の実現のために、各計画と技術的・観測的協力をより密に行う覚書を締結しています。



図1 神岡の地下に設置されたKAGRA
KAGRA installed underground at Kamioka



図 2 レーザーとレーザーを格納する ISO Class1 クリーンブース
Laser system and ISO class 1 clean room for housing it

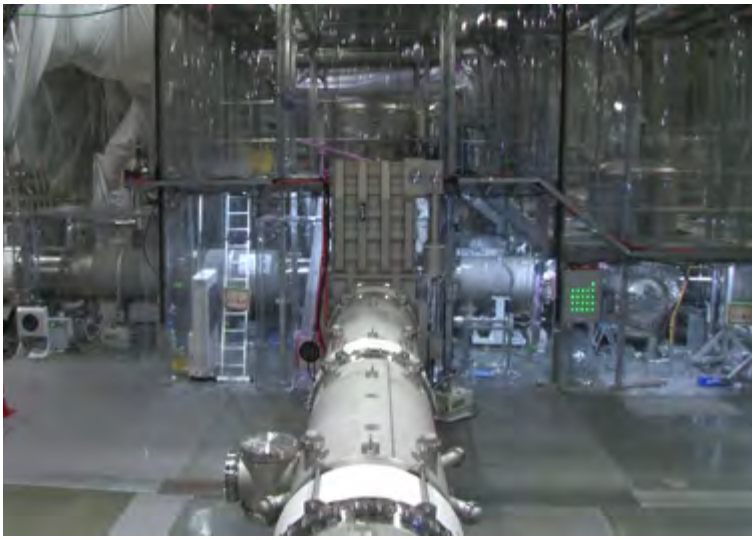


図 3 中央実験室内、２本のアームの交差点付近
Around the crossing of two arm ducts in the KAGRA's central laboratory hall

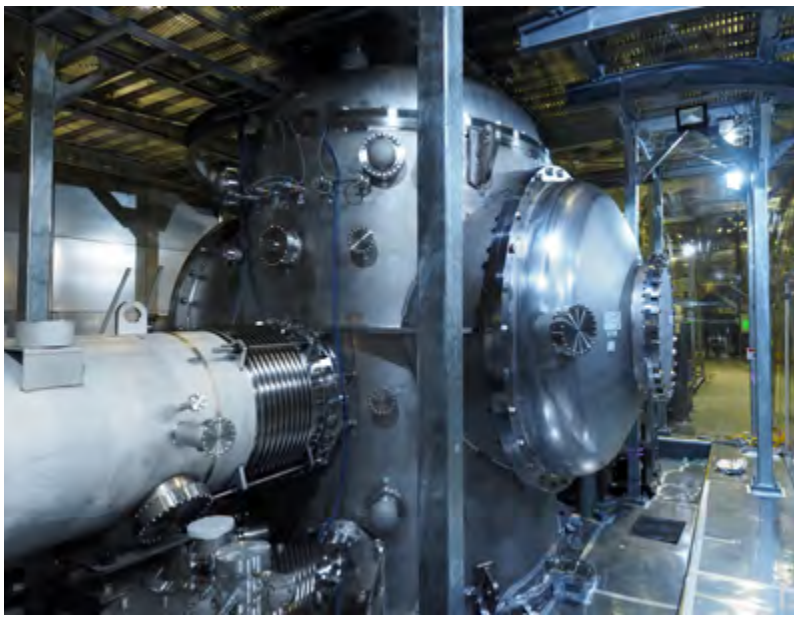


図 4 サファイア鏡を収納する冷凍容器（クライオスタット）
A cryostat which contains a sapphire mirror

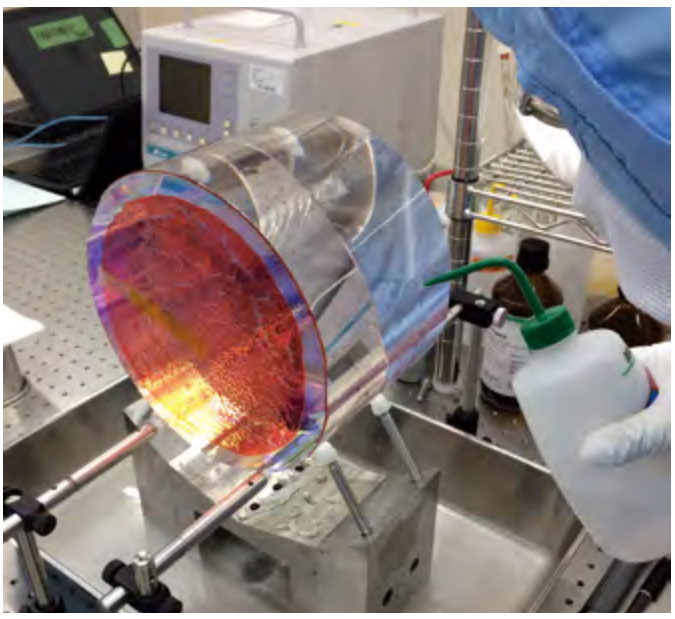


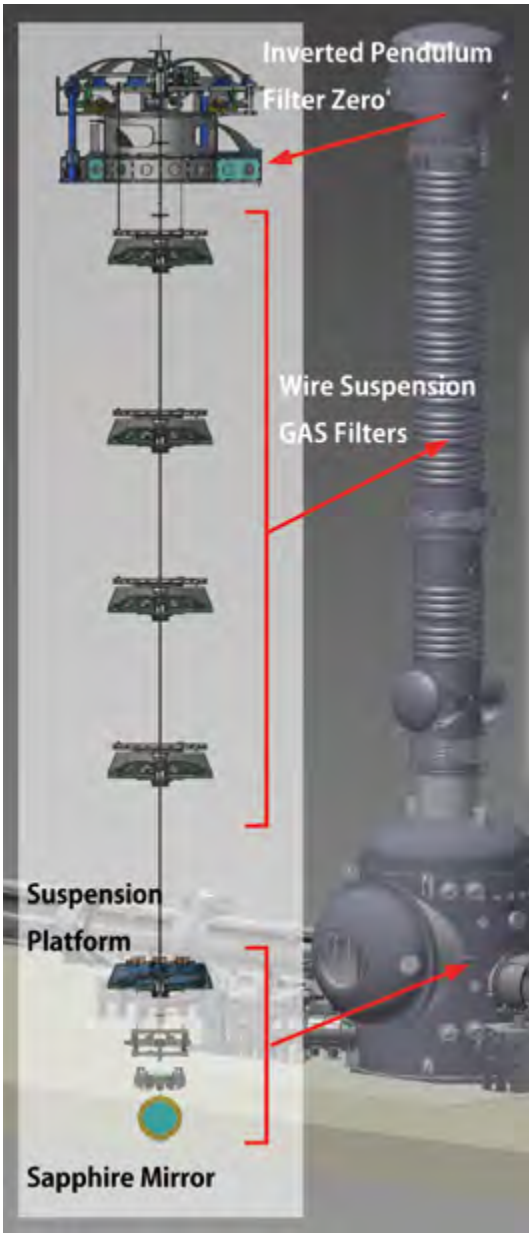
図 5 直径 22 cm の無色透明のサファイアの鏡
A transparent sapphire mirror 22 cm in diameter



図 6 2020 年 2 月 25 日、KAGRA 制御室内で観測開始を喜ぶ研究者
February 25, 2020, Researchers celebrating KAGRA's observation start

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

A gravitational wave should cause a relative change (strain) between two displaced points in proportion to their distance. Even if we take a 3 km baseline length, the effect is so tiny that extensive R&D is needed to detect it. Based on technical achievements of a 300 m TAMA interferometer and a 100 m interferometer CLIO (Cryogenic Laser Interferometer Observatory), the KAGRA project started as one of Strategic Fund for Strengthening Leading-edge Research and Development of Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology-Japan in 2010. The tunnel construction has been finished in FY 2013. In FY 2014, the construction of facilities and setting of almost vacuum tubes and tanks have been done. In parallel, the laser source and its frequency and transverse mode stabilization system using a mode cleaner cavities and several optics for forming a Michelson interferometer were installed. In March 2016, the first interferometer operation was demonstrated (named iKAGRA), and its engineering run finished on April 25th in 2016. All the interferometer instruments were installed in 2019 and after subsequent commissioning works, KAGRA started gravitational wave observation in February 2020.



The collaboration research between the European Gravitational Observatory (EGO) and KAGRA has been conducted to explore the further technical enhancement about a cryogenic interferometer and to share the profound knowledge about the underground environment. In addition to this, KSC (KAGRA Scientific Congress) was established to accelerate KAGRA to produce scientific results for gravitational wave detections.

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 128 Mpc at its optimum configuration, for which one expects a few events per year, on average. To satisfy this objective, KAGRA adopts a power-recycled Fabry-Perot Michelson interferometer with resonant-sideband extraction scheme, the main mirrors of which are cooled down to cryogenic temperature, 20 K, for reducing the thermal noise; they are located in a quiet underground site in Kamioka mine.

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



Observational Cosmology

図 1 すばる望遠鏡の近赤外線多天体撮像分光装置 (MOIRCS)
MOIRCS (Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph) of Subaru telescope

研究の目的

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

背景

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

実験装置

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。すばる望遠鏡次世代超広視野カメラ（Hyper Suprime-Cam; HSC）に取り付けた狭帯域フィルターを用いて、宇宙史初期に多数存在する初期銀河、その中でも特に検出しやすい Ly α 輝線を出す銀河（LAE）を探索しています。見つけられたこれらの銀河をハッブル宇宙望遠鏡やケック望遠鏡などで詳しく調べることで星や銀河の誕生の謎に迫っています。さらに、LAE の Ly α 輝線が宇宙の中性水素から受ける吸収の強度によって宇宙再電離の歴史を調べています。

研究内容

Hyper Suprime-Cam による初期銀河の探査

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

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

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



図 2 ハワイ島マウナケア山頂に設置されたすばる望遠鏡 ©NAOJ
Subaru telescope at the summit of Mauna-Kea, Hawaii Island

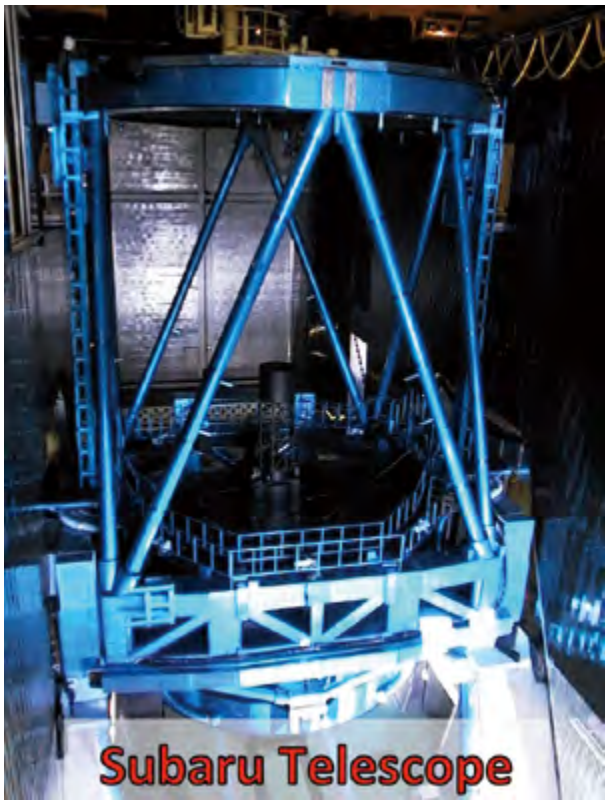


図 3 ハワイ島マウナケア山頂に設置された国立天文台の口径 8.2 m すばる望遠鏡
Subaru telescope, NAOJ, with an 8.2m primary mirror at the summit of Mauna-Kea, Hawaii Island



図 4 すばる望遠鏡のトップリング上に装着された Suprime-Cam
Suprime-Cam installed on the top ring of Subaru telescope

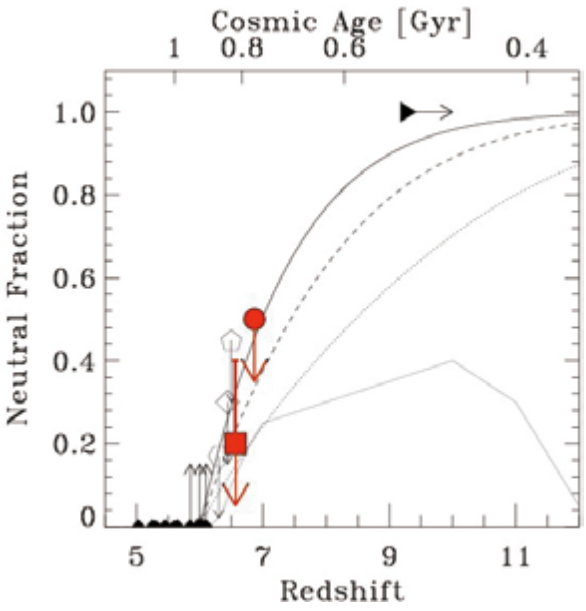


図 5 これまでの研究で明らかにされた宇宙再電離の歴史。赤方偏移（横軸）に対する中性水素比（縦軸）の進化。赤印が Suprime-Cam の探査から付けられた制限。4 つの曲線は異なる理論モデル。いつ、どのように宇宙再電離が進んできたかはほとんど分かっていない。
History of cosmic reionization, so far, understood. Red symbols denote constraints from our Suprime-Cam survey. Four lines represent different theoretical predictions. The epoch and process of cosmic reionization are unknown.

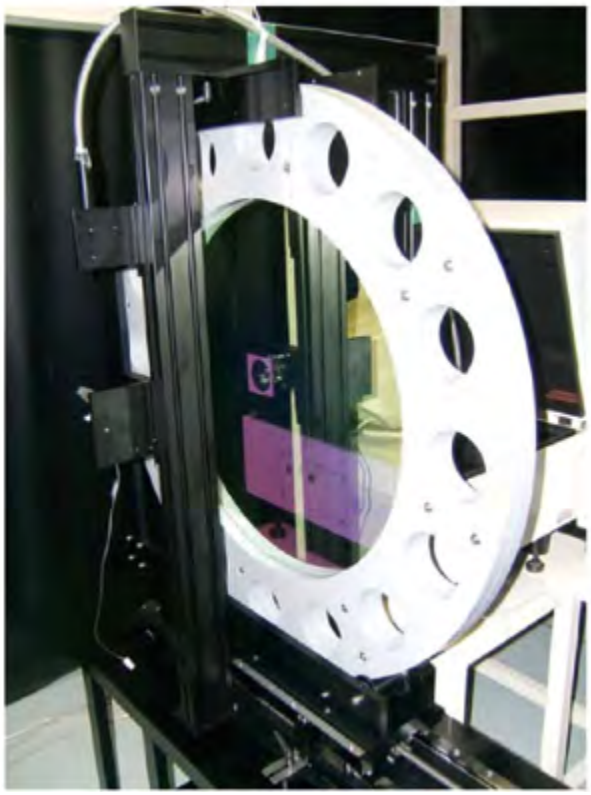


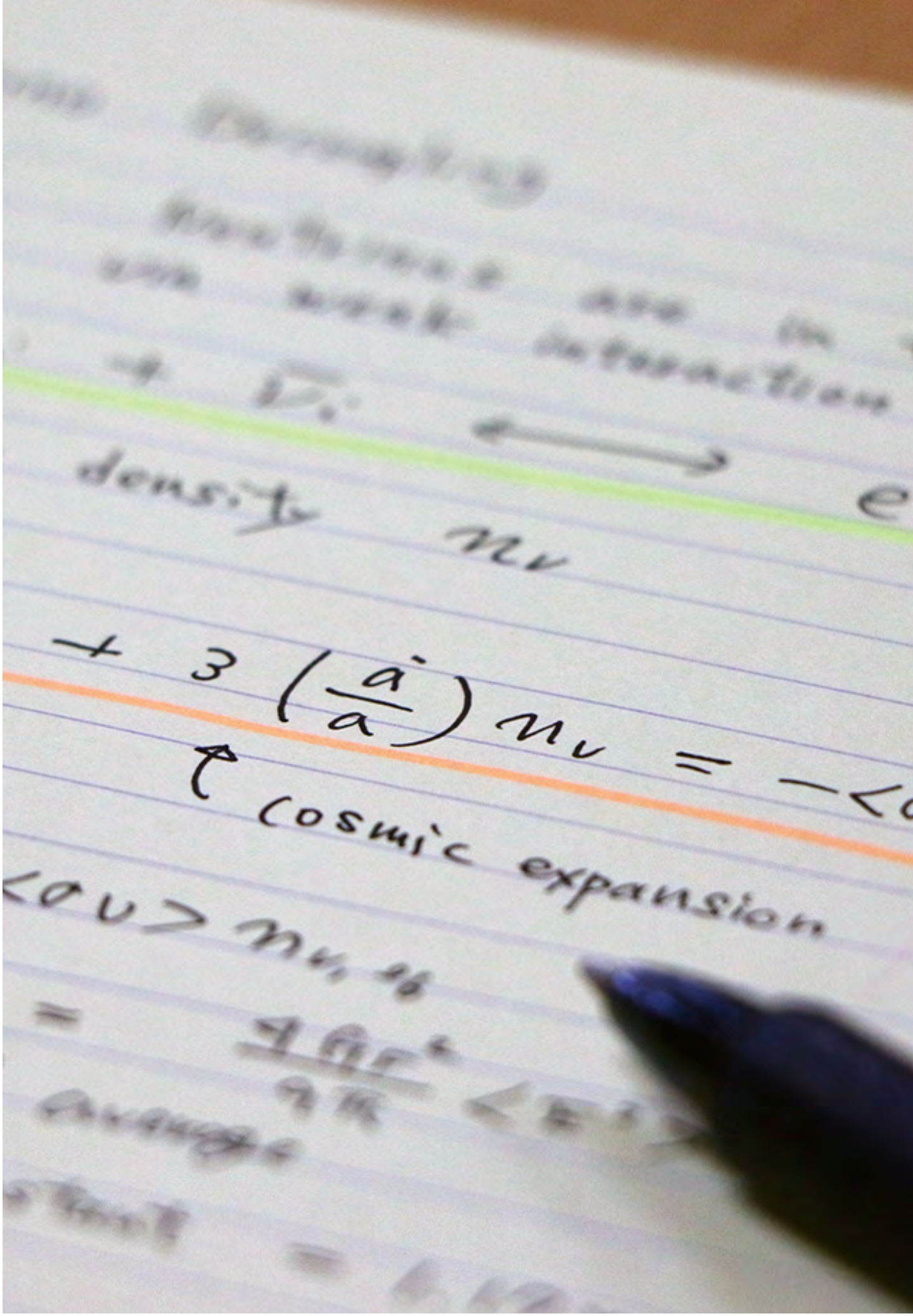
図 6 開発中のすばる HSC 用狭帯域フィルター (Materion [旧 Barr Associates] 社と協力)。
Subaru/HSC narrow band filter under development (collaboration with Barr Associates Inc.)



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

We have recently completed our large survey for Lyα emitting galaxies (LAEs) at z~7 with Subaru Prime Focus Camera (Suprime-Cam) and Keck DEIMOS spectrograph, and reported the results of the survey widely in the world. Our results indicate that there are clear signatures of increasing neutral hydrogen fraction towards z~7, but that the universe is still highly ionized at z~7. These results cast a riddle for the physics of cosmic reionization. It is known that ionizing photons produced by stars and galaxies are less than 1/3 of the amount of ionizing photons necessary for ionized universe at z~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 Lyα 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~7 with HSC than our previous surveys with Suprime-Cam.



Theory

研究の目的

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

研究内容

電磁気力、弱い力、強い力をまとめる大統一理論

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

さまざまな対称性を持つ素粒子模型・宇宙模型

素粒子の世界を司る法則は、いくつかの対称性と呼ばれる概念が自然界に存在することと強く結びついていることが分かっています。そのことから、現在素粒子論が抱えるいくつかの問題についても何らかの未知の対称性が解決の鍵となっているのではないかと期待されています。例えば特に超対称性と呼ばれる新たな対称性が自然界に存在していた場合、素粒子の標準模型の大きな問題の一つと考えられているいわゆる階層性問題が解決されます。また、Peccei-Quinn 対称性に基づく Axion 模型は強い相互作用において CP の破れが生じないいわゆる strong CP 問題の有力な解決策であると考えられています。このように現在の素粒子標準模型の背後には様々な対称性が存在することが期待されており、そのような対称性を持つ素粒子模型・宇宙模型の研究は理論グループの重要な研究テーマとなっています。

インフレーション宇宙模型

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

宇宙には我々の知っている物質では説明できない未知の暗黒エネルギーや暗黒物質の存在が宇宙観測によって明らかになって来ています。理論グループでは暗黒物質等の正体を理論的側面、現象論的側面、宇宙論からの視点をとおして研究しています。

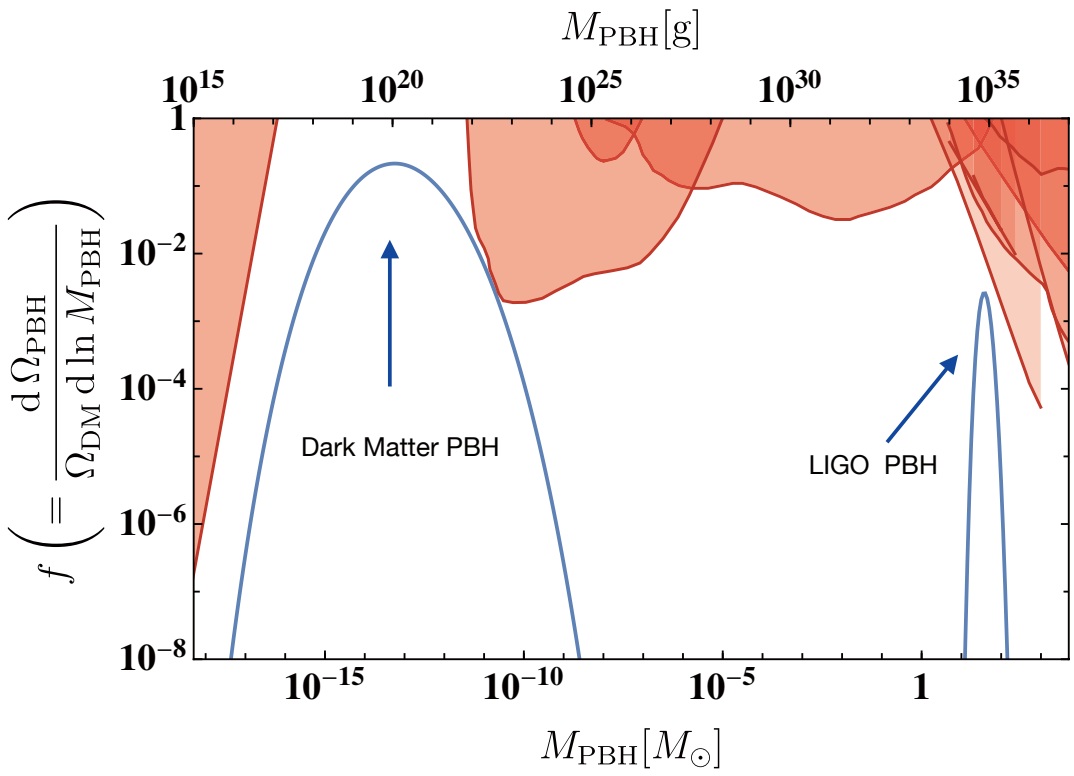


図 1 ダブル・インフレーションで生成される原始ブラックホール（PBH）の質量分布。実線が理論的予言を表し、オレンジの領域が観測の制限を表す。質量の軽い PBH は宇宙の暗黒物質を説明し、質量が大きな PBH は重力波検出器 LIGO で見つかったイベントを説明できる。

Mass distribution of primordial black holes (PBHs). Solid curves represent the theoretical prediction and the orange shadows show the present observational constraints. Light PBHs can account for dark matter of the universe and heavy PBHs can explain the gravitational wave events discovered by LIGO.

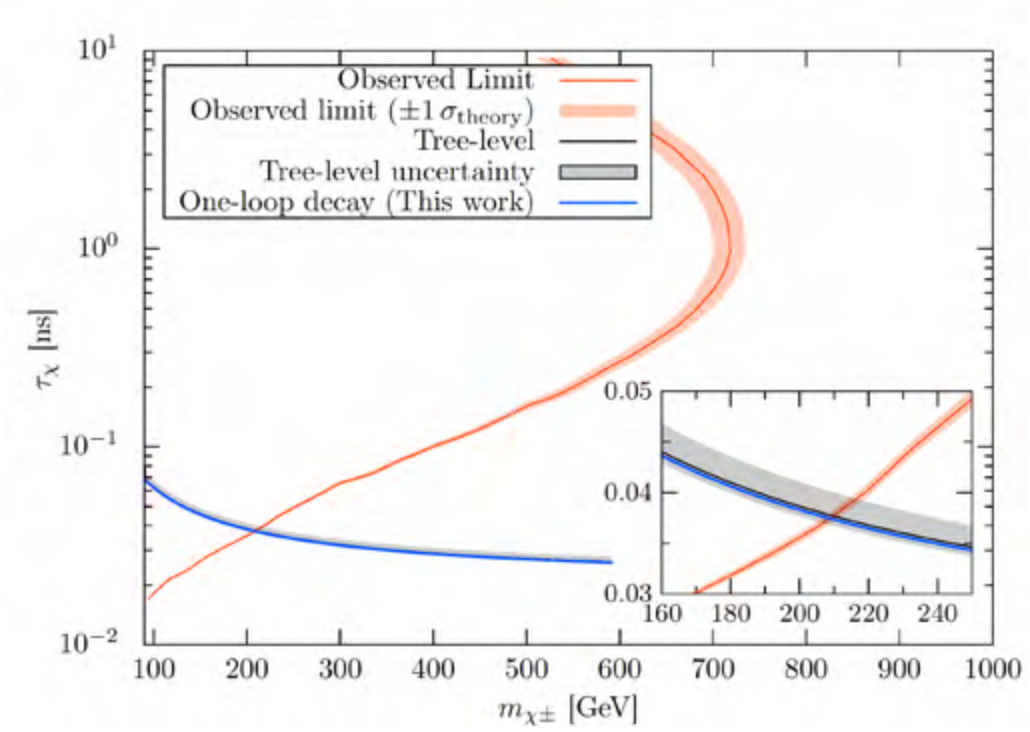


図 2 消える荷電飛跡探索に基づく荷電 Higgsino の質量と寿命に対する LHC 実験による制限。赤の実線は ATLAS による 95%限界（Eur. Phys. J. C 82, 606 (2022)）。赤い帯は Higgsino の生成断面積の 1 σ の不確かさを示す。赤線の左上領域は除外されている。青い実線はニュートラリーノに崩壊する純粋なヒッグシーノの NLO 崩壊率に基づく寿命。灰色の帯はツリーレベルの予測とその不確かさ。

The LHC constraint on the charged Higgsino mass and lifetime based on the disappearing charged track search, where $\Delta m^\pm \sim 300$ MeV. The red solid line shows the 95%. limit by the ATLAS (Eur. Phys. J. C 82, 606 (2022)). The red band shows 1σ uncertainty of the production cross section of the Higgsino. The upper-left region of the red line has been excluded. The blue solid line is the lifetime based on the NLO decay rate for the pure Higgsino, which decays into neutralinos. The gray band shows the tree-level prediction with its uncertainty.

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

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

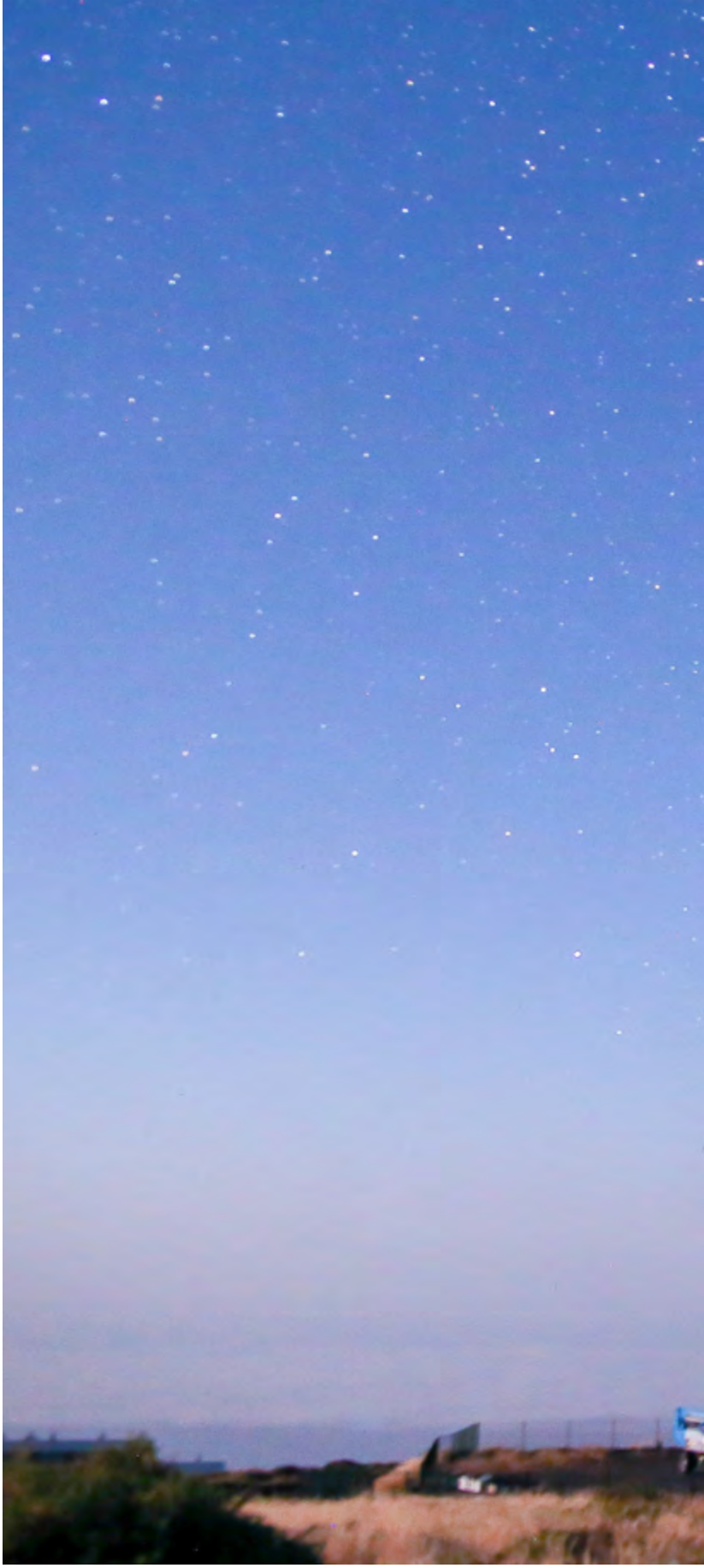
With the success of the Standard Model as a unified theory, the next big leap in particle physics will be the theory which unifies the electroweak and the strong interactions, i.e. the grand unified theory. In fact, the precise measurements of the strengths of the interactions strongly suggest the grand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

The laws of particle physics are known to be strongly interrelated to symmetries in nature. There are expectations that some new symmetries would provide novel solutions to the unsolved problems in the Standard Model. Supersymmetry is one of the most promising symmetries in this respect. Supersymmetry allows a separation of the laws of physics at a low energy scale from those at a high energy scale, which solves the so-called hierarchy problem of the Standard Model. The axion model based on the Peccei-Quinn symmetry is also expected to solve the so-called strong CP problem. The phenomenological and cosmological aspects of physics with new symmetries are one of the most important subjects for the Theory group.

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

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

実験施設について
Facilities





主な実験施設
Experimental Facilities

Overseas

CTA (North Site)



スペイン・カナリア諸島ラパルマにあるロケ・デ・ロス・ムチャーチョス天文台（標高2200 m）。大中小のチェレンコフ望遠鏡群から成り、超高エネルギー宇宙ガンマ線を観測します。

p28

カナリア高エネルギー宇宙物理観測研究施設
High Energy Astrophysics Facility in Canarias



スペイン・カナリア諸島ラパルマに設置された宇宙観測のための拠点施設。チェレンコフ宇宙望遠鏡によるガンマ線観測を支援しています。

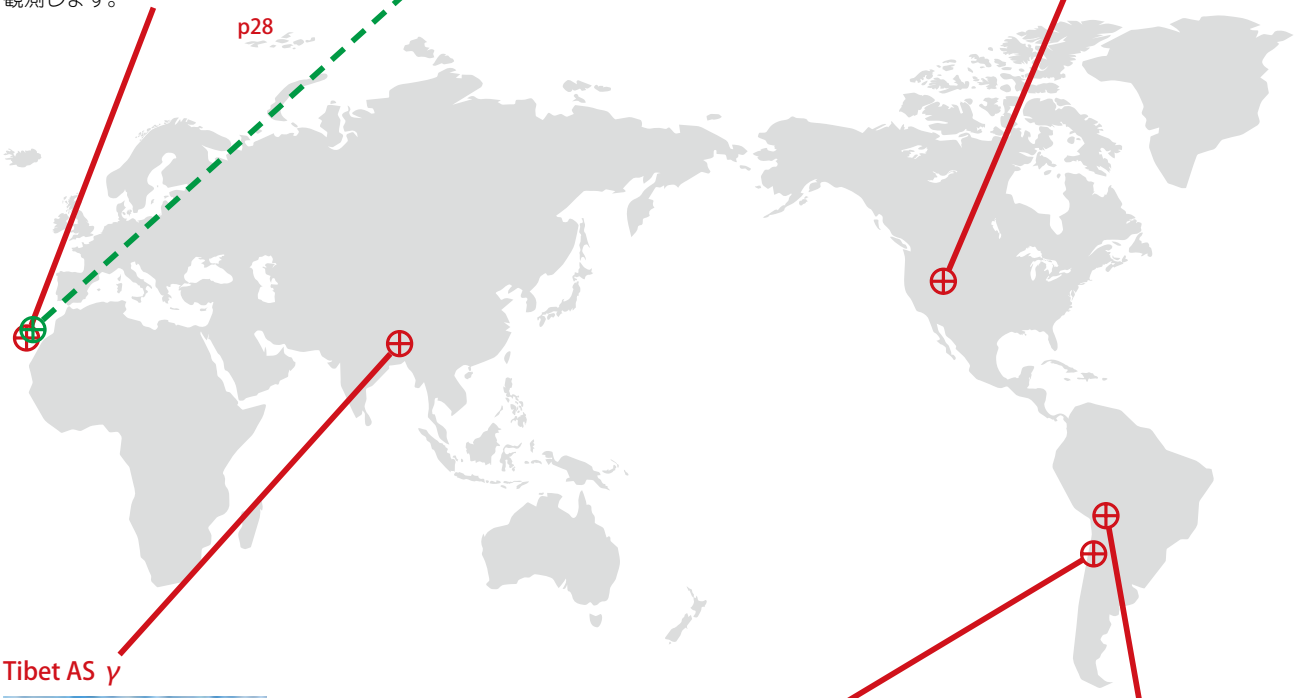
p62

Telescope Array



アメリカ・ユタ州の砂漠地帯（標高 1400 m）。広大な面積の地表検出器と大気蛍光望遠鏡によるハイブリット観測により、超高エネルギー宇宙線の起源を探っています。

p32



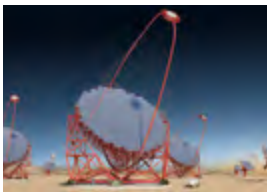
Tibet AS γ



中国・チベット自治区のヤンバーチン高原（標高4300 m）。37000 m^2 の範囲に一定間隔で検出器を並べ、地下プールにも光センサーを置き、ガンマ線由来の空気シャワーを観測しています。

p36

CTA (South Site)



チリ・アタカマ砂漠にあるパラナル天文台（標高2600 m）。大中小のチェレンコフ望遠鏡群から成り、超高エネルギー宇宙ガンマ線を観測します。

p28

チャカルタヤ宇宙物理観測所
Chacaltaya Observatory



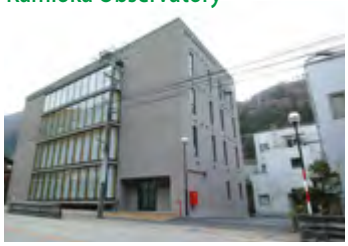
ボリビア・ラパス市郊外のチャカルタヤ山（標高 5300 m）。銀河系内から飛来する宇宙線のエネルギーの上限の確定を目指しています。

p66

Japan

附属施設など *Facilities*

神岡宇宙素粒子研究施設 Kamioka Observatory



岐阜県飛騨市神岡町。ニュートリノなどの素粒子の観測を通じて、素粒子物理学および宇宙物理学の研究を行っています。

p60

Super-Kamiokande



岐阜県飛騨市神岡鉱山の地下1000 m。直径・高さともに約 40 m の円筒形の水タンクと、壁を取り囲む約 13000 本の光センサーからなります。世界最大の地下ニュートリノ観測装置です。

p12

Hyper-Kamiokande



スーパーカミオカンデを凌駕する巨大水タンクと超高感度光センサーからなる実験装置で、神岡鉱山の地下に建設中です。2027 年の実験開始を予定しています。

p20

重力波観測研究施設 KAGRA Observatory



岐阜県飛騨市神岡町。大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の本格稼働に向けて準備を進めており、重力波天文学のさらなる深化を目指しています。

p61

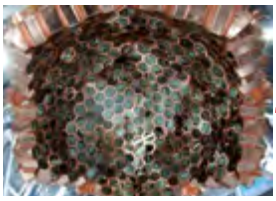
KAGRA



岐阜県飛騨市神岡鉱山の地下 200 m。L 字型に直交する長さ 3 km のトンネルの中に、大型低温重力波望遠鏡を設置し、重力波を直接検出します。

p44

XMASS



岐阜県飛騨市神岡鉱山の地下 1000 m。暗黒物質の直接観測を目指して建設された、835 kg の液体キセノンを 642 本の光センサーで球状に囲った検出器です。

p24

乗鞍観測所 Norikura Observatory



岐阜県高山市の乗鞍岳（標高 2770 m）。宇宙線研究所の始まりの地です。現在は装置の性能試験や予備実験などに利用されています。

p64

明野観測所 Akeno Observatory



山梨県北杜市明野町（標高 900 m）。高エネルギー空気シャワー観測実験が行われていました。現在は新しい装置の試験や組み立てなどで利用されています。

p65

柏キャンパス Kashiwa Campus



千葉県柏市の東京大学柏キャンパス。宇宙線研究所の本部や、宇宙ニュートリノ観測情報融合センターがあります。

p63

神岡宇宙素粒子研究施設



研究内容

神岡鉱山内に設置された世界最大の水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデを用いて、ニュートリノや陽子崩壊に関する研究を行っています。1998 年には大気ニュートリノ振動を発見してニュートリノ質量の存在を明らかにしました。この成果により 2015 年には梶田隆章教授がノーベル物理学賞を受賞されました。2001 年にはカナダＳＮＯ実験と共に太陽ニュートリノ振動を発見、2004 年には茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構から打ち込まれた人工ニュートリノを用いてニュートリノ振動を確認しました。また、2009 年には、茨城県東海村にある大強度陽子加速器（J-PARC）で生成された人工ニュートリノをスーパーカミオカンデに打ち込み、さらに精密にニュートリノ研究を行うＴ２Ｋ実験が始まり、2011 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）、ダークマター探索実験 XENONnT の研究開発や将来のダークマター検出器開発研究、100 ｍ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。

また 2020 年からスーパーカミオカンデより大型のハイパーカミオカンデの建設が始まり、2027 年の実験開始を目指しています。

< 基本情報 >

住所　〒 506-1205　岐阜県飛騨市神岡町東茂住 456
TEL　0578-85-2116
FAX　0578-85-9640
土地　52,370 m^2（借入 50,016 m^2）
建物　5,018 m^2（借入 84 m^2）
海抜　350 m

< アクセス >

富山駅〈JR 高山本線・50 分〉猪谷駅〈バス・10 分〉
茂住バス停〈徒歩・1 分〉

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

Several inter-university collaborative research projects, including a double beta decay experiment using calcium-48 (CANDLES), a direction-sensitive dark matter search experiment (NEWAGE), R&D for a dark matter search experiment (XENONnT), R&D for the next generation of dark matter experiments, a 100m 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.

Construction of the Hyper-Kamiokande, larger than the Super-Kamiokande, has been started since 2020, with an aim to begin the observation in 2027.

<Information>

Address　456 Higashi-Mozumi, Kamioka-cho, Hida-shi, Gifu Prefecture 506-1205 Japan
TEL　0578-85-2116　**FAX**　0578-85-9640
Land　52,370 m^2　**Building**　5,018 m^2
Altitude　350 m

<Access>

- TOYAMA Sta. → JR Takayama line(50 min.) → INOTANI Sta. → Bus(10 min.) → MOZUMI Bus Stop → Walk(1 min.)



重力波観測研究施設



研究内容

神岡鉱山内に大型低温重力波望遠鏡 KAGRA を建設し、観測を行っています。この重力波望遠鏡は、地面振動の小さな地下に設置することで外乱を避け、サファイアミラーを極低温（20K）まで冷却して熱雑音を抑えることで、連星中性子星の合体イベントならば 4 億光年かなたのものまで観測できる感度を実現することが目標です。

アインシュタインが重力波を予言した一般相対性理論の発表からちょうど 100 年目となる 2015 年、米国 LIGO が連星ブラックホールの合体イベントからの重力波をとらえました。これは人類初の重力波の直接観測として新聞等でも大きく取り上げられましたが、そのような状況の中、本施設は発足しました。KAGRA は 2019 年に完成し、2020 年 2 月に観測を開始しました。今後は、重力波天文学を国際共同で創成することが新たな目標となります。そのためには欧州 Virgo を加えた日米欧 3 拠点の国際ネットワークでの同時観測をすすめ、重力波源の方向を精度良く定めることが重要となります。

< 基本情報 >

住所　〒 506-1205　岐阜県飛騨市神岡町東茂住 238
TEL　0578-85-2343
FAX　0578-85-2346
土地　39,327 m^2（借入）
建物　872 m^2（借入 464 m^2）
海抜　350 m

< 主なアクセス方法 >

富山駅〈JR 高山本線・50 分〉猪谷駅〈バス・10 分〉
茂住バス停〈徒歩・5 分〉

KAGRA Observatory

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

The main features of this gravitational wave telescope are that it is located in an underground with low ground vibration to avoid disturbances and that the sapphire mirror is cooled down to cryogenic temperatures (20 K) to suppress thermal noise. We aim to achieve the sensitivity to observe binary neutron star coalescence events up to 400 million light years away.

In 2015, exactly 100 years after Einstein predicted gravitational waves in the theory of general relativity, LIGO in the United States detected gravitational waves from a binary black hole coalescence event. KAGRA was completed in 2019, and observations started in February 2020. A new goal is to create a gravitational wave astronomy with an international collaboration. It is important to determine the direction of the gravitational wave source with high accuracy by the simultaneous observation by the international network of Japan, USA, and Europe.

<Information>

Address　238 Higashi-Mozumi, Kamioka-cho, Hida-shi, Gifu Prefecture 506-1205 Japan
TEL　0578-85-2343　**FAX**　0578-85-2346
Land　39,327 m^2　**Building**　872 m^2
Altitude　350 m

<Access>

- TOYAMA Sta. → JR Takayama line(50 min.) → INOTANI Sta. → Bus(10 min.) → MOZUMI Bus Stop → Walk(5 min.)

カナリア高エネルギー宇宙物理観測研究施設



研究内容

宇宙線研究所附属研究施設「カナリア高エネルギー宇宙物理観測研究施設」は、チェレンコフ宇宙ガンマ線グループが主導し、日米欧の国際共同研究で進める CTA（チェレンコフ·テレスコープ·アレイ）プロジェクトの拠点であり、2019 年 4 月 1 日、スペイン・カナリア諸島ラパルマに設置されたものです。

CTA プロジェクトは、日米欧を中心とした 25 ケ国・1500 人以上の研究者からなる国際共同により、北・南半球の両サイトに、従来の 10 倍の感度と広い光子エネルギー領域を観測する次世代ガンマ線望遠鏡のアレイを運用するものです。日本は、北半球サイトのラパルマに世界最高感度の大口径望遠鏡（LST）4 基を建設・運用し、宇宙初期から現在に至るまでの高エネルギー現象を高感度で観測することを計画しており、2018 年 10 月に第 1 号基（LST-1）が完成、試験運転を開始しました。

これらの望遠鏡の管理運用及び観測の実施と、現地での人材雇用などを行うために活動主体となる施設の確保と現地法人の設立が必要で、同施設は 2019 年 4 月 1 日、ラパルマにある IAC（カナリア天体物理研究所）の CALP（ラパルマ宇宙物理センター）内に設置されました。

High Energy Astrophysics Facility in Canarias

High Energy Astrophysics Facility in Canarias, established on April 1, 2019 in La Palma, Canary Islands, Spain is the actual base of international collaborations on CTA (Cherenkov Telescope Array) project co-hosted by CTA group of ICRR.

The Cherenkov Telescope Array (CTA) is the next generation ground-based observatory for gamma-ray astronomy at very-high energies, participated by more than 1500 researchers from 25 countries. With more than 100 telescopes located in the northern and southern hemispheres, CTA will be the world's largest and most sensitive high-energy gamma-ray observatory. The CTA-Japan consortium is making a significant contribution to the construction of Large-sized Telescopes (LSTs), four proto types of which are planned to construct at northern hemisphere site in La Palma. The first LST was completed and made the first light at the end of December in 2018.

Establishment of the local corporation assets were needed for daily activities such as local procurement and employment to manage and operate the site. High Energy Astrophysics Facility in Canarias was established as a room inside the building of CALP (The Centro de Astrofísica en La Palma), a branch of IAC (Instituto de Astrofisca de Canarias),







2023 年 4 月 22 日に柏の葉カンファレスセンターで開催された合同一般講演会で講演する瀧田正人教授
Prof. Masato Takita presenting at the public lecture held in KASHIWA-NO-HA Conference Center on April 22, 2023

研究内容

宇宙ニュートリノ観測情報融合センターは、ニュートリノ、および、それに関連する研究を行うことを目的として、1999 年に設立されました。本センターのメンバーはスーパーカミオカンデ実験に参加するとともに、大気ニュートリノ、および、加速器ニュートリノ振動実験 T2K のデータを用いて、ニュートリノの性質に関する研究や、宇宙の高エネルギー天体からのニュートリノ放射を探索する研究を行っています。そして、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、次世代大型実験計画であるハイパーカミオカンデにも参加し、検出器の要である 50 センチ口径光電子増倍管の開発研究や、2026 年に予定されている検出器の建設準備を推進し、将来にわたってニュートリノ研究を発展させるべく活動を続けています。

本センターは、本研究所の共同利用研究の役割も果たしています。ニュートリノに関する研究の受け入れはもちろん、本研究所の施設利用として、計算機委員会と共に全国の宇宙線研究者が本研究所の共同利用で使用される大型計算機システムの運用をしています。本計算機システムは、総数約 3300 コアを持つ CPU、9 ペタバイトの大容量ディスク、18 ギガバイト / 秒のデータ転送性能を持ちます。宇宙線観測実験で得られた大量のデータを解析し、また、高い CPU 能力が要求されるシミュレーションデータの生成が可能です。2020 年度に更新が行われて以来、安定に運用されています。また、一次線グループの共同利用研究の受け入れ窓口をつとめており、地下の低バックグラウンド実験室の運営を行っています。その他、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を行っています。

一般の方向けに行われる宇宙線研究の啓蒙活動も支援しています。本研究所では 2009 年以来、春と夏で年に 2 回カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）と一般講演会を共同で開催しており、そのうち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。2023 年度は 4 月 22 日（土）に柏の葉カンファレンスセンターで一般講演会「ガンマ線で見る天文学と医学」を開催し、本研究所の瀧田正人教授、Kavli IPMU の竹田伸一郎特任助教を講師にお招きし、銀河系内に起源を持つとされる宇宙線源 PeVatron（ペバトロン）の探索や、ガンマ線観測の医学分野への応用についてご講演いただきました。また会場参加者の質問に答えるという形で、講師お二人によるクロストークも行われました。会場には約 150 名の方が参加されました。また、本講演の様子は YouTube でも配信され、約 500 名の方が視聴し、再生回数は約 1000 回になりました。

The Research Center for Cosmic Neutrinos (RCCN) was established in 1999 with the aim of conducting research on neutrino and related topics. Members of this center are participating in the Super-Kamiokande experiment, and exploring the properties of neutrinos using data of atmospheric neutrinos and accelerator neutrinos, and search for neutrino emissions from high-energy celestial objects in the universe. We have provided the occasion to discuss theoretical ideas and experimental results on neutrino physics. Additionally, we are involved in the project of next-generation neutrino experiment, Hyper-Kamiokande, conducting research and development on the 50-cm diameter photomultiplier tube, and advancing preparations for the construction of the detector scheduled for 2026, with the ongoing goal of advancing neutrino research into the future.

The center also plays a role in the joint research program of ICRR. In addition to accepting research on neutrinos, as the facility utilization, in collaboration with the Computer Committee, the center manages a large-scale computer system used for joint research at this research institute by cosmic ray researchers nationwide. This computer system has a total of approximately 3,300 CPU cores, 9 petabytes of large capacity disk, and data transfer performance of 18 gigabytes per second. It is capable of analyzing large amounts of data obtained from cosmic ray observation experiments and generating simulation data that require high CPU capability. Since its update in the fiscal year 2020, it has been operated stably. Additionally, the center serves as the acceptance for joint research program by primary cosmic ray group, and operates the low-background experimental laboratory underground. Furthermore, it accepts joint research solely for computer usage and research meetings related to future plans, among other activities.

The center also supports outreach activities for the general public regarding cosmic ray research. Since 2009, ICRR has jointly held public lecture events twice a year in spring and summer with the Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli IPMU). Specifically, for the spring event, the center collaborates with the public relations office to plan and implement it. In the fiscal year 2023, on April 22nd (Sat), a public lecture event titled “Astronomy and Medicine through Gamma-ray Observations” was held at the Kashiwa-no-ha Conference Center. The event featured Professor Masato Takita from our research institute and Associate Professor Shinichiro Takeda from Kavli IPMU as speakers. They discussed the exploration of PeVatron, a cosmic ray source believed to originate within our galaxy, and the application of gamma-ray observations in the field of medicine. Additionally, a cross-talk session between the two speakers was conducted to address questions from the audience. Approximately 150 people attended the event in person, and the lecture was also streamed on YouTube, attracting about 500 viewers with around 1000 views.



研究内容

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

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

基本情報

住所　〒 506-2100　岐阜県高山市丹生川町乗鞍岳
TEL　0263-88-6668, 090-7408-6224, 090-7721-5674
土地　59,707 m^2（借入）　**建物**　1,655 m^2（乗鞍観測所 ）
土地　2,303 m^2（借入）　**建物**　182 m^2（鈴蘭連絡所 ）
標高　2,770 m（平均気圧 720 hPa）

アクセス

① JR 中央本線松本駅〈松本電鉄・30 分〉新島々駅
〈アルピコ交通バス・1 時間〉乗鞍高原観光センター
〈アルピコ交通バス・50 分〉乗鞍岳山頂（畳平）
〈徒歩・25 分〉（※バスの運行期間は 7 月～ 10 月上旬）
② JR 高山本線高山駅〈濃飛バス・1 時間〉平湯温泉
〈アルピコ交通バス・1 時間〉乗鞍岳山頂（畳平）
〈徒歩・25 分〉（※バスの運行期間は 7 月～ 10 月上旬）

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

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

Information

Address　Norikuradake, Nyukawa-cho, Takayama-shi, Gifu Prefecture 506-2100 Japan
TEL　+81-263-88-6668, +81-90-7408-6224, +81-90-7721-5674
Altitude　2,770 m (average atmospheric pressure: 720 hPa)

Access

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



明野観測所



研究内容

明野観測所は昭和 52 年 4 月に発足しました。明野観測所では、$10^{14.5}$eV から 10^{20} eV を超える 5 桁以上に及ぶエネルギー領域を系統的に測定し、超高エネルギー宇宙線の空気シャワーを観測し、空気シャワーの発達や、宇宙における超高エネルギー宇宙線の発生起源を研究して来ました。主要装置の AGASA（明野広域空気シャワーアレイ）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されました。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、ガンマ線バースト、活動銀河核などの高エネルギー宇宙線加速源候補天体の観測、銀河宇宙線強度変動の研究、TA の検出器組立などの観測支援、高エネルギー宇宙線・ガンマ線観測のための新しい装置の開発や試験など、関連分野の共同利用研究に使われています。

基本情報

住所　〒 408-0201　山梨県北杜市明野町浅尾 5259-440
TEL　0551-25-2301
FAX　0551-25-2303
土地　18,469 m^2（借入）
建物　2,843 m^2
標高　900 m（平均気圧 910 hPa）

アクセス

・JR 中央本線韮崎駅〈タクシー・25 分〉



Akeno Observatory

The Akeno Observatory started in April 1977. At the Akeno Observatory, extremely high-energy cosmic rays with energies exceeding 10^{20} eV were observed by the AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) 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 Akeno Observatory is now used for observations of candidate sources of high-energy cosmic-ray acceleration such as Gamma Ray Bursts and Active Galactic Nuclei, research for variation of intensity of galactic cosmic rays, the support of TA, the tests of new devices related to the observations of high energy cosmic rays/gamma rays and the use by university collaborators in associated fields.

Information

Address　5259-440 Asao, Akeno-cho, Hokuto-shi, Yamanashi, 408-0201 Japan
TEL　+81-551-25-2301
FAX　+81-551-25-2303
Land　18,469 m^2
Building　2,843 m^2
Altitude　900m (average atmospheric pressure: 910 hPa)

Access

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



チャカルタヤ宇宙物理観測所

Chacaltaya Observatory



研究内容

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

後者は平成 17 年ごろに終了しましたが、前者（BASJE 実験）は空気シャワー観測装置を更新しながら観測を継続してまいりました。その研究目的は、10^{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（～ 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。近年は、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来ましたが、平成 28 年 3 月末をもって終了いたしました。

BASJE 実験の後を受けて、100 TeV（10^{14} eV）領域の宇宙ガンマ線の広視野連続観測を主目的とする ALPACA（Andes Large area PArticle detector for Cosmic ray physics and Astronomy）実験がチャカルタヤ山の麓（標高 4740 m）で始まりました。knee 領域まで加速された銀河宇宙線が、その加速源である未知の宇宙加速器（PeVatron）周辺の物質と反応する際に生成される中性パイ中間子が崩壊して生ずるガンマ線のエネルギーは 100 TeV 領域になります。したがって、100 TeV 領域ガンマ線の観測は未知の宇宙加速器の同定を行う際の鍵となる実験になります。

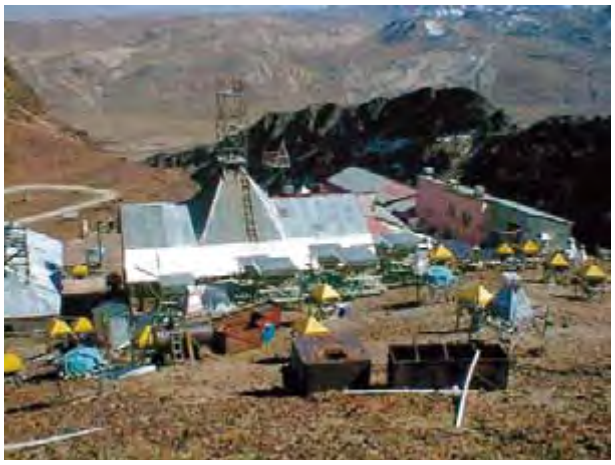
現在は小型の ALPACA、ALPAQUITA を建設中です。

Chacaltaya Observatory of Cosmic Physics has been jointly operated with Bolivia since 1962 at Mt.Chacaltaya, Bolivia, as the world-highest cosmic-ray laboratory (16˚21'S, 68˚08'W, 5300m a.s.l.).

The air-shower experiment, BASJE (Bolivia Air Shower Joint Experiment), aims to investigate the origin of primary cosmic rays around and above the knee region (～ 10^{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. This project is finished at the end of March, 2016.

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

Prototype of ALPACA, ALPAQUITA, is now under construction.





研究所について
Information





沿革

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 1950（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 1953（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。

1957（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、1958（昭和 33）年にはエマルションチェンバーによる観測を始めました。その後しばらくの間、これらの観測装置による地道な観測が続けられました。

1972（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。1973（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、もう一つはボリビア・チャカルタヤ山の高山実験です。 1975（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。

1976（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、1956（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。1977（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、1979（昭和 54）年には明野の 1 平方 km 空気シャワー装置と富士山のエマルション・チェンバーができ、1981（昭和 56）年にはエマルション・チェンバーによる日中共同研究が始まりました。1983（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。

1985（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。1987（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。1988（昭和 63）年には神岡で太陽ニュートリノ欠損を観測し、1989（平成元）年には乗鞍で太陽フレアーに伴う宇宙中性子線の大幅な増大を観測しました。1990（平成 2）年に明野の広域シャワー観測装置が完成し、1991（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。1992（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。1993（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。1994（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。1995（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。1996（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、1998（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。

1999（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発足しました。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。

2003（平成 15）年度から、最高エネルギー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 2005（平成 17）年度と 2006（平成 18）年度に行われ、2007（平成 19）年度から観測が始まりました。

2004（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。2010（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。2010（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「KAGRA」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、2011（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。

2010（平成 22）年には、東海村の J-PARC とスーパーカミオカンデ間のニュートリノ振動実験 T2K がはじまり、2011（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 2012（平成 26）年までには確かな証拠を得ました。

2012（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、2015（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。

2016（平成 28）年 4 月には、KAGRA の観測拠点となる重力波観測研究施設が岐阜県飛騨市に発足しました。2018（平成 30）年 11 月、宇宙線研究所が新たに国際共同利用・共同研究拠点として認定され、国際的な共同利用研究を推進していくことになりました。2018（平成 30）年 10 月、CTA プロジェクトの大口径望遠鏡 1 号機が、スペイン領カナリア諸島ラパルマに完成しました。2019（平成 31）年 4 月に、プロジェクトの研究拠点となる「カナリア高エネルギー宇宙物理観測研究施設」（ラパルマ）が発足しました。

2019（令和元）年 10 月、KAGRA が完成し、2020（令和 2）年 2 月から重力波観測に向けた観測運転を開始しました。また、2020（令和 2）年次世代の超大型水チェレンコフ観測装置「ハイパーカミオカンデ」計画が正式にスタートし、建設が始まりました。

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 inter-university research facility.

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

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

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

From 1985 on, ICRR started to produce increasingly significant experimental results, and further improved its experimental equipment. In 1987, the Kamioka Observatory succeeded to detect neutrinos from a supernova for the first time in the world. In the same year, the construction of a 100-square kilometer scale wide-area air-shower detector was commenced at the Akeno Observatory. In 1988, the Kamioka Observatory observed a deficit of solar neutrinos, and in 1989, the Norikura observatory observed a considerable increase in cosmic neutrons in solar flares. In 1990, the construction of the wide-area air-shower detector at the Akeno Observatory was completed. In 1991, the construction of Super-Kamiokande started. In 1992, the joint use experiment in Australia observed ultra-high-energy gamma rays for the first time in the southern hemisphere. In the same year, a gravitational wave group joined ICRR. In 1993, the construction of the air-shower gamma-ray detector started in Tibet. In 1994, the Akeno Observatory observed a significant shower with its energy beyond the theoretical limit, and the Kamioka Observatory detected an anomaly in atmospheric neutrinos. In 1995, the Kamioka Observatory became the third adjunct facility of ICRR. In 1996, the construction of 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 "Joint Usage/Research Center." In July 2010, the Large Cryogenic Gravitational wave Telescope project named "KAGRA" was approved by the "Leading-edge Research Infrastructure Program" of MEXT. The construction of KAGRA began in the same year. ICRR established the Gravitational Wave Project Office on April 1, 2011 to promote the construction of KAGRA.

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 were taken over by the CTA (Cherenkov Telescope Array) project.

In April 2016, KAGRA Observatory was established in Hida City, Gifu Prefecture as a base for the KAGRA project.

In November 2018, ICRR renewed its inter-university research activities as an "International Joint Usage/Research Center." In October 2018, the first Large Size Telescope (LST) of CTA project was completed at La Palma in Canary Islands, Spain. High Energy Astrophysics Facility in Canarias was established as a base for the project in April, 2019.

KAGRA, completed in October 2019, started its observation for gravitational waves in February 2020. In February 2020, the budget for the first-year construction of Hyper-Kamiokande was approved by the Japanese Diet, and the construction of Hyper-Kamiokande began.

1950 朝日学術奨励金によって乗鞍岳に朝日の小屋が建つ（木造 15 坪）
Asahi Hut (wooden structure; about 50 sq. meters) was constructed on Mt. Norikura based on the Asahi Bounty for Science.

1953. 8 東京大学宇宙線観測所となる
Asahi Hut was incorporated into the Cosmic Ray Observatory, The University of Tokyo.

1955. 8 乗鞍観測所の本館および研究設備が完成する
The main building and research facilities of the Norikura Observatory were constructed.

1956 東京大学原子核研究所宇宙線部が発足（空気シャワー部とエマルション部）
The Cosmic Ray Division (composed of Air Shower Section and Emulsion Section) was inaugurated at the Institute for Nuclear Study, The University of Tokyo.

1957 乗鞍観測所が IGY（国際地球観測年）の観測に参加し、空気シャワーの観測を開始する
The Norikura Observatory participated in IGY (International Geophysical Year) activities, and began air shower observation.

1958 エマルションチェンバーが観測を開始する
The emulsion chambers at Norikura Observatory started operation.

1959 東京大学原子核研究所が空気シャワーの観測を開始する
Air shower observation started at the Institute for Nuclear Study, The University of Tokyo.

1960 東京大学原子核研究所エマルション部が大型気球を開発
The Emulsion Section of the Institute for Nuclear Study, The University of Tokyo, developed a large-size balloon.

学術振興会の海外特別事業（インド、ブラジル、ボリビアの国際協力研究）が始まる
International projects of the Japan Society for the Promotion of Science started (international collaboration with India, Brazil and Bolivia).

1961 京都にて第 7 回宇宙線国際会議を開催する
The 7th International Cosmic Ray Conference was held in Kyoto.

1966 東京大学原子核研究所エマルション部の気球事業が宇宙航空研究所に移管される
The balloon project of Emulsion group of Institute for Nuclear Study, The University of Tokyo, was transferred to the Institute of Space and Aeronautical Science.

1968 東京大学原子核研究所エマルション部が富士山でエマルションチェンバーの観測を開始
The Emulsion Section of the Institute for Nuclear Study, The University of Tokyo, started observation on Mt. Fuji with emulsion chambers.

1972 専任所長が着任する
A full-time director was appointed.

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

東京大学原子核研究所宇宙線部に宇宙物質研究部が発足
The cosmic material research section was established in the Cosmic Ray Division of the Institute for Nuclear Study.

1973 超高エネルギー弱相互作用部門が新設される
The ultra-high energy weak-interaction division was newly established.

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

1974 専任事務長が着任する
A full-time chief administrator was appointed.

1975 ミュートロンが完成する
MUTRON was completed.

明野観測所の建設が始まる
The construction of the Akeno Observatory started.

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

1976. 5 国立学校設置法改正により東京大学宇宙線研究所となる
In the wake of the amendment of the National School Establishment Law, the observatory was reorganized into the Institute for Cosmic Ray Research (ICRR)

超高エネルギー強相互作用部門が第一第二部門に分かれ、東京大学原子核研究所からミュー中間子測定・中間子物理学実験・宇宙線学が移管し、6 部門 1 観測所となる
The ultra-high energy strong-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. 4 明野観測所が附属施設となる
The Akeno observatory was established as one of the ICRR facilities.

1978.10 明野観測所が開所式を行う
The Akeno Observatory performed the opening ceremony.

1979 明野に空気シャワー装置（1km^2）が完成する
The Akeno 1km^2 air shower detector was completed.

富士山エマルションチェンバー特別設備を建設
The special facility for emulsion chamber on Mt. Fuji was constructed.

京都にて第 16 回宇宙線国際会議を開催する
The 16th International Cosmic Ray Conference was held in Kyoto.

1981 エマルションチェンバーによる日中共同研究を開始する
Japan-China joint research on emulsion chamber observations started.

1982 宇宙線計測部門（客員）が新設される
The cosmic ray detection division (for guest researchers) was newly established.

1983 神岡地下観測所が設立される（4 月）
The Kamioka Underground Observatory was established (April).

神岡鉱山で陽子崩壊実験（カミオカンデ実験）を共同実験として開始する
The nucleon decay experiment, Kamiokande, started in the Kamioka Mine as a collaborative research project.

質量分析器を中心とした一次宇宙線研究設備を設置する
The primary cosmic ray research facility (i.e. massspectrometer etc.) was installed.

1986 将来計画検討小委員会 (I) が設置される
The first committee for future projects was organized.

宇宙線観測所以前
宇宙線観測所の時代
宇宙線研究所

1987 カミオカンデ実験が世界で初めて超新星からのニュートリノバーストを捕まえる
The Kamiokande detector observed a neutrino burst from a supernova for the first time in history.

明野観測所で広域シャワー観測装置 AGASA の建設始まる
The construction of the wide-area air shower detector, AGASA, started at the Akeno Observatory.

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

1989 カミオカンデ実験が太陽からのニュートリノ欠損を観測
The Kamiokande detector observed a deficit in solar neutrino flux.

乗鞍観測所で太陽フレアーに伴う宇宙線の大幅増大を観測
A significant increase of cosmic ray intensity coincident with a solar flare was observed at the Norikura Observatory.

1990 明野観測所に広域シャワー観測装置 AGASA が完成する
The wide area air shower detector, AGASA, was completed at Akeno Observatory.

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

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

1992 ニュートリノ宇宙物理学部門が新設され、宇宙線計測部門 (客員) が廃止される
The neutrino astrophysics division was newly established, and the cosmic ray detection division (for guest researchers) was discontinued.

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

オーストラリアでカンガルー計画が始まる
The Cangaroo project started in Australia.

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

1993 チベットでエアシャワーガンマ線実験装置の建設を開始
The construction of air shower gamma ray detector in Tibet started.

1994 神岡に計算機棟が出来る
A computer center was built at Kamioka Observatory.

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

明野観測所で 2×10^{20} eV の大シャワーを観測する
A giant air shower with energy of 2×10^{20} eV was observed at Akeno Observatory.

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

カミオカンデで大気ニュートリノの天頂角依存を観測
The zenith angle dependence of the atmospheric neutrinos was observed at Kamiokande.

1995. 4 ニュートリノ宇宙物理学部門が廃止され、神岡宇宙素粒子研究施設が新設される
The neutrino astrophysics division was discontinued, and the Kamioka Observatory for Cosmic Elementary Particle Research was established.

11 スーパーカミオカンデの完成式を開催する
The completion ceremony of Super-Kamiokande was held.

1996. 4 スーパーカミオカンデの本格観測が始まる
The full-scale operation of Super-Kamiokande began.

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
The air shower gamma ray detector in Tibet was completed.

1998. 6 スーパーカミオカンデによるニュートリノ質量の発見が正式に発表される
The Super-Kamiokande collaboration officially announced the discovery of none-zero neutrino mass.

11 柏キャンパスの建設が始まる
The construction of the Kashiwa Campus was commenced.

1999. 4 宇宙ニュートリノ観測情報融合センターを新設する (4 月)
The Research Center for Cosmic Neutrinos was established.

オーストラリアでカンガルー計画 2 が始まる
The Cangaroo-2 began operation in Australia.

オーストラリアでカンガルー計画 3 が準備を開始する
Preparation of the Cangaroo-3 began in Australia.

科研費 COE 拠点形式プログラムにより超高エネルギーガンマ線研究拠点が発足する
Ultra high energy gamma ray research foothold was established.

2000. 2 外部評価が実施される
An external evaluation of ICRR was conducted.

3 柏キャンパスに全面移転する
ICRR moved to the Kashiwa Campus.

2001.11 スーパーカミオカンデで事故がで起こり、半数以上の光電子増倍管が壊れる
An accident occurred at the Super-Kamiokande, destroying more than half of the photomultipliers.

2002.12 カミオカンデの成果をもとに、宇宙ニュートリノ検出へのパイオニア的貢献により、小柴昌俊名誉教授がノーベル物理学賞を受賞する
Professor Emeritus Masatoshi Koshiba won the Novel Prize in Physics for his pioneering contributions to the detection of cosmic neutrinos, based on outcomes of the Kamiokande experiment.

12 スーパーカミオカンデが部分復旧して、実験を再開する
The Super-Kamiokande was partially restored, and observation resumed.

2003. 8 第 28 回宇宙線国際会議をつくばで開催する (8 月)
The 28th International Cosmic Ray Conference was held in Tsukuba.

テレスコープアレイの建設が始まる
The construction of the Telescope Array was commenced.

カンガルー計画 3 の 4 台の望遠鏡が完成する
Four telescopes for the Cangaroo-3 were completed.

2004. 4 国立大学が法人化される
Japanese national universities became independent administrative agencies.

宇宙ニュートリノ研究部門、高エネルギー宇宙線研究部門、宇宙基礎物理研究部門の 3 研究部門となる
The research divisions of ICRR were reorganized into the three divisions: Neutrino and Astroparticle Division, High Energy Cosmic Ray Division, and Astrophysics and Gravity Division.

2006 スーパーカミオカンデが完全復旧される
The restoration of the Super-Kamiokande was completed.

10 外部評価が実施される（10 月）
An external evaluation of ICRR was conducted.

2007 将来計画検討委員会（III）が設置される
The Committee on Future Projects III was established.

8 将来計画検討委員会（III）の答申が出る（8 月）
The Committee on Future Projects III submitted its report.

2008 テレスコープアレイ実験の観測を開始する
The Telescope Array experiment started observation.

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
The Super-Kamiokande detected the first neutrino from the T2K experiment.

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
ICRR became a Joint Usage Research / Center, renewing its existing function as an inter-university research institute.

大型低温重力波望遠鏡（後に「KAGRA」と命名）が文部科学省の最先端研究基盤事業の一つに選定され、建設が始まる
The Large Cryogenic Gravitational Wave Telescope (LCGT) was approved as a Leading-edge Research Infrastructure Program by MEXT. The construction started.

2011. 4 重力波推進室が設置される
The Gravitational Wave Project Office was established.

6 T2K 実験が電子ニュートリノ出現現象の兆候を捉える
The T2K experiment caught a sign of electron neutrino appearance.

2012. 1 将来計画検討委員会（IV）が設置される
The Committee on Future Projects IV was established.

3 オーストラリアのカンガルー実験が終了する
The Cangaroo experiment ended its operation.

2013. 1 外部評価が実施される
An external evaluation of ICRR was conducted.

9 将来計画検討委員会（IV）の答申が出る
The Committee on Future Projects IV submitted its report.

2014. 7 KAGRA のためのトンネル掘削が完了する
The excavation of KAGRA tunnel was completed.

2015.10 CTA 大口径望遠鏡 1 号基の建設が始まる
The construction of the first CTA Large Size Telescope (LST) was commenced.

11 KAGRA 第一期実験施設が完成する
The construction for iKAGRA(initial KAGRA) was completed.

12 ニュートリノが質量を持つ事を示すニュートリノ振動現象の発見により、所長の梶田隆章教授がノーベル物理学賞を受賞する
Director and Prof. Takaaki Kajita received the Nobel Prize in Physics for the discovery of neutrino oscillation, which shows neutrinos have mass.

2016. 4 重力波推進室が改組され重力波観測研究施設が発足する
The Gravitational Wave Project Office was reorganized into the KAGRA observatory.

10 将来計画検討委員会（V）が設置される
The Committee on Future Projects V was established.

2017.10 将来計画検討委員会（V）の答申が出る
The Committee on Future Projects V submitted its report.

11 宇宙線研究所が中心部局となり、東京大学次世代ニュートリノ科学連携研究機構が発足する
Next-generation Neutrino Science Organization was established. ICRR acts as the host institution.

2018. 6 スーパーカミオカンデが SK-Gd 実験に向け、およそ 6 カ月の改修工事を実施する
Refurbishment work of Super-Kamiokande for SK-Gd had been conducted for 6 months.

10 チェレンコフ・テレスコープアレイ（CTA）大口径望遠鏡 1 号機がスペイン領カナリア諸島ラパルマに完成する
The first Large Size Telescope (LST-1) of CTA project was completed at La Palma in Canary Islands, Spain.

11 宇宙線研究所が国際共同利用・共同研究拠点に認定される
ICRR was selected as one of the “International Joint Usage Research / Centers”.

12 テレスコープアレイ（TA）実験の１０周年記念式典を東京大学柏キャンパスで開催する
The 10th anniversary ceremony of Telescope Array Project was held in Kashiwa Campus, The University of Tokyo.

2019. 2 テレスコープアレイ（TA）の拡張工事（TAx4）が米国ユタ州で始まる
Extended construction of Telescope Array, named TAx4, began in Utah State, USA.

4 カナリア高エネルギー宇宙物理観測研究施設が発足する
High Energy Astrophysics Facility in Canarias was established.

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

10 KAGRA の完成記念式典を実施する
KAGRA celebrated its completion.

2020. 2 ハイパーカミオカンデ計画を開始する
The Hyper-Kamiokande project is officially approved.

2 KAGRA が重力波の観測に向けた運転を開始する
KAGRA started operation for observation of gravitational waves.

8 スーパーカミオカンデに 0.01% の濃度で Gd を導入し、SK-Gd 実験がスタート
Gd was loaded to Super-Kamiokande with 0.01% concentration and SK-Gd was started.

2021. 4 チベット AS γ実験が天の川から史上最高エネルギーのγ線観測。ペバトロンの決定的証拠つかむ
The highest energy gamma rays from the Galactic disk was detected by Tibet ASγ experiment: Evidence for the existance of Pevatrons in our Galaxy.

神岡宇宙素粒子研究施設のサテライトオフィスを飛騨市神岡振興事務所に設置
Satellite office of Kamioka Observatory was opened in the Kamioka branch of Hida City.

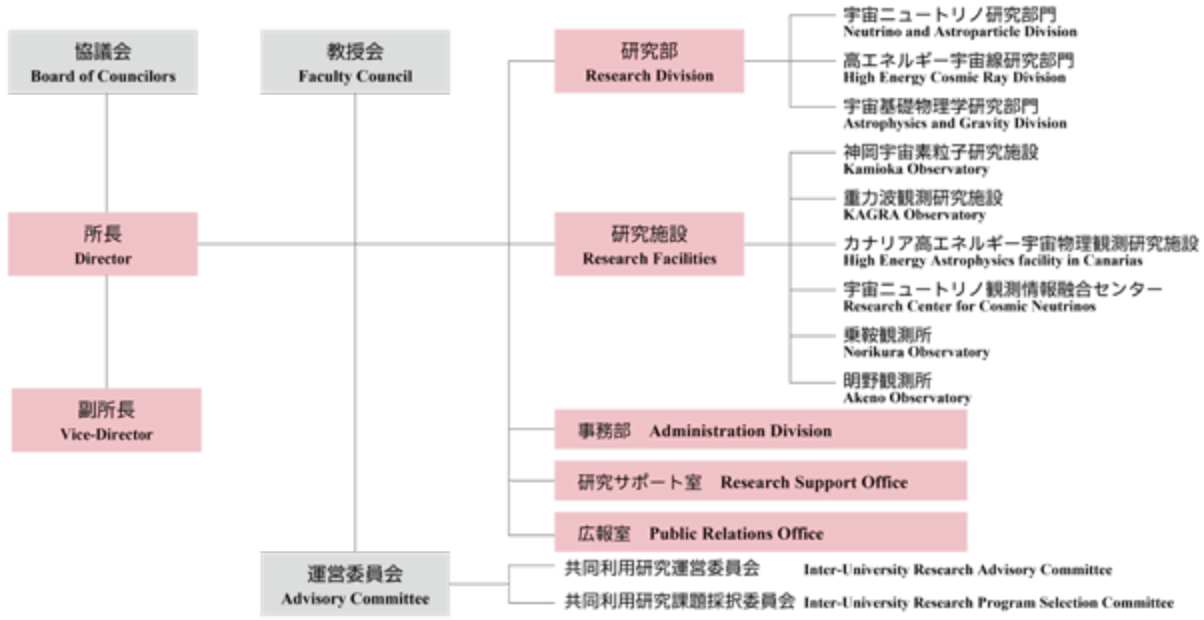
CNRS と東京大学による宇宙・素粒子の国際研究拠点を柏キャンパスに設立
International research laboratory for astrophysics and particle physics was established in Kashiwa Campus by CNRS and The University of Tokyo.

5 ハイパーカミオカンデの着工記念式典を開催
Groundbreaking ceremony for Hyper-Kamiokande was held.

2021.12 宇宙線研究所神岡総合研究棟の竣工記念式典開催
Opening ceremony of Kamioka Research Complex was held.

2023.10 次世代ニュートリノ科学連携研究機構が次世代ニュートリノ科学マルチメッセンジャー天文学連携研究機構に改組される
Next-generation Neutrino Science Organization was reorganized into Next-generation Neutrino Science and Multi-messenger Organization

組織図
Organization Chart



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（東京大学外の委員が半数以上）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）。

Board of Councilors
This is a board for having discussion about 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.

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

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

Inter-University Research Advisory Committee
This is a committee for having discussions to facilitate inter-university 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).

協議会 Board of Councilors

as of April 1, 2024

	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	所長 Director	荻尾 彰一 OGIO, Shoichi
1c	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	森山 茂栄 MORIYAMA, Shigetaka
	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	窪 秀利 KUBO, Hidetoshi
	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	田越 秀行 TAGOSHI, Hideyuki
2c	東京大学大学院 理学系研究科 Graduate School of Science, The University of Tokyo	研究科長 Dean	大越 慎一 OHKOSHI, Shinichi
	東京大学 The University of Tokyo	理事・副学長 Executive Vice President	齊藤 延人 SAITO, Nobuhito
3c	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK	所長 Director	齊藤 直人 SAITO, Naohito
	京都大学 基礎物理学研究所 Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University	所長 Director	青木 慎也 AOKI, Shinya
	自然科学研究機構 国立天文台 National Astronomical Observatory of Japan	台長 Director General	土居 守 DOI, Mamoru
4c	甲南大学 理工学部 Faculty of Science and Engineering, Konan University	名誉教授 Professor Emeritus	梶野 文義 KAJINO, Fumiyoshi
	東海大学 理学部 School of Science, Tokai University	客員教授 Visiting Professor	西嶋 恭司 NISHIJIMA, Kyoshi
	東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, The University of Tokyo	機構長 Director	横山 順一 YOKOYAMA, Junichi
	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 Institute of Space and Astronautical Science,Japan Aerospace Exploration Agency	教授 Professor	山田 亨 YAMADA,Toru
	東京大学 素粒子物理国際研究センター International Center for Elementary Particle Physics, The University of Tokyo	センター長 Director	石野 雅也 ISHINO, Masaya
	名古屋大学 宇宙地球環境研究所 Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University	所長 Director	塩川 和夫 SHIOKAWA, Kazuo

運営委員会 Advisory Committee

as of April 1, 2024

東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	所長 Director	荻尾 彰一 OGIO, Shoichi
東北大学大学院理学研究科 Graduage School of Science, Tohoku University	教授 Professor	高橋 史宜 TAKAHASHI, Fuminobu
東北大学高等研究機構学際科学フロンティア研究所 Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University	教授 Professor	當真 賢二 TOMA, Kenji
横浜国立大学理工学部 College of Engineering Science, Yokohama National University	教授 Professor	南野 彰宏 MINAMINO, Akihiro
大阪大学核物理研究センター Research Center for Nuclear Physics, Osaka University	教授 Professor	民井 淳 TAMII, Atsushi
東京大学大学院 理学系研究科 Graduate School of Science, The University of Tokyo	准教授 Associate Professor	中島 康博 NAKAJIMA, Yasuhiro
宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency	教授 Professor	堂谷 忠靖 DOTANI, Tadayasu
甲南大学 理工学部 Faculty of Science and Engineering, Konan University	教授 Professor	山本 常夏 YAMAMOTO, Tokonatsu
名古屋大学 宇宙地球環境研究所 Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University	教授 Professor	伊藤 好孝 ITOW, Yoshitaka
大阪公立大学大学院 理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University	教授 Professor	神田 展行 KANDA, Nobuyuki
神奈川大学 工学部 Faculty of Engineering, Kanagawa University	教授 Professor	日比野 欣也 HIBINO, Kinya
東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	森山 茂栄 MORIYAMA, Shigetaka
東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	窪 秀利 KUBO, Hidetoshi
東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	田越 秀行 TAGOSHI, Hideyuki
東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	塩澤 真人 SHIOZAWA, Masato
東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	三代木 伸二 MIYOKI, Shinji
東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	川崎 雅裕 KAWASAKI, Masahiro
東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	浅野 勝晃 ASANO, Katsuaki

共同利用研究運営委員会 Inter-University Research Advisory Committee

as of April 1, 2024

C	神奈川大学 工学部 Faculty of Engineering, Kanagawa University	教授 Professor	日比野 欣也 HIBINO, Kinya
	東海大学 理学部 School of Science, Tokai University	教授 Professor	櫛田 淳子 KUSHIDA, Junko
	慶應義塾大学 理工学部 Faculty of Science and Engineering, Keio University	准教授 Associate Professor	西村 康宏 NISHIMURA, Yasuhiro
	大阪公立大学大学院 理学研究科 Graduate School of Science,Osaka Metropolitan University	教授 Professor	常定 芳基 TSUNESADA, Yoshiki
	甲南大学 理工学部 Faculty of Science and Engineering, Konan University	教授 Professor	山本 常夏 YAMAMOTO, Tokonatsu
	大阪大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Osaka University	准教授 Associate Professor	井上 芳幸 INOUE, Yoshiyuki
	千葉大学 国際高等研究基幹 Institute for Advanced Academic Research, Chiba University	教授 Professor	石原 安野 ISHIHARA, Aya
	自然科学研究機構 国立天文台 National Astronomical Observatory of Japan	准教授 Associate Professor	麻生 洋一 ASO, Yoichi
	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	森山 茂栄 MORIYAMA, Shigetaka
	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	准教授 Associate Professor	牛場 崇文 USHIBA, Takafumi
	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	准教授 Associate Professor	奥村 公宏 OKUMURA, Kimihiro
	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	准教授 Associate Professor	早戸 良成 HAYATO, Yoshinari
	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	准教授 Associate Professor	迫 隆志 SAKO, Takashi
O	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	准教授 Associate Professor	齋藤 隆之 SAITO, Takayuki
OB	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	所長 Director	荻尾 彰一 OGIO, Shoichi

共同利用研究課題選択委員会 Inter-University Research Program Selection Committee

as of April 1, 2024

C	山形大学理学部 Faculty of Science, Yamagata University	教授 Professor	中森 健之 NAKAJIMA, Takeshi
	東北大学 ニュートリノ科学研究センター Tohoku University Research Center for Neutrino Science	教授 Professor	岸本 康宏 KISHIMOTO, Yasuhiro
	大阪公立大学大学院 理学研究科 Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University	准教授 Associate Professor	藤井 俊博 FUJII, Toshihiro
	東京大学大学院理学系研究科 Graduate School of Science, The University of Tokyo	准教授 Associate Professor	安東 正樹 ANDO, Masaki
	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	森山 茂栄 MORIYAMA, Shigetaka
	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	荻尾 彰一 OGIO, Shoichi
	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	川崎 雅裕 KAWASAKI, Masahiro
O	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	教授 Professor	窪 秀利 KUBO, Hidetoshi
OB	東京大学 宇宙線研究所 Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo	准教授 Associate Professor	澤田 崇広 SAWADA, Takahiro

C	委員長 Chairperson	1c	第１委員 The First Committee Member
O	幹事 Organizer	2c	第２委員 The Second Committee Member
A	副幹事 Assistant Organizer	3c	第３委員 The Third Committee Member
OB	オブザーバー Observer	4c	第４委員 The Fourth Committee Member

歴代代表者
Past Representatives

宇宙線観測所
Cosmic Ray Observatory

所長 Director	平田 森三 HIRATA, Morizo	1953.8.1~1955.8.31
所長 Director	菊池 正士 KIKUCHI, Seishi	1955.9.1~1959.9.21
（事務取扱） (Acting)	野中 到 NONAKA, Itaru	1959.9.22~1960.7.31
（事務取扱） (Acting)	熊谷 寛夫 KUMAGAI, Hiroo	1960.8.1~1960.11.30
所長 Director	野中 到 NONAKA, Itaru	1960.12.1~1970.3.31
所長 Director	菅 浩一 SUGA, Kouichi	1970.4.1~1972.3.31
所長 Director	三宅 三郎 MIYAKE, Saburo	1972.4.1~1976.5.24

宇宙線研究所
Institute for Cosmic Ray Research

所長 Director	三宅 三郎 MIYAKE, Saburo	1976.5.25~1984.3.31
所長 Director	鎌田 甲一 KAMATA, Kouichi	1984.4.1~1986.3.31
所長 Director	近藤 一郎 KONDO, Ichiro	1986.4.1~1987.3.31
（事務取扱） (Acting)	棚橋 五郎 TANAHASHI, Goro	1987.4.1~1987.4.30
所長 Director	荒船 次郎 ARAFUNE, Jiro	1987.5.1~1997.3.31
所長 Director	戸塚 洋二 TOTSUKA, Yoji	1997.4.1~2001.3.31
所長 Director	吉村 太彦 YOSHIMURA, Motohiko	2001.4.1~2004.3.31
所長 Director	鈴木 洋一郎 SUZUKI, Yoichiro	2004.4.1~2008.3.31
副所長 Vice Director	黒田 和明 KURODA, Kazuaki	2004.4.1~2008.3.31
副所長 Vice Director	福島 正己 FUKUSHIMA, Masaki	2008.4.1~2012.3.31
所長 Director	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	2008.4.1~2022.3.31
副所長 Vice Director	寺澤 敏夫 TERASAWA, Toshio	2012.4.1~2016.3.31
副所長 Vice Director	中畑 雅行 NAKAHATA, Masayuki	2015.12.1~2022.3.31
副所長 Vice Director	川崎 雅裕 KAWASAKI, Masahiro	2016.4.1~2020.3.31
副所長 Vice Director	佐川 宏行 SAGAWA, Hiroyuki	2020.4.1~2022.3.31
所長 Director	中畑 雅行 NAKAHATA, Masayuki	2022.4.1~2024.3.31
副所長 Vice Director	瀧田 正人 TAKITA, Masato	2022.4.1~2024.3.31
所長 Director	荻尾 彰一 OGIO, Shoichi	2024.4.1~
副所長 Vice Director	森山 茂栄 MORIYAMA, Shigetaka	2024.4.1~

乗鞍観測所
Norikura Observatory

（事務取扱） (Acting)	三宅 三郎 MIYAKE, Saburo	1976.5.25~1977.2.28
所長 Director	近藤 一郎 KONDO, Ichiro	1977.3.1~1987.3.31
所長 Director	湯田 利典 YUDA, Toshinori	1987.4.1~2000.3.31
所長 Director	福島 正己 FUKUSHIMA, Masaki	2000.4.1~2003.3.31
所長 Director	瀧田 正人 TAKITA, Masato	2003.4.1~2022.3.31
所長 Director	垰 隆志 SAKO, Takashi	2022.4.1~

明野観測所
Akeno Observatory

所長 Director	鎌田 甲一 KAMATA, Kouichi	1977.4.18~1984.3.31
所長 Director	棚橋 五郎 TANAHASHI, Goro	1984.4.1~1988.3.31
所長 Director	永野 元彦 NAGANO, Motohiko	1988.4.1~1998.3.31
所長 Director	手嶋 政廣 TESHIMA, Masahiro	1998.4.1~2002.12.31
所長 Director	福島 正己 FUKUSHIMA, Masaki	2003.1.1~2012.3.31
所長 Director	佐川 宏行 SAGAWA, Hiroyuki	2012.4.1~2022.3.31
所長 Director	荻尾 彰一 OGIO, Shoichi	2022.4.1~

神岡宇宙素粒子研究施設
Kamioka Observatory

施設長 Director	戸塚 洋二 TOTSUKA, Yoji	1995.4.1~2002.9.30
施設長 Director	鈴木 洋一郎 SUZUKI, Yoichiro	2002.10.1~2014.3.31
施設長 Director	中畑 雅行 NAKAHATA, Masayuki	2014.4.1~2022.3.31
施設長 Director	塩澤 真人 SHIOZAWA, Masato	2022.4.1~

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

センター長 Director	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	1999.4.1~2016.3.31
センター長 Director	奥村 公宏 OKUMURA, Kimihiro	2016.4.1~

重力波観測研究施設
KAGRA Observatory

施設長 Director	大橋 正健 OHASHI, Masatake	2016.4.1~2024.3.31
施設長 Director	三代木 伸二 MIYOKI, Shinji	2024.4.1~

カナリア高エネルギー宇宙物理観測研究施設
High Energy Astrophysics facility in Canarias

施設長 Director	手嶋 政廣 TESHIMA, Masahiro	2019.4.1~2022.3.31
施設長 Director	窪 秀利 KUBO, Hidetoshi	2022.4.1~

教職員数 Number of Staff

教授 Professor	准教授 Associate Professor	助教 Research Associate	研究員 Research Fellow	技術職員 Technical Staff	事務職員 Administrative Staff	非常勤職員 Adjunct Staff	合計 Total
13	16	31	17	7	26	49	159
[7] <1>	[2]	(2) <5>	(2) <5>	(1)	(8)	(37)	[9] (50) <11>

[ ]：客員（外数） ( )：女性（内数） 〈 〉：外国人（内数）
The numbers shown inside [ ],( ),< > are numbers of guest members, female staff and foreign staff respectively.
as of April 1, 2024

予算 Budget

歳出決算額
Annual Expenditures

千円 thousand yen

区分 Category	FY2019	FY2020	FY2021	FY2022	FY2023
人件費 Personal Expenses	872,000	898,000	898,000	1,048,000	1,068,000
物件費 Non-personal Expenses	1,611,000	1,173,000	2,078,000	1,990,000	1,974,000
合計 Total	2,483,000	2,071,000	2,976,000	3,038,000	3,042,000

外部資金等の受入金額
External Funds, etc.

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

区分 Category	FY2019	FY2020	FY2021	FY2022	FY2023
民間等との共同研究 Joint Research with the Private Sector	0 (0)	0 (0)	0 (0)	47,871 (2)	283,128 (2)
受託研究 Entrusted Research	1,966 (1)	340 (0)	231 (1)	0 (0)	0 (0)
奨学寄附金 Donation for Scholarly Development	3,387 (2)	1,600 (1)	0 (0)	0 (0)	3,180 (4)
基金 Foundation	22,728 (141)	22,654 (141)	17,739 (171)	19,449 (238)	15,511 (232)

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

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

種目 Category	FY2019	FY2020	FY2021	FY2022	FY2023
特別推進研究 Specially Promoted Research	17,800 (1)	0 (0)	0 (0)	27,300 (1)	221,300 (1)
新学術領域研究 Scientific Research on Priority Area	165,700 (7)	158,300 (9)	154,000 (5)	123,500 (4)	57,700 (2)
学術変革領域研究（A） Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A)	-	-	-	-	15,100 (1)
基盤研究 (S) Scientific Research (S)	29,700 (1)	71,100 (2)	174,000 (3)	50,200 (2)	51,300 (3)
基盤研究 (A) Scientific Research (A)	49,700 (4)	50,300 (4)	37,600 (4)	11,700 (4)	8,100 (2)
基盤研究 (B) Scientific Research (B)	16,400 (4)	9,400 (1)	7,410 (3)	11,000 (4)	12,200 (3)
基盤研究 (C) Scientific Research (C)	8,300 (7)	4,500 (8)	6,300 (8)	13,400 (10)	8,800 (11)
若手研究 (A) Grant-in-Aid for Young Scientist (A)	0 (0) ※公募終了	0 (0) ※公募終了	0 (0) ※公募終了	0 (0) ※公募終了	0 (0) ※公募終了
若手研究 (B) Grant-in-Aid for Young Scientist (B)	200 (1)	0 (0) ※公募終了	0 (0) ※公募終了	0 (0) ※公募終了	0 (0) ※公募終了
若手研究 Grant-in-Aid for Young Scientist	6,900 (6)	6,700 (9)	9,660 (8)	7,300 (7)	7,800 (8)
挑戦的研究（開拓） Challenging Research (Pioneering)	5,700 (1)	3,100 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
挑戦的萌芽研究 Challenging Exploratory Research	0 (0) ※公募終了	0 (0) ※公募終了	0 (0) ※公募終了	0 (0) ※公募終了	0 (0) ※公募終了
挑戦的研究（萌芽） Challenging Research (Exploratory)	-	2,000 (1)	3,300 (2)	3,200 (2)	1,100 (1)
研究活動スタート支援 Research Activity Start-up	3,000 (3)	2,000 (2)	200 (1)	2,200 (2)	2,100 (2)
国際共同研究加速基金（国際共同研究強化 (B)） Fund for Promotion of Joint International Research (Fostering Joint International Research (B))	6,700 (2)	9,800 (3)	5,500 (2)	6,700 (2)	2,800 (1)
ひらめき☆ときめきサイエンス	-	200 (1)	0 (0)	0 (0)	290 (1)
合計 Total	310,100 (37)	317,400 (41)	398,670 (36)	256,500 (38)	388,590 (36)

共同利用研究
Inter-University Research Program (Joint Usage/Research Center)

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、重力波観測研究施設、乗鞍観測所、明野観測所などの付属施設で共同利用研究を行って来ました。さらに、2018 年には国際共同利用·共同研究拠点として認定されました。これらの共同利用研究は年度ごとに国内外の研究者から公募し、共同利用研究の運営委員会及び課題採択委員会が採択を行います。

ICRR, as one of the "Joint Usage/Research Centers," has hosted Inter-University Research at Kamioka Observatory, KAGRA Observatory, Norikura Observatory, Akeno Observatory, and Kashiwa Campus. In 2018, ICRR was selected as one of the "International Joint Usage/Research Centers", and started to accept applications from international researchers. The Joint Usage/Research programs are selected by the Advisory Committee and the Program Selection Committee.

2023 年度 国内公募 利用状況 FY2023 Results of Domestic Application	申請件数 Applications	採択件数 Successful Applications	述べ研究者数 Total Researchers
宇宙ニュートリノ研究部門 Neutrino and Astroparticle Research Division	41 (41)	41 (41)	1918 (1706)
高エネルギー宇宙線研究部門 High Energy Cosmic Ray Research Division	60 [8]	60 [8]	1280 [90]
宇宙基礎物理学研究部門 Astrophysics and Gravity Research Division	27 <25>	27 <25>	743 <694>
宇宙ニュートリノ観測情報融合センター Research Center for Cosmic Neutrinos	9	9	78

2023 年度 国際公募 利用状況 FY2023 Results of International Application	申請件数 Applications	採択件数 Successful Applications	述べ研究者数 Total Researchers
宇宙ニュートリノ研究部門 Neutrino and Astroparticle Research Division	5 (5)	5 (5)	95 (95)
高エネルギー宇宙線研究部門 High Energy Cosmic Ray Research Division	9 [0]	9 [0]	315 [0]
宇宙基礎物理学研究部門 Astrophysics and Gravity Research Division	10 <10>	10 <10>	189 <189>
宇宙ニュートリノ観測情報融合センター Research Center for Cosmic Neutrinos	2	2	60

（）は神岡宇宙素粒子研究施設の内数、[ ] は乗鞍観測所の内数、< > は重力波観測研究施設の内数
( ) : Kamioka Observatory, [ ] : Norikura Observatory, and < > : KAGRA Obsevatory

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.

	FY2020	FY2021	FY2022	FY2023	FY2024
修士課程 Master's Course	37 (3)	37 (4)	30 (3)	21 (1)	22(0)
博士課程 Doctor's Course	23 (1)	28 (0)	27 (1)	30 (2)	26 (3)
合計 Total	60 (4)	65 (4)	57 (4)	51 (3)	48 (3)

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

国際交流プロジェクト
International Project

アルパカプロジェクト (ALPACA Project)

ボリビアのチャカルタヤ山腹では、空気シャワー観測装置を用いた高エネルギー宇宙線実験が推進されています。

On the Mt. Chacaltaya plateau, studies on high-energy cosmic rays are promoted, using an air shower array.

チベット空気シャワープロジェクト (Tibet ASγ Experiment)

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を行っています。

On Yangbajing Plateau in Tibet, experimental studies on high energy cosmic rays are conducted using air-shower detector.

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

アメリカのユタでは、地表検出器と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 by ground array detectors and air fluorescence telescopes.

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

神岡宇宙素粒子研究施設では、スーパーカミオカンデを用いて、ニュートリノ振動や陽子崩壊の探索などの研究を行っています。11 カ国の研究者が共同研究に参加しています。

At Kamioka observatory, studies on neutrino oscillation and proton decay are conducted with Super-Kamiokande detector. Researchers from 11 countries have joined the project.

ハイパーカミオカンデプロジェクト (Hyper-Kamiokande Project)

神岡宇宙素粒子研究施設では、ニュートリノ・核子崩壊探索のための次世代装置の建設を進めています。22 カ国の研究者が共同研究に参加しています。

At Kamioka Observatory, the next generation detector for neutrino and nucleon decay experiment, Hyper-Kamiokande is under construction. Researchers from about 22 countries join the project.

XMASS プロジェクト (XMASS Project)

神岡宇宙素粒子研究施設では、液体キセノン検出器 XMASS で得たデータを用いて、ダークマター検出や未知現象の発見を目指しています。日本、韓国、中国の研究者が参加しています。

At Kamioka Observatory, searches for dark matter and other unknown phenomena using XMASS data are ongoing. Researchers from Japan, Korea and China have joined the project.

XENON プロジェクト (XENON Project)

イタリアのグランサッソ国立研究所では、XENONnT 検出器を用いて暗黒物質の直接探索実験を行っています。12 カ国の研究者が国際的なコラボレーションを組織しています。

The XENONnT experiment at LNGS in Italy is going on to discover dark matter particles directly. Researchers from 12 countries are organizing an international collaboration.

KAGRA プロジェクト (KAGRA Project)

重力波観測研究施設では、大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」を建設し、運用しています。13 カ国の研究者が共同研究に参加しています。

The KAGRA observatory has constructed and operates the Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (KAGRA). Researchers from 13 countries are involved in the international research project.

CTA プロジェクト (Cherenkov Telescope Array Project)

スペイン・カナリア諸島のラパルマとチリ・パラナルでは、高エネルギーガンマ線天体物理学の研究を行うために、チェレンコフテレスコープアレイ（CTA）の建設を進めています。25 カ国の研究者が共同研究に参加しています。

On Canary Islands, Spain and at Paranal, Chile, construction of the Cherenkov Telescope Array (CTA) is proceeding to study about very high energy gamma-ray astrophysics. Researchers from 25 countries have joined the project.

受入外国人研究者数
The Number of Accepted Foreign Researchers

	2019	2020	2021	2022	2023
アジア (Asia)	48	1	1	10	14
オセアニア (Oceania)	0	0	0	0	0
中南米 (Latin America)	0	0	2	1	5
北米 (North America)	40	0	0	2	10
ヨーロッパ (Europe)	31	2	11	14	11
合計 Total	119	3	14	27	40

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

1981	ボリビアサンアンドレス大学（ボリビア） Universidad Mayor de San Andrés (Bolivia)
1995	ユタ大学理学部（米国） College of Science, University of Utah (US)
1995	カリフォルニア大学アーバイン校物理科学部（米国） School of Physical Sciences, the University of California, Irvine (US)
1995	ボストン大学大学院文理学研究科（米国） Graduate School of Art and Sciences, Boston University (US)
2001	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)
2001	西オーストラリア大学生命物理科学部（オーストラリア） Faculty of Life and Physical Sciences, the University of Western Australia (Australia)
2009	カリフォルニア工科大学 LIGO 研究所（米国） CIT LIGO Laboratory, California Institute of Technology (US)
2011	バーゴ共同研究組織（イタリア） European Gravitational Observatory / The Virgo Collaboration (Italy)
2011	上海師範大学（中国） The Shanghai United Center for Astrophysics Shanghai Normal University (China)
2011	グラスゴー大学重力研究所（英国） Institute for Gravitational Research, University of Glasgow (US)
2012	サニオ大学工学部（イタリア） Department of Engineering, The University of Sannio at Benevento (Italy)
2012	中国科学院国家天文台（中国） National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences (China)
2013	マドリッド自治大学理学部（スペイン） The Faculty Sciences, Autonomous University of Madrid (Spain)
2017	中央研究院物理研究所（台湾） Institute of Physics Academia Sinia (Taiwan)
2017	マックスプランク物理学研究所（ドイツ） Max Plank Institute for Physics(Germany)
2017	成均館大学校自然科学大学宇宙線研究センター（韓国） Sungkyunkwan University, College of Science, Center for Cosmic Ray Research (Korea)
2018	ポーランド国立原子核研究センター（ポーランド） National Centre for Nuclear Research, Poland
2018	カナリー宇宙物理学研究所（スペイン） Instituto de Astrofisica de Canarias (Spain)
2018	トライアンフ（カナダ） TRIUMF (Canada)
2018	清華大学物理工学系（中国） Tsinghua University (China)
2019	中国科学院武漢物理・数学研究所（中国） Wuhan Institute of Physics and Mathematics,Chinese Academy of Sciences (China)
2019	台湾ナショナルスーパーコンピューターセンター・国家実験研究院（台湾） National Center for High-performance Computing(NCHC), National Applied Research Laboratories (NARLabs) (Taiwan)
2020	モスクワ大学スコベルチン核物理研究所（ロシア） Scobeltsyn Nuclear Physics Research Institute, Moscow State University (Russia)
2021	フランス国立科学研究センター（フランス） The French National Centre for Scientific Research (France)
2022	タタ基礎研究所（インド） Tata Institute of Fundamental Research (India)
2022	グアダラハラ大学（メキシコ） Universidad de Guadalajara (Mexico)
2023	ラザフォードアップルトン研究所（英国） Rutherford Appleton Laboratory (England)
2023	ペルージャ大学（イタリア）・国立天文台 The University of Perugia (Italy),National Astronomical Observatory of Japan
2023	国立陽明交通大学（台湾） National Yang Ming Chiao Tung University (Taiwan)

共同利用研究に参加している外国人研究者は、2023 年度で延べ 1,811 人に上ります。

Total number of foreign researchers who joined ICRR inter-university research projects was 1,811 in 2023.

イベント Events

カブリ IPMU との合同一般講演会 ICRR×Kavli IPMU Public Lecture

春・秋



宇宙線研究所が、カブリ数物連携宇宙研究機構と協力して、毎年春と秋に開催しているトークイベントです。

柏キャンパス一般公開 Open Campus

10 月



毎年 10 月に開かれる柏キャンパス一般公開に合わせ、サイエンスカフェやワークショップなどを開催しています。

宇宙・素粒子スプリングスクール Spring School

3 月



大学院進学を控えた大学 3 年生が、4 泊 5 日の日程で合宿を行い、仲間たちと一緒に実験や解析に取り組みます。宇宙・素粒子研究の体験プログラムです。

刊行物 Publication

ICRR ニュース ICRR NEWS



宇宙線研究所のトピックスを伝える季刊誌。年に 4 回ほど日本語で発行しています。

ICRR 要覧 ICRR CATALOGUE



宇宙線研究所の研究プロジェクトや実験施設、その他の概要などの情報をまとめた冊子です。年一回発行、日英併記。

アニュアルレポート ANNUAL REPORT



宇宙線研究所の各研究プロジェクトの 1 年間の主な研究成果をまとめた冊子。年一回発行、英語版です。

Web コンテンツ
Web Contents

宇宙線研究所 Web News
ICRR Latest News



宇宙線研究所のトピックスを伝える Web ニュース。随時、新しい話題を更新しています。

宇宙線研究所 VR
ICRR Virtual Reality



岐阜県飛騨市の神岡鉱山にある実験施設を 360 度のパノラマ画像で探検できます。

PR 映像
PR Video



世界中に散らばる宇宙線研究所の主な実験施設を紹介したビデオです。英語ですが、日本語字幕があります。

オリジナルグッズ
ICRR Goods

スーパーカミオカンデのジグソーパズル
Jigsaw Puzzle of Super-Kamiokande



300 ピース :1530 円 (税込)　500 ピース :2040 円 (税込)

オリジナルマグカップ
Original Mug with "Air Shower"



1100 円 (税込)。乗鞍観測所の星空やスーパーカミオカンデ内部など宇宙線研究所を象徴する写真がきれいです。

チェレンコフリング入りのノート
Original Notebook with Cherenkov Ring



680 円 (税込)　A5 サイズ、64 ページ

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

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

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

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

TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2015
2015.10.26-30（千葉 Chiba）169 人

第 4 回 EliTES 重力波国際会議
4th EliTES General Meeting
2015.12.2-3（東京 Tokyo) 38 人

The extreme Universe viewed in very-high-energy gamma rays
2016.1.13-14（千葉 Chiba）68 人

大型ニュートリノ施設に関する国際会議
Third International Meeting for Large Neutrino Infrastructure
2016.5.30-6.1（茨城 Ibaraki) 80 人

PhyStat-ν Workshop on Statistical Issues in Experimental Neutrino Physics
2016.5.30 - 6.1(千葉 Chiba) 90 人

CTA Consortium Meeting Kashiwa
2016.6.16-20（千葉 Chiba）170 人

Extreme Universe viewed with High Energy Gamma Rays
2017.12.18-19（千葉 Chiba）60 人

Tokyo Spring Cosmic Lyman-Alpha Workshop
2018.3.26-30 (東京 Tokyo）120 人

ハイパーカミオカンデ第 1 回予算検討会議
The First Meeting of Hyper Kamiokande Financial Forum
2019.1.11 (東京 Tokyo）50 人

ハイパーカミオカンデ第 2 回予算検討会議
The Second Meeting of Hyper Kamiokande Financial Forum
2019.6.27 (東京 Tokyo）45 人

第 16 回宇宙素粒子・地下物理国際会議 (TAUP2019)
Topics in Astroparticle and Underground Physics
2019.9.9-13 (富山 Toyama) 約 540 人

Dark Matter Searches in the 2020s
2019.11.11-13（千葉 Chiba）117 人

ICRR holds international conferences and workshops about once a year, and hosts monthly seminars of 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.

高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2019
The extreme Universe viewed in very-high-energy gamma rays 2019
2019.11.14-15（千葉 Chiba）83 人

KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM
2020.11.16-19 (オンライン Online) 290 人

The 7th KAGRA International workshop (KIW7)
2020.12.18-20（台湾 Taiwan and Online）240 人

Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era
2021.1.18-20（千葉 Chiba and Online）80 人

KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM
2021.11.29-12.2 (オンライン Online) 317 人

国際研究会“Black Hole Astrophysics with VLBI 2022”
2022.2.7-9 (オンライン Online) 92 人

UTokyoNY イベント「マルチメッセンジャーで宇宙をさぐる」
UTokyoNY Event "Exploring the Universe with Multi-Messengers"
2022.2.12 (オンライン Online) 300 人

LIGO-Virgo-KAGRA collaboration meeting at Louisiana
2022.3.14-17 (米国 USA) 808 人

Synergies at New Frontiers at Gamma-rays, Neutrinos and Gravitational Waves
2022.3.24-25 (千葉 Chiba) 70 人

21st International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN2022)
2022.9.28-30 (岐阜 Gifu and Online) 111 人

Hyper-Kamiokande Collaboration meeting
2023.3.6-11 (富山 Toyama and Online) 223 人

LIGO-Virgo-KAGRA collaboration meeting at Northwestern University
2023.3.13-16 (米国 USA and Online) 677 人

第 38 回 宇宙線国際会議 (ICRC2023)
38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023)
2023.7.26-8.3 (名古屋 Nagoya and Online) 1429 人

LIGO-Virgo-KAGRA collaboration meeting
2023.9.11-15 (富山 Toyama and Online) 936 人

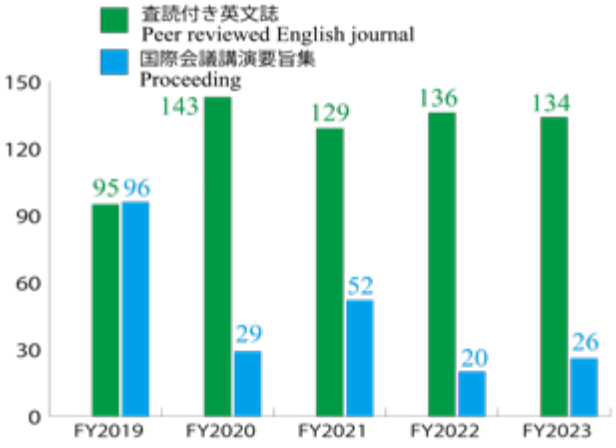
NNSO 改組記念シンポジウム「マルチメッセンジャー天文学の展開」
Symposium of Reorganized NNSO, “New Development of Multi-messenger Astronomy” 2023.11.1-2 (千葉 Chiba and Online) 114 人

論文
Academic Papers

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

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

宇宙線研究所職員の発表論文数 (2019-2023)
Papers and proceedings published by ICRR researchers



受賞歴 Awards

1999	仁科記念賞 Nishina Memorial Award	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	大気ニュートリノ異常の発見 Discovery of the atmospheric neutrino anomaly
2001	仁科記念賞 Nishina Memorial Award	鈴木 洋一郎 SUZUKI, Yoichiro 中畑 雅行 NAKAHATA, Masayuki	太陽ニュートリノの精密観測によるニュートリノ振動の発見 Discovery of neutrino oscillation by precise observation of solar neutrinos
2001	紫綬褒章 Medal of Honor with Purple Ribbon	戸塚 洋二 TOTSUKA, Yoji	宇宙線物理・素粒子物理学研究功績 For contribution to Cosmic Ray Physics and Elementary Particle Physics Research
2002	パノフスキー賞 W.K.H. Panofsky Prize	小柴 昌俊 KOSHIBA, Masatoshi 梶田 隆章 KAJITA, Takaaki 戸塚 洋二 TOTSUKA, Yoji	大気ニュートリノによるニュートリノ振動の 実験的検証による確定 For compelling experimental evidence for neutrino oscillations using atmospheric neutrinos
2002	藤原賞 Fujiwara Award	戸塚 洋二 TOTSUKA, Yoji	大気及び太陽ニュートリノ観測によるニュートリノ振動の発見 Discovery of Neutrino Oscillation from Observations of Atmospheric and Solar Neutrinos
2002	文化功労者 Person of Cultural Merit	戸塚 洋二 TOTSUKA, Yoji	宇宙線天文学の発展に貢献 For Contribution to Cosmic Ray Astoronomy
2002	ノーベル物理学賞 Nobel Prize in Physics	小柴 昌俊 KOSHIBA, Masatoshi	天体物理学、特に宇宙ニュートリノの検出へのパイオニア的貢献 For pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos
2003	ブルーノポンテコルボ賞 Bruno Pontecorvo Prize	戸塚 洋二 TOTSUKA, Yoji	大気ニュートリノの振動を発見した業績 For his outstanding contribution to the discovery of atmospheric muon neutrino oscillations
2004	文化勲章 The Order of Culture	戸塚 洋二 TOTSUKA, Yoji	多年にわたり宇宙線物理学の研究、教育に努め、物理学の歴史に残る卓越した業績をあげ、この分野の発展に顕著な功績をした。 Significant contribution to the research and education in the field of Cosmic Ray Physics
2007	ベンジャミンフランクリンメダル Benjamin Franklin Medal in physics	戸塚 洋二 TOTSUKA, Yoji	ニュートリノに質量があることの発見 Discovery of the neutrino mass
2008	素粒子メダル Particle Physics Medal	荒船 次郎 ARAFUNE, Jiro	非可換ゲージ理論におけるモノポールのトポロジー的性質の研究 Topological property of monopole in non-commutative gauge theories
2008	井上学術賞 Inoue Prize for Science	中畑 雅行 NAKAHATA, Masayuki	太陽ニュートリノの観測とニュートリノ振動の研究 Solar neutrino detection and research of neutrino oscillation
2008	地球化学研究協会奨励賞 Young Scientist Award of the Geochemistry Research Association	宮原 ひろ子 MIYAHARA, Hiroko	宇宙線生成核種による太陽活動史の研究 Study of the long-term solar variations using cosmogenic nuclide
2010	井上研究奨励賞 Inoue Research Award for Young Scientist	西野 玄記 NISHINO, Haruki	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 Search for Nucleon Decay into Charged Antilepton plus Meson in Super-Kamiokande
2010	戸塚洋二賞 Yoji Totsuka Prize	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	大気ニュートリノ振動の発見 Discovery of atmospheric neutrino oscillation
2011	ブルーノ・ポンテコルボ賞 Bruno Pontecorvo Prize	鈴木 洋一郎 SUZUKI, Yoichiro	スーパーカミオカンデ実験における大気ニュートリノおよび太陽ニュートリノ振動の発見 Discovery of atmospheric and solar neutrino oscillations in the Super-Kamiokande experiment
2011	戸塚洋二賞 Yoji Totsuka Prize	中畑 雅行 NAKAHATA, Masayuki	長年に亘る太陽ニュートリノと振動の研究 Study of the solar neutrino and its oscillations
2011	日本物理学会若手奨励賞 Young Scientist Award of the Physical Society of Japan	佐古 崇志 SAKO, Takashi	チベット空気シャワーアレイにおける高エネルギー宇宙線異方性の研究 Study on the High-Energy Cosmic Ray Anisotropy with the Tibet Air-Shower Array
2012	戸塚洋二賞 Yoji Totsuka Prize	福来 正孝 FUKUGITA, Masataka	レプトン起源の宇宙のバリオン数非対称機構の提唱 Pointing out a mechanism to generate cosmological baryon number violation originated by lepton
2012	日本学士院賞 Japan Academy Prize	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	大気ニュートリノ振動の発見 Discovery of atmospheric neutrino oscillations
2012	文部科学大臣表彰若手科学者賞 MEXT Young Scientists' Prize	宮原 ひろ子 MIYAHARA, Hiroko	太陽活動および宇宙線が気候に及ぼす影響の研究 Study for solar activities and its effects
2012	素粒子メダル奨励賞 Particle Physics Medal: Young Scientist Award in Theoretical Particle Physics	伊部 昌宏 IBE, Masahiro	超対称性の破れにおける現象論的宇宙論的制限を満足する新しいシナリオの構築と検証 Sweet Spot Supersymmetry
2013	ティンズリー・スカラー・アワード Extragalactic Tinsley Scholar Award	大内 正己 OUCHI, Masami	遠方宇宙観測による広範囲な研究 Extensive work on distant galaxies and cosmological events in the early universe
2013	ヨド賞 Yodh Prize	永野 元彦 NAGANO, Motohiko	最高エネルギー宇宙線分野における先駆的研究 Pioneering leadership in the experimental study of the highest energy cosmic rays
2013	ジュセッペ・ヴァンナ・ココニ賞 Giuseppe and Vanna Cocconi Prize	鈴木 洋一郎 SUZUKI, Yoichiro	太陽ニュートリノの全フレーバー測定による太陽ニュートリノの謎の解明 Outstanding contributions to the solution of the solar neutrino puzzle by measuring the flux of all neutrino flavors
2013	ユリウス・ヴェス賞 Julius Wess Award	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	スーパーカミオカンデ実験による大気ニュートリノ振動現象の発見 Discovery of atmospheric neutrino oscillations with the Super-Kamiokande experiment
2014	湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞 Yukawa-Kimura Prize	川崎 雅裕 KAWASAKI, Masahiro	重力まで含めた相互作用の統一理論の構築における功績 Supergravity and nucleosynthesis
2014	文部科学大臣表彰若手科学者賞 MEXT Young Scientists' Prize	大内 正己 OUCHI, Masami	可視光広域深探査による宇宙進化の研究 Pioneering studies into the early universe through wide-field multi-wavelength observations
2015	戸塚洋二賞 Yoji Totsuka Prize	塩澤 真人 SHIOZAWA, Masato	加速器ミューニュートリノビームによる電子ニュートリノ出現現象の発見 Observation of electron neutrino appearance in an accelerator muon neutrino beam
2015	日本天文学会研究奨励賞 The Astronomical Society of Japan Young Astronomer Award	小野 宜昭 ONO, Yoshiaki	銀河進化と宇宙再電離の観測的研究 Observational studies of galaxy evolution and cosmic reionization
2015	基礎物理学ブレークスルー賞 Breakthrough Prize in Fundamental Physics	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki 鈴木 洋一郎 SUZUKI, Yoichiro Super-K Collaboration	ニュートリノ振動という本質的な発見をし、素粒子物理学の標準理論を遥かに超える新しいフロンティアを開拓した実績 The fundamental discovery and exploration of neutrino oscillations
2015	文化勲章 The Order of Culture	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	ニュートリノ物理学において著しい研究成果を挙げ、素粒子物理および宇宙論に多大な影響を与えた功績 Outstanding contributions to particle physics and cosmology by the remarkable achievements for researches in Neutrino physics
2015	文化功労者 Person of Cultural Merit	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	ニュートリノ物理学において著しい研究成果を挙げ、素粒子物理および宇宙論に多大な影響を与えた功績 Outstanding contributions to particle physics and cosmology by the remarkable achievements for researches in Neutrino physics

受賞歴 Awards

2015	ノーベル物理学賞 Nobel Prize in Physics	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	ニュートリノが質量を持つ事を示す、ニュートリノ振動現象の発見 The discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass
2016	中日文化賞 Chunichi Cultural Award	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	素粒子ニュートリノに質量があることを示すニュートリノ振動の発見の功績 The discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass
2016	Harvard Foundation Scientist of the Year	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	多様性向上に資する科学分野での顕著な功績と取り組みに対して Remarkable achievements and initiatives that serve to increase diversity in the area of science
2017	素粒子メダル奨励賞 Particle Physics Medal: Young Scientist Award in Theoretical Particle Physics	長谷川 史憲 HASEGAWA, Fuminori	Component action of nilpotent multiplet coupled to matter in 4 dimensional N=1 supergravity
2017	宇宙線物理学功労賞	荒船 次郎 ARAFUNE, Jiro	宇宙線研究所所長としてスーパーカミオカンデ計画などの実現に取り組み、現在の宇宙線物理学、非加速器素粒子物理学研究の隆盛を導いた功績に対して
2017	GITAM foundation Annual Award	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	科学分野での顕著な功績に対して Outstanding contributions in the field of science
2017	日本物理学会若手奨励賞 Young Scientist Award of the Physical Society of Japan	藤井 俊博 FUJII, Toshihiro	大気蛍光望遠鏡を用いた極高エネルギー宇宙線スペクトルの研究 Study on the energy spectrum of ultrahigh-energy cosmic rays with the fluorescence detectors
2017	バークレー日本賞 Berkeley Japan Prize	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	海外における日本の文化・科学技術の普及と発展に貢献した功績に対して Significant contributions in furthering the understanding of Japan on the global stage
2017	井上研究奨励賞 Inoue Research Award for Young Scientists	衣川 智弥 KINUGAWA, Tomoya	宇宙初期からの連星進化計算と連星ブラックホールからの重力波検出率 The binary population synthesis in the early universe and the detection rate of gravitational waves from the binary black holes
2018	日本学術振興会賞 JSPS Prize	大内 正己 OUCHI, Masami	ライマン・アルファ放射体を用いた初期宇宙の観測研究 Observational Studies of the Early Universe with Lyα Emitters
2018	日本学士院学術奨励賞 Japan Academy Medal	大内 正己 OUCHI, Masami	ライマン・アルファ放射体を用いた初期宇宙の観測研究 Observational Studies of the Early Universe with Lyα Emitters
2018	文部科学大臣表彰若手科学者賞 MEXT Young Scientists' Prize	衣川 智弥 KINUGAWA, Tomoya	初代星起原連星ブラックホールからの重力波についての研究 Research for gravitational waves from binary system of black holes of the the first star
2019	21 世紀テクノロジー賞 2019 The 21st Century Technology Award	手嶋 政廣 TESHIMA, Masahiro	CTA 大口径望遠鏡 1 号機の完成とその先端技術開発 Construction of the prototype of Large-Sized Telescope (LST) equipped with cutting-edge technologies
2019	IUPAP-TIFR Homi Bhabha Medal and Prize	梶田 隆章 KAJITA, Takaaki	ニュートリノ物理学における画期的成果を含む宇宙線研究への著しい貢献に対して Outstanding contributions to Cosmic Ray physics including path breaking work in neutrino physics
2020	井上研究奨励賞 Inoue Research Award for Young Scientists	播金 優一 HARIKANE, Yuichi	すばる望遠鏡を使った宇宙の深層的構造形成における初期銀河の統一的研究 Subaru Census of Early Galaxies in the Hierarchical Structure Formation of the Universe
2021	仁科記念賞 Nishina Memorial Award	瀧田 正人 TAKITA, Masato	サブ PeV ガンマ線天文学の創始と銀河宇宙線の起源の解明 Establishment of the sub-PeV gamma ray astronomy and elucidation of the origin of galactic cosmic rays
2021	日本学術振興会賞 JSPS Prize	野田 浩司 Noda, Koji	ガンマ線バーストからのテラ電子ボルト領域高エネルギーガンマ線放射の研究 Study of Very High Energy Gamma Ray Emission from Gamma Ray Burst
2021	井上研究奨励賞 Inoue Research Award for Young Scientists	藤本 征史 FUJIMOTO, Seiji	ALMA で探る冷たい宇宙 : 星間及び銀河周辺物質から宇宙の構造までの統計研究 Demographics of the Cold Universe with ALMA: From Inter-Stellar and Circum-Galactic Media to Cosmic Structures
2021	古在由秀賞 Kozai Yoshihide Research Award	衣川 智弥 KINUGAWA, Tomoya	種族 III 星からの重力波の研究 Research on Gravitational Waves from Population III stars
2021	欧州テクノロジー賞 2021 The 21st Century Technology Award	手嶋 政廣 TESHIMA, Masahiro	CTA 大口径望遠鏡 1 号機の先端技術開発 Technological Milestone of LST-1 Telescope
2022	高エネルギー物理学奨励賞 High Energy Physics Young Researcher's Award	稲田 知大 INADA, Tomohiro	天の川銀河中心における暗黒物質の対消滅による高エネルギーガンマ線放出の探索 Search for High-Energy Gamma Ray Line emission from Dark Matter annihilation in the Galactic Center
2022	日本物理学会若手奨励賞 Young Scientist Award of the Physical Society of Japan	川口 恭平 KAWAGUCHI, Kyohei	中性子星連星の合体に伴う電磁波放射に関する理論的研究 Theoretical studies on electromagnetic radiation from binary neutron star mergers
2022	日本天文学会研究奨励賞 The ASJ Young Astronomer Award	藤本 征史 FUJIMOTO, Seiji	電波と可視光観測による初期銀河と銀河周辺物質の新描像の提案と確立 Establishing a New Physical Picture of Early Galaxies and the Circum-Galactic Medium by Radio and Optical Observations
2023	高エネルギー加速器科学研究奨励賞（小柴賞） Koshiba Award (Foundation for High Energy Accelerator Science)	瀧田 正人 TAKITA, Masato	水チェレンコフミューオン検出器を応用した空気シャワー観測装置によるサブ PeV ガンマ線天文学の開拓 Pioneering sub-PeV gamma-ray astronomy in application of water Cherenkov muon detectors to an air shower array
2023	文部科学大臣表彰科学技術賞 MEXT Science and Technology Prize	手嶋 政廣 TESHIMA, Masahiro	大口径チェレンコフ望遠鏡の開発とガンマ線天文学の研究 Development of LST(Large-Sized Telescope) of CTA and Research for Gamma-Ray Astronomy
2023	文部科学大臣表彰若手科学者賞 MEXT Young Scientists' Prize	播金 優一 HARIKANE, Yuichi	すばる望遠鏡等の大規模観測データを使った遠方銀河の研究 Research for Early Galaxies using Large Observational Datasets Obtained with Subaru and Other Telescopes
2023	日本天文学会研究奨励賞 The ASJ Young Astronomer Award	播金 優一 HARIKANE, Yuichi	高赤方偏移観測限界における先駆的な銀河形成研究 Pioneering Studies of Galaxy Formation at the Observational Redshift Limit

宇宙線研究所の所在地

〒277-8582　千葉県柏市柏の葉 5-1-5
04-7136-3102（総務係）

アクセス

・成田空港から (運休中)

成田空港交通バス（75 分・1800 円）で柏の葉キャンパス駅へ。柏の葉キャンパス駅から東武バス（10 分･170 円）で国立がん研究センターで下車し徒歩 3 分

・羽田空港から

東武バスまたは京浜急行バス（85 分・1600 円）で国立がん研究センターで下車し徒歩 3 分

・秋葉原駅から

つくばエクスプレスで柏の葉キャンパス駅へ（30 分・690 円)。柏の葉キャンパス駅西口から東武バス（10 分・170 円）で国立がん研究センターで下車し徒歩 3 分

・上野駅から

JR 常磐線で柏駅へ（30 分・490 円）柏駅西口から東武バス（25 分・300 円）で国立がん研究センターで下車し徒歩 3 分

Location of ICRR headquarters

5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba,
277-8582, Japan
+81-4-7136-3102 (General Affairs)

Access

・From Narita Airport (currently out of service)

By Airport Bus (Narita Airport Express Bus)
Narita Airport - Kashiwanoha Campus Station: about 75min, 1,800 JPY (one-way)
Kashiwanoha Campus Station (West Exit) - National Cancer Center: around 10 min, 170 JPY (one-way)

・From Haneda Airport

By Airport Bus (Tobu / Keihin Kyuko Airport Bus)
Haneda Airport - National Cancer Center: around 85min, 1,600 JPY (one-way)

・From Akihabara Station

By Train (Tsukuba Express)
Akihabara Station - Kashiwanoha Campus Station: around 30 min, 690 JPY (one-way)
Kashiwanoha Campus Station (West Exit) - National Cancer Center: around 10 min, 170 JPY (one-way)

・From Ueno Station

By Train (JR Joban Line)
Ueno Station - Kashiwa Station: around 30 min, 490 JPY (one-way)
Kashiwa Station (West Exit) - National Cancer Center: around 25 min, 300 JPY (one-way)





東京大学宇宙線研究所

Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo

住所 〒277-8582　千葉県柏市柏の葉 5-1-5

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

TEL 04-7136-3102（代表） / +81-4-7136-3102 (main number)

FAX 04-7136-3115 / +81-4-7136-3115

URL www.icrr.u-tokyo.ac.jp

発行：2024 年 8 月 9 日

Published on August 9, 2024

編集：東京大学宇宙線研究所 広報室

Public Relations Office, Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo

