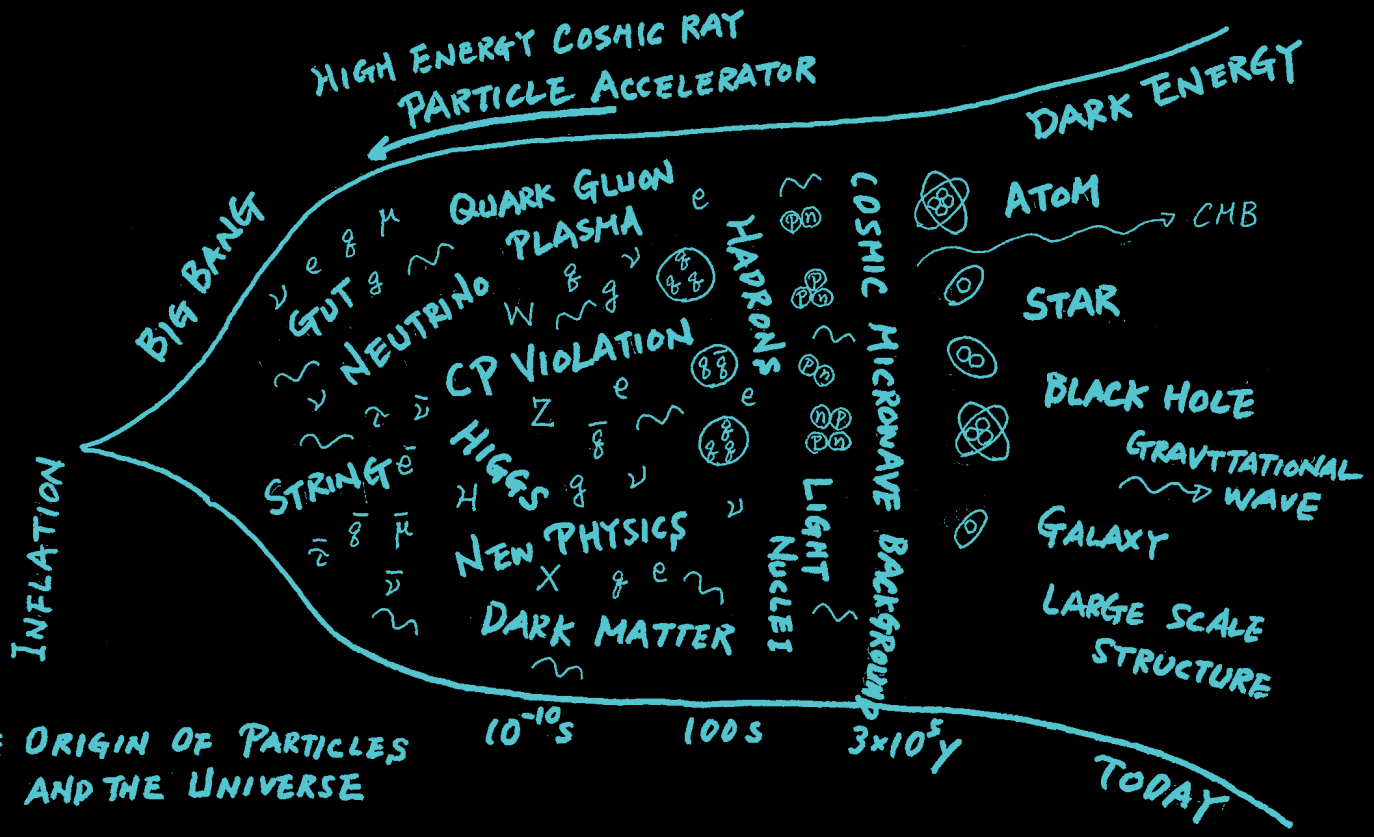
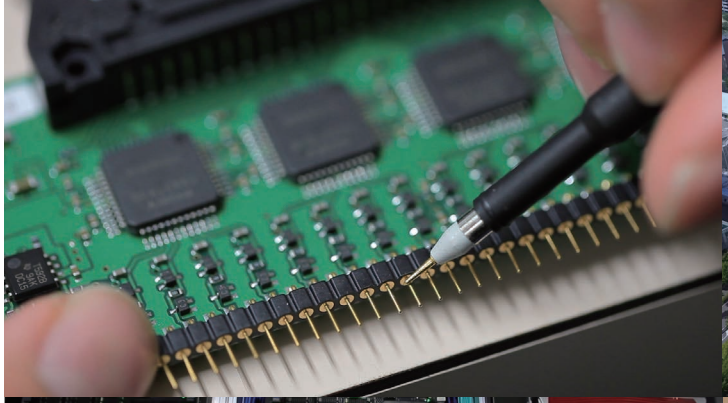
KMI Unfolded

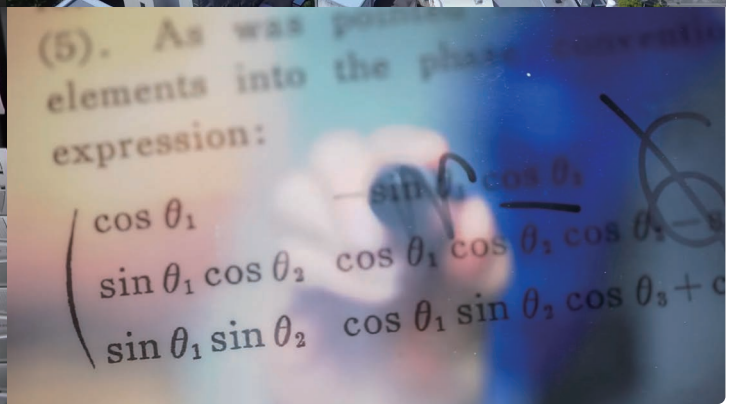
Issue 1 / 2020
www.kmi.nagoya-u.ac.jp



KMI - Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe

素粒子宇宙起源研究所





What is the origin of matter and the universe?
宇宙の - 我々の - 起源とは？

宇宙は何からできているのか、時空の起源とは、
物質はどこから生まれたか、
そして、万物を支配する法則はあるのか。
KMIは、長年人類が追いかけてきた
これらの問いの答えを見つけるための組織です。

KMI tries to answer the biggest questions of all time:
What is the universe made of?
What is the origin of spacetime?
How did physical matter come about?
Is there an ultimate law governing the universe?
KMI researchers are exploring new frontiers in modern physics by revealing the mysteries of elementary particles and the universe itself.

KMI
名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所
Kobayashi-Maskawa Institute
for the Origin of Particles and the Universe
Nagoya University

〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya Aichi 464-8602, JAPAN

www.kmi.nagoya-u.ac.jp

KMI Unfolded Issue 1 / 2020
Editorial team: Masaaki Kitaguchi, Azusa Minamizaki, Masaharu Tanabashi, Shuichiro Yokoyama
Writers: Kiyotomo Ichiki, Yoshitaka Itow, Yuji Kato, Shingo Kazama, Tatsuhiro Naka, Kazuhiro Nakazawa, Yasusada Nambu, Akira Okumura, Tetsuya Shiromizu, Makoto Tomoto
Design: opportune design Inc.

Missions of KMI／素粒子宇宙分野の未解決問題

The Dark Universe
暗黒宇宙

近年の宇宙マイクロ波背景輻射や大規模構造といった宇宙論的観測の目覚ましい進歩により、宇宙膨張や構造の進化の様子が精密に測定されてきている。その結果、我々の宇宙は現代物理学では定義できない正体不明の「暗黒」に支配されていることが明らかになった。宇宙を加速度的に膨張させる「暗黒」エネルギーが68%、構造の進化を支配する「暗黒」物質が27%というのが最新のPlanck衛星による宇宙マイクロ波背景輻射観測の結果である。原子や分子など我々が理解している構成要素は宇宙のたったの4%に過ぎないのだ。宇宙論のみならず、素粒子物理研究においても、理論・実験によるこの「暗黒」の解明に向けた世界的競争が激しい時代となっている。

Thanks to recent developments in cosmological observation, we have entered an era of precision cosmology. From detailed analyses of the expansion of our universe and the formation of its large-scale structures, our universe appears to be largely “dark.” The latest results from the Planck satellite imply that only 4% of the universe is made out of matter such as atoms, with the remaining components of cosmic structures comprising mysterious substances: 68% dark energy, which is accelerating the expansion of the universe, and 27% dark matter, which induces the formation of cosmic structures. Today, many scientists around the world are working to shed light on this dark side of the universe.

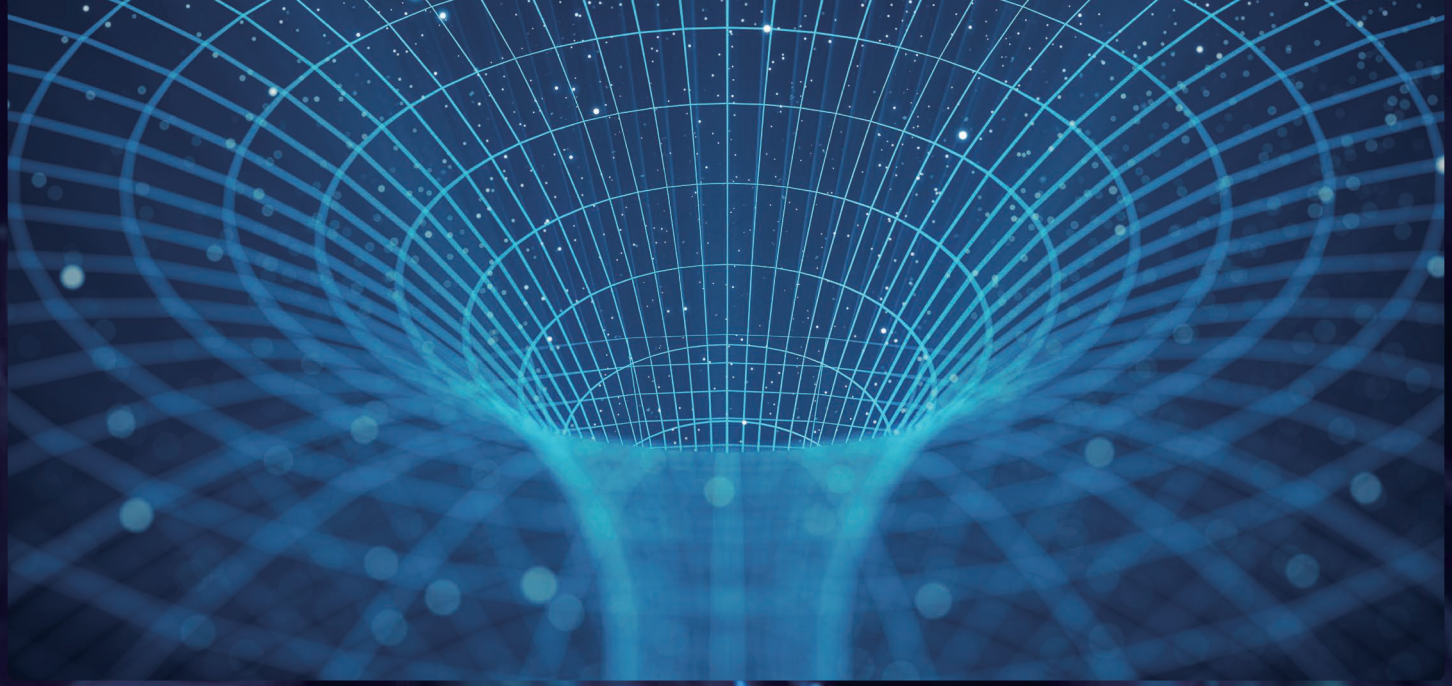
Approaches: Theoretical studies, ATLAS, Belle II, CTA, FERMI, FORCE, Hyper-Kamiokande, MWA, NEWSdm, Super-Kamiokande, XENONnT, XRISM

Missing Antimatter
消えた反物質

宇宙初期、物質・反物質は同数生成されたはずだが、現在の宇宙では反物質はほとんど観測されない。宇宙は膨張とともに冷えていき物質と反物質は対消滅したが、粒子・反粒子の性質の違い、例えば反応や崩壊確率の違いによって物質のみがわずかに生き残ったと考えられている。この粒子・反粒子の性質の違いは「CP対称性の破れ」といい、実験によっても確認されているが、現在見つかっているCP対称性の破れの大きさのみでは、観測される宇宙の物質の量を説明するには小さすぎることもわかっている。大きなCP対称性の破れの探索は標準模型を超える物理理論のよいプローブであり、理論・実験とも世界的に熾烈な競争が繰り広げられている。

Although matter and antimatter should have been produced in equal amounts in the early universe, antimatter is rarely observed today. Physicists suspect that differences in the properties of particles and antiparticles, such as their reactions or decay rates, led to more particles than antiparticles surviving pair annihilations in the early universe. This asymmetry, known as “CP violation,” has been observed, but current measurements cannot explain the number of baryons seen in the cosmological observations of today’s universe. There is fierce global competition in the search for large CP violations, the discovery of which would likely reveal new physics beyond our current understanding.

Approaches: Theoretical studies, ATLAS, Belle II, Hyper-Kamiokande, NOP, Super-Kamiokande, XENONnT



Spacetime

時空の構造

量子力学の不確定性関係によれば「短距離」は「高エネルギー」を意味し、一般相対性理論によれば「高エネルギー」は「時空の曲率」を生み出す。しかし両者を結びつける無矛盾な理論は知られていない。時空の曲率の量子力学的なゆらぎを適切に記述する理論（量子重力理論）が必要とされている。超弦理論はその最有力候補である。超弦理論では、量子重力を記述するのに加え、余剰次元、超対称性、そして、ゲージ相互作用を予言する。しかし、超弦理論が、現在の素粒子標準理論やインフレーション宇宙論、標準宇宙論をどのように内包するか、まだわかっていない。このためには、超弦理論を非摂動的に理解することが必要であり、「ブレーン」とよばれる超弦理論のソリトン解の研究が役立つことが期待されている。

Approaches: Theoretical studies, ATLAS, Belle II, FERMI, NOP, XRISM

The uncertainty principle in quantum mechanics tells us that short distances correspond to high energy. From general relativity, we know that the curvature of spacetime is related to energy. There is a need for a theoretical framework that consistently describes quantum mechanical fluctuations in the curvature of spacetime (quantum gravity). Superstring theory is the leading candidate for the formulation of quantum gravity, that furthermore predicts the existence of extra dimensions, supersymmetry, and gauge interactions among particles. However, it remains a matter of serious debate whether and how the superstring theory can be reduced to the standard model of the particle physics, inflation theory, and standard cosmology. This is partly due to our lack of understanding about the nonperturbative aspects of the theory. Solitonic objects called “branes” may provide clues toward a nonperturbative understanding of superstring theory.

Exploring Black Holes／ブラックホール研究事情

FEATURE

Text by
Kazuhiro Nakazawa
Tetsuya Shiromizu
Yasusada Nambu

Black Holes in Astrophysics

天体としてのブラックホール

ブラックホールは光すら逃がさない暗黒の天体だ。しかし、その強力な重力場で引き寄せられ光の速さ近くにまで加速された星間物質が生む摩擦熱のため、ブラックホールは電波や可視光、X線やガンマ線などあらゆる波長で輝き、ジェットまで噴き出す、莫大なエネルギーの源となっている。天文学者はこれを観測し、ブラックホールに物質が落ちる物理、その成長の歴史、そしてその巨大エネルギーが銀河、銀河団の進化に与える大きな影響を調べている。

Even light cannot escape from black holes. Their strong gravity causes interstellar gas to accumulate and accelerate around them, forming an accretion disk, and frictional forces are generated that produce vast amounts of heat. Black holes are a major energy source in the universe, emitting photons from radio waves to gamma rays, as well as jets and outflows. For this reason, black holes have been an important target in astronomy for decades.

Black Holes in the Laboratory

実験室のブラックホール

ブラックホールはその強重力のため光ですら閉じ込めてしまう事象の地平面を持つが、そこからは量子効果により熱的輻射が放出されることが理論的に予言されている（ホーキング輻射）。実験室でブラックホール地平面の性質を模倣する音速面を持つ量子流体の流れを作り、音速面近傍からのフォノン励起を検出することでホーキング輻射の実験的検証が試みられており、重力と量子力学の関係についてより深い理解が得られると期待されている。

Black holes have an event horizon from which even light cannot escape due to their strong gravity. However, considering quantum effects, black holes are predicted to emit blackbody radiation (Hawking radiation). To clarify this theoretical prediction, there are several ongoing experiments for detecting phonon emissions from the sonic horizon of a transsonic flow in a quantum fluid, which are an analogue to Hawking radiation. Such efforts are expected to provide a deeper understanding of the connection between gravity and quantum mechanics.

Black Holes in String Theory and Mathematics

数理で見るブラックホール

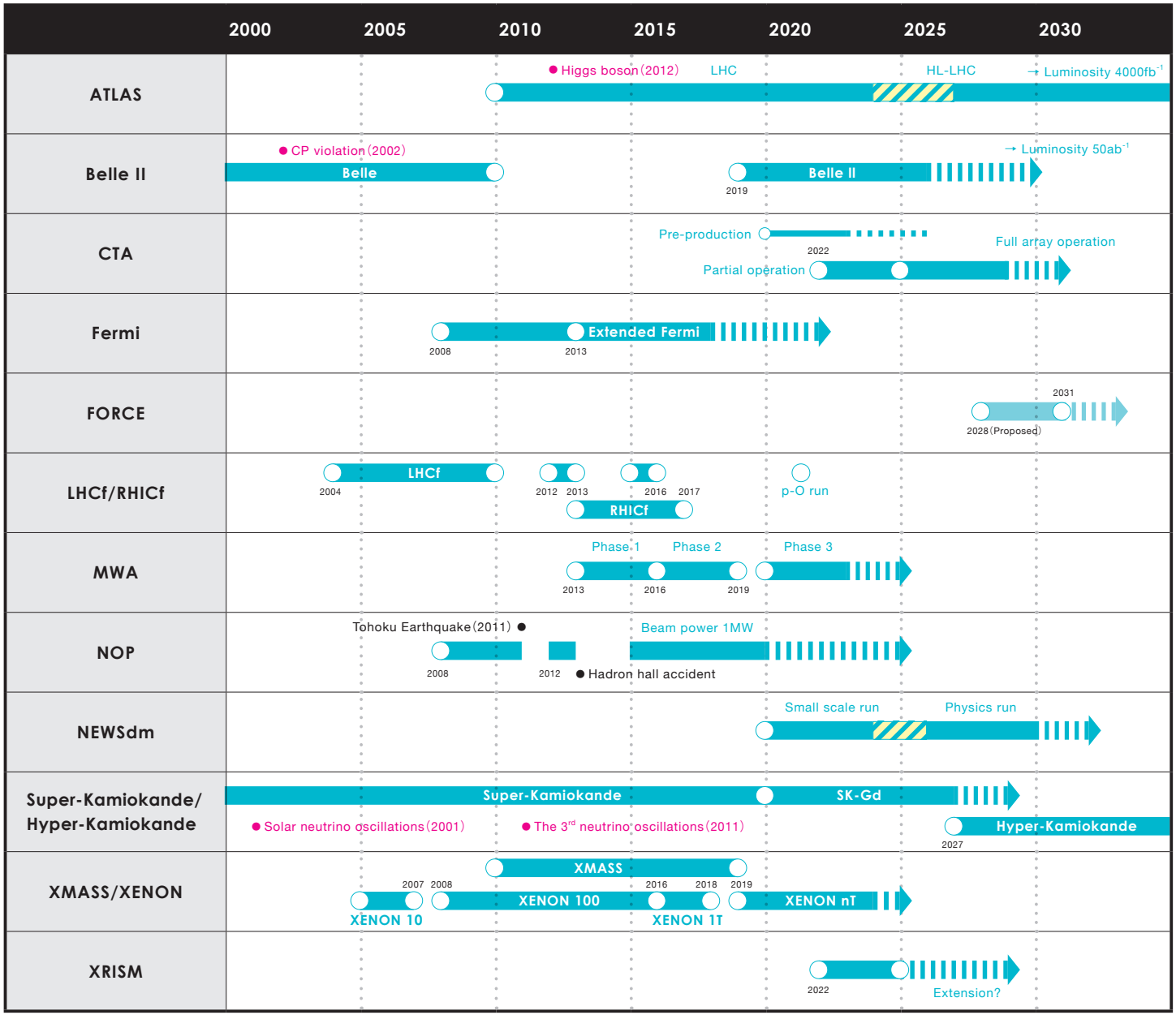
ブラックホールは数学的に厳密に定式化されている。ホーキングによって、太り続けること、その表面が球面であることが証明されている。究極の理論である超弦理論においても高次元ブラックホールは重要な考察対象で、ブラックホールの表面を詳しく調べることにより、高次元重力と物質の理論が等価であることが分かってきた。さらに、高次元時空において様々な形のブラックホールがあることが知られている。これらの数学的構造の理解を通じて、重力と宇宙の真の姿が明らかになるだろう。

The properties and behavior of black holes can be exactly formulated mathematically. Professor Stephen Hawking showed that black holes are constantly growing spheres. Meanwhile, string theory, a proposed theory of everything, shows us the importance of black holes. Indeed, precise investigations of the surface of black holes have revealed the equivalence between higher-dimensional gravity and theories for matter. Furthermore, black holes can have various shapes in higher dimensions. Understanding their mathematical structures will clarify the true nature of gravity and the universe.

Image: the first picture of the shadow of a black hole (M87) captured by the Event Horizon Telescope

KMI Collaboration Projects／参加プロジェクト 一覧

As of February, 2020

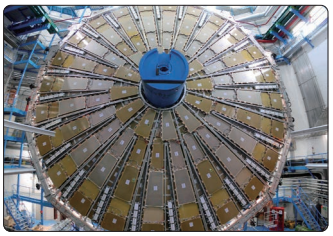


ATLAS experiment

ATLAS実験

ATLAS実験は、欧州CERN研究所にある世界最高エネルギーの陽子陽子衝突型加速器LHCを用いて、未知の素粒子現象を探索しています。名古屋大学は、2012年7月のヒッグス粒子発見を代表とする様々な物理解析、「ミューオントリガー」のエレクトロニクスやソフトウェアの開発・建設・運転など、様々な側面で主導的な役割を担っています。

The ATLAS experiment aims to discover new physics beyond the standard model of particle physics, using the world's largest and most powerful energy frontier collider, the Large Hadron Collider at CERN (European Organization for Nuclear Research). The KMI Nagoya University team contributes to not only searching for new physics, but also developing, constructing, and operating the electronics and software of the "muon trigger system".



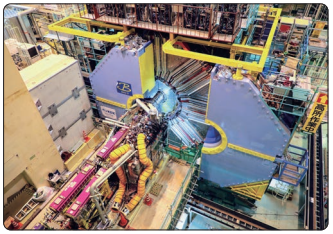
Belle II experiment

Belle II 実験

Belle II 実験は、高エネルギー加速器研究機構のSuperKEKB加速器で生成される膨大な素粒子反応から未知の現象・粒子を探索する国際共同プロジェクトです。名古屋大グループは、新型粒子検出器「TOPカウンター」の独自開発と建設・運転、膨大なデータを処理するための「分散コンピューティング」の開発・運用、新現象発見に向けたデータ解析など、プロジェクトにおける主導的な役割を担っています。

The Belle II experiment aims to discover new phenomena and particles derived from huge numbers of collision of electrons and positrons. The KMI Nagoya University group is leading the project, including constructing a new particle identification detector called "TOP counter", operating distributed computing facilities, and performing data analysis for discovering new phenomena.

KEK



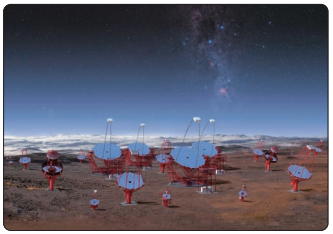
Cherenkov Telescope Array（CTA）

チェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA）

宇宙の高エネルギー天体が発する光（電磁波）のうち、最もエネルギーの高いものがガンマ線です。チェレンコフ望遠鏡アレイでは20 GeV～300 TeVのエネルギーのガンマ線を、地上に並べた約100台の望遠鏡で検出し、超新星残骸やブラックホールなどの高エネルギー天体の観測、また謎多き暗黒物質の間接探査を行う計画です。

Celestial gamma rays are the highest-energy photons emitted by high-energy objects. The CTA project will detect gamma rays with energies of 20 GeV - 300 TeV using approximately 100 telescopes. It will observe high-energy objects such as supernova remnants and black holes, and indirectly search for dark matter.

CTAO/M-A. Besel/IAC (G.P. Diaz)/ESO



Fermi gamma-ray space telescope

Fermi 衛星

Fermi衛星は、アメリカが欧州と協力して開発し、2008年に打ち上げられたGeVガンマ線観測衛星で、日本も検出器開発に参加しています。宇宙における粒子加速そのものや、宇宙線が分子雲と相互作用する様子を探査する優れた能力をもっています。またX線からMeVガンマ線帯域でガンマ線バーストを検出する機能も合わせもちます。

Fermi is a GeV gamma-ray space telescope launched in 2008 by the United States in collaboration with Europe and Japan. It is one of the deepest probes for observing particle acceleration and cosmic ray–matter interactions in the universe. It also hosts a gamma-ray burst monitor.

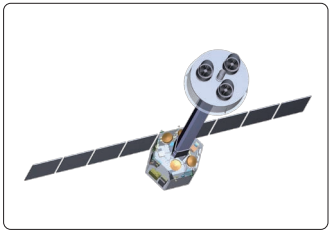
NASA

FORCE satellite

FORCE衛星

FORCE衛星は、日本を中心にアメリカと連携して計画している次世代の衛星で、1-80 keVまでの広い帯域を、特に10 keV以上ではこれまでより1桁高い感度で観測する衛星で、2020年代末の打ち上げを目指しています。強い吸収を受けた天体や熱的放射に隠された高エネルギー現象などを探査する能力に優れ、急成長する巨大ブラックホールの観測などに威力を発揮します。

FORCE is a future X-ray observatory planned to cover a wide energy band of 1–80 keV, with a proposed launch in the late 2020s. Its high sensitivity in the 10–80 keV band means that it will unveil deeply obscured targets, such as rapidly growing black holes.



LHCf / RHICf experiments

LHCf/RHICf

LHCf実験では、CERNの加速器LHCで超前方粒子を測定し超高エネルギー宇宙線が起こす相互作用を研究しています。KMIは中核機関として実験を立ち上げました。2017年には理研と協力し米国ブルックヘブン国立研究所のRHIC加速器にも同検出器を設置したRHICf実験を行っています。2021年には再びLHCでの測定を控え、陽子―酸素原子核衝突での測定も計画中です。

The LHCf experiment measured very forward particle productions using dedicated compact detectors installed in the LHC to study hadronic interactions of very high-energy cosmic rays. KMI is a host institute of the experiment. In 2017, a similar experiment, RHICf, was performed at the RHIC in collaboration with RIKEN. In 2021, new measurement with the LHC is projected, and a future proton–oxygen run is planned as well.

Murchison Widefield Array（MWA）

マーチソン広視野電波干渉計（MWA）

MWAは西オーストラリアのマーチソン電波観測所の80MHz-300MHzという低周波帯域で観測する電波望遠鏡です。名古屋大学・熊本大学を中心とした研究グループでは、この水素ガスの分布とLAEと呼ばれる銀河との相互相関をとることにより、世界で最初の宇宙再電離期からのシグナルの検出を目指しています。

The MWA is a low-frequency radio telescope in Western Australia that aims to be the first to detect a signal from the Epoch of Reionization. It consists of thousands of spider-like antennas arranged in regular grids called “tiles” spread over several kilometers within the Murchison Radio-Astronomy Observatory.

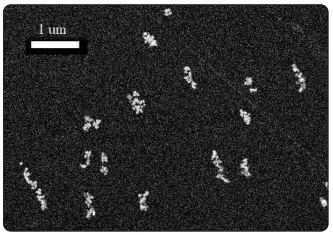
MWA Coll. & Curtin Univ.

Nuclear Emulsion WIMP Search – directional measurement（NEWSdm）

原子核乾板を用いた方向感度を持つ暗黒物質探索実験（NEWSdm）

NEWSdmプロジェクトは、独自開発した超高分解能原子核乾板（Nano Imaging Tracker: NIT）によるナノスケールの飛跡として暗黒物質の信号を検出することを目指した方向感度を持つ暗黒物質探索実験であり、暗黒物質の直接的な性質解明を目指したプロジェクトです。現在、日本（名古屋大学、東邦大学 他）、イタリア、ロシア等による国際共同実験として研究開発を進めています。

The NEWSdm project searches for directional dark matter using a very high-resolution nuclear emulsion (Nano Imaging Tracker) that was originally developed at Nagoya University. The project aims to directly understand the properties of dark matter by detecting nano-scale track information. This project is an ongoing international collaboration between Japan (Nagoya University and Toho University), Italy, Russia, etc.

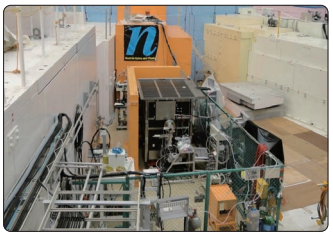


Neutron Optics and Physics（NOP）

中性子光学基礎物理実験

低速中性子を用いて様々な素粒子原子核実験を行います。中性子崩壊を通じた標準模型の検証、電気双極子能率や核反応に現れる対称性の破れの探索、余剰次元・ダークエネルギーの探索など多岐に渡ります。世界最強輝度のパルス中性子源J-PARCや、国内外の加速器・研究用原子炉を利用しています。

This project uses slow neutrons to investigate various topics in physics, for example, precision measurement of beta decay and nuclear reactions, and the search for the electric dipole moment, extra dimensions, and dark energy. Experiments are performed worldwide, including the world's most intense pulsed neutron source at J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex).



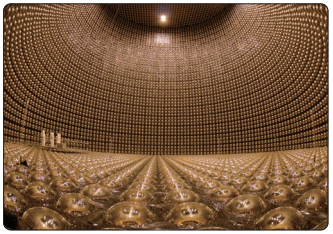
Super-Kamiokande / Hyper-Kamiokande

スーパーカミオカンデ/ハイパーカミオカンデ

神岡地下1000mの5万トン水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデで、ニュートリノ研究と陽子崩壊の探索を行っています。2020年からは、ガドリニウムを水に添加し過去の超新星ニュートリノ観測に挑むSK-Gd計画や、スーパーカミオカンデの8倍の有効体積のハイパーカミオカンデの建設が始まります。KMIは大気ニュートリノ振動の精密研究や暗黒物質からのニュートリノ探索を行っています。

Super-Kamiokande (SK), a 50,000ton water Cherenkov detector located 1000 m underground in Kamioka, Japan, studies neutrinos and searches for proton decay. From 2020, the SK-Gd project with the Gadolinium-loaded water begins to observe neutrinos from supernova bursts. Construction of Hyper-Kamiokande, which has 8 times larger fiducial mass than SK also starts in 2020. KMI has conducted precise neutrino oscillation studies and is searching for neutrinos from dark matter.

Kamioka Observatory, ICRR



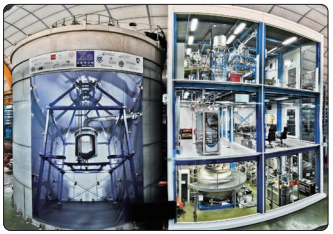
XENONnT experiment

XENONnT実験

XENONnT実験は、世界最大約8トンの液体キセノンを用いた暗黒物質探索実験で、2020年の観測開始に向けて現在建設が進められています。名古屋大学の研究チームは、暗黒物質発見の鍵を握る中性子除去検出器の開発やデータ解析に貢献を行うとともに、将来の暗黒物質探索に向けた新しい光センサーや検出器の開発なども行っています。

XENONnT is a dark matter direct detection experiment that uses approximately 8 tons of liquid xenon as a target medium. The KMI Nagoya University group is contributing to the development of a neutron veto detector, data analysis, and Monte Carlo simulation. We are also developing new photodetectors and time projection chambers for future experiments.

Roberto Corrieri and Patrick De Perio



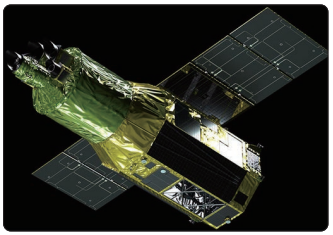
XRISM satellite

XRISM衛星

XRISM衛星は、JAXAがNASAと連携し、国内外の大学研究機関と参加している宇宙X線観測衛星で、2022年ごろ打ち上げ予定です。過去の衛星より桁違いに優れたX線分光ができ、原子からの輝線を高精度で捉えて、宇宙プラズマの詳細な電離状態や、ドップラー効果を用いた速度測定に桁違いの精度をもたらし、宇宙物理に革新をもたらします。

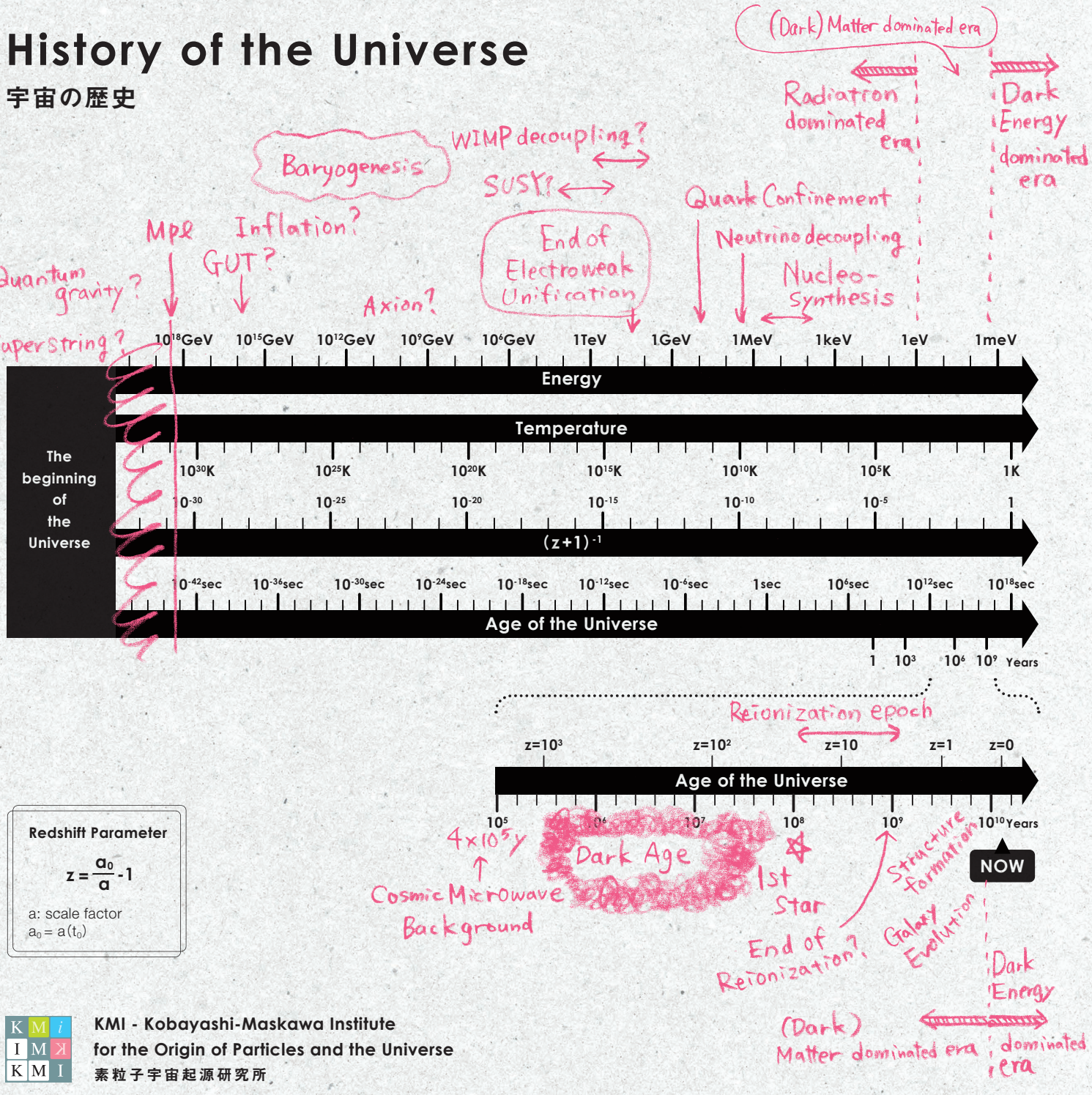
XRISM is a near-future X-ray observatory led by JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), NASA (National Aeronautics and Space Administration), and other institutions located in Japan and around the world. Its energy resolution is an order of magnitude better than that of existing observatories, and is therefore expected to unveil a new field of atomic and velocity-field structures of high-energy objects in the universe.

ISAS/JAXA



History of the Universe

宇宙の歴史



Redshift Parameter

$$z = \frac{a_0}{a} - 1$$

a: scale factor

$a_0 = a(t_0)$

KMI - Kobayashi-Maskawa Institute
for the Origin of Particles and the Universe
素粒子宇宙起源研究所