

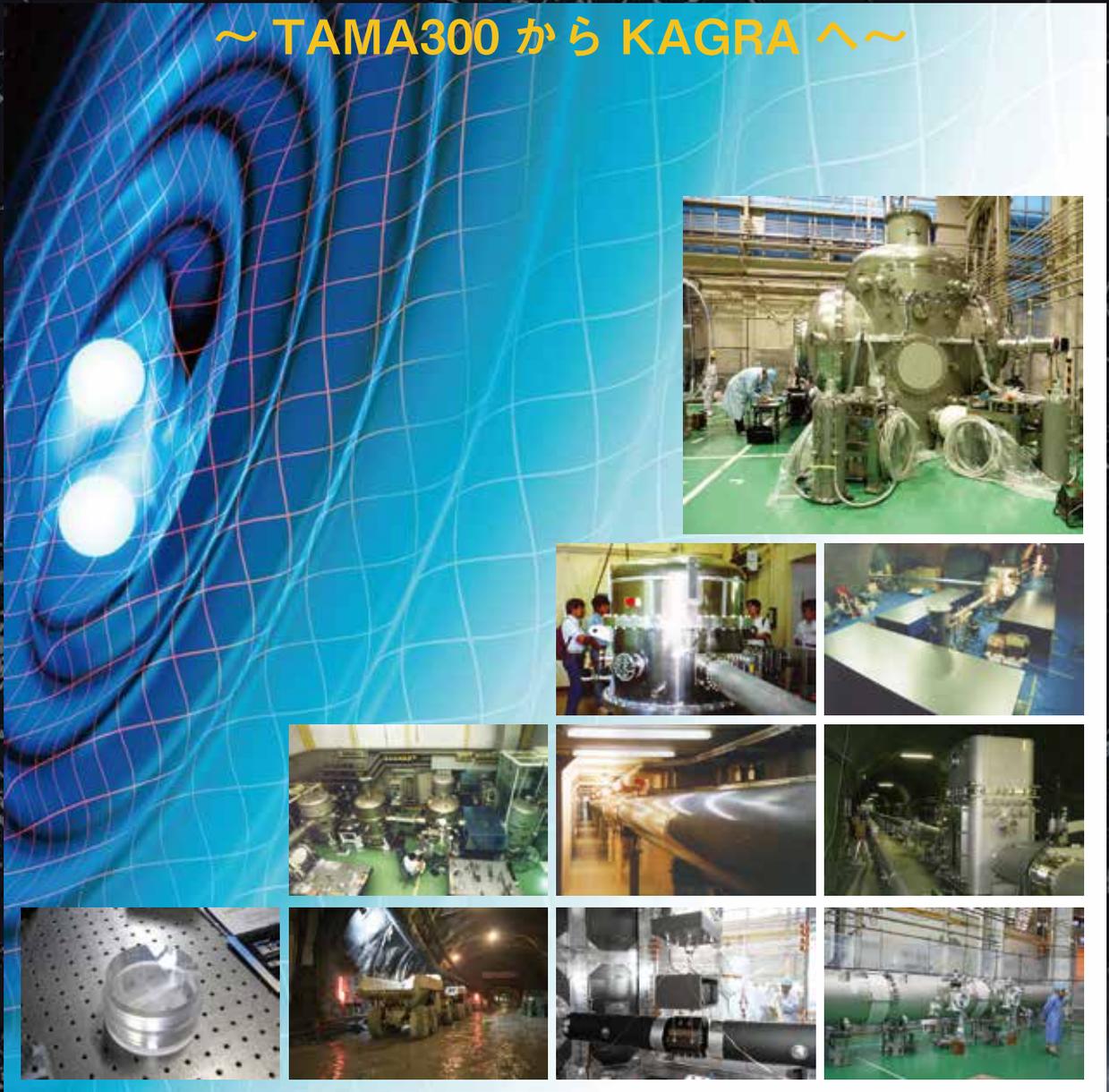
国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2014年2月1日 No.247

特集 重力波天文学が拓く宇宙

～ TAMA300 から KAGRA ～



- ★ I. 重力波天文学への招待 / II. 重力波天文学の原理と観測法 / III. 重力波天文学の観測対象 / IV. 重力波望遠鏡① 20m干渉計とLISM / V. 重力波望遠鏡② TAMA300 / VI. 重力波望遠鏡③ CLIO干渉計 / VII. 重力波望遠鏡④ KAGRA / VIII. 重力波望遠鏡の未来 / 重力波天文学が拓く宇宙

2

2014

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03

特集 重力波天文学が拓く宇宙

～TAMA300 から KAGRAへ～

I. 重力波天文学への招待

II. 重力波天文学の原理と観測法

III. 重力波天文学の観測対象

重力波によるサイエンス

- ①連星中性子星合体のマルチメッセンジャー観測
- ②KAGRAマルチメッセンジャー観測網でダイナミックな宇宙を捉える
- ③重力波で初期宇宙を探る：宇宙重力波背景放射の検出

IV. 重力波望遠鏡① 20m干渉計とLISM

V. 重力波望遠鏡② TAMA300

★TAMA300フォトギャラリー

★CLIOフォトギャラリー

VI. 重力波望遠鏡③ CLIO干渉計

★KAGRAフォトギャラリー

VII. 重力波望遠鏡④ KAGRA

KAGRAの概要

- ①KAGRAのトンネル建設
- ②KAGRAの防振装置
防振系の開発に挑むグローバルなスタッフ
- ③真空と冷却「熱雑音の低減」
- ④真空と冷却「観測天文学の共通技術とその違い」
- ⑤鏡とその評価
- ⑥KAGRAの補助光学系
- ⑦重力波測定器における量子雑音と量子測定理論
- ⑧KAGRAデータ解析スクール継続！！

VIII. 重力波望遠鏡の未来

重力波天文学が拓く宇宙

33

34

35

受賞 中村康二さんが

“Classical and Quantum Gravity”誌で優秀賞受賞

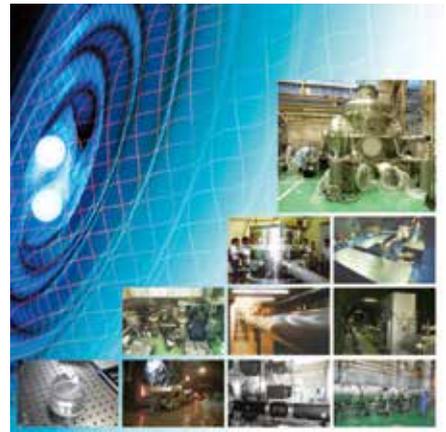
人事異動

- 編集後記
- 次号予告

36

シリーズ 国立天文台アーカイブ・カタログ23

大森式地震計 —— 田村良明（水沢VLBI観測所）



表紙画像

中性子星連星が重力波を発生させながら合体に向かうイメージイラスト（イラスト：KAGAYA）とさまざまな日本の重力波望遠鏡。

背景星図（千葉市立郷土博物館）

渦巻銀河M81画像（すばる望遠鏡）



TAMA300の真空パイプ（詳しくは16ページ）と（上）、初期の重力波検出器「20m干渉計（後のLISM）」に使われた真空パイプ（神岡・CLIO施設内／詳しくは15ページ）（下）。

国立天文台カレンダー

2014年1月

- 7日（火）台長新年挨拶／運営会議
- 10日（金）幹事会議／4次元シアター公開／観望会
- 20日（月）研究計画委員会
- 23日（木）安全衛生委員会
- 25日（土）4次元シアター公開／観望会
- 31日（金）幹事会議

2014年2月

- 14日（金）幹事会議／太陽天体プラズマ専門委員会／4次元シアター公開／観望会
- 21日（金）天文情報専門委員会
- 22日（土）4次元シアター公開／観望会
- 26日（水）幹事会議
- 27日（木）安全衛生委員会

2014年3月

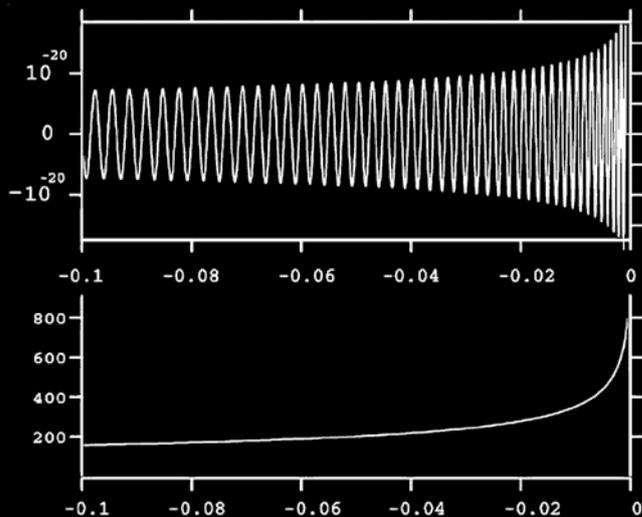
- 4日（火）運営会議
- 6日（木）教授会議
- 10日（月）研究交流委員会
- 14日（金）4次元シアター公開／観望会
- 18日（火）幹事会議
- 22日（土）4次元シアター公開／観望会
- 27日（木）安全衛生委員会
- 28日（金）退職者永年勤続表彰式／幹事会議

重力波天文学

特集

が拓く宇宙

～ TAMA300 から KAGRA へ～



——こうしてすわっていると、まるで、星の世界の声を聞こうとしている大きな大きな耳たぶの底にいるようです。そして、ひそやかな、けれどもとても壮大な、えもいわれず心にしみいる音楽が聞こえてくるように思えるのです。

(ミヒャエル・エンデ『モモ』／岩波書店刊・大島かおり訳)

いま、新しい天文学の扉が開かれようとしています。それが「重力波天文学」です。光や電波、X線やガンマ線など、さまざまな電磁波を観測する従来の天文学とは一線を画して、いまだに捉えられていない重力波を観測することで、未知の天体现象の解明に挑むチャレンジングな研究分野です。この特集では、重力波天文学の全貌とその魅力を紹介します。

● 協力
重力波プロジェクト推進室
東京大学宇宙線研究所
高エネルギー加速器研究機構
KAGRA collaboration

● 取材協力
(株) 東芝
(株) 鹿島建設

● タイトルイラスト
KAGAYA

まず最初に、重力波天文学の歴史的経緯とその大まかな全体像、そして現在建設が進む日本の重力波望遠鏡「KAGRA（かぐら）」の概要を、国立天文台重力波プロジェクト推進室のRaffaele Flaminio教授に紹介していただきます。

Invitation to gravitational wave astronomy

Raffaele Flaminio (TAMA Project Office · Project Professor)



In 1916 Albert Einstein proposed his theory of General Relativity which revolutionized our understanding of space and time. According to this theory, the same used every day to run GPS, space and time are stretchable and can be deformed as an elastic medium by mass and energy. Among the surprising consequences of General Relativity is the existence of gravitational waves, deformations of space and time generated by accelerating masses and propagating at the speed of light.

For more than 40 years after Einstein's prediction, physicists had been doubtful about the possibility of detecting gravitational waves. But in the late Fifties several physicists arrived at the conclusion that gravitational waves should interact with matter thus be detectable. The definitive (albeit indirect) proof of their existence came in the Seventies when two American astronomers discovered a binary system composed of two neutron stars orbiting around one another with a period of only 8 hours. They found that the binary was losing energy at a rate consistent with the emission of gravitational waves, in perfect agreement with Einstein's prediction.

Many astrophysical phenomena can produce gravitational waves. The explosion of a star at the end of its life; the merger of two stars falling onto each other; the oscillation of a newly born black hole and even the primordial explosion that gave birth to the Universe are examples of phenomena that can produce gravitational waves. Their detection will open a new window to the Universe and allow the observation of phenomena which have been undetectable so far.

Indeed, gravitational waves can pass through matter as if it was transparent. As a consequence,

1916年にアルバート・アインシュタイン博士が提唱した一般相対性理論は、時間と空間に対するそれまでの考え方を大きく変えました。ふだんの生活に欠かせないGPS（全地球測位システム）でも使われるこの理論によると、時間と空間はゴムのように伸びたり縮んだりする性質があり、質量やエネルギーがあるところではゆがみます。一般相対性理論の数々の驚くべき帰結のひとつに重力波があります。重力波は加速運動をしている質量から生まれ、光と同じ速さで伝わる時空のゆがみです。

アインシュタイン博士が一般相対性理論を提唱してから40年余り、物理学者たちは重力波が検出できるかもしれない、などとは思っていませんでした。しかし、1950年代後半に何人かの物理学者が、重力波は物質と相互作用をするはずなので、捉えることができると主張しました。そして、間接的にはありますが、重力波が存在するという決定的な証拠が、1970年代に発見されました。ふたりのアメリカの天文学者が、わずか8時間でお互いの周りをまわっている2つの中性子星からなる連星を見つけたのです。彼らは、連星の軌道エネルギーの減りぐあいから、それが重力波の放射によって失われていると考え、アインシュタイン博士の予測と見事に一致することを示しました。

重力波は、さまざまな天体現象から発生します。星の生涯最期の大爆発、2つの星がお互いに近づいていて合体する瞬間、生まれたばかりのブラックホールの振動、そしてこの宇宙開闢の瞬間の大爆発…。これらの天体現象から届く重力波を捉えることで、宇宙を見るための新たな窓が開かれ、これまで思いもよらなかった現象も見つけることができるかもしれません。

重力波と物質の相互作用はとても小さいので、重力波の行く手に物質があっても、ほとんど何もなかったかのように通り抜けてしまいます。このため、重力波

their detection will allow observations of regions of the Universe that are inaccessible with other types of telescopes. These observations will not only provide new and unique information about the Universe and some of its more mysterious components. It will also allow extending our understanding of gravity and of the behavior of space-time in conditions that we cannot reproduce on Earth nor find in the Solar System.

For all these reasons physicists and astronomers are developing a new class of gravitational wave detectors. These new detectors use ultra-stable lasers to monitor the distance between test masses placed several km apart with unprecedented precision. Variations in the distance between the test masses that are ten billions times smaller than the size of an atom will be measurable, thus allowing the detection of gravitational waves such as those emitted by black holes as far as several billion light-years.

In Japan we are building KAGRA, a gravitational wave detector that will be located at Kamioka in Gifu Prefecture. KAGRA has unique features such as being the first km-scale detector located underground and using test masses cooled down to cryogenic temperatures. The use of these solutions will reduce the disturbances due to natural seismic noise and residual thermal vibrations and will make KAGRA the most advanced detector in the world.

The gravitational wave group of the National Astronomical Observatory of Japan is one of the leading teams of the KAGRA project. In the Nineties the group developed the TAMA detector, a precursor of KAGRA, which was the most sensitive instrument at that time. Strengthened by this experience the NAOJ team is contributing to the KAGRA detector in the fields of vibration isolation and optics.

KAGRA is not alone; similar detectors are being developed in the US (Advanced LIGO project) and in Europe (Advanced Virgo project). The Earth being transparent to gravitational waves, the same signals should be visible in all detectors on Earth at the same time. For this reason KAGRA, LIGO and Virgo will join forces to perform the first direct detection of gravitational waves and, a hundred years after Einstein's prediction, will open the field of gravitational wave astronomy.

をつかうことで、他の観測手段では物質に邪魔されて見ることのできない場所——銀河や星の中心付近、ブラックホール近傍、ビッグバン直後の宇宙など——を直接調べることができるようになります。重力波の観測によって、宇宙と、その隠された部分の情報を得ることができるようになるばかりでなく、地上や、太陽系では調べることができない極限状態での重力や時空のふるまいを確かめることができるようになります。

このような理由で、物理学者や天文学者は新しい重力波の検出器を開発しています。これらの新しい検出器では、超高安定なレーザーをつかって、数kmも隔てて置いた鏡 (test mass) の間の距離を、とてつもない精度で測定します。鏡の間の距離は、実に原子の大きさの100億分の1ほどの精度でその変化を測ることができるので、数十億光年離れたブラックホールからの重力波をも検出できるでしょう。

日本では、現在、岐阜県神岡町に重力波望遠鏡KAGRA (かぐら) の建設が進められています。KAGRAはkmクラスの検出器では初めて地下に設置され、また冷却した鏡を利用するという特徴があります。この2つは、地面の常微振動と鏡の熱振動という検出器の本質的な雑音を低減するための工夫であり、これらの対策を施すことで、KAGRAは重力波望遠鏡として世界最先端の性能を誇る装置になるでしょう。

国立天文台の重力波プロジェクト推進室は、KAGRA推進の礎となる主要三機関 (東京大学宇宙線研究所ICRR、国立天文台NAOJ、高エネルギー加速器研究機構 KEK) の一つとして、KAGRAプロジェクトを推進しています。当推進室では、1990年代に、国立天文台三鷹キャンパスにおいてKAGRAの前身となる基線長300mの重力波望遠鏡TAMA (たま) 300を建設し、当時の世界最高感度を達成しています。この経験を活かして、当推進室では、技術的には主に防振系と光学系の開発を分担し、KAGRAプロジェクトの推進に貢献しています。

KAGRAは、唯一の存在ではありません。同じ規模の望遠鏡がアメリカ (Advanced LIGO project) とヨーロッパ (Advanced Virgo project) で建設されています。重力波は地球を簡単に通り抜けてしまうので、地上の全ての検出器で、同じ天体からの信号をほぼ同時に見つけることができるはずですが、KAGRA、LIGO、Virgoは、力を合わせて重力波の初検出を成し遂げ、アインシュタイン博士の予言から百年後、重力波天文学という新たな分野を創成することでしょう。

重力波は、今まで天文学の観測に利用されてきた電磁波とは、物理的にまったく異なる「波動」です。ここでは、重力波の特徴とそれを捉えるための観測方法を中心に、重力波天文学を理解するための基本事項を解説します。

重力波天文学とは？

大石奈緒子(東京大学宇宙線研究所/国立天文台重力波プロジェクト推進室)



●重力波望遠鏡で宇宙を見る

望遠鏡がはじめて天体に向けられたのは約400年前のことになります。望遠鏡を使うことで、目では直接捉えることのできない宇宙のさまざまな姿、より遠くて暗い天体や、天体の細かい部分を観察することができるようになりました。その後、目には見えないX線や赤外線、電波などの電磁波で宇宙を調べる望遠鏡が作られ、新しい観測機器ができるたびに、宇宙に関する新しい知見が得られてきました。重力波の望遠鏡は、これらの電磁波の望遠鏡とはまた違った方法で、目には見えない宇宙の姿を映し出す観測装置であり、宇宙を見るための新しい窓を開こうとしています。

●重力波とはなにか

およそ100年前にアインシュタインが考案した一般相対性理論では、重力を時空の伸縮(ゆがみ)として扱います。

一般相対性理論(★01)は、宇宙で起こるさまざまな現象、水星の近日点移動や重力赤方偏移、重力レンズ、重力の強いところでの時間遅れ、膨張宇宙などを予測するので、実際の観測や実験によって、この理論に基づく予測の正しさが確かめられてきました。これらの検証実験の中で、いまだ実現していない課題として、重力波の検出が挙げられます。

質量が周囲に、図01のような重力場(=時空のゆがみ)をつくっていると、質量が動くことで、周りの時空のゆがみが、星の動きに連れて変化していきます。この変化が、光の速度で周囲に伝播する現象を「重力波」とよびます。電磁波との比較では、電荷が動くとき電磁波が放射されるように、質量が動くことで、重力波が放射されます。

●重力波の性質

重力波の振幅は、波源となる質

★01 一般相対性理論

身近なところでは、GPSを利用したカーナビゲーションシステムでも、一般相対性理論に基づいた位置計算が行われています。

量が重いほど、速く動くほど、大きくなるという性質があります。原理的には、私たちが動くことでも重力波は放射されます。しかし、その振幅は小さすぎて、現在作られている観測装置では感度が足りず、検出することができません。現在の技術でも捉えることができそうな重力波は、その波源を天体(たとえば太陽の質量は約 2×10^{30} kg)に求めるしかなく、その場合でも、重力波は、太陽と地球の間の距離を水素原子1個分ほど変化させるだけだと予想されています。

これほど微弱な重力波ですが、中性子星連星PSR 1913+16の公転周期の観測から、その存在が間接的に証明されています。中性子星がお互いの周りを回ると、重力波が放出されるため、徐々にエネルギーを失って、公転周期が短くなっていきます。この重力波の放射による公転周期の変化の予想値と、電波で観測した公転周期の変化がよく一致していたので、重力波の存在は間接的には証明されたと考えられています。この連星軌道の観測は、1974年から、アレシボの電波望遠鏡を使って行われ、

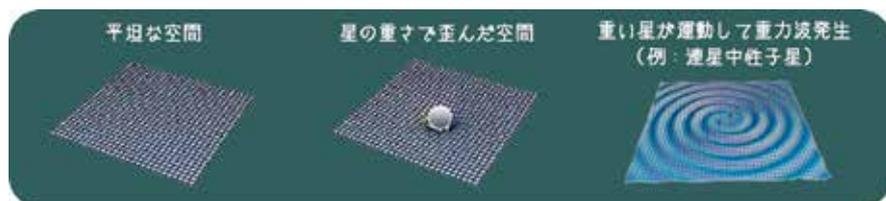


図01 一般相対性理論では、重力は時空のゆがみとして表されます。左の、何も無い場合には平坦な時空が、真中の図のように質量が存在することでゆがみ、重力が生じます。右図のように質量が運動をしていると、その動きにつれて周囲の時空のゆがみも変化し、光速で遠方へ伝わっていきます。それが重力波です(図提供:三代木伸二)。

テイラーとハルスは連星中性子星発見の功績により、1993年にノーベル賞を受賞しています。

しかし、この観測によって重力波の存在は確かめられても、その性質を詳しく調べるためには、やはり直接検出が必要になります。

●測定原理

重力波が来ると、人間には感じ取れないほどかすかに、空間が伸縮します。微弱な重力波が来たことを、私たちが知るためには、何らかの補助手段が必要です。重力波を捉えるために、これまで、大きく分けて2種類の観測装置が作られてきました。ひとつは、共振器型、もうひとつはレーザー干渉計型、とよばれるものです。TAMA300 (16ページ) や KAGRA (21ページ) は後者ですが、歴史的には、共振器型の検出器が先に作られ、現在でも使われています。

共振器というのは、要するに金属のかたまりで、楽器のように固有の音を持っています。鉄琴をたたくと澄んだ音が響くように、重力波が来ると共振器を弾いて、固有の音をたてていきます。現実には、この音は、直接耳で聴くには小さすぎるので、共振器の表面の動きを、光を使って測ります。ずっと表面の動きを見ていると、あるとき僅かに揺れるので、重力波が来たことがわかります。

レーザー干渉計型の検出器では、基本的には鏡を2枚、できるだけ動かないように工夫して置いておき、その間の長さを、レーザーを使って測ります。重力波が来ると、2つの鏡の間の長さが伸縮するので、重力波が来たことがわかります。一般的なことです。絶対長を測定するより、長さの差を測る方が、測定精度を良くすることができますので、現実の重力波の望遠

鏡では、2つの鏡を直線に並べるのではなく、直交する2つの光路の先に鏡を置いて、ひとつのレーザー光をいったん二つに分け、再び重ねることによってBS (ビームスプリッター) から2つの鏡までの長さの差を測ります (マイケルソン型干渉計・図02)。重力波が来た時に、BS から2つの鏡までの長さに差が出ると、それが検出器上の光の明るさの変化 (干渉縞の明暗の変化) となって現れるので、重力波が来たことがわかります。実際には雑音を下げたり感度を上げたりするために、まずレーザービームが通るパイプの中を高真空にして大気による悪影響を極力取り除いた上で、多くの複雑な技術が用いられますが、原理的には、2つの鏡の間の長さを、レーザーの波長という、たいへん正確な「ものさし」でずっと測っているだけです。レーザー干渉計型重力波望遠鏡の基本的な構造はTAMA300の解説 (16・17ページ) をご参照ください。

共振器、干渉計、いずれの場合でも、重力波が来たことを確かめるためには、重力波以外の原因で

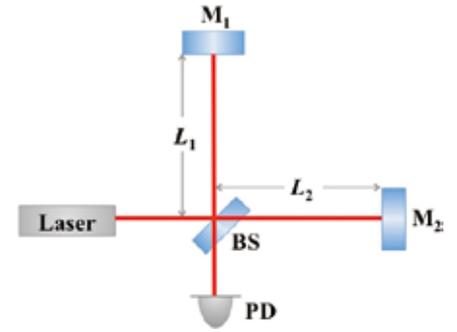


図02 マイケルソン干渉計。BSから2つの鏡M₁、M₂までの長さL₁、L₂の差 δL が変化すると、PD上の明るさが変化します。

共振器や鏡が動かないように細心の注意を払いつつ、観測を続ける必要があります。

●干渉計型重力波望遠鏡の目標感度と雑音源

これまでの長い検出器開発の歴史の中で、重力波以外に鏡の間の長さを変えてしまう原因も詳しく調べられてきて、地上の干渉計型重力波望遠鏡の場合には、およそ図03のようになっています。横軸は鏡の動きの早さ、つまり周波数 (1秒間の振動数) を表します。

地上の重力波望遠鏡の観測帯域は数十Hzから数十kHzで (かこみ①を参照)、人間の耳に聞こえる音の範囲とほぼ一致しています。

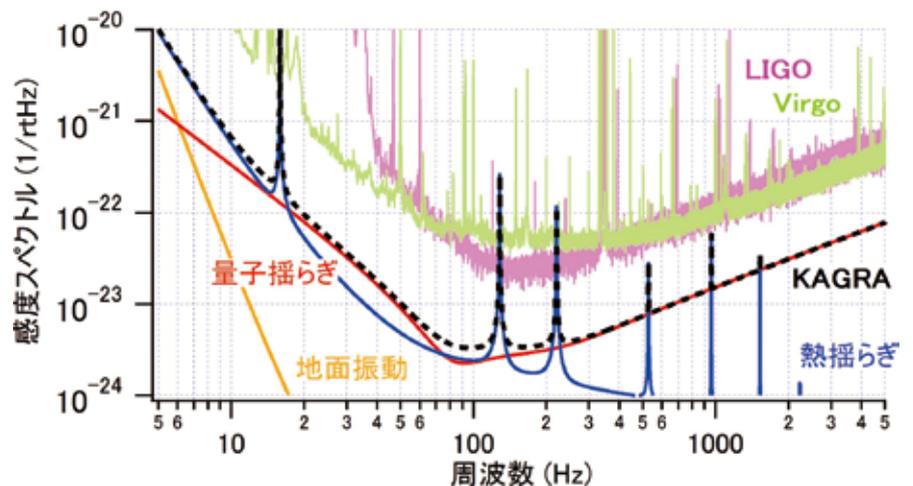


図03 KAGRAの目標感度 (点線) とそれを制限する雑音源 (実線) を、横軸を周波数にして示します。縦軸の値が小さいほど、感度が良いことを示しています。LIGOやVirgoは、現在改良中の欧米の重力波望遠鏡で、数年後に、advLIGO、advVirgoとしてKAGRAと同程度の感度を実現します。advLIGO、advVirgoそしてKAGRAが目標の感度を達成すれば、これまで、100年に一度と言われていた検出確率が1年に10回ほどとなり、重力波の初検出も、もはや手の届くところまで来ているといえます。

ですから、天体から来る重力波の信号を地上の干渉計で受けた場合の計算結果は、音として聞くことができます。また、重力波の信号以外に鏡を揺らす原因を、雑音と呼びますが、これも耳で聞くことができます(図06)。この雑音をいかに低減するかが、レーザー干渉計型重力波望遠鏡の性能向上の鍵を握ることになります。

重力波望遠鏡の原理的な雑音は、周波数の低い方から挙げると、「地面振動」「輻射圧雑音」「熱雑音」「散射雑音」が主な雑音源となっています(図03・輻射圧雑音と散射雑音は、まとめて図の量子揺らぎで示されています)。

「地面振動」というとすぐに思いつくのは地震ですが、近くを車が通ると地面が揺れる、といったことも含まれます。重力波望遠鏡では、地面の揺れの影響を減らすために、もともと揺れの少ないところへ望遠鏡を持っていくことと、

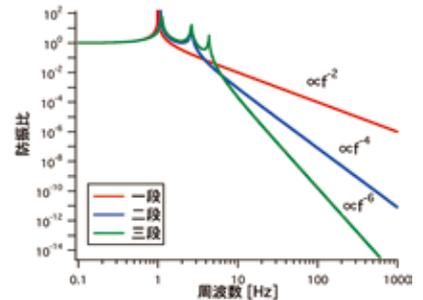
②防振系に利用される振り子のメカニズム

●防振系は、原理的には振り子を利用して作られています。図04のように吊られた鏡は、支点のゆっくりした動きには追従しますが、共振周波数付近で大きく揺れ、それ以上の周波数では、周波数の2乗に反比例 $\propto f^{-2}$ して動かなくなります。振り子を2段重ねれば f^{-4} 、3段にすれば f^{-6} と、防振比(おもりの動き/吊り元の動き)を小さくできます(図05)。共振周波数は振り子の長さを伸ばすことで低くすることができますが、約25cmで1Hz(1秒周期)になります。KAGRAの防振系では、地面振動で鏡が揺らされてしまわないように、振り子の共振周波数を下げたり、共振で強く揺れることを抑え(ダンプ)たり、振り子を何段も重ねたりする工夫が施されています(26ページ参照)。



図04 鏡を吊りし、振り子の原理を利用して地面振動を防ぎます。

図05 振り子の段数と周波数-防振比の関係を示します。振り子の共振周波数より高い周波数では、段数を増やすことで防振比が小さくなり、鏡に地面振動が伝わりにくくなるのがわかります。



鏡を吊って揺れを防ぐ(防振系)工夫をすること、の2つの対策が主に取られます。KAGRAは、地面振動の小さな神岡(岐阜県)の地下に置かれます(21ページ)。防振系は、KAGRAの置かれる静かな地下環境を最大限に活用するために、たいへん重要な装置であり、国立天文台の重力波プロジェクト推進室がKAGRAの建設で果たす大きな役割のひとつになっています(かこみ②を参照)。

地面振動を避けて、より低い周波数の信号を捉えるためには、宇宙空間に重力波望遠鏡を打ち上げる必要があります(33ページ)。

次に「熱雑音」は、鏡が揺れ動くことによって、光路長が変わってしまう現象です。温度は身近な概念ですが、細かく見ると、ものが動いていることに対応します。レーザー干渉計型重力波望遠鏡で問題となる熱雑音は、主に干渉計を構成する鏡の固有振動(28ページ)と、鏡を吊るす振り子に熱エネルギーが分配されて揺れ動くことによって起こります。鏡や振り子の温度が高ければ、それ

だけ鏡が大きく揺れてしまうので、KAGRAでは鏡を低温に冷やす(冷却系)ことで、鏡の揺れを小さくするように工夫されています(28・29ページ)。「散射雑音」と「輻射圧雑音」についてはかこみ③を参照してください。

●「光学・電波望遠鏡」との比較

ここで少し、重力波望遠鏡と光学望遠鏡や電波望遠鏡をくらべてみましょう。すばるなどの光学望遠鏡は、目で見える光を、大きな鏡を使って集めることで、より暗い天体、より遠くにある天体を細かく見分けることができる観測装置です。また、望遠鏡の向きを変えて、空の見たい領域を観察することができます。主に温度の高い星などがよく見えます。

電波望遠鏡は、光より波長が長い電波で宇宙を観察するものですが、大きな望遠鏡を使うと、より多くの光を集めることができます。しかし、観測波長が長くなるとその分、解像度が低下するので、細か

①地上の重力波望遠鏡の観測周波数と基線の長さ

●重力波の振幅 h は、時空のゆがみを表す無次元量です。レーザー干渉計で測る場合、変位量 δL は測っている鏡の間の長さ(基線長 L)に比例します。したがって、基線長はできるだけ長い方が、相対的な変位量が大きくなり、検出しやすくなります。実際には、丸い地球の上で吊り下げた鏡の傾きがあまり変わらない距離は数kmくらいと言われていましたが、将来、地下に10kmの干渉計を設置する計画もあります。

重力波は光の速度で進むので、基線長が長くなると、光が行って帰ってくる間に高い周波数の重力波の影響は消えてしまいます。目標の観測帯域に対しては実効的に100kmから1000kmほどが適切な基線長になります。そこで、直交するふたつの光路にそれぞれ光共振器(ファブリ・ペロー共振器)という装置を組み込んで、何度も光を往復させることによって実効的な光路長を伸ばし、感度を上げる工夫が施されます(16・17ページ参照)。

③「散射雑音」と「輻射圧雑音」

●「**散射雑音**」と「**輻射圧雑音**」は、干渉計に使われるレーザー光に起因する量子雑音です。散射雑音は、レーザー光の強度を上げることで、低減することができるので、光源自体の出力を上げることに加えて、干渉計に使われた後に光源側に戻ってくる光を再び干渉計に打ち返して実効的な光量を増やすパワーリサイクリングという技術が用いられます。また、原理的な問題ではありませんが、レーザーのビーム形がきれいでないとか余計な雑音となるので、光源から出た光は、いったんモードクリナーと呼ばれる共振器で整形してから主干渉計に導かれます(16ページ)。

散射雑音のみを考えると、レーザーの強度は高い方が良いのですが、あまり出力が高くなると、今度は光の圧力のゆらぎによって鏡が動いてしまう輻射圧雑音が感度を制限することが分かってきました。このため、これ以上光源の光量を上げることで、散射雑音を低減するためには、輻射圧で動かないように鏡を重くする必要があります(29ページ)。

いところを見分けて写真のような画像にするためには、複数の望遠鏡をならべて一緒に動かす「干渉計」(★02)という技術が使われます。国立天文台が参加しているALMA望遠鏡も、干渉計として利用することで、詳細な画像を描き



図06 雑音を耳で聞きながら雑音源を同定し、低減する「ノイズハンティング」のようすです。

出しています。電波望遠鏡では、冷たいガスや塵などがよく見えます。

これらの光学・電波望遠鏡と比べると、重力波の望遠鏡は、そもそも電磁波ではなく時空の伸縮を測るという原理的な違いの他にも、いくつかの特徴があります。ひとつは、見たい方向へ望遠鏡を向けることができない、ということです。宇宙から重力波がやって来たときに、手持ちの望遠鏡で見えるかどうかは発生源の方向次第であり、しかも、一台の望遠鏡だけでは、重力波の来た方角さえ分かりません。このことと、先ほどの観測帯域が可聴音域に相当することから、重力波望遠鏡は宇宙の絵を描く装置ではなく、宇宙の音楽を奏でる装置であるとも言われます。

観測された重力波が、空のどの方角から来ているかを決めるためには、複数台の望遠鏡が必要になります。また、複数の望遠鏡のデータを使った解析からでも、指定される空の領域はかなり広いです。現在世界で開発されている複数の重力波望遠鏡は、初検出を目指して競い合ってもいますが、重力波の到来方向や偏波を決めて、波源天体の性質を解明する研究につなげるためには、望遠鏡間でのデータ共有が欠かせません(かこみ④を参照)。

また、重力波は、光に比べると透過力が強いので、ドームを開けて観測する必要がない、というのも大きな特徴です。望遠鏡を神岡の地下に置いても、地表に置いたのと変わらずに観測ができるばかりか、地球の裏側から来た重力波でも、容易に捉えることができます。

一方、原理的には、鏡の間の長さが長いほど小さな信号を捉えることができるようになるので、そういうところは、望遠鏡を大きくするほど、より遠く暗いものが見える光学／電波望遠鏡の性質と似

★02 干渉計

電波干渉計の場合は、天体光を用いて、位相も含めたフーリエ成分を測定することで光源の画像を再生します。光源にレーザーを用いる干渉計では、光を何かに当てることで、物質の位置や性質を調べます。重力波望遠鏡はその機能を使います。

ているかもしれません。

本特集では、次に重力波望遠鏡によって拓かれるサイエンスを紹介し、中盤で日本の重力波望遠鏡開発の歴史を20m干渉計、TAMA300、CLIOという三鷹から神岡地下への流れを中心に振り返ります。そして現在建設を進めている大型低温重力波望遠鏡KAGRAについて、国立天文台の役割を中心に紹介していきます。

④重力波の偏波と発生方向の絞り込み

●電磁波に偏光があるように、重力波にも偏波があります。音(は縦波ですが)に例えられるので、少し紛らわしく感じられるかもしれませんが、重力波は横波です。紙面に垂直な方向、たとえば真上から重力波が来た場合、紙面上で縦横に伸び縮みするプラスモード(+)と、斜め45度方向に伸び縮みするクロスモード(×)の2種類の偏波があります(図07)。図02のようなマイケルソン干渉計に紙面の真上から重力波が入射した場合には、+モードは検出できませんが、×モードの場合には、重力波による干渉計の両腕の長さの変化が同じになってしまうために検出することができません。このように、ひとつの干渉計では、重力波のひとつの偏波成分しか測定することができないので、複数の望遠鏡のデータを使わないと重力波の偏波や、それが来た方角は分からないのです。

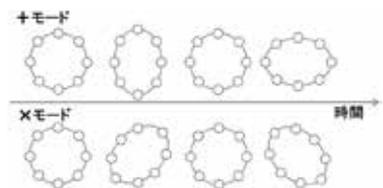


図07 重力波は電磁波と同様に横波で+(プラス)モードと×(クロス)モードの2種類の偏波があります。

もともと極めて微弱な重力波を観測するには、高エネルギー天体現象で生じる重力波を捉えることが必要です。そこには、電磁波では原理的に観測できない情報を得ることも可能となり、マルチメッセンジャー天文学の扉も開かれます。

重力波によるサイエンス

田越秀行 (大阪大学)



●直接検出の重要性

重力波の検出は、それ自体が重力理論の検証となります。すでに触れられているように、連星パルサーが重力波を放出しているであろうということは、連星パルサーの公転周期の変化から間接的に確認されています。しかし、重力波が放射されていたとしても、その後重力波がどのように宇宙を伝播しているかについては、実験や観測的に確認されている訳ではありません。実際、重力波の伝播の仕方や偏極モードについて異なる予言をする、修正重力理論は様々あり、重力波の様々な性質を確認するには、やはり直接検出をすることが重要です。

●コンパクト連星系合体

重力波源のなかで、KAGRAなどにとって最も有望とされているのはコンパクト連星系合体です。中性子星の連星系は先ほど述べた連星パルサーとして観測されているものがあり、KAGRAや advanced LIGO (aLIGO)、advanced VIRGO (aVIRGO) では、年間10回程度観測されるものと評価されています。実際に中性子星連星系が存在していることから、その合体現象があることについては間違いありません。しかし、この頻度推定は不定性が大きく、年間数回かもしれないし、もっと多

いかもしれません。やはり、重力波の観測により実際の頻度が分からないと正確なことは分かりません。また、実際の頻度が観測的に分かってくると、コンパクト連星系の形成メカニズムについてもいろいろと分かってくるものと期待されます。また、京都大学のグループなどによる数値相対論シミュレーションによって、連星中性子星合体波形が中性子星の質量

だけでなく、状態方程式にも依存していることが指摘されています。信号の詳細な解析から超高密度核物質の状態方程式に関する観測的情報が得られると期待されます。

連星合体と関連して現在最も注目されているのは、ガンマ線バースト (GRB) との関連です。GRBのうち継続時間が短いショートガンマ線バースト (SGRB) の母天体は分かっていませんが、中性子星連

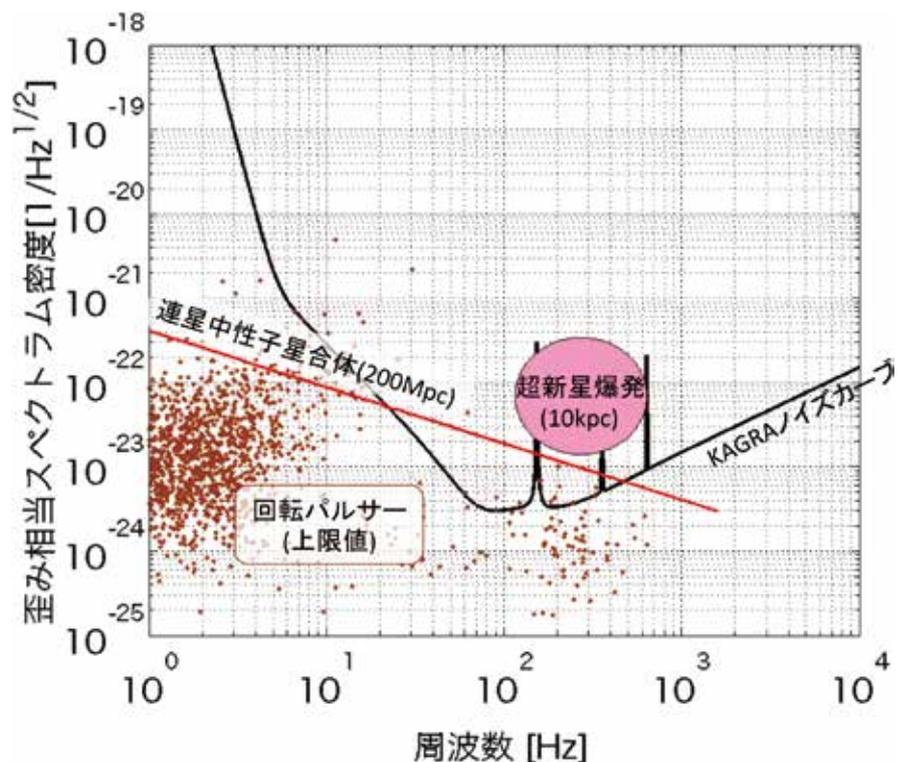


図01 KAGRAノイズパワースペクトラムと、様々なソースの特徴的なスペクトラム。連星中性子星合体は、距離200Mpcで方向や軌道傾斜角について平均したもの。超新星爆発(10kpc)は数値シミュレーションから示唆されるもの。回転パルサーは、観測されているパルサーの回転周期の変化率から導かれる重力波振幅の理論的上限値をプロット(従って、実際の振幅はこれより小さい)。*1pc(パーセク)=約3.26光年

星やブラックホール・中性子星連星の合体が有力視されています。SGRBと重力波の到来方向と発生時刻が一致すれば、この仮説を証明することができます。また、GRBからのX線・ガンマ線放射のビーミング効果によって、すべてのGRBがX線・ガンマ線で観測できるとは限りません。その場合でも、連星合体による重力波の放射角は、ガンマ線より広いために、重力波では観測できる可能性があります。重力波検出の信頼性の向上のためにも、GRB母天体の性質についてのより深い理解のためにも、X線・ガンマ線で観測されない連星合体现象の電磁波対応天体を見つけることは重要であると考えられ、そのための準備も進められています（12ページ）。

●超新星爆発と中性子星

重力崩壊型超新星爆発では、流体やニュートリノの流れが非球対称的であれば重力波が放出されます。超新星爆発は、爆発メカニズムが完全に解明された訳でなく、現在も非常に活発に研究されています。重力波は非常に透過力が強い放射なので、爆発する星内部で発生する重力波は、（一般相対性理論が正しいと仮定すれば）ほぼそのまま地球まで伝搬しま

す。従って、星が爆発に至る前の段階において星内部で起こっている現象も重力波ならば観測できます。また、爆発メカニズムの違いが、重力波波形の違いに現れる可能性が指摘されています。

超新星爆発ではスーパーカミオカンデによるニュートリノ観測も重要な役割を果たすと考えられます。KAGRAなどでは、モデルにもよりますが、数100kpcくらいまでの超新星爆発重力波が観測できると考えられますが、その距離はおおよそスーパーカミオカンデで観測可能な距離と同程度です。超新星爆発の頻度は銀河系内で約50年に一回程度と考えられていますが、スーパーカミオカンデ、重力波検出器、そして電磁波観測により、超新星爆発メカニズムに迫ることができる時が間近に迫っているかも知れません。

中性子星が少してこぼこして非軸対称となると重力波が放出されます。非軸対称性はあまり大きくないとは思われていますが、銀河系内には今まで見つかったよりもずっと多い中性子星があると推定されるので、その中で地球から比較的近い中性子星は、KAGRAのデータを数年間積分して信号雑音比を向上させることで検出できるかもしれません（13

ページ）。また、連星にある中性子星が、伴星からの質量降着が原因で非軸対称性が引き起こされ重力波を放出する可能性も指摘されています。

●宇宙背景重力波

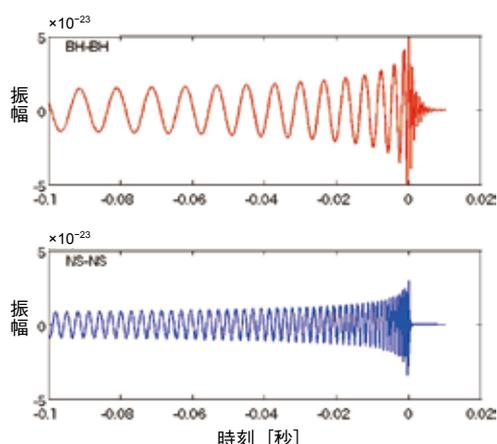
より大きな宇宙論的スケールに着目すると、宇宙背景重力波があります。これは、四方八方より絶え間なく到来するランダムな重力波を指します。これには、インフレーションを起源とするもの、インフレーション終了時の宇宙の再加熱や宇宙の相転移を起源とするもの、数多くの天体からの重力波が重なり合って個別のソースとして分離できなくなったものなどがあります。また、宇宙の相転移に伴い生成される「宇宙ひも」も重力波源となります。理論的に予言されているインフレーション起源の背景重力波の強度は非常に弱く、KAGRAなどでは検出は難しいと考えられますが、それでも観測的に確認することは重要です（14ページ）。

次世代重力波検出器の稼働が数年後に迫っている現在は、まさに重力波天文学の夜明け前と言えるでしょう。重力波天文学の今後の動向にぜひご注目ください。

重力波の信号の見分け方

いまだ発見されていない重力波。では、その信号はどうやって検出されるのでしょうか。中性子星連星合体などのいくつかの重力波イベントは、その信号を理論的に予測することができるので、時間的に変化する重力波の予測波形（チャープ信号）がテンプレートとしてあらかじめ用意されます。実際の観測から得られるデータは、このテンプレートと比較され、重力波が検出されます。この手法は、マッチドフィルターと呼ばれます。常時観測を続けるKAGRAのデータは膨大なもので、その処理と解析を行う計算機処理系には大規模・高性能のシステムが使われます。

なお、チャープ信号とは、右グラフのように周波数が連続的に変わる信号のことです。08ページでも紹介したように、重力波信号の波長は音の波長に近いので、テンプレートはさまざまな音として実際に耳で「聴くこと」ができます。



予想されるチャープ信号のテンプレートのグラフ。上は太陽質量の10倍のブラックホール連星の合体イベントの波形（赤）、下は太陽質量の1.4倍の中性子星連星の合体イベントの典型的な波形です（ともに距離200Mpcの場合）。このケースでは、ブラックホール連星のほうが質量が大きいため、中性子星連星より振動数が低くなります（なお、この場合、振動数はほぼ質量で決まります）。

① 連星中性子星合体のマルチメッセンジャー観測

田中雅臣 (国立天文台理論研究部)



太陽よりも約8倍以上重い星は、一生の最期に「超新星爆発」を起こすと考えられています。超新星爆発が起きると、星の外層は吹き飛ばされ、星の中心には中性子星が残されます。中性子星は私たちの想像を超える極限天体で、この天体が重力波天文学の幕開けに大きく関係しています。

中性子星の質量は、太陽の約1.4倍。しかし、星の半径は約10kmと非常に小さく、密度は1cm³あたり約1兆kg (!) にもなります。地球表面で私たちが感じる重力を1とすると、月の表面では約6分の1というのは聞いたことがあるのではないのでしょうか。同じ計算をしてみると、中性子星の表面の重力は2000億 (!) にもなるのです。

さらに驚くべきことに、宇宙にはこのような極限天体が対になって存在していて(連星中性子星)、合体を起こすこともあります。超強重力場が激しく変動するこの現象には強い重力波放射が伴うため、KAGRAを始めとする次世代の重力波望遠鏡が、この連星中性子星合体からの重力波の直接検出を狙っています。KAGRAの目標感度が達成されると、約200Mpc (2×10⁸パーセク・約6.5億光年) 以内にある系外銀河で起きる、連星中性子星合体からの重力波が捉えられると期待されています。この範囲の宇宙で連星中性子星が合体する頻度は、1年に10回程度と考えられており、ついに「重力波天文学」が始まるのです。

しかし、重力波望遠鏡には弱点があります。重力波望遠鏡だけでは、たとえ複数の望遠鏡で観測しても重力波の到来方向を10~100

平方度の精度でしか決めることができないのです。月の見かけの大きさは0.2平方度ですから、いかにこの範囲が広いかが分かります。200Mpc以内の宇宙だけを考えても、この範囲には数1000個の系外銀河が含まれ、重力波の検出だけでは、重力波を放った天体がどの銀河に存在するのかが分からないのです。重力波天文学の本当の幕開けを見るには、電磁波観測によって正確な位置を決める必要があります。重力波+電磁波の「マルチメッセンジャー観測」が必要不可欠なのです。

では連星中性子星合体は電磁波でも見えるのでしょうか? 答えはイエスです。連星中性子星が合体するとき、その一部(太陽の質量の約1%)が宇宙空間に放出されます。中性子星はその名の通り中性子からできていますから、放出される物質には中性子があふれており、中性子捕獲反応により金、銀、プラチナなど鉄よりも重い重元素が大量に生成されます。このとき合成された元素が放射性崩壊によりエネルギーを解放し、連星中性子星合体は明るく輝くのです。

私たちはこの過程をスーパーコンピュータでシミュレーションすることに成功しました(図01)。その結果、可視光で5日間ほど、22~24等級程度の放射が起こることが明らかになりました(図02)。これは口径4mから8mの望遠鏡であれば、比較的簡単に検出することができる明るさです。ただし、重力

波が検出された後5日以内に、10~100平方度の中から探しまわらなければなりません。そのためには、一度に広い範囲を観測する必要があり、世界の大望遠鏡の中で随一の広視野を誇るすばる望遠鏡に大きな注目が集まっています。KAGRA+すばるによる連星中性子星合体のマルチメッセンジャー観測にぜひご期待下さい。

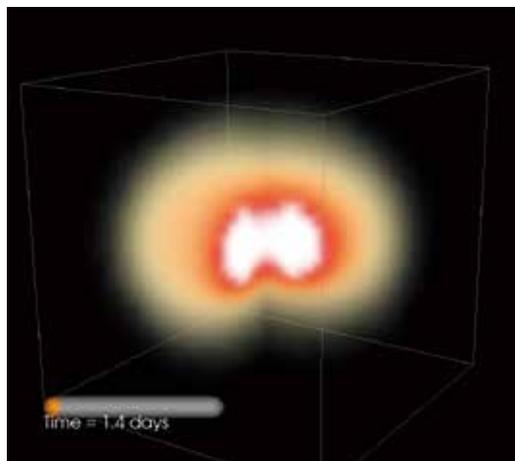


図01 国立天文台天文シミュレーションプロジェクトのスーパーコンピュータ「アテルイ」を用いて行われた、連星中性子星合体に伴う電磁波放射の数値シミュレーション。内部が見えるように4分の1を切り取って表示しており、中心の明るい部分が光の強い部分。

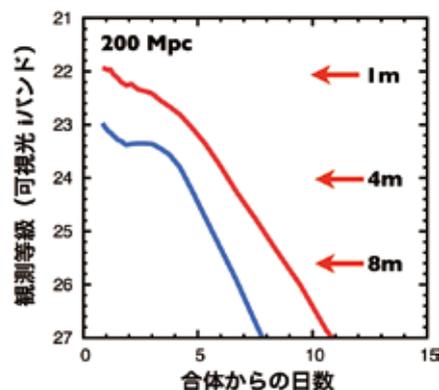


図02 200Mpcの距離で連星中性子星合体が起きたときに予想される可視光放射の明るさ(光度曲線)。1.2太陽質量と、1.5太陽質量の中性子星が合体した場合で、赤線と青線は高密度物質の状態方程式の違い。矢印は各口径の望遠鏡で10分間の観測をしたときに到達できる感度の目安。

② KAGRA マルチメッセンジャー観測網でダイナミックな宇宙を捉える

端山和大 (大阪市立大学)



● 巨大なディスプレイに映し出されるジャングルの様子を想像してみてください。そこにはさまざまな形をし、緑、赤、青、黄といった色とりどりの姿をした木々が静かに生活しています。ヤシの仲間、シダの仲間、そしてまだ発見されていない植物もひっそりと生活しているのでしょうか。さらに眺めていると、空からカラフルな極楽鳥がやってきました。近くの木にはサルが上ってきたようです。おやおや、虹色をした見た事もない大きな鳥が飛び立っていったではありませんか。いったいこのディスプレイの向こうにあるジャングルには何が潜んでいるのでしょうか？ 私たちはカメラでジャングルを映し出すだけではあきたらず、マイクを持ってきてジャングルの音の世界をも知りたいと思うようになります。そして確かに、そこにはディスプレイでは見る事ができないカエルの声、鳥の声、昆虫の声、動物の声があり、私たちは色と音の世界を統合してジャングルの豊潤な生態系を垣間見られるようになります。

私たちは光学望遠鏡すばるで宇宙の奥を調べ、電波望遠鏡VERAで銀河系の構造を把握し、ALMA、TMTでさらに深い銀河、生命の誕生の起源に迫ろうとしています。そして、それと同時に、今まで観測できなかった重力波という「宇宙の音」をとらえる望遠鏡KAGRAを建設しています。突如として出現する超新星爆発のメカニズムを知るために、これまでニュートリノ、光、電波といった望遠鏡を用いて多くの観測がなされてきました。スーパーカミオカンデによって世界で初めて超新星爆発からのニュートリノを検出してニュートリノ放射機構の解明に重要な一歩を踏み出し、すばるなどにより超新星爆発の非軸対称性の観測、即時偏光分光観測による爆

発形状の観測が行われてきました。それとともに理論とシミュレーションを駆使した爆発のメカニズムのモデリングが行われています。KAGRAは、それらの観測、モデルでは窺い知る事の難しい爆発時点からの重力場の変動の一刻一刻をそのままダイレクトに私たちに伝えてくれます。多粒子・多波長天文学と連携して行う観測は、重力波マルチメッセンジャー観測と呼ばれています。——それぞれの観測がジグゾーパズルの重要なパーツであり、それが合わさった時にパズルが解け、真の姿が現れる——。マ

ルチメッセンジャー観測からはまさにそうした解明がいたるところで起きると期待しています。

那須パルサー観測所では20m鏡8つで構成された4組の2素子干渉計によって24時間体制で掃天観測を行って、変動電波源の観測を行っており、増光時間が数分~2日という電波トランジェントを検出しています。その起源は未だ謎に包まれたままです。近年、連星合体の時に生じる電波アフターグローの可能性も指摘され、重力波天体なのかもしれません。今後、重力波観測と連携する事により、今まで分からなかった天体現象の解明へと研究が進んで行く事と思います。もちろんここに挙げたものはほんの少しの例に過ぎません。ガンマ線バースト (GRB)、パ

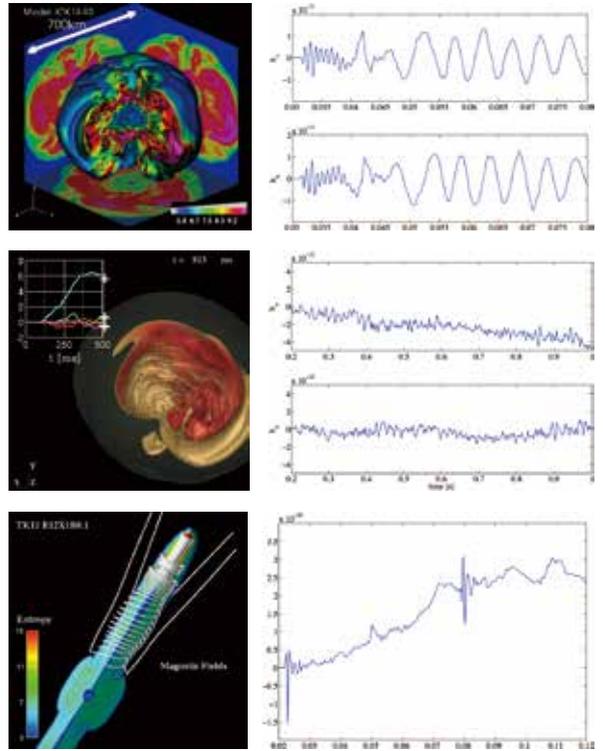


図01 超新星の爆発モデルと重力波形。上からKuroda et al. arXiv:1304.4372 (2013)、Kotake et al. ApJ 736 124 (2011)、Takiwaki et al. ApJ 743 30 (2011)。

ルサーグリッチ、ソフトガンマリピーター、様々な天体現象のマルチメッセンジャー観測による多角的な解明が、天文学全体で連携しながら行われていくことになると思います。

日本にある様々な望遠鏡がそれぞれの個性を活かして連携し、マルチメッセンジャー観測網となり、数年後には色と音を統合した天文学が開いていると期待しています。



図02 那須電波パルサー観測所。

③ 重力波で初期宇宙を探る：宇宙重力波背景放射の検出

黒柳幸子（東京理科大学）



1. 初期宇宙の観測

現在、最も昔の宇宙の姿を捉えている観測は何だと思いませんか？……答えは「宇宙マイクロ波背景放射」です。宇宙誕生から38万年後の宇宙に満ちていた光を観測しています。一方で、KAGRAのような重力波検出実験はさらに初期の宇宙を観測できる可能性を秘めています。

昔の宇宙は高温で密度の高い火の玉のような状態でした。この時代の宇宙では物質どうしが混み合っていて、光の進路を邪魔します。宇宙マイクロ波背景放射は、宇宙が膨張することで密度が下がり、光がまっすぐ飛べるようになった時代の光です。これ以前の光は私たちに直接届かないので、私たちが光を使って過去を見ることが出来る限界になります。

しかし重力波ならばこの限界を超えることができます。重力波は光よりも他の物質との相互作用がとても弱いので、宇宙の密度が高くても周りの物質に邪魔されずに直進することができるからです。

2. 誕生直後の宇宙

では光で直接見ることができない誕生直後の宇宙では何が起こっていたのでしょうか？ 現在、初

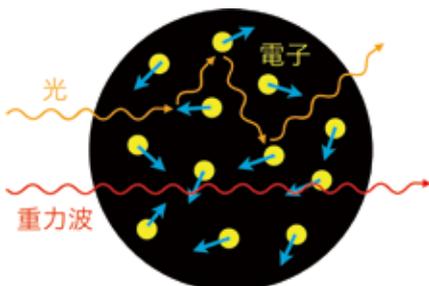


図01 宇宙初期の様子。光は走り回っている電子に邪魔されてまっすぐ進めません。

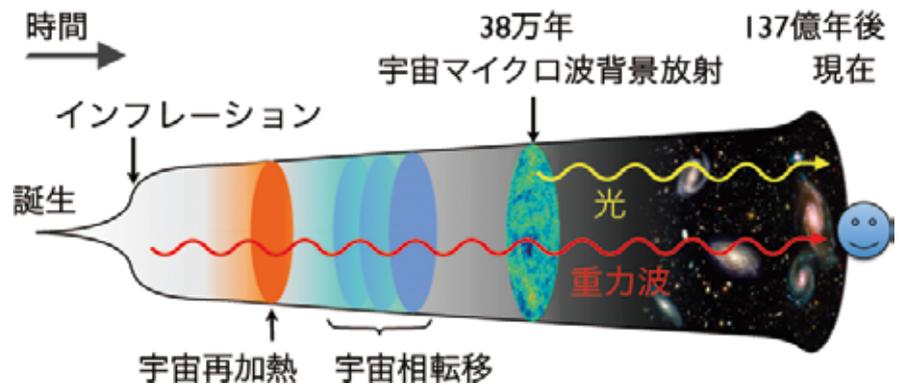


図02 宇宙の進化の時系列。重力波は光よりもはるか昔の時代からやってくるすることができます。

期宇宙論の中で最も盛んに研究が行われているのが「インフレーション理論」です。この理論は宇宙がどの方向を見ても同じ、つまり一様等方であることを説明するために生まれました。宇宙を誕生直後に一気に膨張させて一様に広げてしまおうというアイデアです。

インフレーションが起こった後の宇宙は、劇的な膨張により密度が完全に薄まった状態になります。しかし私たちの知っている宇宙は、物質で満ちた宇宙です。このことからインフレーションの後には「再加熱」と呼ばれる大量の物質が生成される時代があったと考えられています。

その後、宇宙は膨張によって温度を下げながら「相転移」という現象を何度も繰り返します。現在知られている四つの力（重力、強い力、弱い力、電磁気力）は元々一つに統一されていたと考えられていて、その力が分岐するときに起こるのが相転移です。

3. 初期宇宙からの重力波

さて、いま私が述べた宇宙初期の出来事はどれも重力波を作り、それが現在まで残り続けている可

能性があります。例えば、インフレーションは時空の量子揺らぎを引き伸ばして重力波を作ると考えられています。また、再加熱で激しく物質生成が起こると、時空の歪みが誘発されて重力波になります。相転移や超ひも理論から予言される「宇宙ひも」の運動も重力波を生み出します。

こういった重力波は宇宙のどの場所にも一様に作られ、定常的に存在し続けるので「宇宙重力波背景放射」と呼ばれます。重力波の振幅は理論モデルによって大きく異なるので、必ずしも検出ができるとは言えません。しかし、KAGRAのような重力波実験を使って背景放射の存在を調べることで、大きな振幅を予言する初期宇宙モデルを検証していくことができます。

宇宙初期の出来事は素粒子理論や超ひも理論とも関わりが深いので、重力波実験は究極理論の検証にも役立ちます。宇宙誕生直後の姿を直接観測する唯一の道具ともいえる重力波は、今後実験が進むことで宇宙の成り立ちや万物の法則の理解に新たな展望をもたらしてくれることが期待されます。

IV

重力波望遠鏡① 20m干渉計とLISM

日本の重力波天文学の研究と検出器の開発は、さまざまなグループによってスタートし、その後、着実に発展を遂げてきました。ここでは、その中心的な役割を果たした検出器として、「20m干渉計」と「LISM」を紹介します。

地下へ～三鷹から神岡鉱山へ～

辰巳大輔（重力波プロジェクト推進室）



●日本の重力波望遠鏡

レーザー干渉計を用いて、誰も捉えたことがない重力波＝“わずかな”時空のゆがみを検出する試みは、1990年代に入り本格化しました。それまでの重力波検出器は、共振型と呼ばれるもので、時空の歪みにより金属の塊に生じる振動を検出しようとするものでした。微弱な重力波により生じた僅かな振動を金属の共振現象を利用して増幅できる点がこの装置の特長です。

1980年代後半になると、技術の進歩によりレーザー干渉計による時空の歪み測定の可能性について議論が進みました。日本でも、相模原の宇宙研（現JAXA）に100m干渉計、東京大学理学部に3m干渉計、そして国立天文台に20m干渉計が作られました。

●20m干渉計

国立天文台・三鷹キャンパスで最初に開発された重力波検出器が「20m干渉計」です。これは、1991年から始まった重点領域研究「重力波天文学」によって建設されたプロトタイプ検出器です。現在では主流となった「Nd:YAGレーザー」を採用したほか、位相変調されたレーザー光を透過する「モードクリーナー共振器」、ゲイン10を超える「パワーリサイクリング技術」など多くの技術開発実績を上げました。しかし三鷹の振動環境の悪さから1kHz以下の観測帯域では、多くの振動源に悩まされました。

このような経験を踏まえて、世

界に先駆けた重力波観測を目指したTAMA300プロジェクトがスタートしました（16ページ）。また、その時点でさらに大型の重力波望遠鏡（現KAGRA）を建設する計画も始まりました。私たちは20m干渉計

の経験から、重力波観測を本格化するためには振動環境の良い場所を選

定することの重要性を痛感していましたので、その候補地として岐阜県神岡町にある鉱山を選定しました。つまり、レーザー干渉計を地下に建設する計画です。

●LISMプロジェクト

天体観測の感覚から言うと、すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡など最先端の光学望遠鏡や電波望遠鏡は、大気の悪影響の少ない高地に設置するのがふつうで、第一線の天文観測装置を地下に設置するというのは違和感があるかもしれません。しかし、09ページでも述べたように、重力波の観測は地下でもまったく問題ありません。むしろ、観測の最大の妨げとなる振動が少ない地下は優れた観測環境です。しかも、神岡には、すでに長期にわたって東京大学宇宙線研究所のニュートリノ検出器「カミオカンデ」や「スーパーカミオカンデ」が設置・運用され、多くの研究成果を挙げており、地下で観測装



三鷹に設置された20m干渉計。

置を運用するノウハウも豊富です。

そこで、三鷹で運用していた20m干渉計を神岡鉱山内に移して実験をすることにしました。こうして東京大学宇宙線研究所のプロジェクトとして再び活躍の機会を得た国立天文台の20m干渉計は、世界で初めての地下重力波検出器「LISM (Laser Interferometer in Small scale):リズム」として運用され、地下1000mの優れた低振動環境の有効性を「低周波付近における世界最高変位感度の達成」と「当時の世界最長無人連続観測」という形で証明しました。また、その後に観測を開始したTAMA300との世界初の同時観測による研究基礎データの解析にも成功しました。

その後、KAGRAに搭載される低温鏡開発のためのプロトタイプ検出器「CLIO (19ページ)」も神岡の地下に設置されて高い性能を示し、2013年現在、地下に設置されている重力波望遠鏡は日本のレーザー干渉計のみです。つまり地下で最先端の実験が行えるのは、世界的に見ても稀有な環境であるといえるでしょう。この点、地下実験の先駆者であるニュートリノ実験グループが存在したことが、KAGRA計画の推進に大きな後押しとなったことは間違いありません。



神岡の地下に移されLISMに。

国内のレーザー干渉計型プロトタイプ検出器の成果を集大成して作られたのがTAMA（たま）300です。レーザー干渉計型の実用機として建設・運用され、実際に重力波の検出を試みた重力波望遠鏡を紹介します。

21世紀の重力波観測時代の幕開けを告げた望遠鏡

辰巳大輔（重力波プロジェクト推進室）＋編集部

●TAMA300の概要

TAMA300は、東京都三鷹市の国立天文台構内に設置された基線長300mのレーザー干渉計です（18ページ・図01）。もし重力波が到来して時空のゆがみが生じれば、鏡の間の距離が変化するので、それを光干渉技術を用いて精密に測定する、というのが、この装置の基本原理です。

TAMA300は、先に述べた20m干渉計をはじめ、国内のプロトタイプ検出器での技術開発の成果を活かして、日本の多くの研究者が共同で開発と建設を進め、1999年夏に本格的な重力波望遠鏡として世界に先駆けて運転を開始しました。2000年夏には当時の世界最高感度を塗替えることに成功し、その後、前人未達の1000時間観測をも成し

遂げ、21世紀の重力波観測時代の端緒となりました。

●TAMA300の装置の紹介

06～09ページでも概説したように、レーザー干渉計型の重力波望遠鏡の性能（感度）を高めるためのポイントを簡単にまとめると、A「高出力・高安定のレーザー光を用いる」、B「光路を長くする

A 高出力・高安定のレーザー光を用いる

重力波検出の「ものさし」として使うレーザー光には、高い出力と安定性が重要です。

B 光路を長くする工夫をする

レーザー光が重力波の中を長く進むほど多くの影響を受けるので、TAMA300では300mのトンネルの中を光が320往復するように設計されています。

C 光路の長さをできるだけ正確に保つ

重力波以外の影響で光路長が変わらないように、光路パイプ内を真空にしたり鏡の振動を極力減らす工夫をします。

①レーザー光源

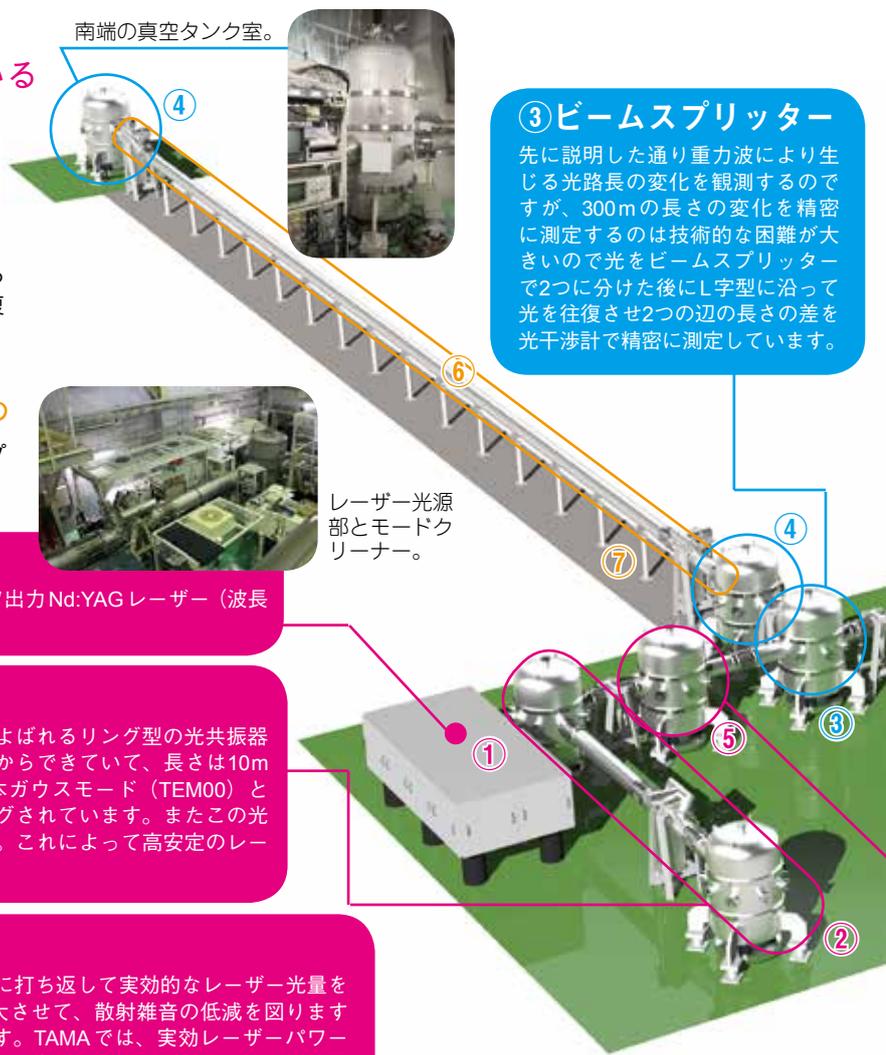
SONYと電気通信大学が共同で開発した（当時）最先端の10W出力Nd:YAGレーザー（波長1064nmの赤外光）が用いられました。

②モードクリーナー

光源から放たれたレーザー光は、次に、モードクリーナーとよばれるリング型の光共振器を通過します。TAMA300のモードクリーナーは3枚のミラーからできていて、長さは10mです。モードクリーナーを通った光は、干渉計に必要な基本ガウスモード（TEM00）と呼ばれるきれいな同心円状の（強度）断面を持つ光にクリーニングされています。またこの光共振器を基準にレーザー波長を安定化する役割も果たします。これによって高安定のレーザー光が生まれます。

⑤リサイクリングミラー

L字型の光干渉計から光源に戻ってくる光を、再度干渉計に打ち返して実効的なレーザー光量を増加させるための鏡です。（18ページ）。光のパワーを増大させて、散射雑音の低減を図ります（09ページ）。これがパワーリサイクリングという技術です。TAMAでは、実効レーザーパワーとして18Wを実現しました（設計値は30Wですが…）。この方式は、LIGOやVIRGOでも採用されています。



南端の真空タンク室。

③ビームスプリッター

先に説明した通り重力波により生じる光路長の変化を観測するのですが、300mの長さの変化を精密に測定するのは技術的な困難が大きいため、光をビームスプリッターで2つに分けた後にL字型に沿って光を往復させ2つの辺の長さの差を光干渉計で精密に測定しています。

レーザー光源部とモードクリーナー。

工夫をする」、C「光路の長さをできるだけ正確に保つ」の3つが重要になります。TAMA300には、以下の図のように、それらを実現するための多くの技術が開発され組み込まれています。

●観測実験

重力波観測は、ひとことできると外乱（振動）との戦いです。とくにTAMA300のある国立天文台・三鷹キャンパス周辺は市街地で、日本を代表する自動車メーカーや、飛行場、多目的スタジアムなどさまざまな振動源となる施設が存在します。このような世界の他の重力波検出器と比べて、たいへんに不利な環境の中で、長時間の重力波観測を続けるには大変な努力と工夫が必要でした。

18ページ・図06は、私たちの

観測実験の足跡を示したものです。観測は最初、みなさんが寝静まった深夜より翌朝に掛けて行われました。というより、深夜にしか稼働出来なかったというのが正しい表現です。そこで、まずは、昼夜を問わずに観測を行うために、干渉計を構成するミラーに振動が伝わらないようにするための防振装置を改良し、最初の1000時間観測を行うことができました（18ページ・図05）。

その後も、検出器の改良と観測運転を繰り返すことで、高感度で安定した重力波観測実験を実現していきました。感度の向上は、検出可能な重力波源までの距離を拡大することで検出の頻度を高めるためであり、安定度を高めるのは、最高感度を常に維持して極めて稀な重力波イベントを逃さないため

と、重力波以外が原因の疑似重力波信号の発生頻度を極力抑えるためです。その甲斐があって、最終的にはほぼ無人で観測運転を維持できるところまで装置の完成度は上がり、まさに観測装置（望遠鏡）と呼ぶに相応しい装置となったと自負しています。

こうして、最終的には、計3000時間を超える重力波探査データを収集しましたが、残念ながら、TAMA300の性能で捉えられる100万年に1度と言われた重力波の事象には巡り会えませんでした。現在、TAMA300は本格的な観測を終えて、KAGRAのための各種試験などに利用されています（26ページ）。重力波初検出の夢は、CLIO（19ページ）を経てKAGRA（21ページ）へと引き継がれているのです。

④光共振器（ファブリ・ペロー共振器）

光共振器は、検出を狙う周波数の受信感度を上げるための工夫で、腕の中に向き合う2枚の鏡を取り付けて、レーザー光をその間で何度も往復させ、長い光路を得ます（ビームスプリッターの隣りにニアミラーを追加して、エンドミラーとの間でレーザー光を往復させます）。TAMA300の場合、300メートルの腕の中を約320回折り返して、合計およそ100kmの光路を実現しています（18ページ）。光共振器には、何度反射してもレーザー光をほとんど失わないための超低損失ミラーが用いられます（30ページ）。

西端の真空タンク室。



部屋の上には地上との出入口がある。



真空パイプ内の区分分離用のゲート機構。

⑥

300mのトンネル内の移動は自転車です。「よい運動になります（笑）」（辰巳さん）。



真空タンクの足回りにも多くの防振機構が組み込まれている（写真は南端のタンクのもの）。

⑥真空系

レーザー光が通る全長600mの真空パイプは、直径が40cmあります（18ページ）。その内部は、残留ガスによる光路長のゆらぎを防ぐために、 10^{-6} Paの真空度に保たれています。パイプの内壁は、ECB（Electro-Chemical Buffering）という研磨法で処理されており、ベーキングなしで高真空を実現しています。なお、モードクリーナーやリサイクリングミラー、ビームスプリッターなども、それぞれ独立した真空タンク内に収められています。

⑦防振系（地面振動と熱雑音の対策）

TAMA300では、幅1.5m高さ2mのコンクリート製の配管路が半地下式に埋め込まれており、真空パイプはその中に設置されています。これにより、地表に比べて温度や振動に対して安定した環境を得ることができます。また、重力波望遠鏡の要であるビームスプリッターやミラーは、地面振動によって揺れてしまうことを避けるために2本のワイヤーで吊下げられています。防振系は、当初はおもりとゴムを交互に重ねたスタックの上に、2重振り子で鏡を吊ったものですが、その後 $\alpha 2$ （あるふぁつー）と呼ばれる空気ばね防振装置が追加され、さらに2重振り子から、TAMA SAS（18ページの図04を参照）と呼ばれるKAGRA防振装置のプロトタイプと言える防振装置へと変遷を重ねていきました。防振系の開発は、TAMAにおいて多くの労力と時間が割かれた部分であり、この経験に基づいてKAGRAの防振系開発に貢献しています。

★この他にも、制御やデータ処理など、さまざまな技術が組み込まれた複合的な観測システムとなっています。

TAMA300

レーザー干渉計型の本格的検出器として開発され、将来の大型干渉計（後のKAGRA）の開発に必要なさまざまな技術を確認した重力波望遠鏡です。さらに実用型望遠鏡として運用が続けられて、実際に重力波検出を試みました。

Recycled Fabry-Perot-Michelson type Laser Interferometer



01 国立天文台（三鷹）に設置されたTAMA300。建設時の航空写真で、干渉計のL字型の光路用のトンネル（片側の長さが300m）のようすがわかります。



02 L字の交点にあたる中央真空タンク室（観測当時）。左から、モードクリーナー（の一部）、リサイクリングミラー、ビームスプリッター（中央）、西側ニアミラーの各タンクで、奥が南側ニアミラータンクです（16・17ページ）。現在の中央真空タンク室には、KAGRA開発のための真空タンクや試験用装置が多く増設されています。



03 地下通路に設置された片側300m（全長600m）のレーザービーム用の真空パイプ。直径は40cmです。



TAMA300は、国立天文台・三鷹のある「多摩」の地名と、光路の長さ300mから命名されました。「冗談半分です『タマにしか来ない重力波がタマタマ検出できれば……』との願いを込めて、と紹介することもありますよ」（藤本真克教授（当時）／国立天文台ニュース2007年5月号の記事から）といった、楽しいエピソードもあります。

04 真空タンクの中に吊り下げられる鏡（中央下の丸い部分）とその揺れを防ぐ防振機構。タンク自体にもさまざまな防振対策が施されます。



05 1000時間観測達成の時の記念写真。

観測	トピックス	実験期間	観測時間 (最長連続稼働)	検出感度 [1/Hz ^{1/2}]
第1期	1999年 8月 初試運転	1晩	10時間 (7.7時間)	3x10 ⁻¹⁹
第2期	1999年 9月 初観測実験	3晩	31時間	3x10 ⁻²⁰
第3期	2000年 4月 感度向上	3晩	13時間	1x10 ⁻²⁰
第4期	2000年 8-9月 初の100時間観測 当時の世界最高感度達成	2週間 (夜間のみ)	167時間 (12.8時間)	1x10 ⁻²⁰
第5期	2001年 3月 第2回100時間観測 終日運転による高い稼働率を実現	1週間 (終日)	111時間	2x10 ⁻²⁰
第6期	2001年 8-9月 初の1000時間観測実験	50日間	1038時間 (22.0時間)	5x10 ⁻²⁰
第7期	2002年 8-9月 パワーリサイクル技術導入 後初の観測実験	2日間	25時間	
第8期	2003年 2-4月 第2回1000時間観測 実験米国LIGOとの同時 観測実験	2か月間	1157時間 (20.5時間)	3x10 ⁻²¹
第9期	2003/2004年 11月 -翌1月 自動運転システム導入 米国LIGOとの同時観測実験	44日間	557時間 (28.1時間)	2x10 ⁻²¹
			トータル 観測時間	3109時間

06 観測実験の推移。

日本の重力波望遠鏡
重力波天文学が拓く宇宙

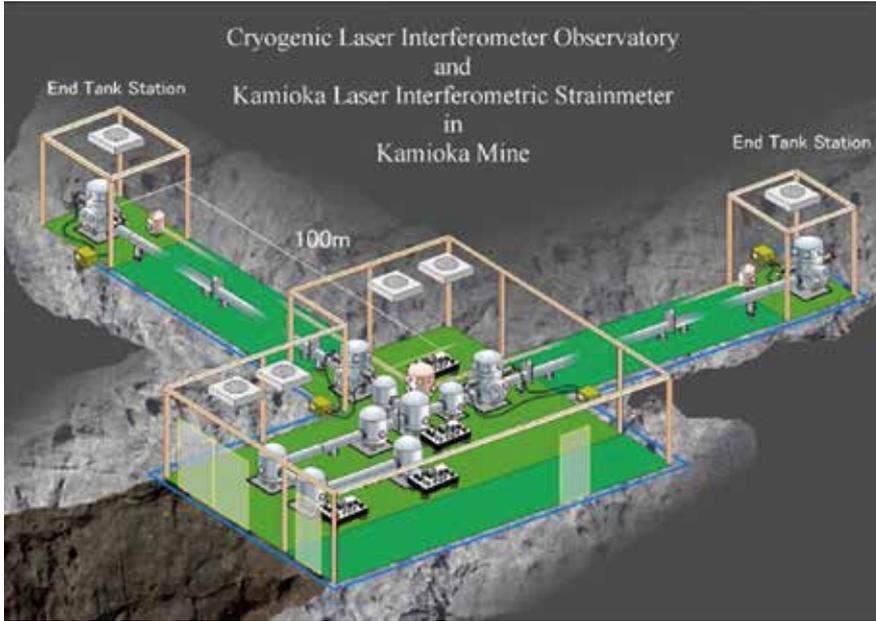
この特集では、日本のおもな重力波望遠鏡としてTAMA300、CLIO、KAGRAを紹介しています。TAMA300は、レーザー干渉型の本格的検出器として開発・運用され、実際に重力波検出を試みた第一世代の代表的望遠鏡です。CLIOは日本独自の大深度地下の利用と低温鏡開発を目的としたプロトタイプ検出器です。それらの成果の集大成として2018年の完成をめざして建設が進むKAGRAは、重力波の初検出と観測に挑む、第二世代の大型重力波望遠鏡です。

重力波望遠鏡	
基線長	
鏡	材質
	直径
	厚さ
	温度
感度 [1/Hz ^{1/2}]	
設置	場所
	深度
真空	真空パイプの直径
	真空度
レーザー源出力／実効出力	
FP光共振器による折り返し回数／実効光路長	
防振装置（振り子の段数／装置高／固有周波数）	
完成（予定）年	

CLIO

地面振動を減らすために岐阜県神岡の地下1000mの硬い岩盤の中に設置され、さらに熱雑音を低減するための低温鏡技術の開発をめざした、技術検証用のプロトタイプ検出器です。その成功により日本独自の技術が確立され、多くの成果がKAGRAに生かされています。

Cryogenic Laser Interferometer Observatory



01 CLIOイメージ図。CLIOは銀色で表された真空タンク（11台）とそれらを繋ぐ真空パイプで成り立っています。「L」字の一边の長さは100mあります。CLIOの内側にある、銅色の真空タンク（3台）とそれを繋ぐ真空パイプで出来ているレーザー干渉計は、地球物理のためのレーザー干渉計で、地面の変形を精密に測定しています。



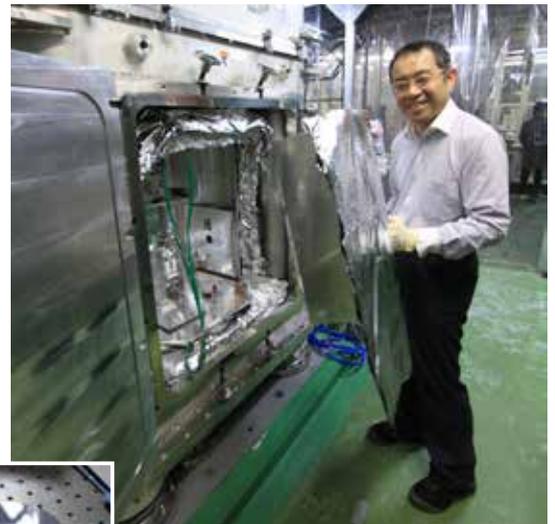
02 CLIOが設置された地下のようす。飛騨片麻岩と呼ばれる硬い地層の中であり地面振動は三鷹の100分の1と、たいへん静かな環境です。



03 近くには、東京大学宇宙線研究所の「スーパーカミオカンデ」をはじめ、kamLAND、XMASSなど多数の地下観測施設が設置されています。



04 地下1000mの地下トンネルに設置されたCLIOの真空タンクと真空パイプ（直径30cm）。地下深くに設置して地面振動を減らす方式は日本独自のものです。



クライオスタットの熱シールド用のフタを取り外す
スタッフの内山さん。



06 直径10cmのサファイア製の冷却鏡。通常の溶融石英ミラーの代わりに開発した日本独自の技術です。

05 CLIOの高さ約2mの真空タンクは、熱雑音を下げるためにクライオスタット（cryostat／低温保持装置）が組み込まれています。冷却によって感度を上げる方式も日本独自のものです。

TAMA300	CLIO	KAGRA
300m	100m	3000m
溶融石英	サファイア	サファイア
10cm	10cm	22cm
6cm	6cm	15cm
室温	20K	20K
1×10^{-21}	3×10^{-21}	3×10^{-24}
三鷹（関東ローム層）	神岡（飛騨片麻岩層）	神岡（飛騨片麻岩層）
半地下式	1000m	250-500m
400mm	300mm	800mm
1×10^{-6} Pa	5×10^{-5} Pa	2×10^{-7} Pa
10W / 2kW	2W / 700W	180W / 750kW
320回 / 100km	2000回 / 200km	1000回 / 3000km
3(垂直)・5(水平) / 2.0m / 2Hz	6 / 1.5m / 0.8Hz	5 / 14m / 30mHz
1999	2006	2018



KAGRA

そして
KAGRAへ

TAMA300、CLIOに続く大型重力波望遠鏡、その名はKAGRA。2018年の完成をめざして建設中！

開発が進むKAGRAの巨大なクライオスタット。

重力波望遠鏡の大敵は雑音です。とくに地面振動と熱雑音をいかに低減するかが、望遠鏡の性能の優劣を決める最大のポイントとなります。その課題克服のために日本独自の工夫を凝らした技術検証用の「CLIO」検出器を紹介します。

日本独自の「低温鏡」と「地下利用」

内山 隆（東京大学宇宙線研究所）



●潜って冷やす

日本で重力波を研究している私たちは、TAMA300と平行して、独自の技術開発も進めてきました。その中で開発された、「低温鏡技術」と「神岡地下利用」はKAGRAでも重要な役割を果たしています。低温鏡技術とは、レーザー干渉計の鏡を -250°C に冷やし、熱雑音を下げ方法のことです。神岡地下利用の目的は、地面の揺れが外と比べて1/100程度しかない、とても静かな環境に、揺れを嫌うレーザー干渉計を建設するという考えです。重力波はどこでも通り抜けてこられるので、山の中に検出器を置いても問題はありません。歴史的には、低温鏡技術は、1996年の東大宇宙線研と高エネルギー加速器研究機構の基礎開発研究を始まりとし、神岡地下サイト利用については、1999年の三鷹の国立天文台に作られた20m重力波レーザー干渉計を神岡鉱山内に移設したLISM計画を始まりとしています（15ページ）。さて、19ページに示したCryogenic Laser Interferometer Observatory (CLIO)は、神岡鉱山内に建設された、低温鏡技術を使った重力波レーザー干渉計です。最大の目的は、低温鏡技術の実証、つまり、鏡を -250°C に冷やして熱雑音を下げ、干渉計の感度が向上すると実際に示すことです。

●サファイアの鏡

19ページ・図01にあるCLIOのイ

メージを見ると、銀色で表された真空タンク（11台あります）とそれらを繋ぐ真空パイプが示されています。そこから、CLIOもKAGRAやTAMA300と同様に、レーザー干渉計特有の「L字」の形をしている事が分かります。ですが、CLIOは、L字の一边の長さが100mしかなく、3000mのKAGRAと比べるととても小さな干渉計です。19ページ・図04～06に示したのは、100mの真空パイプとクライオスタットと呼ばれる、 -250°C に冷やされる鏡が入る真空タンクです。鏡やクライオスタットを冷やすために、振動を抑える工夫を凝らした冷凍機を使っています。鏡自身も、地面の揺れが伝わるのを防ぐため、新たに開発された高さが1.5mほどもある6段の防振装置につり下げられています。鏡には、人工的に作られた直径10cm、厚さ6cm、重さ2kgの円柱の形をしたサファイアを使っています。このサファイアは不純物が入っていないため、無色透明のガラスのように見えます（19ページ・図06）。レーザー光源には出力2W、波長1064nmのNd:YAGレーザーを使っています。

CLIOは、2002年から建設が始まり、2006年に完成しました。そして、2010年に先に挙げた目標を達成しました。図01に示すのが、CLIOの変位感度曲線です。変位感度とは、干渉計が、どれだけ小さな鏡の揺れ（変位）を見られるかを示しています。線が下に行くほど、より小さい

鏡の揺れを見ることが出来る、より高感度な優れた干渉計である事を示しています。赤い線が鏡を -250°C に冷やした時、青い線が鏡を冷やさなかった時の変位感度曲線です。図から明らかなように、40Hzから400Hzの範囲で赤い線が青い線より下がり、鏡を冷やしたことで熱雑音さが下がり感度が向上したことが示されています。CLIOは2013年現在でも、世界で唯一の低温地下重力波レーザー干渉計です。この小さいながらも特徴的なCLIOで得られた成果・経験はKAGRAによる重力波検出の成功に欠かせない大きな要素になると考えています。

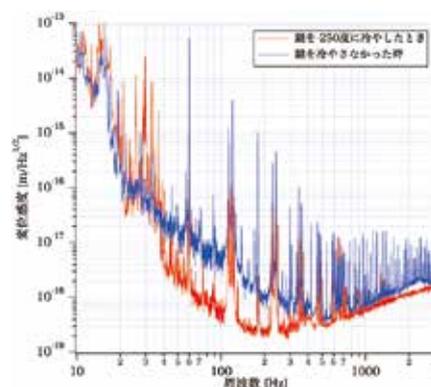


図01 CLIOで測定された変位感度曲線。変位感度とは干渉計が、どれだけ小さな鏡の揺れ（変位）を見られるかを示しています。線が下に行くほど、より小さい鏡の揺れを見ることが出来る、より高感度な優れた干渉計である事を示しています。赤い線が鏡を -250°C に冷やした時、青い線が鏡を冷やさなかった時の変位感度曲線です。

KAGRA

KAmioka GRAvitational-wave telescope

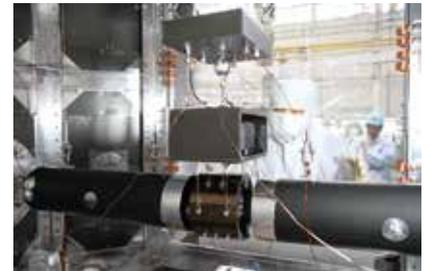
TAMA300やCLIOによって開発された技術の粋を集めて建設が進む重力波望遠鏡です。欧米の他の第二世代望遠鏡と肩を並べる、世界最大級の3 kmの光路を有し、防振対策として日本独自の地下設置や低温鏡装備を実現した期待の大型望遠鏡です。



01 東芝の工場で真空・冷却試験中の真空タンク（クライオスタット）。



02 真空タンクは、作業スペースに4人も入れる巨大さです。

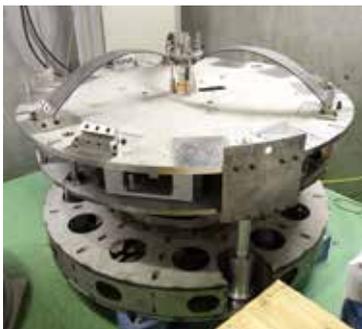


03 吊り下げられた中央の黒い円柱の中に -253°C まで冷やされるサファイアの鏡（プロトタイプ）が置かれています（28ページ）。



04 3 kmの光路を導く真空パイプ。直径は80 cmもあります。

09 KAGRAの3 kmの真空パイプを設置するトンネルの掘削爆破の様子。



05 KAGRAのプレ・アイソレーター。この下に何段もの振り子を吊り下げて鏡の揺れを極力減らすための高性能の防振装置です（26ページ）。



07 巨大で精密な光学装置であるKAGRAには、さまざまな補助光学系のパーツも組み込まれます。画像は、三鷹に作られた専用のクリーンルームで試験される大型のバッフル（31ページ）。

06 TAMA300（国立天文台三鷹）の真空タンクを利用してプレ・アイソレーターの試験中。上部に設置された直径1.5mの小型の真空タンクの中にプレ・アイソレーターが設置されています（27ページ）。



08 岐阜県・神岡鉱山の地下では、急ピッチでKAGRAが設置されるトンネル工事が進んでいます（24ページ）。

10 神岡では、データ処理用の計算機システムの立ち上げも行われています（写真は東大宇宙線研究所の宮川さん）。



KAGRAは、2018年の完成めざして急ピッチで建設が進む大型の重力波望遠鏡です。KAGRAの優れた性能によって、重力波の初検出とさまざまな重力波イベントの観測が期待されます。ここでは、KAGRAの概要と開発中のさまざまな先端技術を紹介します。

KAGRAの概要

宗宮健太郎 (東京工業大学)



● KAGRAの設置場所と愛称

岐阜県北部にある神岡町は、人口1万人程度の小さな町ですが、飛騨片麻岩で囲まれた固い地質を生かして、旧神岡鉱山の内部は宇宙線研究施設として利用されています。ニュートリノ検出器として世界的に有名なスーパーカミオカンデがその代表的なものですが、現在建設中なのが、大型重力波望遠鏡KAGRA(かぐら)です。KAGRAの正式名称は、Large-

scale Cryogenic Gravitational-wave Telescopeの頭文字をとってLCGTと言いますが、建設開始を受けて広く愛称を募集し、KAGRAという名前が選ばれました。重力波は、宇宙から飛来する波ですから、神様に捧げる音楽という意味の「神楽」とかけていて、さらにKAmioka GRAvitational-wave telescopeを省略したものと解釈することもできるようになっています。

● KAGRAの特徴と観測目標

すでにKAGRAの主な特徴は特集記事の前半で述べられていますが、ここでおさらいをしましょう。

正式名称LCGTの中に入っているCryogenicというのは、極低温という意味です。KAGRAは、レーザーの光を3kmの真空パイプの中で何度も往復させ、往復にかかる時間の変化で、重力波による時空の歪みを検出するという構造をしていますが、光を往復



↑ KAGRAの非公認ゆるキャラ「かぐらちゃん」です。

池ノ山 (標高1368m)



KAGRAのL字型のトンネルは座標に見立ててYアーム、Xアームと呼ばれています。



(上) 現地には、地元のご厚意で公民館内に東京大学宇宙線研究所・重力波推進室の神岡分室が設置され、新しい施設棟も建設が進んでいます。(下) 神岡分室のスタッフのみなさん(左から、沖中さん、川上さん、古田さん、高山さん)。

図01 KAGRAは神岡鉱山内に建設される光路の長さ3kmの光干渉計型重力波望遠鏡です。



図02 KAGRAが建設されるトンネル内の様子です(くわしくは24ページへ)。

させるために用いる鏡をマイナス253℃まで冷却しているのです。この鏡はサファイアできていて、冷却するとブラウン運動と呼ばれる粒子のランダムな熱揺らぎが抑えられ、その分だけよりわずかな重力波の影響も検出できるようになります。鏡を冷却するという試みは、大型望遠鏡の中では初めてのものです、KAGRAの大きな特徴の一つとなっています。

地下設置と鏡の低温化に並び、KAGRAのもう一つの特徴は、量子非破壊計測の導入です。重力波を検出するために鏡の位置を正確に知ろうとすると、ハイゼンベルグの不確定性原理から、感度にある限界が生まれてしまいます。そこでKAGRAでは、鏡の位置ではなく重力波の影響について精度がよくなるような信号取得法を採用しています。量子非破壊計測を導入するのも大型検出器では初の試みとなっています。

KAGRAが完成すると、例えば中性子星連星からの重力波については、およそ6億光年先からの信号でも検出できるようになります。遠くまで見えるようになるということは、より頻繁に重力波を観測できるということです。宇宙にどれだけの中性子星連星があるかはおおまかにしか見積もられていませんが、KAGRAは年間10回程度は観測できるだろうと予想されています。中性子

星連星は重力波を放出しながら接近し、最後は合体してブラックホールになります。接近過程と合体の瞬間の重力波を解析することで、中性子星の内部構造などが判明するでしょう。他にも、ブラックホールの振動や超新星爆発など、さまざまな天体現象について、重力波の観測を通じて新しいことを知ることができると期待されています(10~14ページ)。

● KAGRAの建設と完成予定

KAGRAの建設が始まったのは2010年です。建設にかかる総予算は150億円ほどで、第一段階の完成が2015年末、最終段階の完成が2017~18年というスケジュールになっています。アインシュタインが重力波の存在を予言したのが1916年ですから、KAGRAで重力波を検出するとして、その証明までに100年余りの年月を要したことになるわけです。欧米でもKAGRAと同程度の感度をもつ大型望遠鏡が建設さ

れていて、アメリカのAdvanced LIGOは2016年頃、イタリアのAdvanced Virgoは2017年頃に観測を開始する予定になっています。ドイツでもGEO-HFという望遠鏡が観測を続けています。他の分野では違うかもしれませんが、重力波の場合は、日欧米の間では競争関係よりも協力関係が成立しています。その理由は2つあって、第一が重力波がどちらの方向から飛来してもよいようにするために、第二が重力波と突発的な雑音を見分けるためです。日欧米が協力して国際的な観測ネットワークを構築して、重力波を捉えるのです。

KAGRAは、東京大学宇宙線研究所が中心となり、国立天文台や高エネルギー加速器研究機構などが参画した共同研究プロジェクトとして運営されています。最近では、海外からの研究者も多く参加していて、総メンバー数は200人を超えています。真空装置、高出力レーザー、低温鏡など、それぞれの分野のエキスパートが最高品質の部品を提供し、世界最高レベルの感度を実現します。



図03 欧州連合代表部で開催された国際会議の集合写真です。

- それでは、次のページから KAGRA の詳細について解説します。順番に、①「KAGRA のトンネル建設」(24 ~ 25 ページ)、②「KAGRA の防振装置」(26 ~ 27 ページ)、③「真空と冷却・熱雑音の低減」(28 ページ)、④「真空と冷却・観測天文学の共通技術とその違い」(29 ページ)、⑤「鏡とその評価について」(30 ページ)、⑥「KAGRA の補助光学系」(31 ページ)、⑦「重力波測定器における量子雑音と量子測定理論」(32 ページ)、⑧「KAGRA データ解析スクール継続中！」(32 ページ)をご覧ください。

① KAGRAのトンネル建設

取材・文：島田卓也（サイエンスライター）＋編集部

2013年の暮れ、東京大学宇宙線研究所でトンネル工事の施工監理をしている古田清司氏の案内で、掘削作業の現場を見せて頂いた。

KAGRAのトンネルは岐阜県飛騨市にある神岡鉱山の一つ、スーパーカミオカンデなどの観測施設と同じ池ノ山の地下200mに作られている。ビームスプリッターなどの実験装置が集中する中央エリアを起点に、国道41号線に沿って南北にYアームが、跡津川沿いに東西にXアームが、それぞれ3kmの長さで伸びる。Yアームは貫通したばかり、Xアームは2.5kmまで掘削が進んだところだ。

作業坑を抜けてすぐの中央エリアは、断面積130平方メートルという大空間になっている。これは一般的な二車線のトンネルよりひと回り広い。さらにその上には、KAGRAの高さ15メートルにもなる防振装置付きの真空タンク（クライオスタット）の上部を通すためのトンネルが掘られ、巨大な二層構造になっている。この大空間の頑健性を確保するため、弾性波トモグラフィ調査を3次元的に行う、という先端的な方法が用いられた。そこで得られた岩盤強度の立体分布をもとに、中央エリアの外壁にはロックボルトとよばれる補強用鋼材が効果的に打設されている。

一方、XアームとYアームは、横幅が4mという、車がすれ違うのも困難な小断面のトンネルである。KAGRAのトンネル工事には発破を用いた工法が採用されているが、岩盤に孔をあけて爆薬を詰め、爆破し、崩れた岩を運び出す、という作業サイクルは、細く長いトンネルを重機や車両が何度も往来すると効率が悪い。そこで、爆薬を詰める孔を、4mもの長さであけ（通常は約1.5m）、1回の発破で掘れる距離をかせぐ「長孔発破」と呼ばれる工法が用いられている。さらに重機や車両にも通常より大型のものを用いて作業効率を高めることで、多いときには1日4回の発破を行い、工事に求められたスピードを実現している。

作業坑や実験室も含めると延長7500mに渡るトンネル工事全体は、3月に完了する計画だという。もうまもなくだ。ところで、掘削が進むXアーム2.5km地点のすぐ先には、北20号と呼ばれる断層が待ち構えている。さらにその先は横山衝上断層を境にして、飛騨片麻岩より軟質な堆積岩に変化する。そうすれば補強のために何らかの補助工法が必要になる可能性もある。道路トンネルとちがひ、KAGRAのトンネルは途中で地質が悪いからといって計画を変更して曲げるわけにはいかない。「ここまでくれば後戻りはできない。何が何でもやらなければならない。（工事を進める人たちも）日々が祈る気分だと思う」と古田氏が言う通り、最後まで気の休まらない難工事が続いている。



① 神岡支所に置かれていたKAGRAトンネル掘削用の「ドリルジャンボ」の模型。先端に伸びる2本のドリルアームが特徴的。② トンネルの建設を担当している鹿島建設の事務所で工法の解説について伺った。③ 真空パイプが設置されるKAGRAのトンネルは、横幅4mと小断面ながら長さが3kmとユニークで、工事にもさまざまな工夫が施されている。④ トンネルの正確な直線をガイドするレーザー光。⑤ 中央エリアから約2.5kmの地点のXアームの掘削現場。ドリルジャンボから伸びる2本の強力なドリルが轟音を上げながら長孔発破のための深い孔を硬い岩盤に穿つ。⑥ トンネル掘削工事は湧水との闘いでもある。写真は2013年末に貫通したYアームからの湧水（中央エリア）。

KAGRAのトンネルから掘り出したもの

現地取材でお世話になった、KAGRAのトンネル工事の施工監理をされている古田清司さんのインタビュー記事をお届けします。

「もともとは地元の飛騨市にある小さなゼネコンで、国土交通省の仕事を40年くらいやらせて頂いていたんですよ」。

東京大学の職員の立場でKAGRAのトンネル工事の施工監理をしている古田さんは、岐阜と富山の県境の川を縫って走る国道360号線の整備工事のほとんどを手がけてきた、地元における橋梁トンネル工事のエキスパートだ。国土交通省から優良技術者として顕彰を受けたこともある。定年を迎え、これまでの経験を活かさないかと考えている時に、飛騨市の職員からKAGRAのトンネル工事を紹介された。

「KAGRAのトンネルは研究用なので、構造や仕様が特殊なところもあるし納期も短い。でもそこにやり甲斐を感じて、お手伝いすることになりました」。2012年7月、つい一年半前のことだ。

古田さんには土木工事に対する譲れない信念がある。「土木工事には求められる規格があって、たとえば、技術的に究極の仕上げを100として、その現場に見合った適正な品質として65でよいという規格なら、当然65のレベルで顧客には受け取ってもらえます。でも、それを75の仕上げに高めて納品したものは、間違いなく長持ちします。それは何を作っても同じこと。予算は同じでも、そのプラス10の実現に向けて創意工夫を重ねることが、人にも喜ばれ、自分にとってもよりよい仕事を続けていくための力になるのですね。ですから今は、とにかくいいものを作りたい。そうすれば先生方の不安要素も

減らすことができるだろうと、自分は思ってます」。

そこには入念に検討された環境や安全への配慮も含まれている。

「コストありきではなくて、本当にやらなきゃならないことはきちっとやる。土木の世界で譲れないのは、その見極めと責任なんです」。今は発注側の監理者として、なるべく高い点数で引き渡せるものを工事を担当する鹿島建設にも求めている。

「そういう高い目標を掲げて、ともに力を尽くすことで、お互いの立場を越えた信頼が生まれるのだと思います」。

品質の高いものづくりを通して、人と人との繋がりを築いてきた古田さんは、地元の人たちにも、もっとこの事業に関わってほしいと思っている。そして、これからのKAGRAに古田さんが願うことは、KAGRAの建設に関わる全ての人の想いを代表しているようだった。「このトンネルはたいへんな難工事です。だから求める水準も高くなります。それだけに、完成したら、ずっと大切に使用してもらって、やがて大きな科学的成果が生まれたら、それは建設に携わった土木屋冥利に尽きるというものです」。

プラス10のトンネルのその先を、古田さんは掘り進む。



古田清司さん
(東京大学宇宙線研究所)



● Xアームの掘削現場。ドリルジャンボの後ろに発破で崩した岩石（ズリ）を掻き集める大型機械が控える（左の車両）。これも小断面のトンネルで効率良く作業を進めるために投入された機械の一つ。



⑦ 中央エリアのセンター（X・Yの各光路の交点）、すなわちKAGRAのビームスプリッターが置かれる地点からXアームの入口をのぞむ。左上に見えるパイプは、爆破で生じるガスを坑外に送り出すための排気ダクト。細くて長いKAGRAトンネルの掘削工事には必須の設備だ。⑧ 同じく交点から既に貫通したYアームの入口をのぞむ。この先には、正確な直線で掘られたトンネルが3km続く。⑨ 中央エリアの直上に広がるもう一つの掘削空洞。二層構造になった上層階は防振装置室が設けられ、足元に開けられる縦穴を通して、下層階に設置されるクライオスタットに鏡が吊り降ろされる。ライトで照らされた地面の直下が07・08の撮影地点。

●現場を案内していただいた鹿島建設の栗山氏。現場を切り盛りし、岩質や湧水の状況を日々見極めながら、現場の安全と工事の進捗に精力的に取り組んでおられます。

② KAGRAの防振装置

高橋竜太郎（重力波プロジェクト推進室）



● KAGRAの防振の概要

干渉計型重力波検出器は試験質量である鏡の間隔が、重力波による空間のゆがみによって変化するのを検出しようとするものです。マイケルソン干渉計のそれぞれの腕に配置された2つの鏡の間を光が往復する時間の差を干渉した光の位相の変化として捉えます。測定すべき位相の変化は鏡の間を行き来する光の往復時間と共に増加するので、鏡の間隔は出来るだけ大きくする必要があります。KAGRAでは鏡の間隔は3kmです。重力波による鏡の変位は 10^{-19} m程度ですから鏡に十分な防振が必要であることは容易に想像できます。例えば100Hzでは $1/10^9$ （10億分の1）以下の防振比が必要です。

重力波検出器における防振の目的は大きく分けて2つあります。ひとつは既に述べたように、重力波の観測帯域において地面振動による鏡の変位が重力波検出の雑音とならないようにすることです。これは鏡を多段振り子によって吊り下げることで実現できます（08ページ）。もうひとつの目的は低周波での鏡の変位を小さくすることです。干渉計を最適な状態に保つためには鏡の間隔を一定に保つ必要があります。これを「干渉計をロックする」と呼んでいます。干渉計をロックするためには鏡をアクチュエータで制御する必要があります。アクチュエータが出せる力を大きくすれば大きな変位でもロックできますが、アクチュエータ自身の持つ雑音や、大きな力を鏡に与えることによる非線形な効果によって観測帯域において雑音が導入されます。そのため、アクチュエータが出せる力には限度があり、鏡の変位は0.1ミクロン以下に抑える必要があります。この部分の防振を担う装置を特にプレ・アイソレーターと呼びます（図01）。

を示します。装置全体は空気の屈折率の変化による干渉計への影響、空気による鏡への機械的・音響的影響や汚染を避けるために真空中に設置されます。

最上部にプレ・アイソレーターが取り付けられます。これは水平方向の防振を行う倒立振り子と垂直方向の防振を行うGAS（幾何反ばね）フィルターの連なりから構成されています。3本脚の倒立振り子がGASフィルターの初段部分を支える構造となっており、倒立振り子を制御するための変位センサ、加速度計、およびアクチュエータが各3つずつ配置されています。倒立振り子の共振周波数は30mHzに設定されます。一方GASフィルターの共振周波数は各段で0.2~0.3Hzに設定されます。垂直用の変位センサとアクチュエータが中心部に配置され、制御によって共振をダンプすることができます。

プレ・アイソレーターの下にはペイロードと呼ばれる鏡の懸架装置が吊るされています。ペイロードの各段における共振をダンプするため、変位センサとアクチュエータが一体になったものが取り付けられています。センサにはLEDとフォトダイオードを組み合わせた光センサが、アクチュエータには磁石とコイルを組み合わせた電磁アクチュエータが用いられます。

● TAMA300を用いたの防振装置試験

現在国立天文台ではKAGRA用防振装置の試験が行われています。図02・03は鏡の懸架装置の試験

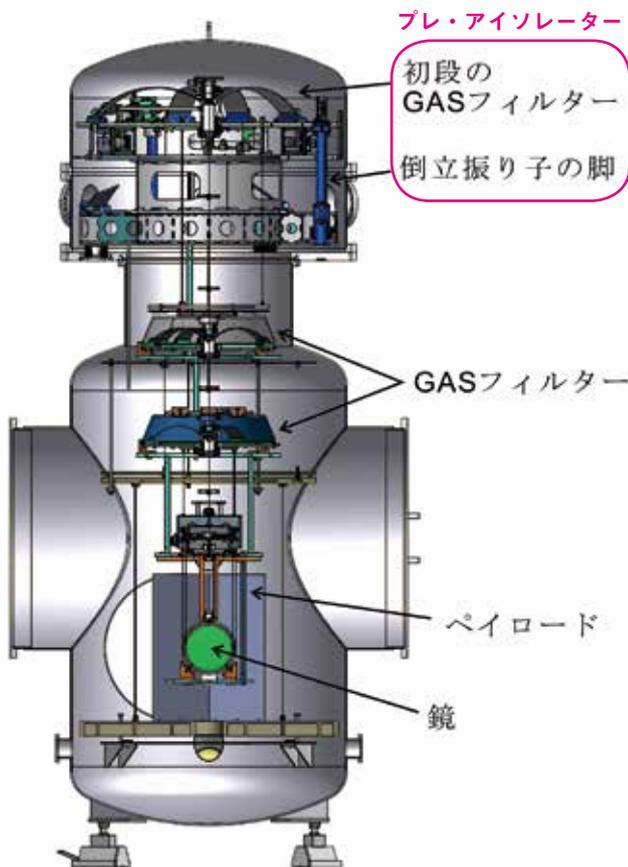


図01 KAGRAの防振装置の一つ。真空槽の中にプレ・アイソレーターやペイロードが配置されています。

● KAGRAの防振装置

図01にKAGRAの防振装置の一つ



図02 開発中のペイロード。鏡を懸架する最終段の防振装置でプレ・アイソレーターに吊るされます。KAGRAの鏡は、5段にも及ぶさまざまな防振振り子装置を組み合わせることによって、極限まで振動を低減します。

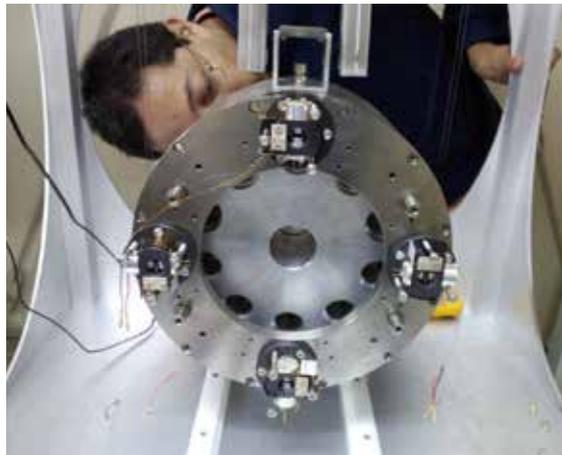


図03 鏡の懸架装置の試験の様子。鏡を包み込むように吊り下げられた部分にセンサやアクチュエータが取り付けられています。

を配置し、さらにペイロードを吊り下げます。TAMA300の長基線を使った鏡の揺れの評価などが予定されています。

●最後に

KAGRA用防振装置の開発には長年TAMA300で培った技術や経験が生かされています。KAGRAの設置サイトである神岡鉱山の地下の地面振動レベルは三鷹の1/100と小さく、KAGRAの防振装置と組み合わせることによって、極限レベルの微小変位環境を実現することが期待されています。

の様子です。装置に取り付けられているセンサやアクチュエータを用いて振り子の特性を測定しています。

プレ・アイソレーターを含んだシステム全体の試験をするためには大きな真空槽が必要です。そのため国立天文台に設置されている重力波望遠鏡TAMA300の設備を利用します。TAMA300の西エンドに設置されている直径1mの真空槽の上に新たに直径1.5mの真空槽を設置しました(図04・05)。この中にプレ・アイソレーター



図04 既存のTAMA300の真空槽上部に設置された直径1.5mの真空槽。この中にプレ・アイソレーターが設置されます。

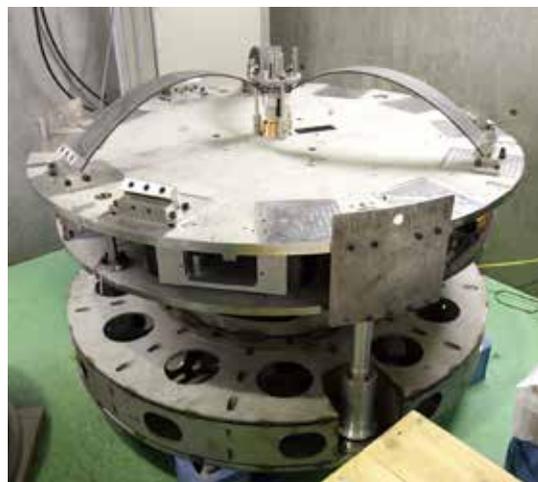


図05 試験中のプレ・アイソレーター。倒立振り子がGAS(幾何反ばね)フィルターの初段部分を支えます。手前に倒立振り子の脚が1本と、上部に反り返ったGASフィルターの3本のばねがわかります。図04の上部真空槽に納められます。

防振系の開発に挑むグローバルなスタッフ Ramsey Lundock (重力波プロジェクト推進室)

KAGRAの防振系の開発を担う国立天文台・重力波プロジェクト推進室には、世界中から高い技術を持ったスタッフが集まって研究・開発を続けています。重力波観測のグローバルな広がりを感じることができます。「防振系はKAGRAの鏡を吊るす重要な部分です。機械物は設計通りに動かないことも多く、苦労が絶えませんが、みんなといっしょにがんばります」(防振系開発チーフの高橋さん)。

KAGRA防振系の開発スタッフ
(左から)石崎秀晴(NAOJ)、Eric Hennes(Nikhef)、Ramsey Lundock(NAOJ)、Alessandro Bertolini(Nikhef)、高橋竜太郎(NAOJ)、Ettore Majorana(Sapienza University of Rome)、関口貴令(東京大学)、Joris van Heijningen(Nikhef)、我妻一博(Nikhef)、Fabián Erasmo Peña Arellano(NAOJ)

出身は米国。大好きな日本で世界的な研究ができて嬉しいです(ランドック)



③ 真空と冷却「熱雑音の低減」

山元一広 (東京大学宇宙線研究所)



●熱雑音の特徴

重力波を検出するためには非常に微細な光の往復時間の差を測る必要があります。ある意味究極の精密測定と言えます。精密測定である以上様々な雑音を取り除く努力が必要となります。しかし、現代の物理学は測定に関して限界を与えます。熱雑音はそのうちの一つです。

熱雑音の最も有名な例はブラウン現象です。水に浮かんだ花粉からでた微粒子（花粉そのものではありません）が水分子のランダムな衝突によって常にジグザグとランダムな運動をするという現象で、微粒子の位置測定の限界を与えます。アルバート・アインシュタインは、これを記述する式を与えました（1905）。彼の式によるとランダム運動を起こす力は温度が高いほど、また物体が水中を移動するときの水から受ける抵抗が高いほど大きくなります。抵抗が大きいというのはそれだけよく分子と衝突しているということで、このため熱雑音が大きくなります。この抵抗と熱雑音の関係はおおよそ半世紀のちにより一般的な形（揺動散逸定理）としてまとめられます。

●内部弾性振動の除去

重力波検出器の場合、反射面の位置の熱揺らぎが重力波検出の限界となります。この熱揺らぎとしては2つ考えられます。一つは鏡自体が動くことです。重力波検出器の鏡は図01のように吊るされます。この“振り子”が揺らぐと鏡自体の位置が変わります。もう一つは図02のような鏡の形自体が変わる内部弾性振動です。検出器

は真空中に置かれるので空気による抵抗はありません。しかし鏡やそれを吊るワイヤー自体が内部に散逸（抵抗）を持ちます（もし散逸がなければ一度振動をはじめたら永遠に振動を続けますがそれはありえません）。揺動散逸定理はこのような物質内部の散逸にも適用できます。つまり鏡とワイヤーは内部の散逸ができるだけ小さい物質で作られる必要があります。現在欧米で開発が進められているAdvanced LIGOおよびAdvanced Virgoでは熔融石英で作られた鏡が熔融石英で作られたファイバで吊るされます。これは熔融石英が非常に小さい内部散逸を持つからです。

●冷却とサファイア鏡

ではこの熔融石英で作られた鏡とワイヤーを冷やすとさらに熱雑音は小さくなるでしょうか。残念ながらそうではありません。熱雑音は温度と散逸で大きさが決まりますが、散逸自体が温度によって変わります。残念ながら熔融石英は低温で非常に大きい内部散逸をもち、むしろ熱雑音は常温より大きくなってしまいます。KAGRAではサファイアで作られた鏡をサファイアワイヤー（図03）で吊るします。サファイアは低温で常温より小さい内部散逸を持つため、温度を下げることによって効果的に熱雑音を下げるができます。KAGRAの鏡の温度の目標は20K（-253℃）です。これが実現できれば、鏡の熱雑音は常温のおおよそ1/10になります。

KAGRAはkmスケールの重力波検出器として初めて鏡を冷却

します。KAGRAのさらに10倍高い感度を目指して計画されているヨーロッパのEinstein Telescope（33ページ）でも鏡を冷却する予定です。このため低温技術はKAGRAのみならずさらに先の将来にとっても重要なものとなっています。

さらに詳細をお知りになりたい方は『低温工学46（2011）426』（https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsj/46/7/46_7_426/_article-char/ja/）をお勧めします。なおこの号（2011年7月号）では重力波の特集が組まれています。

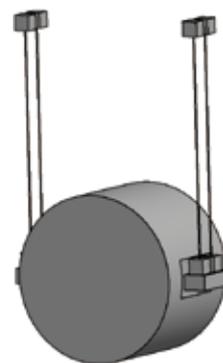


図01 重力波検出器の鏡はこの図のように吊るされます（29ページ・図02）。

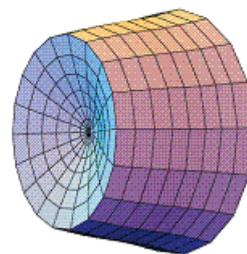


図02 コンピュータグラフィクスによる鏡の内部弾性振動の一例。



図03 ノギスの上に写っているのがサファイア鏡を吊るサファイアワイヤー（品質調査のためのテストピース）。

④ 真空と冷却「観測天文学の共通技術とその違い」

東谷千比呂（東京大学宇宙線研究所）



●防振仕様の冷凍システムの開発

サファイアの鏡を20K (-253℃)に冷やすには、クライオスタットと呼ばれる真空容器の中に鏡を入れて、機械式の冷凍機を使います。冷凍機は高圧ヘリウムガスを断熱膨張させて低温をつくりだす構造上、必ず振動が発生します。鏡から冷凍機へ熱を吸い上げる伝熱経路には、効率よく熱を伝えるために非常に熱伝導率の良い金属を用い、一方で振動ができるだけ伝わらないように振動吸収機構が組み込んであります。それでも冷凍機と鏡は物理的につながっているため、熱が伝わる経路を伝って、冷凍機やさらには地面からの振動が鏡へ伝わります。KAGRAでは冷凍機で発生する機械的な振動を、神岡鉱山の地面振動以下まで、言い換えると冷凍機からクライオスタットまでの間に振動を約1/100以下に減らすように設計しています。

一方で、冷やす物の量（熱質量）が大きいのもKAGRAの特徴です。1台のクライオスタットで1枚のサファイア鏡（直径220mm、厚さ150mm、重さ約23kg）を冷やすために、冷やす部分の構造物だけでも重さが約1500kg以上になります。これらを全て冷やすのに、2段式パルスチューブ冷凍機を4台使います（図01）。

● 10^{-7} Paの超高真空仕様

鏡は3kmの干渉計の2本の腕の両端に1枚ずつ、つまり干渉計全体で4台のクライオスタットを用意します。クライオスタット1台の大きさは直径2.6m、高さ4.3m、重さ約11トン（21ページ・図01）で、中に4

人が入って作業できるようになっています。内部には二重の輻射シールドがあり、外側シールドは約80K (-193℃)、内側シールドは約8K (-265℃)に冷やされます。真空中に残っている気体分子なども干渉計の感度を悪くさせることから、クライオスタット内部は超高真空（圧力で言うと 10^{-7} Paもしくは 10^{-9} Torr）仕様になっています。これを実現するため、クライオスタット内壁は洗浄性を高め不純物の付着を防ぐために電解複合研磨で鏡のようにピカピカに仕上げられています。また各部品の表面から放出されるアウトガスを極力低く抑えるために、クライオスタット内で使う材質やその取り扱いにも厳しい基準を設けています。

●KAGRAで使われる真空と冷却技術の特徴

熱雑音を減らして感度を上げるための装置冷却は、可視・赤外・電波などの観測装置でも基本です。これらの観測装置とKAGRAの一番大きな違いは、KAGRAはモニター装置であることです。特定の天体を追尾したり、露出時間をかけたりすることはありません。冷却した状態で感度を維持することが大事ですから、長い目でみてメンテナンス部分を極力少なくし、装置のダウンタイムを減らすことも課題のひとつです。いずれにしても、可視・赤外・電波分野で現在最新鋭として使われている地上の大型冷却観測装置

と比べても、KAGRAの温度範囲に大きな差はなく、用いる機器類（真空ポンプや冷凍機）や材質はほとんど同じです。異なるのは、KAGRAでは熱質量が数倍大きく、また冷却装置として要求される圧力や振動の制限が2桁ほど厳しく、そこに労力とお金のかかる経験が積まれています（図02）。

KAGRAで使われる真空・低温技術は、既存の基礎技術を最大限に駆使した高度な技術であり、望遠鏡や観測装置の大型化・高性能化に伴いこれまでより高い精度で観測装置を制御する必要に迫られるようになる近い将来、観測天文学共通の基礎技術として活用できると期待されます。



図01 試験中の2段式パルスチューブ冷凍機。1つのクライオスタットに4機が取り付けられます。

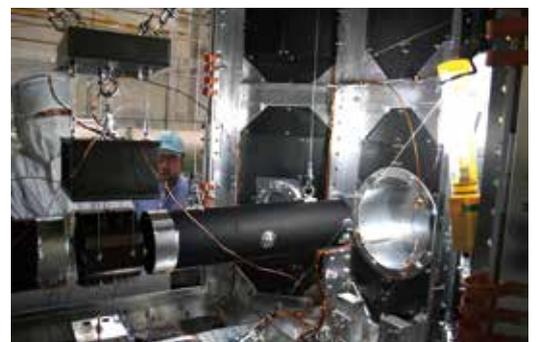


図02 東芝の工場で真空・冷却試験を終えたクライオスタットの内部。プロトタイプ鏡（左下に見える懸架された黒くて短い筒状のパーツの中）などが納められた大きな箱状の内側シールドは約8K (-265℃)まで冷却されます。

⑤ 鏡とその評価

上田 暁俊、辰巳 大輔（重力波プロジェクト推進室）



●求められる鏡の性能

KAGRAで用いられる鏡に対する要求値は大変厳しく、反射率 $R < 99.99\%$ 以上です。1-Rは鏡を透過する光と、散乱等で失われる光の量となりますが、ここで失われる光の量は、数ppm（100万分の1）以内の必要があります。計測すべき量は、反射、透過、損失、そして鏡や基板の表面形状となります。

干渉計において、鏡と光源であるレーザーは基本コンポーネントであり、製作技術と評価技術を持つことは、将来的な干渉計の性能向上にも関係し、極めて重要な事です。そこで、製作技術と評価技術の開発は、プロジェクト始動に間に合わせるために、おおよそ5年ほど前よりスタートしました。開発目標としては、損失数ppmの鏡作成に必要となる、基板研磨（スーパーポリッシュ）や成膜等、鏡作成の全工程を、一つの場所で一貫して行えることでした。

鏡作成では、シグマ光機（株）

がイオンビームスパッタの装置導入を検討している時期であり、良いパートナーを得る事が出来ました。

●鏡の評価システムの開発

平行して、鏡の評価システムの開発を進めました。測れていない物は作成されたとはいえ、鏡にスペック付け出来る体制を整えました。光共振器のフィネスから反射、損失、透過を厳密に決める装置、基板や薄膜からの散乱量を計測する装置、顕微鏡下で散乱の有無を調べる装置、薄膜の屈折率を求める装置、薄膜のダメージプロセスを見るための装置、鏡の表面粗さを観測する装置といった、鏡評価に必要な装置の整備を行いました。これらの装置は、計測の要求値が厳しいため、手作りの物も多く、多大な労力を要しました。また、外部研究所の協力を得、TEMやXPSを使用し、物性的アプローチも可能となりました。シグマ光機（株）とは、成膜条件を変えつ

つ200近い試料の計測結果を成膜行程へフィードバックし、反射率 $< 99.99\%$ 、散乱損失 $< 8\text{ppm}$ の鏡の安定的な作成に成功しています。世界の成膜メーカーのコーティング性能を評価した内、このレベルにあるのは3社のみで、その内2社は、天文台と共同研究を行った、シグマ光機（株）と東海光学（株）です。東海光学（株）については、研磨施設を持たないので、成膜のみが可能です。

●鏡の製作と今後の展開

評価結果を製造工程へフィードバックし、競合メーカーを増やしていく事により、鏡製作コストを抑えることが可能になり、プロジェクトタイムラインに合わせた鏡の作成が可能になる等、限られたプロジェクト予算と時間を有効に活用するための土壌が出来上がりました。図01はKAGRAプレモードクリーナー用のコーティングを施した鏡で、反射率99.99%程度、損失 $< 8\text{ppm}$ の性能で作成が終わり、プロジェクトへ納品されています。

KAGRAで使用する鏡は、長時間高い光出力にさらされるため、高光耐力が必要となります。また、膜質の経年変化等による特性変化は、干渉計の感度へ影響します。したがって、今後、これらの問題を解決する必要があります。そのためには、物性的アプローチが重要となっていきます。また、この開発で得られた経験を、重力波干渉計に留まらず、天文観測装置の超広帯域ARや狭帯域フィルタの作成といった、様々な分野へ拡張したいと考えています。



図01 超低損失誘電体多層膜鏡（シグマ光機作成）。

⑥ KAGRAの補助光学系

阿久津智忠（重力波プロジェクト推進室）



●補助光学系の重要性

カメラや望遠鏡ではレンズが重要な部品です。このような光学機器の結像の原理を説明する図には、物体とレンズとフィルム（や目）が描かれ、それでいたいところは説明されてしまいます。しかし実際の製品にはそれ以外の部品、たとえばカメラならばシャッターも必要となります。同様に、KAGRAという、3kmもの巨大なトンネルや、その両端にあるサファイアの大きなミラー、そしてそれを冷やす冷却装置などに目を向けられがちですが、現実には、それだけでは高性能な干渉計にはなりません。補助光学系グループの役割は、KAGRAの干渉計の実装上の課題のうち、とくに光学的な部分を解決することです。これにはさまざまなものがあるのですが、以下ではこの中から、迷光対策についてお話します。

●迷光対策

青空はなぜ青いのか、という問いへの答えはいろいろあると思いますが、この後の話に関連することと言えば、それは太陽の光を空気の分子が散乱しているからです。たとえ昼間でも、日食のときのように太陽が地球から隠されると空は青くはなりません。これは、空気の分子が自発的に発光しているのではなく、他に照らす光源（この場合は太陽）からの光を分子が散乱したものです。このように、光の散乱というのは身の回りでおこるとてもありふれた現象です。もしもこの文を電子書籍やPCのモニターではなく、印刷物として読んでいるのであれば、それは紙面が

何かの光源に照らされて光を散乱しているからと言えます。

改めて言えば、KAGRAとは、腕の長さ3kmもの巨大な光干渉計を用意して、重力波によってその長さが極微小に変化する様子を捉えようという装置です。さて、光干渉計の中でレーザー光線はさまざまな光学部品を通り抜けますが、このときにレーザー光の一部は光学部品によって散乱されます。問題はこの散乱光で、これに適切な対策をしないと重力波望遠鏡の性能が損なわれてしまい、重力波を見つけれられません。小見出しにある迷光というのは、この散乱光に代表されるような、本来の目的には必要は無いが現実問題としては発生が避けられないような余分な光のことで、重力波望遠鏡に限らず光学製品全般にとって大敵です。

補助光学系では、このような迷光の影響を抑えるため、光を吸収するような表面に黒色処理を施した様々な大型のバッフルやダンパーを開発しています。

技術的に難しい点は、これらの黒色表面が高真空（ 10^{-7} Pa）環境で使えるようにホコリや脱ガスの少ないもので、かつバッフル類の設置箇所によっては低温（20 K=-253℃程度）にも耐えねばならないということです。また、大型（直径80 cm程度）の構造体の表面に黒色処理を施すとすると、工業的にとりうる手段も限られてきます。これら性能とコストとを考慮しつつ現在、まさにバッフル類を製造しているところです。

KAGRA Baffle system

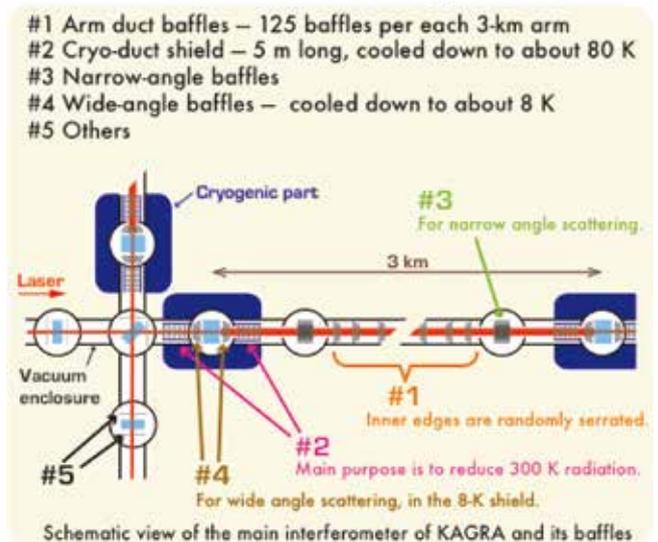


図01 KAGRAの迷光対策システムの概要。大きく分けて5種類のバッフルやダンパーが必要。

Example of a large baffle



図02 大型バッフルの試作品。

⑦ 重力波測定器における量子雑音と量子測定理論

中村康二（重力波プロジェクト推進室）



「弱測定」の提唱者であるYakir Aharonov氏が来日した際の小規模研究会での写真。同氏はAharonov-Bohm効果で世界的に有名な研究者です。この研究会には「小澤の不等式」の提唱者である小澤正直氏も参加してくれました。

重力波の測定では、様々な雑音が重力波測定器の感度を制限します。そのために鏡の防振や低温下による雑音低減の工夫がなされています。それらを駆使し、極限まで雑音を低減した後に残る雑音が、量子力学の「不確定性」に起因した量子雑音です。将来的にはこ

の量子雑音の低減も必要で、それには量子力学の測定理論に根ざした測定方法が必要です。このため、重力波観測の分野では、「量子非破壊測定」という量子雑音を低減するため工夫が考案され、2000年代にはこの分野での大まかな理解は確立したと考えられています。

その一方、近年、量子計算や量子通信を動機とした「量子測定理論」が、重力波観測の分野とは独立に、量子力学基礎論の分野で発展しています。そこでは、「小澤

の不等式」という量子力学の「不確定性」に対する数学的定理の提唱とその実験的検証や、「弱測定」というこれまでの量子力学での測定とは異なる測定手法が議論されています。

実は、この「量子測定理論」のもともとの動機は重力波観測にあったのですが、1980年代の量子測定に関する論争の後、両者は独立に発展しました。

そこで、量子力学基礎論に根ざした「量子測定理論」で提唱されている測定手法の重力波観測への応用や、「量子測定理論」の観点から重力波観測における「量子非破壊測定」を見直すことなどで、量子雑音の低減のさらなる可能性を探る研究もしています。

⑧ KAGRA データ解析スクール継続中！！

中村康二（重力波プロジェクト推進室）

国立天文台ニュース2013年4月号（10ページ）で報告したKAGRAデータ解析スクールが継続され、2013年9月27日～28日に、東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター（RESCEU）において開催されました。今回は、RESCEU、KAGRA、科研費新学術領域「重力波天体の多様な観測による重力波物理学の新展開」が協力して主催し、KAGRAデータ解析、データ管理サブシステム、そしてRESCEUの運営により行われました。このスクールは、来る重力波観測に向けてデータ解析を担う人材育成を目指し、理論—実験の枠を超え、重力波データ解析に興味を持つあらゆる方を対象に、データ解析の基本的な講義および演習を行う形で開催されてい

ます。今回の参加者は70名を超え、KAGRAへの注目度を感じさせるものでした。

今回はパルサーからの連続波のデータ解析がテーマとなり、招待講演として小嶋康史氏（広島大学）、Rutger van Haasteren氏（NASA）を迎えるとともに、伊藤洋介氏（東京大学）を主な講師とする連続波データ解析の講義と演習が行われました。伊藤氏はその講義の冒頭で、「重力波を一番最初にみるのは他の誰でもなくデータ解析をしている人です」と説き、その言葉に多くの受講生が目を輝かせていました。

今後重力波天文学の創設をめざすにあたり、データ解析は理論と実験をつなぐ要です。それを担う人材を育成するこのようなスクー

ルが今後も継続することを切に望みます。



図01 Rutger van Haasteren氏の講演を聴く受講者たち。

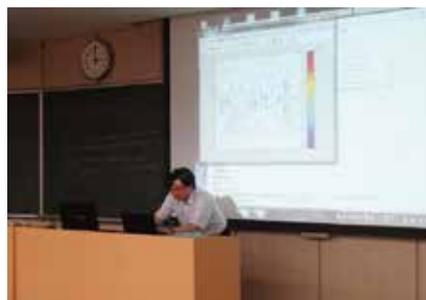


図02 演習の実演をする伊藤洋介氏。

KAGRAによって拓かれた重力波天文学の扉は、さらに続く第三世代の重力波望遠鏡群によって、より大きな展開を見せることになるでしょう。未来の重力波天文学に向けて進められている将来計画や技術開発について紹介します。

重力波望遠鏡・将来計画と基礎実験

麻生洋一（東京大学大学院理学系研究科）

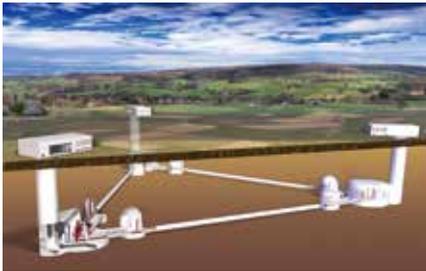


図01 アインシュタイン・テレスコープ (ET) の予想図（画像：ET Project）。

KAGRA等の第二世代重力波望遠鏡が動き出すと、いよいよ重力波の初検出がなされると期待されています。しかしこれは重力波天文学の始まりでしかありません。重力波をもたらす宇宙に関する様々な情報をより多く引き出すためには、さらに高い感度の望遠鏡を開発していく必要があります。また、様々な天体現象はそれぞれ異なる周波数を持つ重力波を放出します。そのため、検出可能な周波数範囲を広げていく事も重要です。ここでは、重力波望遠鏡の将来計画と、それに向けた国立天文台の研究を紹介します。

現在考えられている次世代重力波望遠鏡には、大きく分けて3つの方向性があります。一つ目は、KAGRAやAdvanced LIGOが成功した後に、それらの望遠鏡をさらにアップグレードする計画です。これはまだアイデアを出し合っている段階ですが、世界中の若手研究者が定期的に会議を持ち、様々なデザインの比較検討を行っています。

一方、既存施設の枠を打ち破

る大胆な計画を立てているのが、ヨーロッパのアインシュタイン・テレスコープ (ET) です。ETでは地下に一辺が約10kmという巨大な三角形のトンネルを掘り、そこに3台の干渉計を設置するという壮大な計画です (図01)。これによって、KAGRAの10倍という高い感度と、幅広い観測可能周波数の実現を狙います。2011年までに概念設計を固める研究が終了し、現在はその実現へ向けて必要な技術開発を行っています。ETでは干渉計を大型化するのみならず、熱雑音を下げるとともに鏡を低温にする予定です。そのため、世界に先駆けて低温干渉計を開発しているKAGRAの技術に対する期待も大きく、日欧の技術交流が盛んに行われています。

さらに、地球という枠からも飛び出すのが宇宙空間重力波望遠鏡です。地球は丸いため、地球上に建設可能な重力波望遠鏡の大きさは10km程度が限度となります。

また、地上は地面の振動などに起因する雑音が大きいため、低い周波数の重力波を捉えるのには向きません。そこで宇宙に重力波望遠鏡を建設するわけです。ヨーロッパのeLISA計画では、太陽周回軌道に3機の人工衛星を打ち上げます。これらの衛星は一辺約100万kmの巨大なV字型に配置され、その間にレーザー干渉計を構築します。日本のDECIGO計画では、腕の長さ1000kmの宇宙空間レーザー干渉計を用いて、eLISAや地上検出器では観測できない、0.1Hz付近の重力波を狙います。このような望遠鏡を用いると、地上望遠鏡では捉えられない超巨大ブラックホールの合体現象や、初期宇宙からの背景重力波等が観測できると期待されています。国立天文台ではDECIGO計画の第一段階である技術実証衛星 (DPF) の打ち上げへ向けて、様々な技術開発・プロトタイプ製作を行っています (図02)。

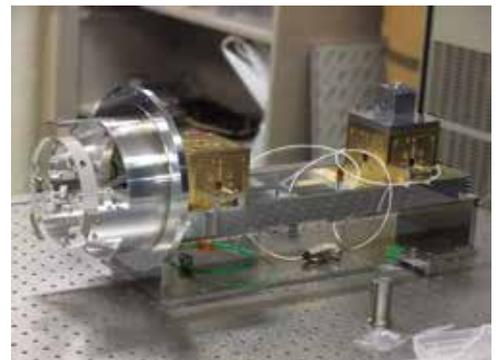
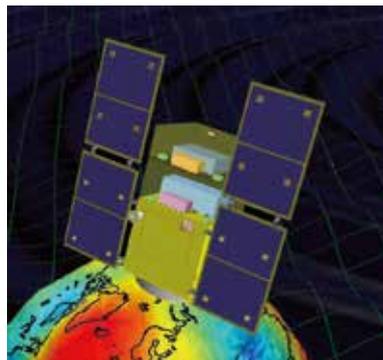


図02 DPFの予想図 (左) と、国立天文台で開発中の試験マスモジュール (右)。

重力波天文学が拓く宇宙

安東正樹 (重力波プロジェクト推進室/東京大学)



本特集号「重力波天文学が拓く宇宙」では、現在建設が進められている大型低温重力波望遠鏡KAGRAを中心に、重力波天文学で期待できる科学的知見、観測装置の概要や、そこで用いられる最先端の技術などを紹介してきました。

重力波は、電磁波とは異なり、物質との相互作用が非常に微弱です。そのため、アルバート・アインシュタインが一般相対性理論の帰結として存在を予言してから約100年が経とうとしていますが、未だに直接観測はされていません。しかし、物質との相互作用が小さいということは、逆に、非常に強い透過力を持つ、とも言えます。一度観測されてしまえば、これまでは直接観測することができなかった天体現象内部の動きや、初期宇宙を観測する手段になり得るのです。大型低温重力波望遠鏡KAGRAや、現在、欧米で建設が進められている他の重力波望遠鏡では、重力波の直接観測が十分可能な感度が実現される予定です。本特集号の一連の記事から、その「重力波天文学」の創成が目前に迫っていることや、そこから新しい宇宙像がもたらされる可能性を感じ取って頂けたのではないかと思います。

重力波の観測は、電磁波を中心とした既存の天文学とは質的に異なった新たな手段を私たちにもたらすことでしょう。その一方で、重力波天文学は、当然のことながら、それだけで全てを解き明かすものでもありません。ガンマ線バーストや超新星爆発といった高エネルギー天体現象は、重力波・ニュートリノ・多波長の電磁波といった様々な観測手段によって異なった時間的・空間的スケールを観測することで、初めて総合的に理解することがで

きます。宇宙の中でも最も激しいこれらの天体現象を理解することは、宇宙の法則に対する新しいフロンティアを切り拓くことにつながるでしょう。また、初期宇宙の観測においては、重力波を用いることで、電磁波では観測できない宇宙誕生直後の姿を知ることが可能になるでしょう。この観測で得られた知見は、マイクロ波背景放射などの電磁波観測で得られたものと組み合わせられ、宇宙の誕生と進化の歴史を解き明かす手掛かりになることでしょう。このような「マルチメッセンジャー天文学」において、重力波観測は、電磁波観測と双璧をなすものになるだろう、と考えています。

「重力波天文学」の最終的な目標は、宇宙の誕生と進化の謎を、直接の観測によって解き明かす、というものです。これは、天文学や、さらに広く言えば人類の科学の究極の目標の一つでもあります。天文学は、文明の発祥と同時に生まれた最古の科学の一つと言って良いでしょう。その根幹には、農業や文明の存続といった「実用的な」目的だけではなく、宇宙の誕生や人類の始まりを知りたいという、純粋な好奇心

があったのではないかと思います。現代の天文学における理解や手法は、神話に語られているようなものとは大きく異なっていますが、宇宙・人類の起源を解き明かしたいという好奇心は脈々と流れているのだと思います。重力波による観測は、宇宙を知る新しい手段をもたらし、本質的に人類が持つ、そのような好奇心に答えてくれる可能性を秘めているのです。

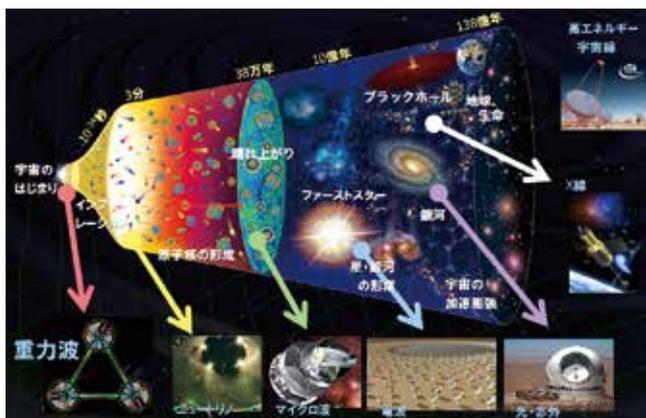


図01 宇宙の歴史とさまざまな観測手段。重力波を用いることで、マイクロ波背景放射(宇宙誕生から38万年後)よりも初期の宇宙を直接観測することが可能になる。

重力波は宇宙から飛来する波、宇宙が奏でる音。
KAGRA には、神様に捧げる音楽「神楽」の意味が込められています。

——そしてまったくその振子の音のたえまを遠くの遠くの野原のはてから、
かすかなかすかな旋律が糸のやうに流れて来るのでした。

(宮沢賢治『銀河鉄道の夜』/筑摩書房刊・新修宮沢賢治全集より)



中村康二さんが“Classical and Quantum Gravity”誌で優秀賞受賞

重力波プロジェクト推進室の中村康二さんは、専門の一般相対論の高次ゲージ不変摂動論の研究において、2012年に“Classical and Quantum Gravity”誌に掲載された論文が優秀論文賞「CQG High Light 2011-2012」に選ばれ、また“2012 Awards for Essay on Gravitation”に投稿した論文が佳作に選出されるなど、長年にわたる研究の成果が広く認められました。おめでとうございます。

人事異動

● 研究教育職員

発令年月日	氏名	異動種目	異動後の所属・職名等	異動前の所属・職名等
平成25年11月1日	寺田 宏	昇任	光赤外研究部 (TMT推進室) 准教授	光赤外研究部 (ハワイ観測所) 助教
平成25年12月1日	PYO TAE-SOO	勤務地変更	ハワイ観測所 (三鷹) 助教	ハワイ観測所助教
平成25年12月16日	川邊良平	勤務免	電波研究部 教授	電波研究部 (チリ観測所) 教授
平成26年1月1日	中里 剛	新規採用	電波研究部 (チリ観測所 (三鷹)) 研究技師	
平成26年1月1日	田澤誠一	配置換	光赤外研究部 (ハワイ観測所) 研究技師	光赤外研究部 (ハワイ観測所) 主任技術員
平成26年1月1日	PYO TAE-SOO	勤務地変更	ハワイ観測所 助教	ハワイ観測所 (三鷹) 助教

● 事務職員

発令年月日	氏名	異動種目	異動後の所属・職名等	異動前の所属・職名等
平成25年12月31日	潮 麻衣子	辞職		事務部財務課 (競争的資金等担当)

● 年俸制職員

発令年月日	氏名	異動種目	異動後の所属・職名等	異動前の所属・職名等
平成25年9月30日	松岡良樹	新規採用	光赤外研究部 特任助教 (国立天文台フェロー)	
平成25年9月30日	成影典之	新規採用	先端技術センター 特任研究員	
平成25年9月30日	FRIEDRICH DANIEL DIETER	新規採用	重力波プロジェクト推進室 特任研究員	
平成25年10月15日	神鳥 亮	新規採用	太陽系外惑星探査プロジェクト室 特任研究員	
平成25年12月1日	KIM JEOUNG SOOK	新規採用	水沢VLBI観測所 特任研究員	

編集後記

あれっ、今年は平成何年だっけ？……書面に日付を記載するときに手が止まることがしばしば。早く慣れねば。(O)

野生動物に関する本の著者のトークイベントに参加。全然違う分野の科学トークは新鮮だった。本を書くということについても勉強になること多し。いつ活かせるかはわからないが……。 (h)

ふれあい天文学で熊本へ。元気な中学生が迎えてくれました。熊本ラーメンおいしかったなあ。(e)

毎年のように年度末の追い込みで忙しい今日この頃です。そんな中、7~8月に予定されている会議への申込のメ切にも対応。目先のことで精一杯なのに、半年先のことなんか知らないよ。(K)

寒暖の差が大きくなっています。雪の量は例年と変わらずですが、雪が解けて再度凍った朝が一番滑りやすいのです。しかし、まだ今年は一度も雪で滑って転げていない。(J)

【ニュース】『東京都心45年ぶり大雪、成田空港では6000人以上足止め』。ハワイからの帰路、もの見事に巻き込まれてしまいました…。でも食料、マット・寝袋は支給されたし、空港内は暖かで、意外と過ごしやすかったです。(K)

国立天文台前のバス停から、凍つく星空を眺めていると木星+冬の大三角が、巨大な南十字をなしているのに気づきなんとなく嬉しくなった。(W)

国立天文台ニュース NAOJ NEWS

No.247 2014.02

ISSN 0915-8863

© 2014 NAOJ

(本誌記事の無断転載・放送を禁じます)

国立天文台ニュース編集委員会

●編集委員：渡部潤一 (委員長・副委員長) / 小宮山 裕 (ハワイ観測所) / 寺家孝明 (水沢VLBI観測所) / 勝川行雄 (ひので科学プロジェクト) / 平松正顕 (チリ観測所) / 小久保英一郎 (理論研究部) / 岡田則夫 (先端技術センター) ●編集：天文情報センター 出版室 (高田裕行 / 福島英雄 / 岩城邦典) ●デザイン：久保麻紀 (天文情報センター)

★国立天文台ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話あるいはFAXでお願いいたします。
なお、国立天文台ニュースは、http://www.nao.ac.jp/naojnews/recent_issue.htmlでもご覧いただけます。

発行日 / 2014年2月1日

発行 / 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構

国立天文台ニュース編集委員会

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

TEL 0422-34-3958

FAX 0422-34-3952

3月号の研究トピックスは、すばる望遠鏡によるアイソン彗星の $^{15}\text{NH}_2$ (アミノ・ラジカルの窒素同位体) の検出成功をお届けします。

お楽しみに!

深
ら
り
キ
ョ
ク



図1 木村榮記念館に展示されている大森式地震計。

大森式地震計

田村良明 (水沢 VLBI 観測所)

アーカイブ・メモ

品名：大森式地震計

振子重量：45kg

周期：16～17秒

倍率：100倍

所在地：国立天文台水沢 VLBI 観測所

公開状況：水沢 VLBI 観測所の木村榮記念館で常設展示されています。



図2 記録部分。ドラムの記録紙は模造品。重錘式の時計仕掛けで駆動。



図3 振子部分の拡大。

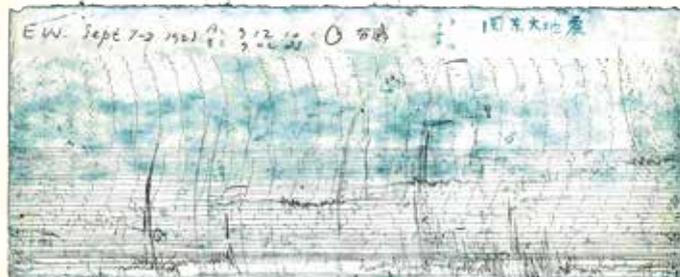


図4 1923年の関東大震災の記録(色調反転)。「有感、関東大地震」と書き込まれている。



図5 資料庫に保管されている煤書きの原記録。



図6 スキャナで読み取ったデータ。初期はDVD化、その後外付けディスクに保存。

国立天文台水沢地区の前身である緯度観測所(1899年創立)では、1902年から地震観測が開始されました。当時としては世界的に見ても貴重な地震観測地点でした。

地震観測を始めたのは、地球の自転軸の位置が変化する原因を探るといった大きな目的があったと思われますが、1891年の濃尾地震を契機に設立された震災予防調査会や、緯度観測所設立に関わった田中館愛橋氏の働きがあったものと思われます。また、1896年6月の明治三陸地震津波、同年8月の陸羽地震と大きな地震が東北地方で続き、地震観測の気運が高まっていたと思われます。

大森式地震計の原理は振り子を水平に近い形でつるし、振り子の周期を延ばして地震の揺れを計るというものです。振り子の揺れをこの原理で拡大し、それを煤を付けたドラム上の記録紙に引っ掻いて記録を残します。倍率を上げる(感度を高める)ためには、この慣性やペン先の摩擦に打ち勝つために、振り子を重くする必要があります。大森式の地震計では、初期は6.5kg(倍率6倍)、その後15kg(20倍)、1911年に45kg(100倍)と順次感度を高めていきました。

緯度観測所の地震観測は、原記録が観測開始時から全て残っているという点に大きな価値があります。そこで過去の記録を保存するため、東北大学が中心となって煤書きの地震記録を全てスキャナーで読み取るというプロジェクトが行われました。ファイルはTIF形式で1枚あたり約200MBになり、5万枚を超える資料を読み取っています。記録データは、たとえば同一地域で発生した過去の地震との比較や、震源位置の再決定に利用されています。

この地震計は1911年から1967年の間、東西成分の観測に使われました。観測データは測候所での観測と同じく、観測直後に気象庁に通報していました。地球の内部構造について核が発見されたのは1913～14年のころですから、地震学的にも初期から観測に関わっていたこととなります。1930年代に走時表を作成していた英国のジェフリース卿(1891

～1989)によると、「緯度観測所の観測は天文観測を行っていたため時刻精度が高く、地震データを安心して使えた」という話が伝わっています。観測当時はP波S波の到着時刻、最大振幅程度しか読み取っていませんでしたが、1923年の関東大震災の地震などでは波形データが後日読み取られ、耐震設計などの防災資料としても活かされています。

く
ろ
に
く
る