

ノーベル賞の梶田隆章さんにきく！

重力波と ニュートリノ振動

天文学はマルチメッセンジャーの時代へ

東京大学宇宙線研究所の所長として
最先端のプロジェクトを率いる梶田隆章さん。
2015年にノーベル物理学賞を受賞し、
現在も業務や講演で多忙を極める
梶田さんの独占インタビューが実現した。
宇宙の研究の将来展望をうかがうべく、
この5月末に国立天文台三鷹キャンパスで
お話を聞かせていただいた。

文・インタビュー／梅本真由美
撮影／渡部直樹
協力／東京大学宇宙線研究所、国立天文台

梶田隆章 (かじた たかあき)

東京大学宇宙線研究所所長・教授。IPMU 主任研究員を兼任。
大型低温重力波望遠鏡 KAGRA 計画代表。
埼玉県東松山市の出身。埼玉大学理学部で物理学を専攻後、
1981年に東京大学大学院理学系研究科に進学し、小柴昌俊氏
(2002年ノーベル物理学賞) の研究室に所属。戸塚洋二氏
(故人) とともに宇宙線研究に従事する。1988年にカミオカン
デにおける大気ニュートリノの観測からニュートリノの異常を報
告し、続くスーパーカミオカンデによる精密測定からニュートリ
ノ振動を確認、ニュートリノに質量があることを発見し1998
年の国際会議で発表した。2015年、Arthur B. McDonald
氏とともにノーベル物理学賞を受賞。同年、文化勲章を受賞。

ニュートリノ 振動の発見

物質のもとになる最も基本的な粒子のひとつが「ニュートリノ」である。梶田さんはニュートリノ振動の発見によって、ニュートリノに質量があることを世界で初めて観測で証明し、ノーベル物理学賞を受賞した。そもそもニュートリノ振動とはなんだろうか。梶田さんの発見は、現在のニュートリノ研究にどのような影響を与えたのだろうか。

物理への突破口が開かれた

— 梶田さん、ノーベル物理学賞の受賞おめでとうございます。まずはじめに受賞理由であるニュートリノ振動の発見と、ニュートリノに質量があることの関係について教えてください。

ニュートリノ振動というのは、3種類のニュートリノが飛行中に姿を変え、入れ替わっては戻るといった変化を繰り返す現象のことをいいます。

「ニュートリノが姿を変える」ということは「時間とともに姿を変える」ということです。時間が進まなければなにも変化できませんから、当然ですね。アインシュタインの特殊相対性理論では、もし物体が光の速さで進んだら時間は進みません。また、質量を持つものは光の速さでは進めないことも知られています。よって、ニュートリノが姿を変える → ニュートリノの時間は進む → ニュートリノは光よりゆっくり進んでいる → ニュートリノには質量がある、と結論づけることができます。

— 質量があるとわかった、どのような点が評価されたのでしょうか。

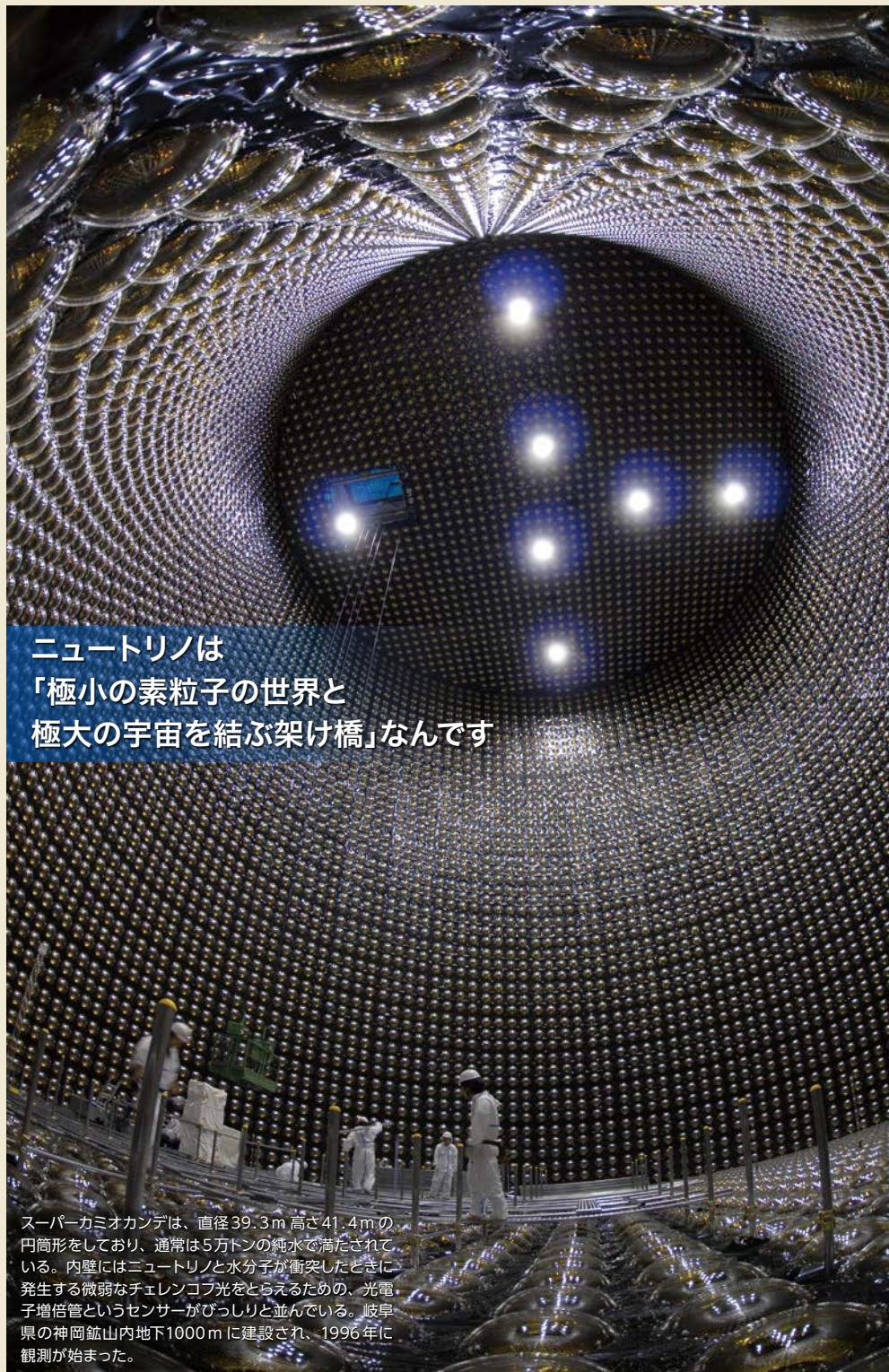
それまでは質量がないと思われていたニュートリノに質量があり、さらにその質量が非常に小さいという点です。

それまでの素粒子の標準理論では、「ニュートリノの質量は0」と仮定していたのですが、その大前提が真実ではなかったの

す。しかしそれよりも、ニュートリノ振動をとおして見つかったニュートリノの質量が、ほかの素粒子に比べて桁違いに軽くて、およそ10桁くらいは軽いわけです。その非常に小さい質量というのが、ものすごく重要だと思われています。

— ニュートリノの非常に小さい質量の発見によって、それまでの素粒子物理学の定説が修正され、いろいろな難問を解決していったのですね。

素粒子の質量というのは、2012年に見つかったヒッグス粒子が関係していると思われ



ニュートリノは
「極小の素粒子の世界と
極大の宇宙を結ぶ架け橋」なんです

スーパーカミオカンデは、直径39.3m高さ41.4mの円筒形をしており、通常は5万トンの純水で満たされている。内壁にはニュートリノと水分子が衝突したときに発生する微弱なチェレンコフ光をとらえるための、光電子増倍管というセンサーがびっしりと並んでいる。岐阜県の神岡鉱山内地下1000mに建設され、1996年に観測が始まった。

ていますが、ニュートリノの質量があまりにも小さすぎるので、ヒッグス粒子が関係した物理では直接は説明できないだろうと言われてしています。それまでの素粒子の標準理論を超えて、もっと深く素粒子の世界を理解していく必要があります。1988年以降、素粒子理論の見直しをせまるニュートリノの性質が次々に明らかにされてきました。その意味では、ニュートリノによって素粒子の標準理論を超える物理への突破口が開かれたと言えるでしょう。

次なる飛躍へ

— そうやってニュートリノの研究が進むと、どんなことがわかってくるのでしょうか。たとえばですけど、この宇宙はすべて「物質」でできていて、「反物質」が見当たりません。なんでそうなんだということを、ニュートリノを研究することによって、その理解に向けた第一歩の情報が得られるのではないかと考えています。

非常に小さいニュートリノの質量というのは、標準理論を超えた素粒子の理解には不可欠ですし、そしてそれが、宇宙の物質の起源という宇宙の大問題を理解する上でのポイントだと思っています。そのような意味をこめて、ある講演会のパンフレットに「ニュートリノは極小の素粒子の世界と極大の宇宙を結ぶ架け橋」と書きました。

ニュートリノ研究はさらなる発見を目指し、次のステージへ進もうとしている。スーパーカミオカンデの約10倍の大きさの装置「ハイパーカミオカンデ」を建設する計画だ。

— 将来計画であるハイパーカミオカンデですが、なぜこれだけの大きな装置が必要なのでしょう。

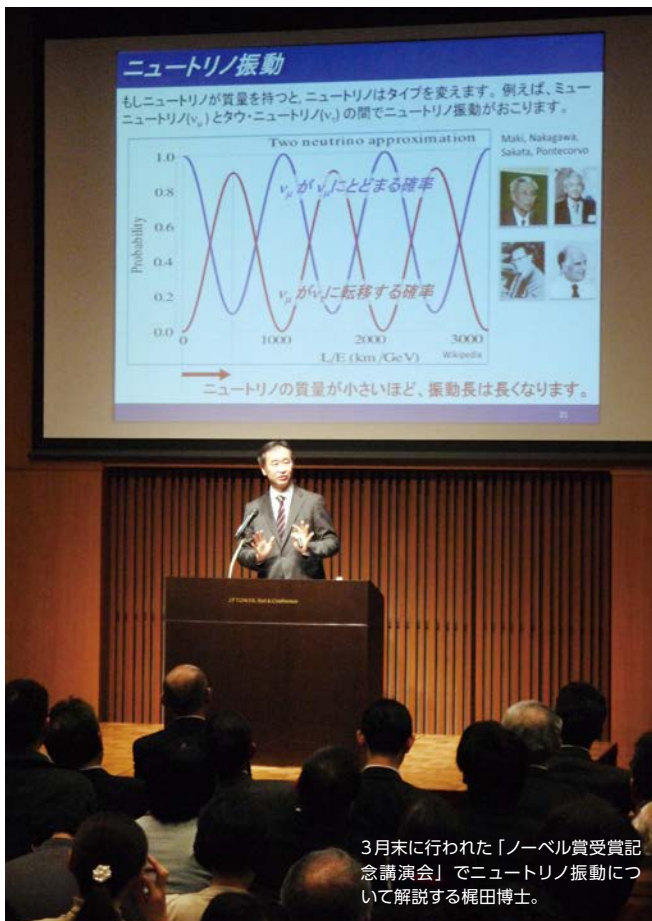
ニュートリノをとらえられる頻度は、単に物質の量に比例するんです。つまり水の量です。水を増やせばニュートリノがぶつかる頻度が上がります。非常に大雑把なたとえで

すが、スーパーカミオカンデで10日に1回だったものが、ハイパーカミオカンデでは1日1回はとらえられる、というような考え方です。まだ構想段階で、「プロジェクト」と呼べるほどのところまで至っていないのですが、

— ハイパーカミオカンデではどのような観測、実験を希望されているのですか。

すでに述べた宇宙の物質の起源の解明に向け、ニュートリノと反ニュートリノのニュートリノ振動に違いがあるかを観測したいと思います。また、ニュートリノの話題から離れますが、スーパーカミオカンデでは見つからない陽子の崩壊が、ハイパーカミオカンデの大きさになれば観測できるかもしれません。スーパーカミオカンデの大きさでは観測している陽子の数が少なすぎるので、もっとたくさんの数の陽子を観測すれば、もしかすると観測できるかもしれないわけです。

これらの観測を通して素粒子の統一理論や、宇宙の進化史の解明をめざしていきたいと思っています。



3月末に行われた「ノーベル賞受賞記念講演会」でニュートリノ振動について解説する梶田博士。

そこが知りたい天体物理 ①

解説／内藤誠一郎
(国立天文台天文情報センター)

ニュートリノの振動＝質量とは？

量子力学的に考えると、素粒子のエネルギー状態は波動関数で表現される。これは、複数の固有状態がそれぞれ異なる周期の波として同時に存在しており、常に重ね合わった状態にあることを意味する。ニュートリノが異なる質量の固有状態(仮に ν_1 、 ν_2 、 ν_3)を持つとすると、ある瞬間にはそれらのある確率で重ね合わせた状態で見えることになる。この重ね合わせ状態の違いが、電子型、ミュー型、タウ型という3つのフレーバー(香り)として現れている。異なる周期の波の重ね合わせの結果、「うなり」のように現れるフレーバーの種類が周期的に変化を繰り返す。これがニュートリノ振動だ。ニュートリノが振動しているということは、もともと固有状態として質量の違いを持つ、ということの結果なのである。

「非常に軽い」ことが重要なのはなぜ？

ニュートリノの質量は、クォークやレプトンといった素粒子に比べて100万分の1以下しかないほど軽い。その理由として考えられるひとつの可能性が、スピンの違うペアのニュートリノの存在だ。素粒子はスピンという角運動量を持っていて、観測されているニュートリノのスピンは全て左巻きだ。大統一理論に基づけば、左巻きニュートリノの質量は私たちの知らない右巻きニュートリノの質量と対になって決まり、右巻きニュートリノが非常に重い粒子であったとすると左巻きニュートリノが軽いことが説明できる(シーソー機構)。大統一理論は宇宙初期の超高エネルギーの世界を記述するために不可欠な理論であり、ニュートリノの質量の謎は、宇宙を支配する4つの力(強い力、弱い力、電磁力、重力)を統一的に理解するカギに繋がっている。



宇宙には、重力波を観測手段として
研究すべき天体が数多くあります

インタビュアーが素粒子や物理学に関して素人であることを前置きしたところ、梶田さんは言葉を選びながら、初心者にもわかりやすい語り口と朗らかな笑顔でお話してくださった。



りするようになる。重力波望遠鏡はこの伸縮を計測するわけだが、その伸縮は非常に小さく、たとえば地球と太陽の距離（1億5千万キロメートル）が水素原子1個分（0.1ナノメートル）動く程度だ。それを地球上で検出するためには、約3キロメートルの直線距離に対し、1兆分の1のさらに1億分の1メートルの変化をとらえる必要がある。

同等の性能をもつ重力波望遠鏡はアメリカに2台（LIGO）、ヨーロッパに1台（VIRGO）建設されていて、KAGRAは4台目となる。ライバルがひしめくなかで、日本のアドバンテージはあるのか。そしてKAGRAが果たしていく役割はなんだろうか。

日本の 重力波望遠鏡 KAGRA

重力波はアインシュタインの一般相対性理論から導出された「光速で伝わる時空のひずみ」である。今年2月には、アメリカの重力波天文台LIGO（ライゴ）で重力波を直接観測したと発表があった。日本でも重力波望遠鏡KAGRA（カグラ）の運用が始まろうとしている。一般相対性理論の発表から100年、ついに現実となった重力波の検出により、どんなことがわかってくるのだろうか。

KAGRAの「強み」

— ついに重力波が検出されて、重力波天文学がおもしろくなってきましたね。梶田さんが計画代表をつとめる最先端のKAGRAでは、岐阜県の神岡鉱山の地下で非常に大掛かりな工事をされたと伺っています。現在、KAGRAの進捗状況はいかがでしょうか。

今年の3月25日から31日まで24時間体制で運転を続けて調整をし、さらに4月11日から25日まで再び試験運転をしました。このあとは、本格的な観測に向けて、防振装置の設置などが必要です。感度を高めるために鏡をマイナス253度ぐらいまで冷やしますが、その鏡を冷やしての最初の試験観測を、2017年度中に行う予定で進めています。

重力波が来ると、2つの離れた物体の距離が、重力波の周期で伸びたり縮んだり

— KAGRAの特徴、強みについて教えてください。

ひとつは装置全体を地下につくったこと。風が吹いたり、波が打ち寄せたりして地面は常に振動していますが、地下に潜ることによって、極めて地面振動が少なく、温度・湿度が安定した環境に設置できますから、装置を安定的に動かすうえできわめて有利です。

もうひとつは一部の重要な鏡をマイナス253度という極低温まで冷やすことで、鏡自身の熱雑音を抑え、高い感度を実現できる点です。3キロメートルの腕の入り口と反対側にある2枚、それと90度の方向にある2枚の合計4枚を冷却して、中央実験室にあるいろいろな鏡は常温で使います。

— KAGRAの前駆的取り組みとして、国立天文台三鷹キャンパスにはTAMA300が、神岡にはCLIO（クリオ）がありました。どのような技術が開発され、KAGRAに受け継がれ

ているのでしょうか。

干渉計技術を学ぶうえで、三鷹キャンパスのTAMA300でやっていたことは、ものすごく役に立っています。TAMA300では地面の揺れを取り除く非常に高度な防振装置を開発してきました。それらの技術と経験がKAGRAに受け継がれています。また、地下でちゃんと動かせるとか鏡を冷やせば感度が良くなるとか、そういった日本独自の技術なり、ポイントということについては、CLIOで培っていると思います。

重力波天文学の未来

— 今年2月に発表されたLIGOによる重力波初観測の報にふれたとき、どう思われましたか？

率直に“よかった！”と思いました。まだそれほど感度が良くない状態で、2週間くらいの試験観測のデータでしたから、昨年は見つからないだろうというのが大方の予想でし

た。それがあったとなると、これは予想よりも相当数の重力波が観測できるのではないかと思うので、重力波天文学全体にとって非常に良いニュースだと思いますね。※注

— KAGRAの将来展望をお聞かせ願います。

重力波の天文学は、世界中の同様の検出器と協力してやっていくことになります。というのもレーザー干渉計による測定では、複数の設備が協調すれば、到達時間の差からどの位置から重力波が来たのか特定する

地表から200メートル
— KAGRAの強みは地下にあることです

3kmの腕トンネルに設置された真空ダクト。サファイアの鏡は、この真空ダクトの中にワイヤーで吊って設置されている。長さ12m、直径80cmのダクトを約250本縮結し、約3kmの高真空空間を構築している。

提供：東京大学宇宙線研究所 重力波観測研究施設

ことができるんですが、そうやって重力波源天体の方向を割り出すためには、少なくとも3台以上の干渉計による同時観測が必要だからです。

超新星爆発や中性子星合体、ブラックホールなど、宇宙には重力波を観測手段として研究すべき天体が数多くあります。日本としてはなるべく早く KAGRA をきちんとした装置に仕上げ、国際的なネットワークに参加し、一緒にサイエンスをやっていただけるようにしたいと思います。

そこが知りたい天体物理②

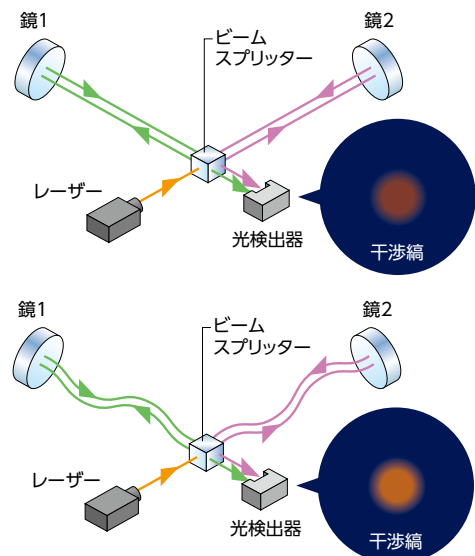
日本が誇るKAGRAプロジェクト

KAGRA は東京大学宇宙線研究所を中心に、国立天文台、高エネルギー加速器研究機構など国内外の大学・研究機関が協力して建設している大型低温重力波望遠鏡。基線長3kmのL字型に置いた鏡の間でレーザー光を往復させ、固有距離の変化を測定するレーザー干渉計型検出器だ。ノイズとなる鏡の振動を抑えるため、地面振動が小さい神岡鉱山跡が選ばれた。さらに、鏡をマイナス250度近くまで冷却することで熱振動を極力抑えている。鏡の基材は、高純度の単結晶サファイアだ。レーザー光の損失が非常に少なく、熱伝導率が高い性質も極低温冷却に向いている。



提供：東京大学宇宙線研究所 重力波観測研究施設

神岡鉱山の地下にあるKAGRAのイメージ。「KAGRA」のKAは神岡の頭文字から、GRAは重力をイメージする「Gravity」や「Gravitational wave」などに由来する。



直交する二方向の光路長が重力波の到来で伸縮すると、光の到達時間のずれが干渉縞の変化として検出される。

(東京大学宇宙線研究所サイト掲載の図を参考に作成)

注…インタビュー後の6月半ば、LIGOで2015年12月26日に史上2例目となる重力波の直接検出に成功したことが発表された。

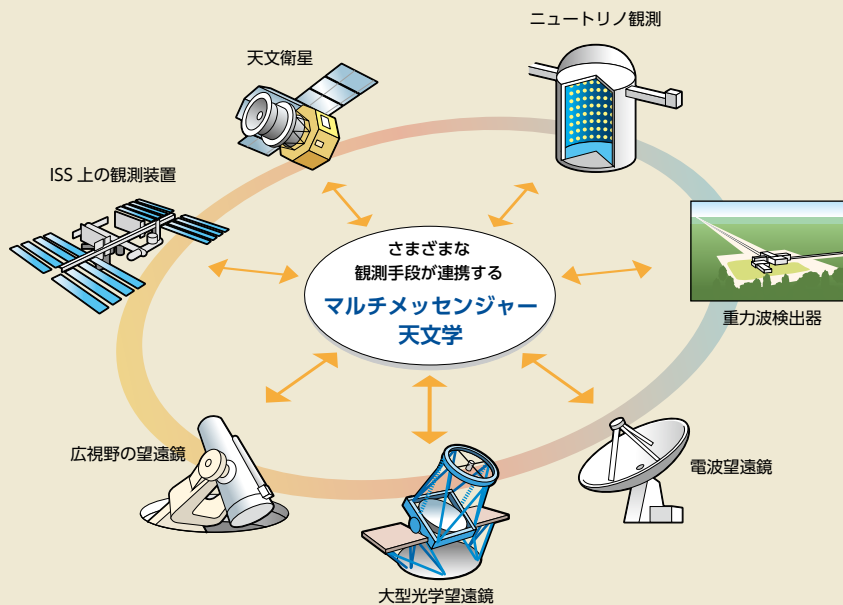
マルチ メッセンジャー 天文学の幕開け

ニュートリノ、重力波という目に見えない世界が、宇宙の物質の謎に迫るカギをにぎっていることや、予想以上に重力波を観測できそうなこともわかってきた。重力波源天体の方向を割り出せるようになると、その先にどのような展望があるのか。これまで培われてきた電磁波によるノウハウはどう活用されていくのだろうか。

総合的に調べる時代

——ニュートリノと重力波の観測施設が同じ場所にあることは、今後どう生きてくるのでしょうか？

重力波が観測できて、同時にニュートリノが観測できる可能性がありますので、そのあ



たりを担うのは重要だと思います。

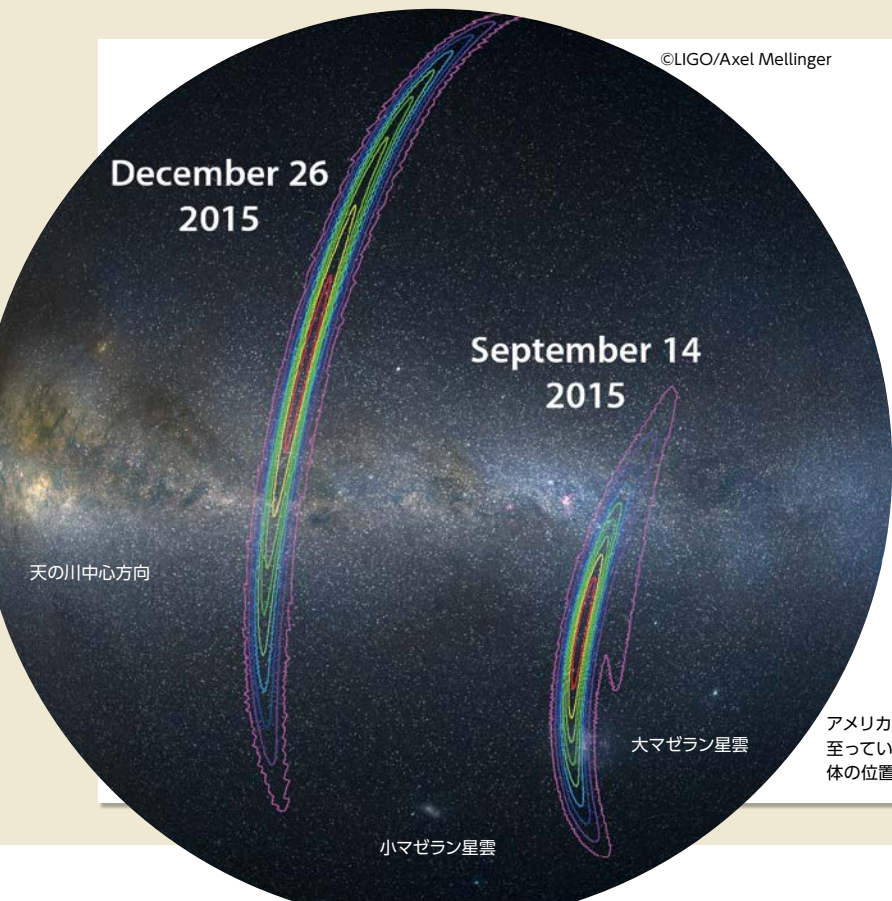
超新星爆発を例に挙げますと、ニュートリノも重力波もやってきますので、両方を同じ場所で観測できる「地の利」としては、2つのデータを何も気にすることなく比べられます。そうなれば、超新星爆発のときに、星の中心部で起こっていることが、いままでよりも非常にハッキリわかると思います。

——超新星爆発が起きると、ニュートリノが

先に出て、何時間とか何日とかちょっと遅れて光がでますが、その光を望遠鏡で観測すれば、超新星爆発の瞬間(ショックブレイクアウト)をとらえられるでしょうか。

重力波とニュートリノだけで、星の中心部の様子はわかりませんが、やはり超新星爆発の全貌まではわからないので、光での追観測が重要だと思います。

最初に重力波とニュートリノで超新星爆発を見て、そのデータを解析するとだいたい



そこが知りたい天体物理 ③

発生源を絞る連携観測

単体の重力波干渉計では、鉛直方向に対してどの角度から重力波が飛来したかを決定することしかできない。地球上の異なる地点に設置された3台以上の干渉計を統合して、ようやく天球上の領域を絞り込める。ニュートリノを検出するスーパーカミオカンデでは、電子と衝突して放射されるチェレンコフ光の広がり方から、粒子の飛来方向をある程度特定できる。しかし、これらの観測では10平方度程度の領域に絞り込むのがせいぜいだ。これは満月の50個分もの面積で、現象がどの天体で起きたのかを特定するにはあまりに広すぎる。10億光年以上先の銀河を分解しようと思えば10秒角(360分の1度)程度の分解能が必要なのだから。そのため、光学望遠鏡などでの観測によって天体を同定する必要があるだろう。ここで、広範囲を効率的に撮影できる観測装置が活躍する。すばる望遠鏡に搭載された超広視野主焦点カメラ(HSC)や東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡のために開発された広視野CMOSカメラ(トモエゴゼン)などとの連携に期待したい。

アメリカの重力波天文台LIGOはすでに2例の重力波を検出するに至っている(左図)。しかしどちらの観測でも、重力波源とされる天体の位置は極めておおまかにしかわかっていない。

こっちのほうからきている、というのがわかるので、あとはおそらく世界中の望遠鏡がそちらを狙って、最初は視野の広い望遠鏡で探査を始めることになるでしょう。場所が特定できれば、すばる望遠鏡などの高精度な望遠鏡で観測するのではないのでしょうか。

— LIGOのブラックホール合体の信号から、質量もどういふ現象が起こったかも、どれだけのエネルギーが放出されたかもわかってしまうのはすごい、と驚きました。

すごいですよね。ただ、重力波だけでは活動的なブラックホールなのか、まわりになにもない状態のブラックホールなのか、ジェットが出ているのかといった詳しいところまではわからないんです。そこを調べていくためには、電磁波の観測が絶対必要ですよ。

これからの天文学は、いろんな観測手段、いろんな波長を全部使って何が起こっているかを総合的に調べる時代になりましたので、

いままで以上にいろんな機関の連携が重要です。そうした連携をきちんとやっていかないといけないと思っています。

— それを、マルチメッセンジャー天文学と呼ぶのです。さまざまな国や機関との連携で、ご苦労もあるかもしれませんが、梶田さんにリーダーシップを発揮していただけるのは、とても心強いです。マルチメッセンジャー天文学で、宇宙の謎に総合的に迫っていく時代となった今、梶田さんが宇宙に感じていらっしゃる魅力とは？

宇宙にはまだまだ、わからないことがたくさんあります。われわれ宇宙線の研究者は光（電磁波）とはちょっとちがう方法で宇宙を調べて、みなさんと総合してよりよく宇宙を理解していくという形でがんばっています。

だいぶ方向性は違いますけど、両方あってはじめて、よりよく宇宙を理解できると思

ますので、宇宙線の研究者として、我々の分野もがんばっていきたいと思います。そして、若い方にぜひ宇宙の研究に参加してもらえればと思います。

— 宇宙の研究は本当におもしろい時代になったのです。私もわくわくしてきました。これからもご活躍を期待しています。梶田さん、本当にありがとうございました。

取材当日はあいにくの雨模様。インタビュー終了後、林正彦天文台長の「タクシーをお呼びしましょう」との申し出を「JRの駅までバスに乗りますから」と丁寧に辞退し、まっすぐな姿勢で歩いていかれた梶田さん。あのときバス停に並んでいた人たちはさぞ驚いただろう。

朗らかで、静かに情熱が伝わってくるお人柄に触れ、夢心地になりながら、梶田さんのエレガントな後ろ姿を見送った。

