

とやまと自然

第43巻冬の号1

No.171 2021

神岡地下から重力波で宇宙の声を聞く

宮川 治（東京大学宇宙線研究所 准教授）



KAGRA トンネル入り口から 3 キロメートル先の実験室エリア。
地中の奥深くおくふかに巨大な地下空間きょだいがあります。

かみおか 神岡地下から重力波で宇宙の声を聞く

みやかわ おさむ うちゅう (東京大学宇宙線研究所 准教授)



1. はじめに

富山と岐阜の県境にほど近い、岐阜県飛騨市神岡鉱山にある「KAGRA」(「かぐら」、注1)と呼ばれる重力波望遠鏡のお話をしたいと思います。望遠鏡と言っても、筒につけたレンズを目で覗くような普通の望遠鏡の形をしているわけではありません。「池ノ山」と呼ばれる標高1000メートルほどの山の裾近くに長さ3キロメートルのトンネルを東西方向、南北方向に2本掘り、そこにレーザー光を走らせて重力波をとらえる、非常に大きな装置です。この山の山頂直下には直径40メートル、深さ40メー

ルほどの穴に超純水を満たしたスーパーカミオカンデと呼ばれるニュートリノを検出するための大きな実験装置もあり、山の中全体が一大宇宙線観測施設となっています(図1)。

KAGRAのお話は追々していくとして、そもそも重力波とはいったいどんなもので、どこからやってくるのでしょうか?まずはそこから見ていきましょう。

2. 重力波の発生源

KAGRAが検出しようとしている重力波は、重さを持ったものが動き出すことで発生しま



図1. KAGRAの全体図。富山県と岐阜県の県境の山の中に、裾を走るように3キロメートルの腕を2つ持ったKAGRAがあります。ノーベル賞を受賞したニュートリノ検出器スーパーカミオカンデも同じ山の中にあります。

みやかわ おさむ りがくけい (東京大学理学系研究科物理学専攻にて博士号取得。その後渡米し、カリフォルニア工科大学でLIGOプロジェクトに参加。2008年末、KAGRA(当時の呼称はLCGT)プロジェクト推進のため帰国し、家族4人で富山市在住。現在、東京大学宇宙線研究所准教授。天体写真の撮影が趣味。)

す。例えば今、げんこつを握^{にぎ}って手をぐるぐる回^{まわ}してみてください。これだけでも重力波は出ています。でもこのような動きで出てくる重力波はあまりに小さいため、検出器^{けんしゅつ き とら}で捉^{とら}えることはできません(コラム1参照)。そのため、多少遠くても、ものすごく重たい星やブラックホールなどが、爆発^{ばくはつ}したりぶつかったりするなどの、宇宙^{うちゅう}スケールの出来事^こで出てくるくらい大きな重力波でないと、捉^{とら}えることができないのです。具体的には重たい星がその最後に起こす超新星爆発^{ちやうしんせい ばくはつ}や、中性子星^{ちゆうせいし}と呼ばれる非常に重たい星が2つ互^{たが}いにグルグル周りながら最後に合体^{ごうたい}する中性子連星^{せいしれんせい}合体、また非常に重たいブラックホール同士の合体などが重力波の源^{みなもと}となります。

3. 重力波の検出

実際に世界で一番最初に発見されたのは、ブラックホール同士の合体からきた重力波でした。アメリカの長さ4キロメートルの重力波検出器^{けんしゅつ き} LIGO (ライゴ) が、2015年9月14日に重力波^{はつけんしゅつ}を初検出^{おとず}しました。図2はLIGOを訪れた際に飛行機^{ひこうき}の窓から撮^とった写真^{しづしん}です(コラム2参照)。でも実はこの最初の重力波^{かんそく}、観測体制^{くわんそくたいせい}に入る直前のテスト動作^{けんしゅつ}の時に検出^{けんしゅつ}されてしまったのです。そのため、この検出^{けんしゅつ}が間違い^{まちが}いでないかどうか相当な検証^{けんしやう}が行われたと聞いています。結果、この重力波は本物だと結論^{けつろん}づけられたのですが、その後さらに感度^{かんど}が向上し、



図2.米国のLIGO観測所を訪れた際に、飛行機^{ひこうき}の窓から撮^とった写真^{しづしん}。砂漠^{さばく}の中に4キロメートルの2本の腕^{うで}が見えます。

何度も重力波^{けんしゅつ}を検出^{けんしゅつ}できているので、間違い^{まちが}いはなかったと言えるでしょう。この功績^{こうせき}により、LIGOは2017年にノーベル賞を受賞^{じゅんぱん}しています。検出^{けんしゅつ}からわずか2年、実際の公式^{じっさい}な発表^{はつぱつ}か

コラム1：重力波を発生させてみよう

ちょっと思考実験^{しやうこうじけん}をしてみましょう。例えば重さ1トンの丸い鉄球^{てつきゅう}を2個用意^{ようい}し、それを長さ1メートルの棒^{ぼう}でつなぎ、1秒間に100回ぐるぐる回^{まわ}します。ちょっと怖^{こわ}いですが、そこからわずか1メートル離れた^{はな}ところで、出てくる重力波^{そくてい}を測定^{そくてい}してみましょう。鉄球^{てつきゅう}が重ければ重いほど、2つの鉄球の距離^{きょり}が近ければ近いほど、そしてそれをできるだけ近くで測定^{そくてい}すればするほど大きな重力波^{とら}を捉^{とら}えることができます。ところが、これほど大袈裟^{おおげさ}な実験^{じけん}をしたとしても、発生^{けんしゅつげんかい}する重力波はKAGRAの検出限界^{けんしゅつげんかい}の10兆分の1くらいでしかありません。実際^{じっさい}にとらえることができるほどの大きな重力波は、地球上でできる実験^{げんかい}の限界^{げんかい}を遙かに超^こえたスケールの重さを持ったものが動く必要があるのです。

コラム2：LIGO時代の話

私も博士取得^{わたし}後アメリカに渡^{わた}り、2002年からLIGOメンバーの一員^{いちいん}として研究^{けんきゅう}していました。LIGOプロジェクトの本拠地^{ほんきょち}の一つカリフォルニア工科大学^{かんそくしよ}に約6年、その後LIGOのハンフォード観測所^{かんそくしよ}に半年間^{はんねんかん}ほどいました。そのころはまだLIGOの感度^{かんど}も今のKAGRAを少し良くした程度^{ていど}で、感度^{かんど}を上げるための努力^{にうりょく}を続けていました。カリフォルニアからハンフォードまで引越^{ひっこ}しする際^{さい}、海岸^{かいがん}を走るルート1号線^{ごうせん}を一週間^{いっしゅうかん}ほどかけてのんびりと家族^{いどう}と移動^{いどう}したのは今でもいい思い出^{おぼえ}です。また、ハンフォード観測所^{かんそくしよ}は砂漠^{さばく}の中にあるために乾燥^{かんそう}していて、夜^よになると地平線^{ちへいせん}間近^{まぢか}までくっきりと星^{ほし}がよく見えます。湿気^{しつげ}で地平線^{ちへいせん}近くの星^{ほし}が霞^{かすみ}んでしまう日本^{にっぽん}とは、気候^{きこう}も全然^{ぜんぜん}違います。

注1 KAGRAの「KA」は「かみおか」の「か」から名付けられています。「GRA」はgravitational wave(重力波)の「gra」から来ています。

ら1年半程でのノーベル賞受賞は、科学的に相当なインパクトがあったことを示しています。重要なことは、感度を向上していけば重力波検出の頻度は確実に増えていくことで、現在のLIGOでは1ヶ月に数回程度の頻度で重力波を検出するに至っています。

その中で特筆すべきは、中性子連星合体からの重力波の検出です。この出来事により、一瞬で地球数十個分の金ができたと考えられています。数多くの重い原子がこの中性子連星合体を元に作られたと考えられるようになり、原子の生成原因の一部は中性子連星であると、教科書に書き加えられるほどになっています。

この中性子連星の合体はこれまでにたった二回検出されたのみのめずらしい現象ですが、重力波と共にガンマ線や赤外光、可視光に至るまで様々な波長の光が明るく輝いたため、宇宙のどこで発生したのかがはっきりとわかっています。それ以外に検出された重力波は全て、どこで発生したかははっきりとしていません。ある程度の範囲内から来たということくらいしかわかっていないのです。

重力波の到来方向は、複数台の検出器に到達する重力波の到達時間の差から計算します(図3)。重力波は光と同じ速度で伝搬してくるので、地球に重力波がやってきても、離れた位置

にある検出器では検出する時間にずれが生じるのです。検出器同士の距離が離れていれば離れているほど、より到達時間に大きな差ができるために、どの方向から来たかの精度が上がります。そのため、欧米から離れたアジアに存在するKAGRAでの重力波検出が進めば、到来方向の精度の向上が期待されています。

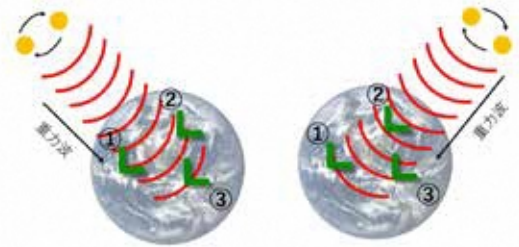


図3. 検出器のある場所により、検出する時間に差ができます。その時間差を正確に測定すれば、重力波がどの方向から来たかがわかります。例えば重力波が左上から来た場合(左図)は①、②、③の順に検出されます。一方、重力波が右上から来た場合(右図)は②、③、①の順に検出されます。

重力波が真上から来た場合



図4. 重力波が真上からやって来た場合の伸び縮みの様子。例えば人間は、ごくわずかだけのぽぽになったり、太っちゃよになったりを繰り返します。

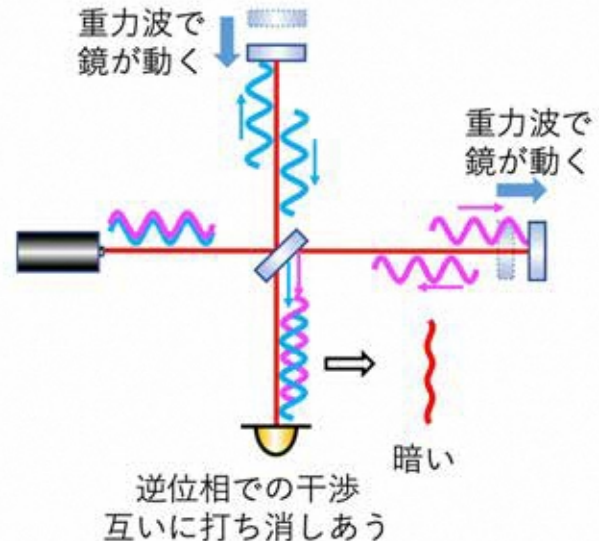
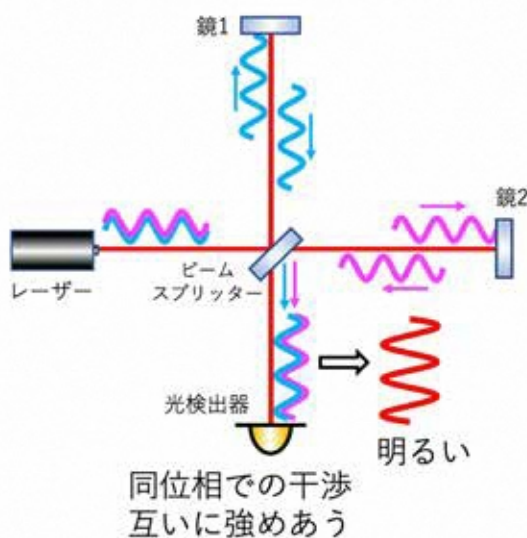


図5. マイケルソン干渉計を使った重力波検出の原理。重力波がやってくると鏡が動きます。その際、レーザー光の干渉によって光検出器での明るさが変化することで、重力波がやってきたことがわかります。

4. 検出原理

では重力波はどのように検出されるのでしょうか？過去には、アルミ合金の大きな塊の共鳴を利用する方法もありましたが、現在ではレーザー光の干渉（注2）から重力波が来たことを検出しています。重力波は地球に到達すると、ありとあらゆるものの長さを変化させます。例えば図4にあるように、重力波が真上からやってくると、ある時は縦方向が伸びて横方向が縮み、次の瞬間には縦方向が縮んで横方向が伸びるといったような動きをくり返します。

検出器はこの伸び縮みの長さを測ります。長さを測っているのです、重力波検出器というのは言ってみれば、「ものさし」ですね。ただし単に長さを測ると言っても、この伸び縮みの長さは相当小さな変化で、3キロメートルのKAGRAでさえも原子の核の直径のさらに1万分の1とか10万分の1とかいう、とんでもなく小さな変化を測定することになります。このような非常に小さな変化を見るために、レーザー光を使い、干渉という現象を見ることでその小さな長さの変化をとらえるのです。図5にあるように、レーザーから出た光は、ビームスプリッターと呼ばれる、光の半分を通し、光の半分を反射するような鏡を45度傾けて置くことで、ここで2つに分けられます。2つに分かれた光はKAGRAの場合、それぞれ3キロメートル先にある鏡で反射し、それぞれビームスプリッターのところに戻ってきて、再びここで重なり合います。その際、光は波の性質を持っているので、2つの光の波の山が重なると強めあって明るくなり、逆に波の山がずれると、弱めあって暗くなります。重力波がやってくると、2つの鏡までの距離が変化し、光の波の山にズレを起こします。そのズレからくる明るさの違いを検出することで、重力波がきたことを知るといわけです。

5. 大型低温重力波検出器 KAGRA

KAGRA プロジェクトは2010年にスタートし、2011年の東日本大震災で約1年間の遅れ

注2 干渉：光と光が重なり合い、明るくなったり暗くなったりすること。図5参照。

は出ましたが、2012年から実際の建設が始まりました。建設はトンネル掘削から始まり、約2年間かけて神岡鉱山内に2本の腕と中央部、両エンド部（表紙写真参照）を含めて総延長7キロメートルのトンネルを掘りました。L字型に配置された2本のトンネルは、直径4メートル、長さがそれぞれ3キロメートルありま



図6. 建設当初のトンネル。水漏れがひどい状態でした。



図7. 現在の3キロメートルのトンネルの様子。直径80センチメートルの真空パイプがほぼ完全に一直線に設置され、その中をレーザー光が行き来します。



図8. 実験室の中央部分。中央にはタンクがあり、その中の鏡で、光が左と手前に伸びるパイプ2つの方向に分けられ、それぞれ3キロメートルのトンネルを通り、その先に置かれている鏡に当たります。

す。トンネルの途中に断層が走っていて、水漏れには大変苦労しました。当初のトンネルは非常に過酷な環境で、図6に示すように、まるで嵐の中にいるような状況でした。当時は本当にこんな中で実験できるのだろうかと心配しましたが、溜まっていた水は徐々に枯れ、さらに天井や壁を吹き付けてコーティングしたことにより、今では快適な実験環境が実現されています。その後、長さ12メートルの真空パイプを約500本接続し(図7)、実験室エリアには真空槽や低温容器を設置し、その中に巨大なレーザー干渉計を設置しました。図8が現在の中央実験室の様子です。このエリアは、幅15メートル、高さ9メートル、奥行きが100メートルほどの巨大空間になっていて、人と比べてもかなり大きな装置が並んでいることがわかります。中央実験室の一部は、地下の中なのですが、二階構造になっています。上の階から厚さ5メートルの岩盤に直径1メートルの穴を開け、下の階まで真空パイプを設置し、その中に鏡をつるすために、ワイヤーを通してあります。

6. 鏡

KAGRAの中で一番重要な部品は重力波に直接反応する鏡です。メインの鏡は直径22センチメートル、厚さ15センチメートルの大きな人工サファイアでできています(図9)。

この鏡は長さ約13メートルのワイヤーで吊られていて、長い振り子構造になっています。鏡を振り子状にするのは、地面の揺れを鏡に伝

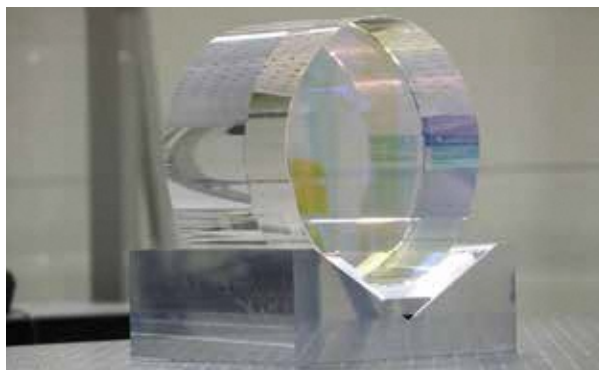


図9. 人工サファイアでできた鏡。不純物が無いので無色透明です。この鏡が長さ13メートルの振り子に吊られます。

えないためです。これは車のサスペンションなどを想像してみるとわかりやすいでしょうか。振り子とバネは物理的には同じような働きをします。車にバネがついていることで、地面のガタガタが人間には伝わりにくくなっていますね。振り子のもう一つの重要な役割は、重力波が来たときに、鏡に自由に動いてもらうことです。振り子自身が自由な動きの邪魔になると思われるかもしれませんが、振り子の共振よりも速い重力波が来た場合には、振り子に邪魔されずに鏡は自由に動くことができます。これを「自由質点」などと呼んだりします。

この鏡は、最終的にマイナス252度の極低温まで冷やされます。全ての物体は熱を持つと、熱で振動します。この熱振動が実は重力波からくる長さの変化よりも大きいため、重力波の観測にとっては邪魔になってしまいます。熱による揺らぎを抑えるために、鏡を極低温に冷やす必要があるのです。

これらの鏡をはじめ、レーザーや光検出器など全ての装置は、巨大な真空タンクの中に入っています。光が通る3キロメートルの腕も全て真空パイプで繋がっています。これは空気が残っていると、空気の密度からくる屈折率の揺らぎによりレーザー光が影響を受け、重力波を見ている3キロメートルの腕の長さが変わって見えてしまい、重力波で揺れているのか、レーザー光が揺れているのか分からなくなってしまいうからです。



図10. コントロールルーム。この部屋から地下にあるKAGRA全体をコントロールします。観測時もここが拠点になり、24時間体制で動作状態をモニターします。

7. KAGRA の制御

KAGRA は言ってみればものすごく大きなサイズのロボットです。例えば、全ての鏡の向きは当然正しい方向を向くように真空槽の外からコントロールされなければなりません。また、重力波検出器としてレーザーを正しく干渉させるためには、鏡の位置を最低でも1ピコメートル(注3)以下の精度でコントロールしなくてはなりません。しかも観測中は、研究者を含む全ての人は、坑内の実験室エリアに立ち入り禁止になります。これは人間の動き自身が重力波の検出にとってノイズになる可能性があるからです。

言い換えると、KAGRA は全てリモートで外部から操作されなければなりません。実際に、地表にあるコントロールルーム(図10)からKAGRA までは約7キロメートルの長さの光ファイバーケーブルで繋がり、リモートで制御されるのです。そう言った意味で、KAGRA は巨大なロボットなのです。しかも、自分で状況を判断し動作状態を変えるような頭脳も持ったロボットです。といっても、教えられたことを判断する程度の頭脳なので、例えば装置を改造し性能を上げるようなことは、人間の手で手間をかけてやる必要があります。

8. 感度向上

建設、実験装置の組み立て、何度かのテスト動作を経て、KAGRA が初めて3キロメートルの腕をフルに使い動作したのが2019年8月です。この時初めて重力波検出器としての能力を表す感度というものが測定されました。干渉計がどれくらいのノイズによって揺れていて、どれくらいの距離からくる重力波なら検出できるかという指標になるものです。当時はまだ初めての動作なので感度は全然良くありませんでした。その後の様々な改良により、半年の間に感度を約10万倍向上し(図11)、約300万光年先の中性子連星の合体を観測できるほどになりました。

ところで図11のグラフは、下の軸が周波数という1秒間に何回揺れるかを表した量になっています。縦の軸は感度を表し、下へ行けば行くほど感度が良くなったことを表します。一番感度のいいところが100ヘルツから1000ヘルツと、ちょうど人間の耳に聞こえる音の周波数と同じなのです。これは特に何かの操作をしたというわけではなく、ごくごく自然に重力波というものは人間の可聴域と同じ周波数の信号を持ち、ノイズを除去していくと重力波の音を実際に聞くことができます。今回のタイトルを「聞く」としたのはそういう理由からです。

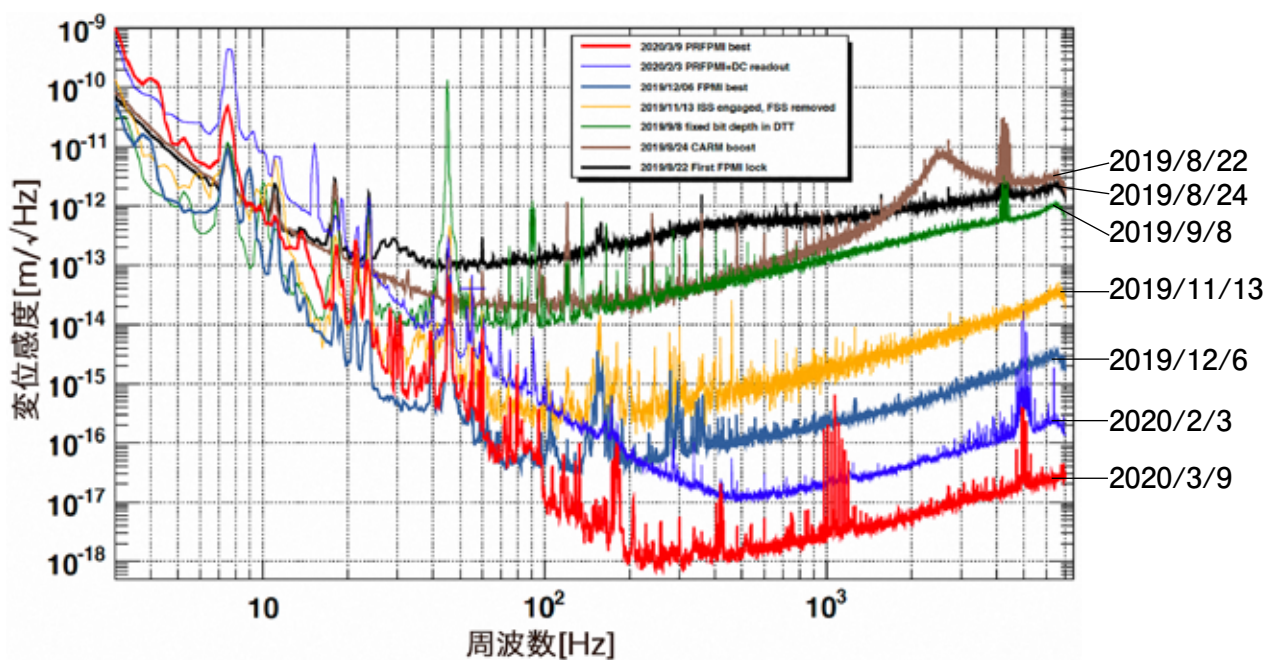


図11. 半年間で約10万倍の感度向上を達成。これは初期のLIGOと比べても驚異的なスピードです。

注3 1ピコメートル=1兆分の1メートル

9. 観測と今後の展望

このような過程を経て、2020年の2月と4月にそれぞれ2週間の重力波観測を実施しました。特に300万光年という最低限の目標を達成した4月からの観測は、本来LIGO、VIRGO（バーゴ）（ヨーロッパの重力波検出器）との共同観測になる予定でした。ところが、春からの新型コロナウイルスの影響でLIGOとVIRGOが共にストップしてしまい、共同観測は不可能になってしまいました。それでもドイツにあるGEO（ジオ）と呼ばれる600メートルの重力波検出器が稼働していたため、GEOとの共同観測を遂行し、これがKAGRA初の国際共同観測となりました。

現在の感度では、まだアンドロメダ銀河ほどの隣にある銀河で起こる現象しか見ることができません。より遠くの出来事を見るために、2020年10月からKAGRAはさらに感度を上げるためのアップグレード期間に入っています。今後2年間で、感度をあと数十倍上げる予定です。この感度が実現されれば、今から約2年後に行われるO4（オーフォー）と呼ばれるLIGO、VIRGOとの国際共同観測に参加し、重力波を十分に検出できると考えています。KAGRAの最終目標感度はそこからさらに5倍ほどの感度向上が必要になり、最終的には約7億光年先からの重力波を検出できるようになると考えられています。O4の次の観測、O5（オーファイブ）に向けて最終感度を目指す予定です。

重力波検出により、アインシュタインが1915年に発表した、一般相対性理論が相当な範囲で正しいということがわかってきました。また、ブラックホールが存在し、互いに衝突し合体するということがわかりました。2019年には電波望遠鏡によりM87と呼ばれる銀河の中心のブラックホールの姿が映し出されました。2020年のノーベル物理学賞が、ブラックホールの理論的研究をしたロジャー・ペンローズらに与えられたのも記憶に新しく、今後ブラックホールの研究がますます進むことが期待されます。

では、重力波の検出は1回だけで十分なので

しょうか？そんなことはありません。現在までに50例の重力波が検出され、今後さらにその数は増えていくでしょう。検出例が増えることにより、統計的な手法を用いることでより精度のよい観測やモデル化ができ、星の構造やより正確な宇宙年齢などがわかるようになるはずで、KAGRAがこの観測に加わることで、重力波到来方向の精度が高まると期待されます。また、中性子星の合体などによるめずらしい出来事において、様々な波長帯で観測する「マルチメッセンジャー」と呼ばれる動きがあります。これは、重力波検出をきっかけに世界中の天体観測機器が一斉に作動し出し、一緒に同じ方向を観測するような観測体制です。現在では、重力波は検出するだけという時代はもう終わりつつあり、天体観測の一手法として、他の天文研究分野と協力し、宇宙を解明する手法の一つになりつつある、劇的に変化している時代と言えます。我々はこのような「重力波天文学」と呼ばれる一学問分野を切り開いていこうとしています。

今後、KAGRAは数十年のスケールで活躍し、重力波を数多く捉えることになるでしょう。アジア、オセアニア地域の重力波研究の中心観測施設として、ますます発展していくことが期待されています。また、同じ山の中にニュートリノ検出器のスーパーカミオカンデがあり、さらにはハイパーカミオカンデと呼ばれる次世代のニュートリノ検出器の建設が予定されていて、超新星爆発での重力波とニュートリノの同時観測も期待されています。

もし国道41号を南下することがあれば、富山と岐阜の県境の山の中に巨大な実験施設があり、宇宙の謎を解き明かそうと日々努力している研究者がいることに、少しだけでもいいので思いを馳せ、応援していただけるととてもありがたいです。