

科学の 峰々

95

取材日：2018年3月26日
東京科学機器協会会議室



はらまきAINシュタイン氏の
イラスト：Sora

名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻・教授

川村 静児 先生 に聞く

AINシュタインの宿題の答え “世紀の大発見！重力波”で 宇宙の始まりを知る 上

聞き手：南 明則 日本科学機器協会 広報副委員長

佐藤 文俊 同 同

谷尾 俊昭 同 広報委員

外嶋 友哉 同 同

藏満 邦弘 同 専務理事

岡田 康弘 同 事務局長

(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)

川村 静児 先生のプロフィール

〈経歴〉

- 1989年 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修了(理学博士)
1989年 カリフォルニア工科大学 Research Fellow 後に Staff Scientist
1992年 イノバテック代表 宇宙科学研究所にて研究を行う
1993年 カリフォルニア工科大学 Staff Scientist 後に Member of Professional Staff
1997年 国立天文台 助教授、後に准教授
2011年 東京大学宇宙線研究所 教授
2017年 名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 教授

〈特筆すべき活動〉

- 2004年より3年間、アメリカの重力波プロジェクトLIGOの
プログラム助言委員会(PAC)のメンバー
2008年より5年間、重力波分野の国際的な取り組みをする
国際運営委員会(GWIC)のメンバー

〈著書〉

- 「重力波物理の最前線」(共立出版、2018年)
「重力波とは何か」(幻冬舎、2016年)



产学官との連携

— 2017年のノーベル物理学賞は「重力波」をLIGO(ライゴ)という観測装置で世界初観測したアメリカの研究グループが受賞しました。川村先生はこのLIGOのプロジェクトに携わり、観測の検出感度を劇的に向上させ、ノーベル物理学賞の受賞に大きく貢献した立役者だと国内外で報じられています。重力波の観測は「世紀の大発見!」だったわけですね。

川村 重力波は、アインシュタインが一般相対性理論で「重力の波があるはずだ」と予言したものです。それを2015年9月、LIGOが世界で初めて検出して、存在が証明されました。その年は一般相対性理論の提唱からほぼ100年後にあたり、100年かけてアインシュタインが残した宿題に答えを出すことが出来たわけです。この世界初検出の後、重力波は数回観測されています。



— 重力波を観測できればノーベル賞は確実と言われて来ましたが、重力波で何が分かるのでしょうか?

川村 最も大きなことは「宇宙のはじまり」を見られるようになるはず、ということです。これまで人類は宇宙を「光」つまり「電磁波」を用いて観測を

試みてきましたが、その手法ではどうしても宇宙誕生の瞬間までは解明することが出来ません。その理由は後程お話しします。それを可能にするのが重力波の観測による重力波天文学です。

私が重力波を研究する最大のモチベーションもズバリ「宇宙のはじまりを見たい」ということに他なりません。

— 重力波とは何か?重力波は宇宙にあるものですか?ひとつ教えていただけますか。

川村 重力波は宇宙からもやって来ますし、地上で物を動かせば重力波が出ます。

実は私達の体は、重力波の影響を受けていつも伸び縮みしているのです。宇宙からの重力波ですと10のマイナス21乗、あるいは10のマイナス22乗メートルほど…0.000…といつも0が並ぶほど微少なので、自分の体が伸びたり縮んだりしているとは誰も気付いていませんが、伸び縮みは言い換えると「空間をひずませている」ということです。

つまり「空間のひずみが伝わっていく波」が重力波です。ひずみ方ですが「縦に縮み、横に伸びる。次の瞬間反対に縦に伸び、横に縮む」を繰り返しています。このひずみ方は、月が地球に及ぼす潮の満ち引きと同じなので“潮汐的な空間のひずみ”という言い方をします。そして重力波の速さは光と同じです。

まとめると「重力波とは潮汐的な空間のひずみが光速で伝わっていく波」ということになります。



ひずみが伝わっていく重力波で私達の体は、常に“伸び縮み”

川村 仮に何でもいいので身近にある物を動かしてみると…今、10のマイナス50乗メートルくらい伸び縮みしたかもしれません(笑)。これはどういって検出不可能なレベルで、地上で発生する重力波はとても小さいのです。

なぜかというと、重力波は「重いものの、すなわち質量が大きなものが速く動くとたくさん発生する」という性質のものです。ではどれくらい重いものだと観測可能なレベルになるかというと、天体やブラックホールの影響といったレベルになります。

— “重力波がわかれば宇宙の始まりがわかる”とおっしゃっていましたことに近づいてきた気がします。宇宙で重力波が発生する例を教えていただけますか。

川村 代表的なものが3つあります。1つ目が「中性子星連星の合体による重力波」、2つ目が「ブラックホール連星の合体による重力波」、何と言ってもすごいのが3つ目で「宇宙誕生直後のインフレーションの時代に発生した重力波」です。

産学官との連携

—1つ目の「中性子星連星の合体による重力波」から教えていただけますか。

川村 中性子星は、ほぼ中性子で出来た星です。ものすごく密度が高く半径10kmほどしかないので、質量は太陽より少し重く1.4倍ほどのものが多く、ものすごく重いわけです。

そんな中性子星が2つ、引力で引き合いながら回っていると、重力波がたくさん出ます。さらに重力波を出すことでエネルギーが失われるので、2つの中性子星はだんだん近づき、近づくほど回転の速度が速くなります。そして最後にはバンッと合体して、多くはブラックホールになります。これが中性子星連星の合体で、この時に重力波がたくさん発生します。

—今お話ししていただいた以上に大きな中性子星も存在するのでしょうか？

川村 いえ、質量が太陽の1~2倍程度のものがほとんどで、それより大きいとブラックホールになってしまいます。中性子星は恒星の「星の一生」において一部の星の最後の方の形態です。

一部の星というのは太陽の8~30倍重い星のことです。太陽くらいの重さの星は核融合で燃え尽き、最後に膨張して大きくなつて赤色巨星といふものになり地球も飲み込みます。その後冷え込んで白色矮星といふものになり最後には完全に暗くなります。

太陽よりかなり重いと、超新星爆発という現象を起こして最後に中性子星が残るという流れです。

初観測された重力波は ブラックホール連星の合体

—続いて2つ目の「ブラックホール連星の合体による重力波」について伺う前に、ブラックホールの特徴や性質についても簡単に教えていただけますか。

川村 まず、ブラックホールは宇宙にいくつもあります。そして非常に密度が高いのです。あまりに密度が高いので完全につぶれて点になっていて、光さえあるところまで近づくと脱出できなくなります。

例えば太陽の重さと同じブラックホールがあるとすると、半径3km程度まで近づくと、光でさえ脱出できなくなります。この脱出できなくなる地点までの長さをシュワルツシルト半径といい、その大きさはブラックホールの重さに比例します。だから太陽より10倍重いブラックホールだとシュワルツシルト半径は30kmというわけです。

ちなみに、地球がブラックホールに飲み込まれると、ものすごく引っ張られる場所とそれより弱い力で引っ張られる場所が出来るので、引き裂かれてしまいます。

また、シュワルツシルト半径の中では通常では奇妙に思うことが色々と起こっていて、例えば“時間と空間が外と入れ替わっている”のです。簡単に言うと…時間と空間が入れ替わっている(笑)。

補足になるかわかりませんが、宇宙船に乗った人がブラックホールのシュワルツシルト半径の中に行くとします。実際に乗っている人は行けます。しかし、その様子を外から見ている人は、宇宙船はシュワルツシルト半径に近づくけれどもそこから先に行けずに止まっているように見えます。また、宇宙船に乗っている人にしてみれば「時間と空間が入れ替わっている」とは感じません。ですが外から見ると入れ替わっているのです。

—シュワルツシルト半径がとても大きくない場合、例えば太陽系を飲み込むような巨大ブラックホールなどは実在するのでしょうか？

川村 銀河の中心にはとてもなく大きなブラックホールがあります。

銀河には太陽のような恒星が1000億個くらいありますが、その中心にある巨大ブラックホールの重さは太陽の10万~100億倍ほどです。

仮に1億倍とするとシュワルツシルト半径は3億kmになります。しかし3億kmといつても銀河の大きさに比べるとほんのわずかです。ですので、銀河系全体を飲み込むという話ではありません。

—そんなブラックホールが重力波を出すということですね。

川村 このブラックホールも、連星になつていれば、ぐるぐる回つて重力波を出します。

そして、先ほど中性子星でお話し



したように、2つのブラックホールもぐるぐる周りながら重力波を出しながら近づいていき、動きを加速させながらやがては合体します。その時に「チャーブ信号」というブラックホールの連星合体(中性子星連星の合体から出る重力波もほぼ同じ)から出る重力波の典型的な波形が捉えられるのです。

LIGOが世界で初めて観測した重力波は、ブラックホール連星の合体によるものと見られていて「太陽質量の36倍のブラックホールと太陽質量の29倍のブラックホールが13億光年の彼方で合体」した時に発生した重力波と結論づけられました。

実はブラックホール連星という天体现象そのものが「あるだろう」とはされていましたが、実際には観測されていませんでした。というのも従来の電磁波(光)を使った天文学では光も吸い込んでしまうブラックホールの観測そのものが困難だったので、それが重力波の観測で分かっ

たわけです。つまり重力波の発見は同時に、ブラックホール連星の発見でもあったというわけで、「重力波天文学の幕開け」となったのです。

——まさに天文学の歴史を変えるのが重力波の観測だったわけですね。さらに3つ目の「宇宙誕生直後のインフレーションの時代に発生した重力波」について教えていただけますか。

川村 宇宙が誕生した直後に、とてもない勢いでブワッと広がったのです。つまり急膨張したと考えられている現象をインフレーションと言います。このインフレーションは138億年前に宇宙が誕生して、10のマイナス35乗秒後の頃に起こったと考えられている現象で、この時に重力波が発生しています。この重力波を捉えることで、宇宙誕生の頃のことが分かってくるのです。

——つまり138億年前に発生した重力波を今キャッチしようとしている、ということでしょうか?

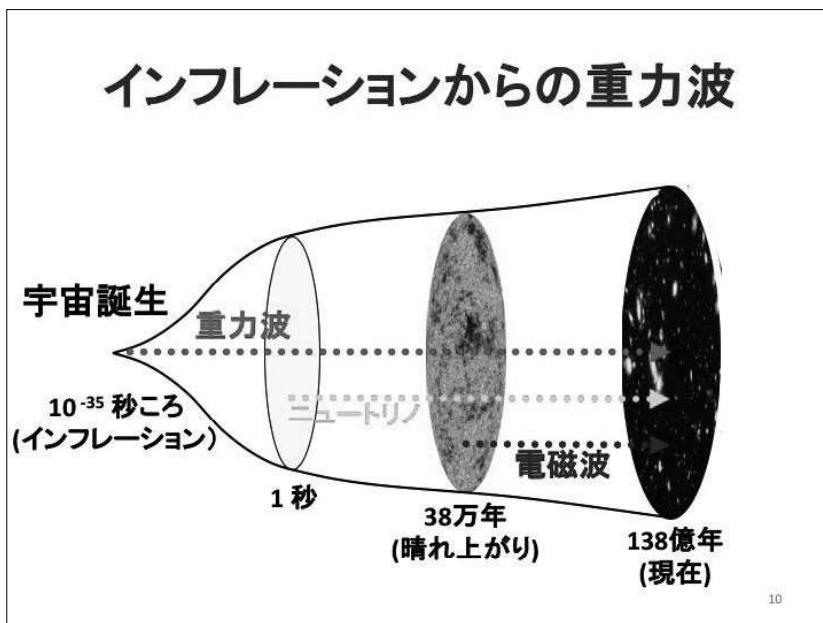
川村 そういうことです。「大昔の宇宙を見る」ことを、これまで人類は「光」つまり「電磁波」を観測することで試みてきました。

遠くを見れば見るほど、私達は「昔の姿を見る」ということになります。どういうことかというと、今見えている太陽は、実は8分前の太陽です。それは太陽の光が地球に届くのに8分かかるからです。同じように非常に明るい恒星で知られるシリウスも、地球で我々が見ているその姿は何年も前のもので、もしかしたらもうないかもしれません。それを電磁波で遠くを見ることで、もっと前の姿を知ってきたわけです。

ではどこまで遠く、昔の姿まで見られるかというと、電磁波では「宇宙が誕生したその38万年後」までになり、それより昔は見られないのです。なぜかというとその前の期間は電子と陽子が分離していて電磁波がまっすぐ飛べないので、だから電磁波では見られません。

しかし重力波は、宇宙が誕生した138億年前から真っ直ぐに飛んでいました。そして今もその重力波が飛んでいるわけです。それを観測することで電磁波では見られなかった大昔まで分かるようになるのです。

——138億年前の宇宙誕生直後のインフレーションの時代に誕生した重力波が、今観測出来るのでしょうか?



川村 「そんな大昔に発生した重力波はどこかに行ってしまっているのではないか」と思うかもしれません、そうではありません。その理由の説明の仕方は色々とあります、ひとつの説明として、重力波も進んでいますが宇宙全体も誕生後に一気に広がっていくので、進んでいるのに「動く歩道を逆に進んでいるような状態」でようやく今到達した、というようにも例えられます。

あるいは、宇宙は“端”がないのでこの宇宙のいたるところで生まれた重力波は宇宙以外のどこにも行きようがなく、よって今も昔もいつでも宇宙のいたるところにあるしかない、という言い方も出来ます。

これまで私達は星を光で見て、その次に赤外線で見て、それから電波で、X線で、ガンマ線で見て、と進化させて来ながら、その度に新しいものを発見してきました。これから重力波という電磁波ではない

全く別のものによって、我々が考えもつかなかったようなものが見つかることが期待できるわけです。何が新たに分かるのか、全く予想がつきません。

AINSHUTAINの奏でる宇宙からのメロディー

— それでは1つ目の「中性子星連星の合体による重力波」から教えていただけますか。

川村 その前に、重力波の音を聞いてみますか？

— 重力波の音が聞けるのですか？

川村 なぜ音が聞こえるかというと、最初に私達は重力波の影響で気付かないけど伸び縮みをしていると言いましたが、鼓膜も動かされているわけです。それに気付くほどの地獄耳の人人がいると聞こえているはずなのですが、そんな人はいな

いですよね。10のマイナス何乗…という伸び縮みですので(笑)。ですが、もしいたしたらこんな音が聞こえます。

ここで川村先生は「AINSHUTAINの奏でる宇宙からのメロディー」と題した重力波の音(一般相対性理論を使って計算したもの)を聞かせてくれました。

まず「中性子星連星の合体」による重力波の音—2秒弱の長さの音で“フゥーウッ”と尻上がりに高くなります。

続いて、より質量が小さい「ブラックホール(太陽質量の0.1倍)連星の合体」による重力波の音—尻上がりに高くなるのは同じですが、全体がより高音、長さは長くなり3秒ほど前後です。

さらに続いて、より質量が重い「ブラックホール(太陽質量の10倍)連星の合体」による重力波の音—やはり尻上がりに高くなりますが、全体がぐっと低音、長さはすごく短くほんの一瞬という音でした。

川村 ちなみにLIGOで最初に観測した重力波を発生したブラックホール連星の合体は、太陽の質量のおよそ30倍でした。さらに低い音になるわけです。

重力波のこうした音が、あっちで“フゥーウッ”こっちで“フゥーウッ”と、私達は気付いていないですが鳴っているのです。

— 例えば中性子星連星の合体は、どれくらいの頻度で起こっているのでしょうか？

产学官との連携

川村 ひとつの銀河で中性子星連星の合体が起こるのは1万年に0.3~5回程度なのですが、銀河は実に膨大にあるので、地球から30億光年の範囲で1年間に300~5000回くらい起きています。つまり1日約1~13回起きているのです。だからその音が聞こえれば、1日約1~13回は今の“フゥーウッ”という音が聞こえるはずです。これが103年前にインシュタインが存在を予測し、つい3年前によく発見された重力波です。

「重力の本質とは何か?」 3分で分かる一般相対性理論

川村 せっかくですので、重力波の存在を予測した、インシュタインの一般相対性理論を“3分間コース”で説明いたしましょう。

綱の切れたエレベーター、つまりドンドン落下しているのですが、それに乗っている時に手からリンゴを離すとどうなると思いますか?



— エレベーターと一緒にリンゴが落ちているので、空中に浮いて見えるのでは?

川村 その通りです。

乗っている人から見ると、リンゴは浮かんで見えます。

この時「重力は消えたのか」と言うと、普通は「一緒に落ちているから浮かんで見えるだけで重力はある」と思いますよね。ですがインシュタインはこの状態は本当に重力が消えていると言ったわけです。「一緒に落ちているから見かけ上、重力がない」というのではなく「本当に重力がない」と考えたのです。

では、重力の本質とは何でしょう。それを考えるためにもう1つ質問します。

先程と同じ、ドンドン落下している綱の切れたエレベーターの中に、今度はリンゴを「上下左右4個」それぞれの位置で離します。リンゴはどうなるでしょう? この時リンゴ同士が引き合う引力は無視します。



— 先程と同じように、リンゴは位置を保ったまま、浮いた状態で落ちていく気がします。

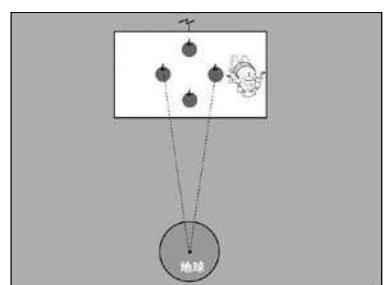
川村 そう思いがちなのですが、これが違うのです。

なぜかというと、それぞれのリンゴが地球の中心に向かって落ちていくのです。しかも下のリンゴの方が上のリンゴよりも地球の中心に近いので、より速く落ちます。

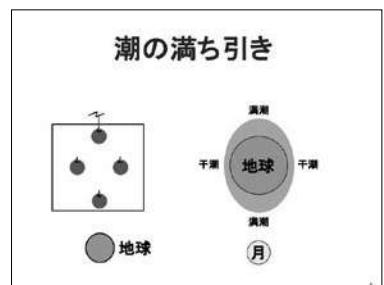
ということで4個のリンゴは、上下の距離を広げながら、おかげで左右のリンゴは地球の中心に向かって

していくので左右の距離を狭めながら落ちていきます。エレベーターの中の人から見ても、4個のリンゴの位置の上下幅が広がり、左右幅が狭まるように見えます。

この力は消せません。これが重力の本質で「潮汐的な力を受ける」ことになります。



— 潮汐的な力…潮の満ち引きのような力、ですね。



川村 そうです。

先ほどの「4個のリンゴを落としたエレベーターと地球」の関係を「地球と月」の関係にそのままあてはめられます。上下のリンゴが幅を広げたように、地球の上下で表面の水は幅を広げる、つまり

産学官との連携

深くなり満潮になる、左右のリンゴが幅を狭めたように地球の左右は水が狭まる=つまり浅くなり干潮になる、という具合です。

というわけで「重力の本質というのは潮汐的な空間のひずみ」ということになります。

最初に重力波を説明した時に「重力波とは潮汐的な空間のひずみが光速で伝わっていく波」と言ったことと、これでつながりましたね。これがわかれば、もう一般相対性理論の免許皆伝です。

世界各地の観測拠点が協力 大型レーザー干渉計が 重力波の発生源を特定する

— そんな重力波が、3年前に世界で初めて観測されたわけですが、大型観測装置について教えていただけますか。

川村 レーザー干渉計という大型装置で検出します。

現在はアメリカに2台「LIGO(ライゴ)」という装置があり、イタリアに1台「Virgo(ビルゴ)」という装置があります。そして日本では2020年頃に稼働スタートを予定している「KAGRA(カグラ)」が完成する予定です。そしてもう1台、インドにLIGOの装置を作ろうということで世界の重力波観測計画が動き出しています。

初観測の際はアメリカの2か所にあるどちらのLIGOでも観測され、これは間違いないと確認されたわけです。

— そのうち、川村先生は重力波を世界初観測したLIGOのプロジェクトで感度を著しくアップする貢献をされました。そして日本のKAGRAでも中心メンバーにならってきたわけですね。まず、レーザー干渉計とはどういう仕組みなのでしょうか？

川村 仕組み自体は非常に簡単です。

L字型に2つのアームを組み、それぞれの端に鏡を置きます。重力波が来るとアームは片方が伸びもう片方が縮むというふうに運動します。そこにレーザーから出た光をビームスプリッタという装置で2つに分けて鏡に反射させ、干渉光を光検出器で検出します。その干渉光の明暗の変化を見て重力波を検出するわけです。

このレーザー干渉計ですが、大型にすればするほど感度が良くなります。というのは重力波は空間のひずみとしてやってきますが、アームの長さが大きいと、アームの端の鏡がより大きく動きます。鏡がたくさん動くと干渉光の明暗の変化がそれだけ大きくなって、検出しやすくなるわけです。ですので、アームを長くすればするほど感度は良くなります。アームの長さはLIGOが4km、VirgoとKAGRAが3kmです。

— 先ほどのお話をすると、宇宙では大きな重力波を発生する活動がひんぱんに起こっているのですね。このレーザー干渉計が重力波をキャッチした時に「宇宙のどの方向からやって来た重力波なのか」わかるのですか？

川村 重力波源の方向をどう特定するのか、実はレーザー干渉計が離れた場所に3台あることで分かります。宇宙からの重力波は3台のレーザー干渉計A、B、Cに届くのに時間のズレがあります。その時間差から方向が分かるのです。

— では1台だけでは方向までは分からないのですね？

川村 はい、1台だけでは厳しいです。アメリカにLIGOがあり、ヨーロッパにVirgoがあり、日本にKAGRAがある、ということには重要な意味があるのです。

こうした世界中にある施設の連携は「中性子星連星の合体による重力波」が初観測された2017年8月17日の例を見ることでも分かります。

「重力波だ」と観測されたその1.7秒後に、中性子星連星の合体が起きたときに起こりうるガンマ線バーストが刻印されたのですが、それを受けて41分後に「先程のガンマ線バーストと今回の重力波は関連している」とアナウンスがありました。さらに4時間後には先程の重力波がどの範囲で発生したかが判明、10時間後にはチリの望遠鏡での観察によって「この場所で起きた中性子星連星の合体だ」ということが突き止められました。その後地上の約70台の望遠鏡でその場所が観測され、結果、中性子星連星の合体によって「金や白金が出来ている」ということがほぼ判明するなど、色々な発見が生まれました。

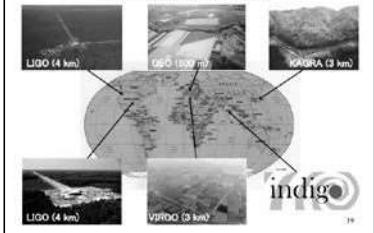
産学官との連携

—つまり、重力波を観測する拠点だけでなく、電磁波を使った天文観測の拠点とも世界中で連携をして新しい発見が生まれたということですね。アカデミックな世界のグローバル化を感じます。

重力波源の方向は?



世界の大型干渉計

KAGRA(カグラ)の稼働で
レベルアップする
世界の重力波観測

—先程、レーザー干渉計はアメリカにLIGOが2台、イタリアにVirgoが1台、ということでしたので、KAGRAは世界で4台目のものとなるのですね?

川村 そうです。先程3台あると場所が特定出来るとお話をしたので、4台目にどんな意味があるのかと思うかもしれません。しかし観測感度をアップ出来ることはとても大きな意味があります。

レーザー干渉計には得意な方向と不得意な方向があります。3台が

重力波により、予想されしなかつたような宇宙の新たな姿が分かることです。
今、重力波天文学の夜明けです!



最高感度の半分程度以上の性能で観測出来る範囲は、全天のどれくらいの割合かという数字で「全天カバー率」というものがありますが、3台ですと実は72%しか観測できません。ところがこれに4台目のKAGRAが加わることで全天カバー率が100%になるのです。つまり、お互いの不得意な方向をカバーしあえるわけです。

また、各地の干渉計も常に100%稼働できているわけではなく1台あたりの稼働率は大体80%くらいです。その稼働率だと3台揃って稼働している率は51%くらいなのですが、

KAGRAが加わると、4台中少なくとも3台が稼働している割合は82%になり、1.6倍に向上するわけです。

—ということは、世界中の重力波研究者にとっても、日本のKAGRAの稼働が待望されているわけですね。

次号「科学の峰々」では
引き続き川村静児先生
「AINSHUTAINの宿題の答え“世紀の
発見!重力波”で宇宙の始まりを知る
(上)」をお話いただきます。

KAGRA

3 kmの腕共振器を持つ干渉計型重力波検出器

KAGRAの特徴

- ・地下サイトの利用(地面振動低減)
- ・鏡の低温化(熱雑音低減)



KAGRA collaboration, presented at the JPS meeting by T.Ushiba