

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



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

アイン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 下

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)



産学官との連携

干渉計の鏡の角度制御で重力波観測の感度を飛躍的にアップさせる

—川村先生は、重力波を世界で初めて観測したアメリカのレーザー干渉計「LIGOライゴ」で観測感度を飛躍的に向上させた功績から、国内外で通称ノイズハンターとも呼ばれています。どのような方法で観測感度を向上させたのでしょうか。

川村 結論から言いますと、レーザー干渉計のアームの端に付いている「鏡」の角度制御によって感度を上げていました。

私が着手したのは、1989年にカリフォルニア工科大学に派遣されて、LIGOの前身となる「40メートルプロトタイプ」の研究に携わったのがはじまりです。先に結論を申しますが、実は携わった当初は、鏡の角度揺れが感度の向上に大きく関係することに誰も気付いていませんでした。以前から観測感度の向上を妨げている様々なノイズは大きな問題だったものの、どうすればノイズ

を減らせるかは、いわば荒唐無稽に試行錯誤されていましたし、鏡の角度揺れは二次的な要素にしか過ぎないと想っていたのです。当時は、ノイズを減らすためのシステムティックな検討方法すら確立されていませんでした。

した中で、私は「鏡の角度制御の担当」となったわけですが、これがもししかしたら計測感度を妨げているノイズと大きく関係しているのではないか?と思うようになりました。

そこでノイズの減少をシステムティックに行っていったのですが、それはとても地道な作業でした。干渉計に現れる様々な種類のノイズは「ノイズ源と任意の伝達関数のかけ算の結果」となります。そこでまず“様々な種類”的ノイズをひとつずつ突き止めて書き出します。そしてひとつずつ検証していき「この周波数の時はノイズ-A」「この周波数の時はノイズ-B」が影響している、といった地道な作業を繰り返していました。ノイズ自体は非常に微小なので100倍程に増幅させて調べて行きました。

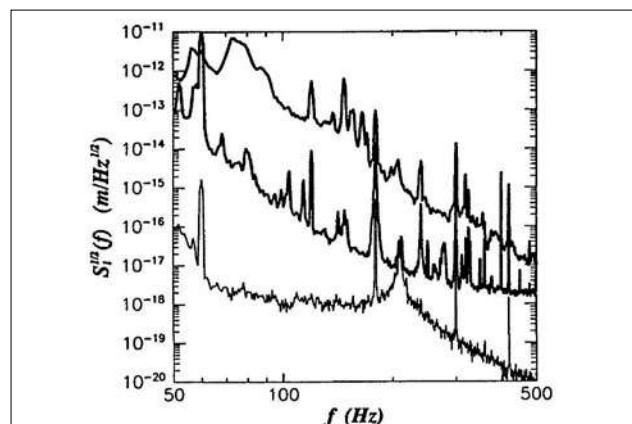
—検証方法は、想像以上にアナログな作業なのですね。

川村 そうですね。数十種類のノイズを調べたでしょうか。今わかっているノイズだけを検証するだけでは解決出来ず「こういうノイズがあるのではないか?」など、まだ分かっていないノイズを想定して、実際に見つけた場合は、その後の検証が必要でした。

そうしていく過程で「鏡の角度揺れ雑音」が検出感度と大きく関わっていることが分かってきて、鏡の制御システムを大改造していました。極めて簡単に言うと、角度的には比較的硬めに吊り下げられていた鏡を角度的にも“柔らかく”吊り下げる方式をとったわけです。これを改良していくうちに目覚ましいレベルで最大3ケタくらいの感度が上がりました。それまで重力波を本当に観測出来る能力が証明されていなかったものが現実になって、私はLIGOプログラムチームで一躍ヒーローになりました。



重力波を世界で初めて観測したアメリカのレーザー干渉計 LIGO
資料提供:LIGO



鏡の角度制御で感度がものすごく改善
鏡の角度制御で雑音が上の曲線から真ん中の曲線まで下がった。
下の曲線は新しい鏡の角度揺れ雑音の予測。資料提供:S. Kawamura and M. Zucker, Appl. Opt., 33 (1994) p.3912-3918

産学官との連携

—そもそも重力波のひずみ自体が、10のマイナス21乗や22乗、さらにはもっと小さい…というレベルですので、それを感知するためのノイズ減らしとなると、私達には到底想像が及ばない細かさだと拝察します。先生は“ヒーローになった”とおっしゃられましたが、その時の研究室の盛り上がりが想像されます。

川村 実はノイズを減少させたことが、私がその後7年間アメリカで研究出来たことにもつながりました。カリフォルニア工科大学には日本の某科学振興財団の「一年間長期派遣援助」という形で籍を置いていたのですが、滞在半年にして財源が尽きて日本に帰国するしかない立場でした。その経済的な問題をLIGOプロジェクトのボスに話すと、「じゃあLIGOで雇うよ」となったのです。その形態も、普通はポスドクでとりあえず3年間雇用し(あるいはさらに3年)成果を上げれば正式採用という形が多いのですが、私の場合は、いきなり3か月間の准サイエンティストの期間を経て、プロジェクトがある限り雇用が続くサイエンティストという形で採用してもらいうことが出来ました。

そしてプロトタイプの段階では、LIGOの感度は世界3位だったのですが、どんどん感度をアップさせてドイツとイギリスのプロトタイプを抜き去って世界トップの観測感度に向っていくことが出来ました。これはプロトタイプから本物のLIGOの建設が決定する決め手の要因になりましたので、期待に応えることが出来たかなと感じています。



LIGO のカリフォルニア工科大学の初期のメンバー、手前左が川村氏。資料提供：ノーベル賞を受賞したキップ・ソーン氏の著書 Black holes & time warps



1992年カリフォルニアの川村氏の自宅にて、ノーベル賞受賞のレイ・ワイズ氏（中央）と川村氏（左）



川村氏が開発した LIGO サスペンションの初期段階の鏡吊り下げシステム 資料提供：LIGO

—先生は自らの研究成果をもってして、実力で研究する場を勝ち取られたわけですね。そのプロトタイプを経て、LIGOそのものの建設でも重要な役割を担われたのですね。

川村 一旦日本に帰国した後の1994年頃からLIGOの建設がスタートします。私は再びアメリカに渡り、鏡の吊り下げや位置・姿勢の駆動機構などを含むサスペンション・システムのタスクリーダーとして任せられました。それは要求される事柄の洗い出しから始まり、概念設計、予備設計、プロトタイプテスト、最終設計、製作という順序で設計を進め、製作を完了しました。さらに、自分が担当した場所だけでなく、

それ以外のサブシステムの設計審査も、度々要請されて行いました。

—まさに先生は世界初の重力波発見の立役者だったわけですね。鏡の細かい調整なども研究者自らが行っていたのかと驚きました。

川村 なぜか私達重力波研究の分野では、研究者自らが行うことが文化のようになっている側面があります。制御系の機器ひとつをとってもデジタルはとても少なく、アナログ回路が多くて、自分たちで作ることを学生の頃から行っているのです。実は自分たちで作った方が早いので、研究者は器用に何でも作れますよ(笑)

産学官との連携

目標は「宇宙のはじまりを知る」と壮大なわけですが、日々行っていることは非常に泥臭いところがあります。私自身は、壮大な夢を持つことも泥臭い地道なことも両方が好きなので、やっていて面白いと感じます。

“とんぼ返り”の体験から宇宙に興味を持った

—先生が宇宙の謎に興味を持ち始めたきっかけは何だったのでしょうか？

川村 最初に興味を持ったのは小学生の時です。私の場合ちょっと特殊なのですが…“とんぼ返り（宙返り）”が出来るようになりたいと思って練習していた時です。小学生の頃、誰がとんぼ返りを出来るようになるか、友達同士で盛り上がったのですが、ある日やりすぎて目が回り、頭がぼうつとなつたその時になぜか「死んだらどうなるのだろう？」という思いがふと湧き上りました。それがどんな感情かというと、生きている時は舞台のようなものがあるのだけれど、死ぬということは舞台そのものがなくなるのだと子供ながらに恐怖を覚えたわけです。その恐怖を解消するために、何かよりどころが欲しいと思うようになりました。「なぜか宇宙にたどりついたのです。『宇宙は最強なので宇宙さえあれば自分は何も怖くない』といったような、そんな感情だったと思います。

—生きるよりどころが宇宙だ、という思いを小学生で感じたということですね。宇宙といえば、天体や星座を見たりするのも好きだったのですか？

川村 それが全然興味がなかったのです。天体望遠鏡にいたっては、39歳でアメリカから帰国し国立天文台に赴任しましたが、その数年後の一般公開の時に一般のお客さんと一緒に天体望遠鏡を初めて覗いたほどでした。(笑)

なぜ子供の頃に宇宙のことについて行き着いたのかは、自分でもよく分からぬのですが…といえば、インシュタインという人がいることは小学生の頃に知りました。相対性理論は世界で数人の学者しか分からないのだと、という話に触れたことがあるように記憶しています。

—そこから宇宙の研究にまっぐら、ということだったのでしょうか？

川村 私は高知市中心部の“はりまや橋”近くで育ちました。中学、高校と言わば流されるようにやりたいこともやけてきて、大学は早稲田の理工学部に進んだのですが研究室では物性物理を専攻していました。

早稲田大学大学院の修士課程の2年次、就職するか否かとその後の進路を決める必要に迫られていた時ですが「確かに自分は宇宙のことを知りたかったはずだ」と思い出したのです。やはりその事をしないでは後悔すると思い、早稲田には宇宙関係の研究室はあまりあり

ませんでしたので、東大の大学院の入試を受け直して入学してから宇宙の研究を始めるようになったのです。そして現在に至っています。少し遠回りをしたかもしれません、今でも子供の頃に覚えた興味を追い続けられているのは幸せなことだなと感じます。

日本のレーザー干渉計KAGRA(カグラ)とスペース重力波アンテナDECIGO(ディサイゴ)

—先生は日本のレーザー干渉計KAGRA(カグラ)でも開発や建設に中心的な役割を担われてきました。アメリカのLIGOから様々な面で進歩していると思いますがいかがでしょうか。

川村 そうですね。様々な面でLIGOの問題であったことを改良するなどしてKAGRAの建設は進んでいます。

場所は岐阜県飛騨市神岡鉱山の地下に実験装置を建設中です。地下の方が地上より格段に静かであり、不必要的振動などを避けられますので重力波観測に適しているのです。地上は1ヘルツ程度で0.1ミクロンくらい揺れているのですが地下だとその揺れは100分の1くらいに減少します。

そしてKAGRAの特徴として、鏡を冷やした低温ミラーを使い「熱雑音」を抑えています。温度があるものは「ブラウン運動」という揺れが起きていて、その揺れは温度が高いほど大きいので冷やしている

産学官との連携

わけです。温度としては鏡を20ケルビンまで冷やします。ケルビンというのは絶対温度の単位で、高校の理科で耳にしたことを思い出す方も多いのではないかでしょうか。

鏡を冷やす前の段階では鏡の温度は、300ケルビン程なので約15分の1に冷やしていることになります。この冷却だけの効果でどれくらいノイズが減少するという“ルート15”つまり3.8ほど、抑えられる計算になります。

ちなみにその熱雑音をさらに減らすために、鏡はサファイアを使用していて、それをサファイアのファイバーで吊り下げています。

—宝石のサファイアには色がありますが、サファイア鏡の写真を見ると透明ですね。

川村 一般的にサファイアは青色とイメージされていますが、それは不純物が混じっているからです。不純物が混じっていると重力波の観測には到底使用できませんので、

純度100%の人工サファイアの鏡を使います。

これを作つてもらうには大変な困難がありました。先ほど話したように鏡を「冷やす」わけですが、光が鏡で吸収されるため鏡自体はある程度温まります。その温まるレベルが“ここまでならばよい”という要求値になかなか収まらなかったのです。

しかも、1つ要求値におさまる鏡が出来たのでそれと全く同じ製法で作ればまた出来るはず、と試みたのに今度は上手く出来なかった、というブラックマジック的なところもあって、なんとかKAGRAに使用することができる4つを、日本の企業とアメリカの企業に作つてもらいました。

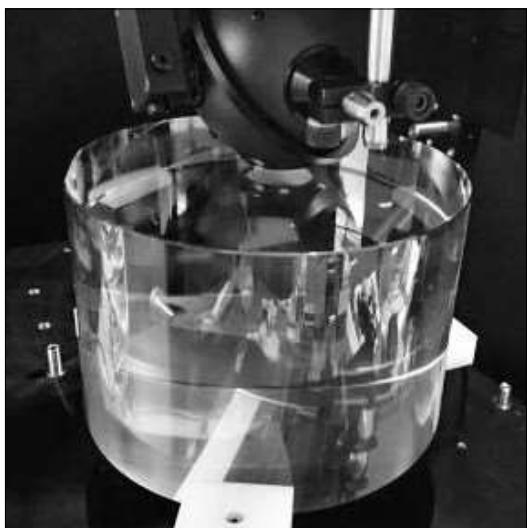
KAGRAについては、そうした光学制御、デジタル制御、光学サポートの各サブグループの統括を行つたり、また国際協力を担当したり、設計や建設の指揮をしてきました。作業者が安全に働く環境づくりや外国との共同研究を立ち上げることなども行いました。つまりありとあらゆることに関わった

と言っていいかもしれません。

また、LOGOで検出感度を向上させた干渉計に関しても、世界で初めて「吊り下げ鏡を用いた帯域可変型干渉計の広帯域動作」に成功したりなど、いくつか世界初の先進的技術を成功させることができます。こうしたものを組み入れたKAGRAは世界も稼働を待ち望んでいるものなので、2020年の稼働の時が楽しみです。

—このKAGRAで大変忙しい日々を送りながら、もうひとつ、日本の“スペース重力波アンテナ”「DECIGO(ディサイゴ)」もプロジェクトの中心で進めていらっしゃいます。DECIGOはどういうものなのでしょうか?

川村 アメリカのLIGOは地上にあり、日本のKAGRAは地下にあると言いましたがDECIGOは“宇宙に浮かぶ重力波観測装置”となります。



人工のサファイア鏡

資料提供：東京大学宇宙線研究所

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

KAGRAは岐阜県飛騨市神岡鉱山の地下に建設中、2020年稼働予定

产学官との連携

このDECIGOに先んじて、宇宙にレーザー干渉計を置く計画はヨーロッパで進められてきました。LISA(リサ:Laser Interferometer Space Antenna)というものです。

なぜ宇宙に置くかというと、レーザー干渉計はアームの長さを長くするほど感度がよくなります。アームの長さはLIGOが4km、日本のKAGRAは3kmですが、宇宙に置くLISAは桁違いになり250万kmです。これほどの長距離のアームをどう建設するのかと言うと宇宙ではレーザー光がアームとなります。

3つの衛星を打ち上げて、その衛星間の距離が250万kmで常に一定になるように正三角形に配置され、レーザー光で結ばれます。そのレーザー出力は2ワットなのですが、実は250万kmもの距離を飛ばすと届くのは数100ピコワットくらいと計測するにはあまりにも小さいものとなってしまいます。そこで光トランスポンダというものが組み込まれ、感知出来る仕組みとなっています。

アームの両端に鏡があって干渉光の濃淡を見ることで重力波を観測する、という仕組みは地上の装置と基本的には同じです。

LISAが出来ることで、銀河の中心で起きているブラックホールの合体に伴って発生する重力波が飛躍的に計測可能となります。それが分かることで、銀河の中心でどうやって巨大ブラックホールが出来ていったのかが分かるのです。また、インシュタインの一般相対性理論の検証に大きく寄与すると見込まれています。

— そうした計測器の進歩とともに、これからはAIなども導入され、より解明が進められると思うのですが、いかがですか？

川村 それが実はなかなかAIとは結びつき難いですね。というのは、一般相対性理論は“非線形”なので特殊な場合しか解けないので。方程式は“線形”なので解けるのですが、そう単純にいきません。

少し補足するとインシュタイン方程式というのは、“モノがどれだけあると時空がどれだけひずむか”を結びつける式なのですが、時空のひずみはエネルギーを持っているのでそのエネルギーがさらに時空をひずませるというようなことになっているのです。ブラックホール連星からの重力波があったとしても、それは数値相対論というものでもすごく計算をしなくてはならず、AIで対応出来るものではないのです。

— そうなのですね。宇宙の謎に立ち向かうには、まさに人の知恵が頼り、というのはドラマチックな面を感じます。

— 日本が将来宇宙に建設しようと計画しているDECIGO(ディサイゴ)のことを詳しく教えていただけますか。

川村 日本のスペース重力波アンテナDECIGOのアーム長は1000kmで、つまり一辺1000kmの正三角形に配された3つの衛星が宇宙に浮かぶことになります。先ほどのLISAのアーム長250万kmと

比べると随分短いので、そのぶん計測感度が劣るのではないかと思うかもしれないのですが実はそうではありません。アーム長が短い分、光をたくさん受けることが出来まして、その光を共振させて高めることによって感度をあげることが出来るのです。その結果感度はLISAよりもDECIGOの方が優れています。

— LISAもDECIGOも「3つの衛星を打ち上げて正三角形に配する」ということなのですが、常に衛星間の距離を一定に保つことが出来るのでしょうか？

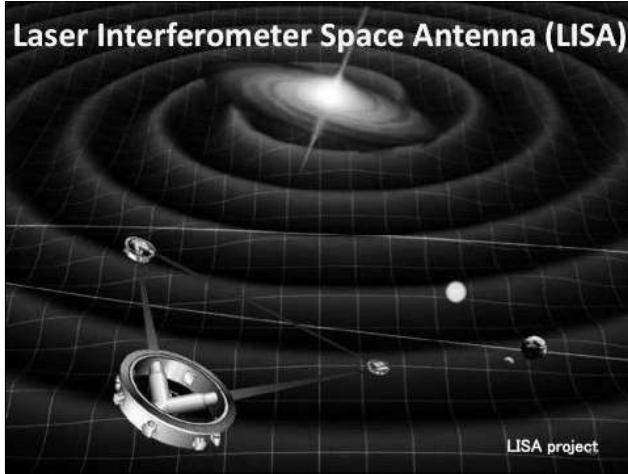
川村 それは大丈夫です。宇宙では太陽の周りを回る「レコード盤軌道」というものがあり、その軌道に乗って地球の動きにあわせてLISAもDECIGOも太陽の周りを周回します。

もし太陽しか宇宙がない場合、打ち上げた3つの衛星は一度正三角形に配されるとレコード盤軌道にそって未来永劫グルグルと回るのです。実際には地球や様々な惑星の引力があるので、そのあたりは補整が加えられます。

また、今“衛星間の距離を一定”と言いましたが、正確に言うと各衛星の内部にある“鏡”的距離が一定に保たれるように、鏡が衛星の内部で宙に浮いた状態になります。

というのは、宇宙には塵の影響があったり太陽の輻射圧の影響があったりするのですが、重力波を正確に計測するための鏡にはその影響があつてはいけないわけです。

産学官との連携



LISA のイメージイラスト 資料提供:LISA

ではどうするかというと、鏡に重力以外の力がかからないように外側を覆っている衛星を制御します。これをドラッグフリー衛星と言い、DECIGOにはこれが採用されることになっています。

そしてLISAとDECIGOでは“重力波を狙う帯域”が違います。LISAでも地上の計測器でも検出出来ない帯域を狙うのがDECIGOです。

この帯域が検出できると、また色々なすごいことが分かりまして、ひとつが宇宙の膨張加速度を直接測ることが出来るということです。

—先生が前回「宇宙が誕生以来膨張している」ことを教えてくださいましたが、その膨張の加速度がDECIGOで分かるようになるのでしょうか？

川村 そうなるはずです。宇宙の膨張の加速度については20年ほど前に超新星の観測から導かれた新しい考えが論じられています。

普通に考えると引力があるので宇宙が膨張するスピードは落ちて

いくはずなのですが、どうやら逆に膨張スピードは加速しているのではないかというのです。でもそれだと理屈が合わないわけで、よく分かっていないけれど、何かしらのエネルギーが働いていることになり、その正体不明のエネルギーはダークエネルギーと呼ばれています。これは本当に正体不明、まったく何も分かっていません。

超新星の観測から導かれたこの理論は色々な仮定を経ていて直接的に導かれたものではないのですが、それがDECIGOによって膨張加速度が直接的に計測できること、解明に大きく前進すると見られています。

他にもDECIGOが出来ると、一般相対性理論が4桁ほど高い精度で検証され、また巨大ブラックホールが出来る過程、ダークマターの正体は原始ブラックホールではないかという仮説の解明などのサイエンスが得られると考えられています。

より知りたい方は、最近出版されたばかりの本「重力波物理の最前線」

で詳しく解説していますのでお読み頂けると幸いです。

さらにもうひとつ、DECIGOの主目的があります。

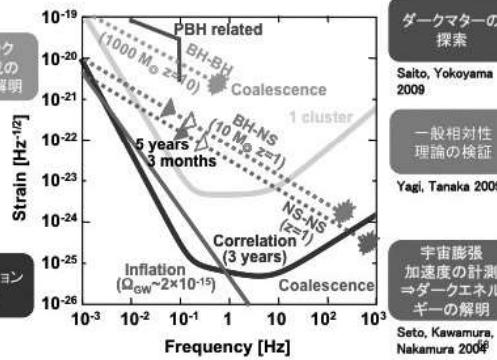
宇宙誕生直後から宇宙が広がり始めた“インフレーション”時の重力波の観測です。そうするとインフレーションがどのように起こったのか、どんなことが起きていたのかなどが解明されていくことにつながります。今、予想として色々なことが論じられていますが、インフレーションの時の重力波を計測すると実は全く違うかもしれないのです。

—それは“宇宙のはじまりを知りたい”という川村先生の目的とまさに合致しますね。

川村 そういうことになります。インフレーションも含め、宇宙のすべての始まりは何か?というところを知りたいというのが私の願いです。

究極的には、ホーキング博士が推測した「宇宙は無のゆらぎから始まった」というところを突き止めたいという思いがありますが、なかなか

DECIGOの目標感度と得られるサイエンス



DECIGO の目標感度 資料提供: DECIGO

ダークマターの探索
Saito, Yokoyama 2009

一般相対性理論の検証
Yagi, Tanaka 2009

宇宙膨張 加速度の計測
→ダークエネルギーの解明
Seto, Kawamura, Nakamura 2009

産学官との連携

「宇宙のどこかに必ず響いている宇宙誕生の“おんぎやあ”という産声を重力波でキャッチして聞きたいと思っています」



ここまで迫る道筋は描けていません。ですが、宇宙が出来て10のマイナス35乗後くらいの時に、インフレーションで“ぶわっ”と宇宙が膨張して大きくなつた、その時に出たと思われている重力波を検出して、その様子を知りたいと思っています。

重力波は音で観測するわけですが宇宙が出来たときの重力波の音は、宇宙の産声なのです。私は「宇宙が138億年前にあげた“おんぎやあ”という産声を聞きたい」という言い方でそのことを表現しています。しかし産声にたどり着く手前には、例えば中性子連星の合体で起きた音など様々なものがあるので、それらにかき消されてまだ産声までは聞くことが出来ていません。その音をひとつひとつ解析して産声でないものを除外していくってたどり着く、という事が必要になります。

私が名古屋大に籍を置くことにしたのは、KAGRAからDECIGOの方に本腰を入れて携わって、今話したことを実現するためにほかなりません。

— DECIGOの稼働はいつ頃になるのでしょうか。

川村 このDECIGOは2段階の計画で、先に「B-DECIGO」という規模が10分の1のものが行われます。これでも今の地上の干渉計より遥かに感度の良い計測が行えますが、インフレーションからの重力波までは受けられません。これをやった後で、DECIGOの実行となるのでなかなか時間を要するところはあります。そこで、先に行うB-DECIGOでインフレーションからの重力波を計測出来るようなデザインが出来

ないか、とも考えています。

また、地上でインフレーションからの重力波を計測する新しい方法も試みたいと考えています。アイディアとしては色々と目星がついてきています。

何とか私が生きている間に、インフレーションからの重力波がキャッチ出来るよう、少しでもよい方法を思案している毎日です。



JASIS サイエンスセミナーで講演される川村氏
2017年9月千葉幕張メッセ国際会議場にて

少年のようなまなざしで宇宙の始まりへの思いを語ってくださった川村先生。近い将来、念願であるインフレーションからの重力波を発見し、さらに、宇宙の産声を聞く日がくることを、お待ちしております。

次号「科学の萌芽」では
筑波大学システム情報工学科
合原一究 先生にお話いただきます。



「重力波の大発見で宇宙の始まりがわかる」とご教授される川村先生（左）と広報委員の皆さま
東京科学機器会議室にて