

I

# 研究室別 2012年度 研究活動報告

## 2.1 坪野研究室

本研究室では重力と相対論に関する実験的研究を進めている。その中でも、重力波検出は一貫して研究室の中心テーマとなっている。2010年にスタートした大型低温重力波検出器 KAGRA の建設は順調に進んでおり、トンネルの掘削、全長 6km におよぶ真空パイプの建造、低温ミラーを収納するクライオスタットの製作等が先行して行われている。KAGRA の 2017 年からの本格的な重力波観測開始への期待が高まっている。また、徐々にではあるが、宇宙空間重力波アンテナ DECIGO 計画の基礎開発も行われている。地上浮上型重力波検出器 TOBA についてはセンサーの技術開発が進んだ。同時に、われわれは重力波研究以外にも関連するいくつかの研究テーマを追求している。低温 (4K) シリコン光共振器を用いた超高安定レーザー光源の開発は世界的にもユニークな研究である。片道光速の異方性検出や微小距離における重力法則の検証は基礎物理として重要である。また、量子光学の手法を用いた光学実験は重力波検出器の高感度化を実現する可能性を秘めている。

2013 年 3 月をもって坪野研究室は幕を閉じることになった。1987 年に東京大学理学部に坪野研究室が発足して以来、本研究室は 26 年にわたり重力波研究の中核拠点として機能してきた。大学院生として研究室に在籍した学生のうち、修士課程修了者は 38 名、そのうち博士学位取得者は 14 名にのぼる。博士課程修了者の多くは重力波研究分野およびその周辺分野に残り、現在は各分野で主導的な役割を果たしている。今後は安東正樹准教授が研究室を引き継ぐことになった。残ったスタッフ、学生と一緒に頑張ってさらに重力波研究を大きく展開していくことが期待される。

### 2.1.1 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

KAGRA (かぐら) は岐阜県神岡の地下サイトに一边 3km の L 字型巨大レーザー干渉計を建設し、宇宙からの重力波を検出しようとするプロジェクトである (図 2.1.1)。2010 年 10 月よりプロジェクトがス



図 2.1.1: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の概念図。

タートし、2011 年 1 月 28 日には、それまで LCGT と呼ばれていたプロジェクト名に KAGRA という愛称がつけられた。現在、装置の建設は順調に進んでおり、2015 年には常温での運転が、2017 年からは低温での重力波観測が可能になる予定である。これによって世界初の重力波検出をめざしている。当研究室では、主干渉計光学系の設計などの主要部分の役割を担っており、それに関連した研究開発が進められている [1, 16, 17, 18, 19]。

### 光学系のレイアウト設計

KAGRA では多数の鏡を km オーダーの長い間隔で分散配置する。その際、光学的なレイアウトには、入射角度やビームスポット位置等に対して、満たさなければならない拘束条件が多数ある。また実際に干渉計を動作させる際に、必要な光を取り出し易くすると共に、不要な光を適切にダンプし、散乱光雑音が生じないように処理する必要がある。これらのレイアウト最適化作業を効率良く行うため、麻生は、ガウシアンビームの光線追跡ソフトを作成した。これによって、従来は手動で行なっていたレイアウトパラメーターの最適化が自動化され、鏡の仕様変更等に対して柔軟かつ迅速に最適レイアウトのアップデートができるようになった。このソフトを用いて、KAGRA の光学レイアウトが決定された [30, 35]。

### アライメント制御

レーザー干渉計を高感度な重力波検出器として用いるには、干渉計を構成する鏡の位置と姿勢を高精度に制御する必要がある。KAGRA では従来型の干渉計に比べて 5 枚鏡を増やし、RSE と呼ばれる構成を採用することで感度を向上させているが、一方で、制御すべき自由度が大幅に増加する。これにより各自由度の変位信号の分離・対角化が格段に困難になる。また、高出力レーザーを入射角として用いるため、干渉計の片腕の Fabry-Perot 共振器内を往復するレーザーパワーは 400 kW にも及ぶ。そのため、共振器を構成する鏡の傾きに対してレーザー輻射圧トルクがそれを拡大させる方向に働き、角度不安定性が自発的に生じてしまうという問題がある。

我々はアライメント制御系をシミュレートするためのソフトを開発し、これを用いて KAGRA の干渉計パラメータの最終決定を行った。特に腕共振器を構成する鏡の曲率と、2 つのリサイクリング共振器の鏡の曲率はアライメント制御系を大きく左右するため、KAGRA の目標感度達成に重要である。腕共振器の鏡の曲率は輻射圧による角度不安定性が小さくなるよう選んだ。また、リサイクリング共振器の鏡の曲率は重力波信号を汚す高次モードと呼ばれる光を抑制しつつ、アライメント信号の分離がしやすいように選択した。こうして決定した鏡の曲率を元に、現在鏡の製作が行われている。

また、鏡の懸架系の 3 次元剛体シミュレーションの結果と合わせ、角度制御系の設計を行った。これ

により鏡を冷やすためのサファイアファイバーの共振が干渉計の感度を悪化させることがわかった。現在は東京大学宇宙線研究所と協力し、鏡の懸架系を見直すとともに、懸架系自体の制御モデルの構築を行なっている [13]。

### パラメトリック不安定性

光学系のパラメータ設計の際に考慮すべき問題として「パラメトリック不安定性」という問題がある。当研究室ではこの不安定性の起こる条件の適用範囲を先行研究から拡張し、任意の光学系について適用可能なものとした。また、この結果を実際に KAGRA およびヨーロッパの第 3 世代重力波望遠鏡 ET に対して適用し、これらの干渉計の光学設計においてパラメトリック不安定性のリスクを評価した (図 2.1.2)。今年度は以上の結果を投稿論文としてまとめ、公表する予定である [10, 44]。

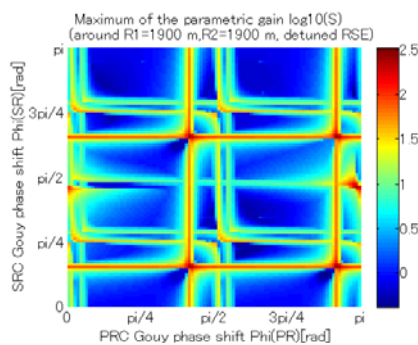


図 2.1.2: KAGRA においてパラメトリック不安定性を評価した結果。

### サファイアの低温物性に関する研究

大型レーザー干渉計型重力波検出器 KAGRA では、干渉計を構成する鏡をサファイアのロッドで懸架する。このサファイアロッドは鏡を引っかけるためにロッドの端が太い特殊な形状をしており、ロッドの表面を研磨することができないことが分かっている。KAGRA の懸架に使用するサファイアロッドは鏡からの入熱を冷凍機に送るために高い熱伝導率を持つ必要があるが、径の細いロッドの熱伝導率は表面状態によって変化することが知られており、現在作成可能であるサファイアロッドの熱伝導率が KAGRA の要求する熱伝導率を満たしているかどうかは非常に重要な問題である。そこで、坪野研究室ではサファイアロッドの低温での熱伝導率測定を行った。

2012 年度は過去に熱伝導率が測定されたことのあるサファイアロッドのサンプルを用いて、熱伝導率測定のセットアップを構成し熱伝導率の測定ができることの確認を行った。また、そのサンプルに関して

暫定的ではあるが熱伝導率の値をおよそ 10 K - 40 K の範囲で測定した [11]。

### PD の感度一様性測定装置の開発

Photo Detector (PD) は干渉計の信号を電気信号に変える重要な要素である。一般に、PD に入射するレーザービームには微小ながら位置揺らぎ (ジッタ) が存在する。そのため、PD 表面上でのビーム照射位置が常に変動している。PD 表面に感度の不均一性が存在すると、このビームジッタが PD 出力の変動として現れ、雑音となる。坪野研究室ではこれまで、制御されたビームジッタを持つビームを PD に照射し、その照射位置をスキャンすることで、PD 表面の感度非一様性を測定する装置を開発してきた。これによって、そもそも非一様性の低い PD を選別すると共に、PD 表面で比較的一様性の高い部分にビームを当てることで、ビームジッタ起因の雑音を低減することができる。特に今年度は、二方向に異なる周波数でビームジッタを加えることで、同時測定を行い、高速な一様性測定が可能な装置を開発した。今後、KAGRA で使われる PD をこの装置で選別していく予定である。

### 2.1.2 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

DECIGO は基線長 1000km のファブリペロー型レーザー干渉計を宇宙空間に建設するという野心的な計画である。これは、主に 10 Hz 以上で感度のある地上レーザー干渉計と、0.1 Hz 以下で感度のある NGO (LISA の後継計画) のような大型宇宙レーザー干渉計の中間にある周波数帯をターゲットとする検出器である。DECIGO は巨大ブラックホールの合体や、初期宇宙からの重力波などの観測を目指している。DECIGO は極めて技術的要求が高い計画であるため、数段階の技術実証実験を経てその実現を目指す。本研究室ではこれまでに世界初の宇宙空間重力波検出器である SWIM<sub>μν</sub> を打ち上げ、そのデータ解析を行っている。また、DECIGO Pathfinder (DPF) と呼ばれる DECIGO の技術実証衛星の開発にも参加しており、主に干渉計モジュールの構造設計を行っている [2, 5, 14, 20]。

### 超小型宇宙重力波検出器 SWIM<sub>μν</sub>

SWIM<sub>μν</sub> は、JAXA の打ち上げた小型実証衛星 1 型 (SDS-1) に搭載された超小型重力波検出器モジュールである。この内部には、長さ 50 mm 程度のねじれ型重力波アンテナ (TOBA) が格納されている。SDS-1 衛星のスピンのよって「回転 TOBA」という新しいタイプの重力波検出器が実現されるため、回収したデータにより低周波宇宙背景重力波の探査を実施した。SWIM<sub>μν</sub> は小型の実証機器であり重力波感度が良いわけではなかったが、DPF のための技術の一部を軌道上実証できたといえる [6]。

### 2.1.3 ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA

ねじれ振り子型重力波検出器 (Torsion-bar Antenna, TOBA) は地上で低周波重力波を観測するための検出器である。現在、神岡で KAGRA という 3 km の腕を持つ干渉計型重力波検出器が建設されているが、こういった地上の干渉計型重力波検出器は共振周波数と地面振動の影響で 10 Hz 以下に感度を持つことができない。また、干渉計を宇宙に打ち上げて低周波重力波を探索するための DECIGO 計画の提案されているが、その実現にはまだしばらく時間がかかる見込みである。そこで地上で低周波重力波探索ができる検出器として TOBA が提案された。これは棒をワイヤーや超伝導ピン止め効果によって浮上させたもので、回転の共振周波数が数 mHz となりこれ以上の重力波に対して感度を持つ。現在、坪野研究室にワイヤー懸架タイプと超伝導磁気浮上タイプのプロトタイプ検出器が開発され、いずれも 0.1 Hz 付近で重力波に対する感度が  $10^{-8}$  から  $10^{-9} \text{ Hz}^{-1/2}$  程度であり、この周波数帯では世界最高感度となっている。今後は雑音を低減させ、より良い感度での観測運転を目指す [15, 21]。

#### Phase-II TOBA の設計

現在までに、TOBA 第 1 号機によって原理検証・観測が行われてきたが、今後は感度向上の為、技術検証や大型化が必要となる。そこで、Phase-II TOBA として、低温技術・防振技術を盛り込んだ中型 TOBA のコンセプトデザイン決定を行った (図 2.1.3)。

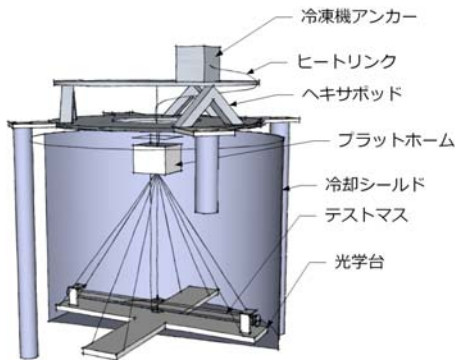


図 2.1.3: Phase-II TOBA のコンセプトデザイン。

本研究で検証する技術は、TOBA だけでなく KAGRA などの他の重力波検出器にも応用可能なものであり、コラボレーションが期待できる。また、重力波観測においてもテストマスの水平方向の回転だけでなく、垂直方向の回転もモニターする事で、双方向からやってくる重力波を観測する新たな解析手法も採用する予定である。

今後、このコンセプトに基づいて具体的な設計・システム構築を行う [4, 45]。

### 2.1.4 低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源の開発

レーザー周波数の安定化は、重力波検出器のみならず、光格子時計や超高精度分光等の精密計測において重要な役割を果たす。一般に周波数安定化には高安定な光共振器を用意し、レーザーをその共振点にロックすることで達成される。しかし、この共振器の長さ安定度は、構成分子の熱的振動によって生じる熱雑音によって制限される。そこで当研究室では、低温において高い機械的 Q 値を持つ単結晶シリコン製の光共振器を用いて、熱雑音を低減した超高安定化レーザーの開発を行なっている。この研究は、工学部香取研究室と共同で進めており、完成した際には、香取研の光格子時計用プローブレーザーとして活用する予定である。本研究の目指す  $10^{-17}$  レベルの安定度を持つプローブレーザーを使えば、100 秒程度の短期積分で  $10^{-18}$  の安定度に到達可能な超高性能光周波数標準を実現可能である [3]。

#### 光学系開発

本研究に使用する光共振器は、単結晶シリコン製のミラーをやはり単結晶シリコン製のスペーサーにオプティカルコンタクトすることで製作される。この際、様々なテクニカル雑音の影響を避けるため、鏡には極めて低い光学損失が要求される。一方で、熱雑音を低減するためには鏡上でのビームスポットサイズをできるだけ大きくする必要がある。そこで、我々の光共振器では、鏡の曲率半径を 3m と大きな値に設定した。しかし、このような大曲率半径の曲面と、オプティカルコンタクトのための平面研磨部分を同一面内に作成するのは困難である。当初、磁気流体研磨によるミラー製作を試みたが、必要な表面粗さを達成することができなかった。そこで、従来からあるオスカー研磨法を応用した鏡面研磨が可能であるか、光学部品メーカーにテストを依頼し、その結果、我々の要求値を満たす鏡面の製作を行うことができた。現在、この鏡基板に誘電体多層膜コーティングを行ったものの評価実験を進めている。また、この共振器に光を導入し、レーザーをロックするための真空対応光学系を構築し、ロックが可能であることを確認した [22, 37, 42]。

#### 光共振器の防振

目的の周波数安定度を獲得する為には、地面や冷凍機による振動によって共振器長が弾性変形するのを防がなければならない。この為に必要となるのが防振台である。そこで我々は、ヘキサポッドと呼ばれる 6 本脚の台を使用する。6 本の脚にはそれぞれピエゾ素子が組み込まれており、小型の seismometer (速度計) でモニターした振動をピエゾ素子にフィードバックして脚の長さを調節する事で、全自由度の振動を抑える。これにより、1 Hz において  $10^{-8} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$

(東京の地面振動レベルの約 1/10) の振動レベルまで防振する事を目標とする。

現在までに装置の組み立て及び 1 自由度制御に成功しているが、現状ではまだ防振比が足りない状況にある。今後、フォトセンサーを用いたサブ制御ループを組み込むことで防振比・帯域を向上させる予定である [25, 31]。

### 光共振器の低温化

低温光共振器ではスペーサーや鏡、コーティングの熱雑音を低減させるために極低温まで共振器を冷却する。また、熱膨張による共振器長変動を小さくするために温度安定化も行う必要がある。

2012 年度は 2011 年度に納品された冷凍機およびクライオスタットの性能評価、光共振器の冷却試験、極低温化での光共振器の温度安定度測定を行った。冷凍機およびクライオスタットの性能評価としては到達真空度、到達温度、熱負荷に対する温度上昇を測定し、当初の要求を満たすことの確認ができた。光共振器の冷却試験では共振器の温度が 5.2 K まで冷却可能であることが確認でき、当初の予定であった 18 K でのオペレーションよりも低い温度でのオペレーションも可能であることがわかった。極低温での光共振器の温度安定度測定では現在の温度安定度が 400 nK/ $\sqrt{\text{Hz}}$  以下であることを見積もることができた。

今後は、温度安定度を向上するための温度安定化や、低温化でのレーザーの光共振器へのロックおよびロックした状態でのレーザーの周波数安定度の評価などを行っていく [8, 28, 33]。

### 2.1.5 極小距離領域における重力法則検証

4 つの相互作用すべてを統一しようとしている超弦理論において、時空は通常の 4 次元座標以外にも複数の余剰次元座標も用いて記述されるとしている。この理論によって、重力相互作用はほかの相互作用と異なり余剰次元空間にも伝播するため、古典的な逆二乗則は微小距離において破れている可能性がある」と指摘されている。

当研究室ではかつて重力波検出器として用いられていた共振型振動子を用いてその検証実験を試みている。この検出器は高い Q 値と低い共振周波数をもつため、高い S/N 比で重力信号を検出することができ、先行研究よりも高精度での重力法則の検証が行うことができると期待される。

2012 年度はデータの一部を取得し、8~10mm の領域で先行研究と同程度の精度の検証に成功した。本年度は引き続き残りのデータの取得を行い 0.1~10mm の幅広い領域で先行研究よりも高い精度での検証結果を得たいと考えている [7, 27, 32]。

### 2.1.6 空間等方性の研究

量子重力理論の研究や宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測から、わずかに Lorentz 不変性が破れている可能性が示唆されている。特に光子の Lorentz 不変性の破れは特殊相対論の否定する光速の異方性に通じ、我々の宇宙観を左右する極めて重要な問題であるため、世界中で光速の異方性探査が行われている。しかし、これまでの多くの実験は Michelson-Morley の実験と同じように往復光速の異方性探査となっており、片道光速の異方性への上限値は往復光速に比べて 4 桁大きいものとなっていた。そこで、我々は片道光速の異方性に着目し、研究を行なっている。片道光速の異方性とは、一方向に進む光の速さの、行き帰りの差である。

これまで異方性探査実験では、光共振器の鏡像反転対称性のため、往復光速の異方性しか測定することはできなかった。そこで、光リング共振器の光路の一部に媒質を入れて屈折率を変え、非対称性を持たせることで片道光速の異方性を測定可能にした。片道光速の異方性が存在すると、この光リング共振器の時計回りの共振周波数と反時計回りの共振周波数に差が生じる。この差をダブルパスという光学系構成により測定することを考案した。ダブルパス構成では一度光共振器に共振した光を逆回りに再入射する。これにより測定が高精度な null 測定となる。また、両回りの共振周波数は共振器の水平や温度の変動に伴って同相で変化するため、共振周波数の差を測定する本手法は高い同相雑音除去により環境変動に極めて強い。これまでの光共振器を用いた異方性探査実験では高レベル防振装置や高真空環境が必須であったが、本実験ではその必要がなく、優れている。

今年度は昨年度に制作した装置を改良を行い、8 月より長期測定を開始した。本異方性探査では光リング共振器を回転させているが、この回転に伴ってレーザーの偏波面が変化してしまう影響への対策と、回転台の水平度出しが主な改良点である。また、長期測定を可能にするためリモート制御環境を整えた。現在も長期測定を続けており、約 220 日分、約 83 万回転分の異方性信号データを取得している。このデータを用いて解析を行ったところ、有意な異方性は見つからず、片道光速の異方性へ  $10^{-14}$  のオーダーの上限値をつけた。特に拡張標準理論の枠組みで解析を行い、光子の Lorentz 不変性の破れパラメータのうち、奇パリティ成分に  $10^{-14}$  オーダー、スカラー成分に  $10^{-10}$  オーダーでの上限値をつけた。これらはこれまで他の実験で得られていたものを 1 桁以上更新するものであり、我々の知る限り世界で最も厳しい上限値である [29, 34, 43, 46]。

### 2.1.7 巨視的振動子の量子測定

近年、光の圧力 (量子輻射圧揺らぎ) と巨視的機械振動子が結合した光共振器 (機械光学系) における巨視的量子現象に関心が集まっており様々な理論予測が発表されている。例えば振動子間の巨視的工

ンタングル状態の生成など、機械光学系は巨視的量子現象を観測する新たな実験系となる可能性を秘めている。

しかし、巨視的な系における輻射圧揺らぎの観測は未だなされていない。困難さの原因は二つあり、一つは振動子の質量が重いこと、もう一つは光軸変動と輻射圧力が結合し共振器が不安定となる (Siddles-Sigg の不安定性) ために、光共振器に十分な光量を溜められない事にある。そこで我々は、エアロゲルと呼ばれる超低密度な物質を基材として利用した鏡を開発し、輻射圧雑音の影響を観測に特化した装置の開発を目指した。現在のところ誘電体多層膜の残留応力が問題となっているため、金コーティングを施した鏡の開発を行った。また、Siddles-Sigg の不安定性を解消する実験構成として三角共振器を利用した自発的に安定な検出装置を提案し、その原理検証に成功した [9, 12, 26]。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] Y. Aso, K. Somiya and O. Miyakawa, *Class. Quantum Gravity* 29, 124008 (2012).
- [2] M. Ando, DECIGO Pathfinder, *International Journal of Modern Physics D* 22 1341002 (2013).

(会議抄録)

- [3] H. Katori, et al, Prospects for frequency comparison of Sr and Hg optical lattice clocks toward  $10^{-18}$  uncertainties, *Frequency Control Symposium (FCS)*, IEEE International pp. 1-6 (2012).
- [4] Ayaka Shoda et al, Search for a Stochastic Gravitational-wave Background with Torsion-bar Antennas, *J. Phys.: Conf. Ser.* **363** 012017 (2012).

(国内雑誌)

- [5] 瀬戸直樹, 八木絢外, 安東正樹, 宇宙レーザー干渉計が切り拓く重力波天文学, *日本物理学会誌* **68** (2013) 38.

(学位論文)

- [6] 穀山渉: Spaceborne Rotating Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observations, 博士論文 (2013).
- [7] 柴田和憲: サブミリメートル領域での重力法則の検証による余剰次元探査, 修士論文 (2013).
- [8] 牛場崇文: 低温シリコン光共振器を用いた高安定化光源の開発, 修士論文 (2013).

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [9] Nobuyuki Matsumoto, Yuta Michimura, Kenshi Okada, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono: Towards the macroscopic quantum phenomena, *GCOE International Symposium on Physical Sciences Frontier, GCOE* (Dec. 2012, Japan).

- [10] K. Shibata et al, Parametric Instabilities in KAGRA and ET, the ELiTES 1st meeting (Nov. 2012).
- [11] T. Ushiba, Measurement of the thermal conductivity of sapphire fibers, ELiTES meeting (Oct. 2012).
- [12] Nobuyuki Matsumoto, Yuta Michimura, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono: Interferometer as a New Field of a Quantum Physics- the Macroscopic Quantum System -, ELiTES Thermal Noise Workshop (Aug. 2012, Germany).
- [13] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: BS Thermal Lensing in KAGRA, ELiTES Thermal Noise Workshop (Aug. 2012, Germany).

招待講演

- [14] Masaki Ando, DECIGO, *Gravitational Waves: New Frontier* (Jan. 16-18, 2013, Seoul National University, Korea)
- [15] Masaki Ando, TOBA: Torsion-Bar Antenna, *Gravitational Waves: New Frontier* (Jan. 16-18, 2013, Seoul National University, Korea)
- [16] Masaki Ando, Gravity and Gravitational-Wave Physics, *Global COE Symposium 'Development of Emergent New Fields'* (Feb. 13, 2013, Kyoto University, Kyoto).
- [17] Y. Aso, Keeping an Interferometer at the Optimal Operating Point, *The 3rd Japan-Korea Workshop on KAGRA* (December 2012, Sogang University, Seoul).
- [18] Masaki Ando, Stray-Light Control in Interferometers, *The 3rd Japan-Korea Workshop on KAGRA* (December 21-22, 2012, Sogang University, Seoul).
- [19] Y. Aso, A new way to see through the universe: Gravitational Wave Astronomy, *Japan Germany Frontier of Science (JGFoS) symposium*, Hotel Steigenberger Sanssouci (October 2012, Potsdam, Germany) .
- [20] M. Ando, Space Gravitational-wave observatory: DECIGO, *The Fifth International ASTROD Symposium* (July 12, 2012, Raman Research Institute, India).
- [21] M. Ando, TOBA: Torsion-Bar Antenna, *GWADW2012* (May 17, 2012, Hawaii, USA).

ポスター

- [22] N. Ohmae, Y. Aso, A. Shoda, T. Ushiba, M. Takamoto, and H. Katori: Stable lasers toward  $10^{-17}$  stability with cryogenic cavity and 1-m-long cavity, *5th International Conference on Untracold Group II Atoms*, (2012年10月, NICT Japan).

(国内会議)

一般講演

- [23] 坪野公夫, 時空のさざ波 - 重力波を求めて, *物理学教室最終講義* (2013年3月, 東京大学, 本郷).

- [24] 坪野公夫, 波多野智, 池上健, 鈴木敏一, 麻生洋一, 大前宣昭, 平松成範, 正田亜八香, 牛場崇文, 柴田和憲, 三橋秀人, 稲場肇, 渡部謙一, 洪鋒雷, 低温光共振器を用いた超高安定光源の開発 V, 日本物理学会 2013 年年次大会 (2013 年 3 月、広島大学、広島).
- [25] 正田亜八香, 麻生洋一, 大塚茂巳, 大前宣昭, 牛場崇文, 平松成範, 坪野公夫, 超高安定化光源のための Hexapod 型能動防振装置の開発 II, 日本物理学会 2013 年春季大会, 27aBE-2 (2013 年 3 月、広島大学).
- [26] 松本伸之, 道村唯太, 麻生洋一, 坪野公夫: 三角共振器を用いた量子輻射圧揺らぎ観測実験, 日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月、広島大学).
- [27] 柴田和憲, 牛場崇文, 大塚茂巳, 八幡和志, 平松成範, 麻生洋一, 坪野公夫, 共振型振動子を用いたサブミリメートル領域における重力法則の検証 (7), 日本物理学会 2013 年年次大会 (2013 年 3 月、広島大学).
- [28] 牛場崇文, 渡辺篤史, 麻生洋一, 平松成範, 大塚茂巳, 大前宣昭, 正田亜八香, 坪野公夫, 低温光共振器に向けた低温システムの開発 II, 日本物理学会 2013 年春季大会 (2013 年 3 月、広島大学、広島).
- [29] 道村唯太, 松本伸之, 大前宣昭, 麻生洋一, 穀山涉, 安東正樹, 坪野公夫: 光リング共振器を用いた片道光速の異方性探査 III, 日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月、広島大学).
- [30] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 山元一広, 道村唯太, 柴田和憲, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 我妻一博, 西田恵里奈, 陳タン, 安東正樹, 新井宏二, 和泉究, 山本博章, KAGRA Collaboration, 重力波検出器 KAGRA の主干涉計開発 II, 日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年 3 月、広島大学).
- [31] 正田亜八香, 麻生洋一, 大塚茂巳, 大前宣昭, 牛場崇文, 平松成範, 坪野公夫, 超高安定化光源のための Hexapod 型能動防振装置の開発, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月、京都産業大学).
- [32] 柴田和憲, 牛場崇文, 大塚茂巳, 平松成範, 麻生洋一, 坪野公夫, 共振型振動子を用いたサブミリメートル領域における重力法則の検証 (6), 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月、京都産業大学).
- [33] 牛場崇文, 正田亜八香, 大前宣昭, 平松成範, 大塚茂巳, 麻生洋一, 鈴木敏一, 坪野公夫, 低温光共振器に向けた低温システムの開発, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月、京都産業大学).
- [34] 道村唯太, 大前宣昭, 麻生洋一, 穀山涉, 安東正樹, 坪野公夫: 光リング共振器を用いた片道光速の異方性探査 II, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月、京都産業大学).
- [35] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 山元一広, 道村唯太, 柴田和憲, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 我妻一博, 西田恵里奈, 陳タン, 安東正樹, 新井宏二, 和泉究, 山本博章, LCGT Collaboration, 重力波検出器 KAGRA の主干涉計開発, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月、京都産業大学).
- [36] 坪野公夫, 波多野智, 池上健, 鈴木敏一, 麻生洋一, 大前宣昭, 平松成範, 正田亜八香, 牛場崇文, 柴田和憲, 三橋秀人, 稲場肇, 渡部謙一, 洪鋒雷, 低温光共振器を用いた超高安定光源の開発 IV, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012 年 9 月、京都産業大学).
- [37] 大前 宣昭, 麻生 洋一, 坪野 公夫, 正田 亜八香, 牛場崇文, 平松 成範, 波多野 智, 三橋 秀人, 香取 秀俊: 低温光共振器を用いた時計用周波数安定化レーザーの開発 II, 日本物理学会 2012 年秋季大会, (2012 年 9 月, 横浜国立大学).
- [38] 坪野 公夫, 重力波プロジェクト報告 KAGRA, DECIGO, DPF, RESCEU 夏の学校 (2012 年 7 月、裏磐梯休暇村、福島).
- [39] 坪野公夫, スタートした KAGRA 計画, ビッグバンセンター研究交流会 (2012 年 6 月、東京大学、本郷).
- 招待講演
- [40] 安東 正樹, 重力波望遠鏡が拓く新しい天文学, 京都大学基礎物理学研究所 談話会 (2013 年 3 月 8 日, 京都大学).
- [41] 安東 正樹, 重力波望遠鏡 かぐら (KAGRA) が拓く新しい天文学, 国立天文台談話会 (2012 年 7 月 6 日, 国立天文台 三鷹).
- [42] 大前 宣昭, 山中 一宏, P. Thoumany, B. Christensen, 高本 将男, 金田 有史, 正田 亜八香, 牛場 崇文, 麻生 洋一, 香取秀俊: より高性能は光格子時計の実現に向けて (水銀光格子時計, 低温光共振器の開発), 電気学会第 7 回精密周波数の発生と高精度分配のための次世代回路技術調査専門委員会 (2012 年 6 月, NICT).
- (セミナー)
- [43] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, and Kimio Tsubono: Search for Anisotropy in the One-Way Speed of Light Using an Optical Ring Cavity, Forum for Prof. John L. Hall and young research careers (Oct. 2012, Japan).
- [44] K. Shibata, Parametric Instability, the ELiTES thermal noise workshop, (Aug. 2012).
- [45] Ayaka Shoda, "Torsion-bar antenna for low-frequency gravitational-wave detection, Caltech-JPL Association for Gravitational Wave Research Seminar (2012).
- [46] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, and Kimio Tsubono: Search for Anisotropy in the One-Way Speed of Light Using an Optical Ring Cavity, LIGO Seminar (July 2012, USA).

## II

# Summary of group activities in 2012



# 1 Tsubono Group

**Research Subjects:** Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

**Member:** Kimio TSUBONO and Yoich ASO

The detection of gravitational waves is expected to open a new window onto the Universe and brings us a new type of information about catastrophic events such as supernovae or coalescing binary neutron stars; these information can not be obtained by other means such as optics, radio-waves or X-ray. Worldwide efforts are being continued in order to construct detectors with sufficient sensitivity to catch possible gravitational waves.

In 2010, a new science project, KAGRA (former LCGT) was approved and funded by the Leading-edge Research Infrastructure Program of the Japanese government. The detector is now under construction in KAMIOKA. This underground telescope is expected to catch gravitational waves from the coalescence of neutron-star binaries at the distance of 200Mpc.

A space laser interferometer, DECIGO, was proposed through the study of the gravitational wave sources with cosmological origin. DECIGO could detect primordial gravitational waves from the early Universe at the inflation era.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Construction of the KAGRA gravitational wave detector
  - Optical design of the interferometer
  - Alignment control
  - Parametric instability
  - Study of cryogenic contacts
  - Study of the homogeneity of PD surface
- Space laser interferometer, DECIGO
  - Development of DECIGO pathfinder, DPF
  - SWIM <sub>$\mu\nu$</sub>
  - Study of the effect of the residual gas
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
  - A new type sensor for TOBA
  - Design of next generation TOBA
- Development of the ultra stable laser source
  - Optical system
  - Vibration isolation of cavity
  - Cryogenics for cavity
- High sensitive laser interferometer using non-classical light
- Gravitational force at small distances
- Study of space isotropy

## Reference

- [1] Y. Aso, K. Somiya and O. Miyakawa, *Class. Quantum Gravity* 29, 124008 (2012).
- [2] A. Shoda, M. Ando, K. Okada, K. Ishidoshiro, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono: Search for a stochastic gravitational-wave background with torsion-bar antennas, *J. Phys. Conf. Ser.* 363 (2012) 012017.