

1.1 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。現在は、高感度なレーザー干渉計を用いた重力波検出に力を注いでいる。これらの研究に関連して、熱雑音や精密計測に関する研究も同時に進めている。

日本の重力波研究の長年の目標計画であった大型レーザー干渉計重力波検出器計画 LCGT プロジェクトが、ついに 2010 年 10 月よりスタートした。これが完成すれば確実に年に数回の重力波イベントを検出できるはずである。現在は光学設計やインフラ整備が急ピッチで進んでいる。一方で、宇宙空間を利用した重力波検出計画も構想されている。われわれは、日本独自のスペース重力波検出器 DECIGO を提唱している。これを実現するための基礎研究として、小型衛星を用いた予備実験などの準備を進めている。これらの基礎研究をもとにして、DECIGO によって巨大ブラックホールや宇宙初期のインフレーションに起源をもつ重力波をとらえようとする計画を推進中である。[3, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 57, 59]

1.1.1 地上レーザー干渉計重力波検出器

スタートした大型レーザー干渉計 LCGT プロジェクト

日本の重力波研究者グループの悲願であった LCGT (Large-scale Gravitational Wave Telescope) 計画が、ついに 2010 年 10 月から最先端研究基盤事業としてスタートすることが認められた。LCGT 計画は、基線長 3 km のレーザー干渉計型重力波検出器を神岡地下のサイトに建設するものである。この重力波検出器では、干渉計を構成する鏡を 20 K の低温に冷却するとともに、高出力レーザー光源を用い、干渉計方式を RSE と呼ばれる方式を採用する事で、TAMA より 2 桁以上高い感度が実現される。それによって、連星合体からの重力波については約 200 Mpc 遠方のイベントまで観測する事ができる見込みである。その範囲にある銀河数を考慮すると、1 年に 10 回程度の頻度で重力波イベントを観測できることが期待できる。また、もし我々の銀河系内で超新星爆発が発生すれば、そこからの重力波も、LCGT によって十分観測可能である。[19, 43, 49, 56, 58]

LCGT の主干渉計設計

当研究室では LCGT 主干渉計の設計チームリーダーである麻生を中心として、LCGT の光学設計及び制御方法の設計を行なっている。LCGT は RSE と呼ばれる干渉計方式を採用するが、この方式では制御すべき鏡の自由度が第一世代干渉計と比較して増える。従って、新しい制御方法の開発が必要となる。また、この制御方法では、主干渉計の雑音を増加さ

せないように、低雑音な誤差信号取得方法を用いなければならない。そのため、主干渉計の様々なパラメータを最適化する必要がある。我々は、干渉計シミュレーションツールを用いた詳細な検討を行ない、主干渉計の各種パラメータ及び、制御信号取得方法を決定した。[42]

1.1.2 宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO

DECIGO, DPF

DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory) は、日本のグループが中心となり、2027 年ごろの打ち上げを目指して検討が進められている宇宙空間重力波望遠鏡計画である。DECIGO は、互いに 1000 km 離れた 3 台のスペースクラフト内に収められた鏡の間の距離をレーザー干渉計を用いて精密に測定することで重力波を観測する装置である。DECIGO は、連星中性子星や連星ブラックホールの合体現象に関してはほぼ宇宙全体を観測範囲に持ち、また、初期宇宙で発生した重力波を直接捕らえることができるだけの感度を持つ、非常に強力な観測装置になるはずである。

DECIGO 計画では、その前に 2 つの前哨衛星を打ち上げ、技術成熟度を段階的に向上させていくロードマップが立てられている。DECIGO パスファインダー (DPF) はその最初の前哨衛星であり、高度 500 km の地球周回軌道に投入される 350 kg 級の小型衛星として設計が進められている。DPF では、中間質量ブラックホール合体からの重力波をターゲットとしており、我々の銀河内のイベントを観測できるだけの感度を持っている。また、地球重力場観測や、宇宙空間での精密計測のための先進科学技術の実現など幅広い成果が期待できる。

DPF は、JAXA が進めている小型科学衛星シリーズの候補の 1 つになっており、衛星システム検討と基本サブシステムの試作と性能評価が進められている。[2, 9, 26, 37, 38, 45, 46, 55]

DPF 向け Fabry-Perot 干渉計実験

DPF には鏡をとりつけた 2 つの試験質量からなる Fabry-Perot 共振器、モノリシックな入射光学系、そして全体を囲う熱シールドからなる干渉計モジュールが搭載される。Fabry-Perot 共振器はドラッグフリー制御によって非接触保持された 2 つの鏡で構成され、共振器長は 30 cm となっている。DPF ではこの共振器長の変動から 0.1-1 Hz の周波数帯域における重力波観測や、地球重力場観測を行う。

2010 年度は BBM 向けに製作された部品が全て揃い、共振器長と 2 つの鏡の pitch と yaw それぞれの姿勢制御に成功した。Fabry-Perot 共振器の全 5 自由度の制御ができ、干渉計制御の動作確認ができたことになる。実験では懸架された 2 つのアルミ製試験マスから成る Fabry-Perot 共振器と、低膨張率ガラス基板に光学素子をシリケートボンディングして

作られた入射光学系を用い、制御用アクチュエータとしてはコイル-マグネット型のものを用いた。また制御には SWIM _{μ v} の気球実験で用いられた FPGA ボードを使い、衛星向けを意識したデジタル制御を行った。[20, 25, 28, 39, 48]

DPF を利用した地球重力場観測

DPF は、重力波の為の技術検証、及び重力波観測を目的とするだけでなく、地球の微細な重力場構造を観測する事も重要な科学的目的の一つと位置付けている。DPF による地球重力場の測定は、海流の流量の変化や、地下水量の変化、南極の氷の厚さなどといった情報を提供する事ができ、有用な地球環境モニターとして期待されている。

測定方法としては、衛星軌道を観測する事で地球の重力場を観測する Satellite-Satellite Tracking in the high-low mode (SST-hl) という方法と、重力勾配を測定する事で地球重力場の構造を観測する Satellite Gravity Gradiometry (SGG) という2つの方法が検討されている。

SGG は、Fabry-Perot 干渉計の2つの鏡にかかる力の差が、干渉計の腕の長さの変化に現れる事を利用して重力勾配を測定する方法である。

一方、地球を周回する衛星の軌道は、基本的には地球の重力場で決定されるため、衛星軌道を GPS によって測定すれば重力場も算出する事ができるというのが SST-hl の考え方である。ただし実際は、太陽風や空気抵抗などといった衛星軌道に影響を及ぼす外乱が衛星には働いている。そこで外乱の分だけ衛星軌道を補正する為、外乱量を測定する装置として加速度計が衛星に搭載される予定である。

この加速度計は、重力波検出に使用される Fabry-Perot 干渉計の鏡をマウントしているテストマスと衛星と非接触に置き、衛星に追従するように制御する。制御の際に衛星とテストマスの相対位置を検出するセンサーとして、テストマスに接着された鏡と共に差動マイケルソン干渉計を構築するレーザーセンサーを使用する。本研究ではそのレーザーセンサーの感度を評価し、GPS の精度で制限されるより十分良い精度を持ったセンサーである事を示した。同時に、動作点が非常に狭く、衛星内での扱いが難しいと予想されるなどといった問題点も明らかにした。

更に、この2つの方法によって、地球重力場を球面調和関数に展開した時にそれらの各次数をどれだけの精度で観測できるかを見積もった。その結果、SGG の方法では約 120 次以下の低次数の球面調和関数の係数は、過去の重力場観測衛星を超える精度で観測する事が可能である事が明らかになった。また、SST-hl の方法でも、SGG の方法や過去の観測結果より精度は悪いものの、50 次以下の係数では有意義な結果が得られるであろうという結果を得た。これらの見積もりにより、DPF を用いる事によって海流や地下水量などといった環境を1年を通してモニターする事が可能になり、更には国外の他の重力場観測衛星ミッションと協力する事によって更に良い精度の測定ができると期待できるという事を示す事がで

きた。[21, 29, 31, 32]

DPF における残留ガス雑音の実験

DPF では重力を検知するための試験マスとその周りにある静電センサの極板との距離が近いために残留ガス雑音が増加する Squeeze film damping という効果が重要となる。この Squeeze film damping の効果を研究するためねじれ振り子を用いた実験を行った。

残留ガスによる外力とねじれ振り子の回転のダンピング係数は揺動散逸定理によって関係づけられる。そのため、ねじれ振り子の腕に取り付けられた長方形型試験マスとその周りに配置された壁との間の距離を変えていきダンピング係数の変化を測定することで Squeeze film damping の効果を評価することができる。Squeeze film damping の効果がモンテカルロシミュレーションと一致することは過去の実験ですでに検証されており、今回行った実験でも誤差の範囲で一致していた。Squeeze film damping の効果は壁を例えば楕形などにしてガス分子が逃げる経路を作ることにより低減することが可能である。今回 2 mm 間隔で細長い穴をあけて楕形にした壁を用いてダンピング測定をした結果、試験マスと壁との距離が 1mm 程度の距離で Squeeze film damping による残留ガス雑音が 1/4 程度にまで低減していた。これは DPF において静電センサを楕形にすることで Squeeze film damping による残留ガス雑音をこの程度低減できることを示す結果である。[40, 47]

SWIM _{μ v}

SWIM (SpaceWire Interface demonstration Module) は、次世代の宇宙用通信規格 SpaceWire を持った汎用小型演算処理・制御システムである。JAXA (宇宙航空研究開発機構) が開発した小型実証衛星 (SDS-1) に搭載され、2009 年 1 月 23 日に打ち上げ・軌道投入が成功裏に行われ、2010 年 9 月に運用を終了 (衛星が停波) した。

SWIM の超小型宇宙実験プラットフォーム開発の一環として、我々は超小型重力波検出器 (SWIM _{μ v}) を開発し、その運用を行った。SWIM _{μ v} は、80mm 立方程度の大きさのねじれ型重力波アンテナモジュール 2 つと制御用基板で構成されている。これは小型であるために、地上の大型重力波検出器に匹敵する感度は実現できないが、試験質量変動の検出や非接触制御など、将来の本格的な宇宙空間重力波検出器のための実証試験をする最初のステップとなる。

今年度の約半年間の運用で、「宇宙空間に存在する検出器」として初めての重力波観測運転を実施した。その際には地上設置型ねじれ型重力波アンテナと観測時間を合わせることで、地上-宇宙の同時重力波観測測定も加えて実施した。これらの測定により、(1) 衛星搭載のため、慣性系に対して回転する重力波検出器による周波数変換、(2) 衛星検出器-地上検出器による相対位置関係が変化する同時重力波観

測、という2点について独自の測定ができたことになる。これは、重力波源の位置の特定、偏波の分離など、これまでにない新たな解析手法研究の基礎データとなる。また、(3)小型衛星上の振動環境の測定、についても工学的に重要なデータとなる可能性があり、これらについてデータ検討と解析の準備を進めた。[5, 16, 22, 23, 27, 30, 41, 54]

1.1.3 磁気浮上重力波検出器

背景重力波のデータ解析

磁気浮上重力波検出器とは、新しいタイプの地上重力波検出器 Torsion-bar Antenna (TOBA) のプロトタイプである。TOBA は、重力波からの潮汐力によるねじれ振子の回転を読み取る事で、重力波を検出するものである。従来のレーザー干渉計型のような重力波検出器は感度を約 100 Hz 以上の高周波数帯域にしか持たないのに対し、TOBA は 1 Hz 以下の低周波の重力波を観測する事ができるのが大きな特色である。1 Hz 以下の低周波重力波には、宇宙背景重力波や巨大ブラックホール連星からの重力波などといった、宇宙論的に非常に興味深い現象が存在すると期待されており、天文学・物理学双方の観点から、その検出が強く望まれている。1 Hz 以下の低周波重力波を観測する手段としては、他にも LISA や DECIGO のように、宇宙空間にレーザー干渉計型重力波検出器を構成する計画が進められているが、TOBA は地上で観測ができる為、比較的安価で建設が可能、ノイズ対策やアップデートが可能であるなどといった利点がある。

現在は、この検出器を用いて TOBA で初めての同時観測・相関解析の研究が進められている。磁気浮上重力波検出器は、東京大学と京都大学の2か所に設置されており、それを用いて約5時間の同時観測を行い、背景重力波をターゲットに相関解析を行っている。これによって、0.1 - 1.0 Hz 帯の背景重力波に対して新たな上限値を設ける事ができるとの見積もりがされており、現在詳細な解析を進めている最中である。

この研究によって、背景重力波は検出こそされないとされるものの、TOBA を用いた同時観測・相関解析の検証のみならず、将来の背景重力波検出の可能性を示す結果となっている。[1, 4, 6, 7, 24, 35, 50]

重力波データに対する擬似雑音時系列の生成

磁気浮上重力波検出器を用いた背景重力波探査に向けた研究を行なっている。特に、 $SWIM_{\mu\nu}$ とのコインシデンス解析を行う際、データ解析パイプラインのチューニングを行うには、バックグラウンドデータが大量に必要な。しかし、 $SWIM_{\mu\nu}$ の観測時間は短いため、充分なバックグラウンドデータが得られない。そこで、 $SWIM_{\mu\nu}$ と同じスペクトルを持つ擬似データを計算機上で生成する研究を本年度冬学期の学生実験として行なった。まずは元となるデータの

パワースペクトルを精度よくポール/ゼロでフィットする。その後、白色雑音を種として、得られたポール/ゼロと同じ形のスペクトルを持つ擬似データを生成する。結果、バックグラウンドスタディに必要な擬似データを任意の長さで生成することが可能になった。

1.1.4 非古典光を用いたレーザー干渉計の高感度化

スクイーズド光を用いたレーザー干渉計の高感度化

スクイーズド光とは、共役な物理量の揺らぎが等しく、かつその一方は対称的な量子限界よりも小さくなっている状態である。我々の実験では、直交位相振幅の揺らぎの一方を小さくした直交位相振幅スクイーズド光を生成する。このような光を発生させるには光子間に相関をもたせる必要があり、そのために非線形光学効果を用いる。具体的には、2次の非線形光学効果である縮退パラメトリック増幅を共振器の中で行う OPO (Optical Parametric Oscillator) を作成し、スクイーズド光を生成する。また、この際必要になる第二次高調波を生成するために、SHG (Second-Harmonic Generator) も作成する。

重力波検出への応用では、その検出帯域である 10 Hz ~ 10 kHz において、量子限界を基準として -10 dB 程度揺らぎを小さくしたスクイーズド光の生成が目指している。2010 年度には、SHG, OPO を作成し、OPO においてパラメトリック増幅によるダウンコンバージョンを確認した。

今後はホモダイン測定によるスクイーズド光の観測を行い、小型のプロトタイプ重力波検出器の量子雑音の低減を目指す。[18, 34, 51]

1.1.5 超高安定レーザー光源の開発

低温光共振器を用いた超高安定光源

高安定なレーザー光源の開発は、光原子時計のブローレーザーや重力波検出器、高精度分光等、広い応用が期待される。一般に高精度のレーザー周波数安定化は、長さを安定化した光共振器にレーザーをロックすることによって実現される。従来は、温度膨張率が低い ULE ガラスを用いた光共振器が広く使われてきたが、その性能は熱雑音で制限されていることが分かっている。坪野研では、この熱雑音を下げ、さらなる周波数安定化のために、冷却した光共振器の開発を行なっている。

現在、低温で高い機械的 Q 値を持ち、かつ熱膨張率が低い素材として、単結晶シリコンを用いた光共振器の研究を行なっている。シリコンは、低温において極めて高い機械的 Q 値と高い熱伝導率を持つため、共振器の素材として有望である。また、18K 付近に熱伝導率のゼロ点があることが報告されており、この温度を用いれば ULE ガラス同様に温度揺らぎ

による共振器長変動を取り除くことができる。今年度は実験装置全体の概念設計と、共振器、冷却系のデザインを行なった。[33]

光共振器支持法の研究

地面振動が本研究で用いる光共振器に伝わると、共振器の弾性変形によって共振器長が変動してしまう。これは超高安定な光共振器を作る上で大きな問題となる。この効果は共振器を対称性良く支持することによって、大部分はキャンセル可能であることが知られている。これまで、等方弾性体として扱える ULE 製光共振器において様々な支持方法が提案されてきた。我々は結晶であるシリコンを用いるため、それに応じた最適な支持方法を探索している。そのため、有限要素法で立方晶の弾性行列を用いて弾性変形の計算を行なった。材料モデルの妥当性は、以前に当研究室で測定した円筒形単結晶シリコンの共振周波数と、このモデルを用いて有限要素法で計算した結果を照合することで確認した。今後は、支持方法を変化させながら、長さ変動が最小になる点を探す予定である。[53]

冷却系のデザイン

光共振器を冷却するために用いる冷凍機は、低振動であることが求められる。一般に低振動とされるパルス管冷凍機を用いても、コールドヘッドが圧力脈動で振動する効果が無視できない。そこで、我々は最近開発されたヘリウム再凝縮型冷凍機を利用することを計画している。この方式では、冷凍機がヘリウムガスで満たされたチェンバーで覆われている。コールドヘッドでヘリウムが液化され、このチェンバーの底部には液体ヘリウムが溜まっている。この底面と光共振器をヒートリンクで繋ぐことによって、共振器を冷却する。底面は振動するコールドヘッドとは機械的な接触を持たないため、振動伝達を大幅に抑えることができる。また、ヘリウム圧力を安定化することで、液体ヘリウムの温度も安定化することができる。パルス管のコールドヘッドはパルス周波数で脈動することが知られているので、それを回避する有効な対策となる。今年度は冷却系の概念設計を完了し、現在メーカーと詳細設計を詰めている段階である。[60]

1.1.6 極小距離領域における重力法則の検証

ねじれ振動子による重力実験

ある種の超弦理論によれば、重力の逆二乗則は厳密には成立せず、サブミリメートル領域でそのずれを検証可能であると言われている。坪野研究室ではかつて重力波検出器として用いられていたねじれ振

動子を使ってこの検証を行っている。これはねじれ振動子が高い Q 値と低い共振周波数をもつため重力信号の S/N 比を高くすることが可能だからである。具体的な測定法としてはねじれ振動子の底面にある深さ 5 mm 程度の窪み (missing-mass) の下でアルミ円盤に 12 回対称に穴を開けたもの (attractor) をモーターで回転させ、ねじれ振動子に働くトルクを測定することによって重力を測定する。

2010 年度はこのための予備実験として制作したねじれ振動子の感度評価、変調重力場を発生させるモーターの周波数制御を中心に行った。感度評価ではねじれ振動子の感度が $1 \times 10^{-15} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ で、室温のブラウン運動を十分に測定できる感度であることが確認でき、数値計算で得られた重力信号の大きさに対して十分な感度をもっていることが確認できた。モーターの周波数制御では PLL 制御を用いて、モーターの回転周波数の揺らぎを 0.1% に抑えることに成功した。

今後はねじれ振動子による重力信号の測定および本格的な重力の逆二乗則の検証を行っていく予定である。[36, 52]

分子の分光による重力法則検証実験

Newton によって示された重力逆二乗則の検証は、階層性問題の解決への道筋を含む興味深いテーマである。我々は京都大学の量子光学研究室と共同で、 Yb_2 分子の分光を用いて mm スケールの重力逆二乗則を検証する研究に取り組んでいる。

分子間ポテンシャルの測定には二光子光会合という技術を用いている。解離極限付近での分子の束縛エネルギーはおよそ 100 MHz 程度であるが、これに等しい周波数差を持つ 2 本のレーザーを原子集団に照射することで原子集団から分子が生成されることを利用している。ここで重要なのは 2 本の光の周波数差であり、周波数の絶対値はそれほど問題とならない。100 MHz 程度の周波数差は GPS にロックされたシンセサイザと AOM を用いれば 7 桁程度の精度で実現することができ、本研究に必要とされる高精度のエネルギー測定を可能にしている。また、本研究においては 10nK 程度に冷却された原子集団が必要とされるが、これも光磁気トラップや蒸発冷却法を用いた冷却により達成されている。

現状では、既に京都大学の装置を用いたデータの測定を終え、補正項 α の解析を開始している。[44]

<受賞>

- [1] 正田亜八香 : Best Student Poster Award at the Gravitational-wave Physics and Astronomy Workshop (University of Wisconsin-Milwaukee, Jan. 26, 2011).

<報文>

(原著論文)

- [2] Seiji Kawamura, Masaki Ando, Naoki Seto, Shuichi Sato, Takashi Nakamura, Kimio Tsubono *et al.*,

- and the DECIGO working group: The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO, *Class. Quantum Grav.* 28 (2011) 094011.
- [3] J. Abadie, et al., Search for gravitational waves associated with the August 2006 timing glitch of the Vela pulsar, *Physical Review D*, 83, 042001, 2011.
- [4] Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Hiroataka Takahashi, Kenshi Okada, Nobuyuki Matsumoto, Wataru Kokuyama, Nobuyuki Kanda, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono: First Observational Upper Limit on Gravitational Wave Backgrounds at 0.2 Hz with a Torsion-Bar Antenna, *Phys. Rev. Lett.* (2011) (in press).
- [5] Wataru Kokuyama, Kenji Numata, and Jordan Camp: Simple iodine reference at 1064 nm for absolute laser frequency determination in space applications, *Applied Optics*, 49, 6264-6267 (2010).
- [6] K. Ishidoshiro, M. Ando, A. Takamori, K. Okada, K. Tsubono: Gravitational-wave detector realized by a superconductor, *Physica C* **470** (2010) 1841-1844.
- [7] Masaki Ando, Koji Ishidoshiro, Kazuhiro Yamamoto, Kent Yagi, Wataru Kokuyama, Kimio Tsubono, and Akiteru Takamori: Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observations, *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 161101.
- [8] J. Abadie, et al., Calibration of the LIGO gravitational wave detectors in the fifth science run Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A, 624, 223, 2010.
- [9] M. Ando, S. Kawamura, N. Seto, et al., DECIGO and DECIGO pathfinder Classical and Quantum Gravity, 27 084010, 2010.
- [10] J. Abadie, et al., First search for gravitational waves from the youngest known neutron star *Astrophysical Journal*, 722 1504, 2010.
- [11] J. Abadie, et al., Predictions for the rates of compact binary coalescences observable by ground-based gravitational-wave detectors *Classical and Quantum Gravity*, 27 173001, 2010.
- [12] . Abadie, et al., All-sky search for gravitational-wave bursts in the first joint LIGO-GEO-Virgo run *Physical Review D*, 81 102001, 2010.
- [13] B. Abbott, et al., Search for gravitational-wave bursts associated with gamma-ray bursts using data from ligo science run 5 and virgo science run 1 *Astrophysical Journal*, 715 1438, 2010.
- [14] J. Abadie, et al., Search for gravitational-wave inspiral signals associated with short gamma-ray bursts during ligo's fifth and virgo's first science run *Astrophysical Journal*, 715 1453, 2010.
- [15] B. Abbott, et al., Searches for gravitational waves from known pulsars with science run 5 LIGO data *Astrophysical Journal*, 713 671, 2010.
- (国内雑誌)
- [16] 安東正樹, 穀山渉, 坪野公夫: はじめての宇宙実験 - 超小型重力波検出器 SWIM $_{\mu\nu}$, *日本物理学会誌* **65-12** (2010) 987-990.
- [17] 坪野公夫: 理学の匠「重力波の計測」、*理学系研究科・理学部ニュース* **42-2** (2010) 10.
- (学位論文)
- [18] 松本伸之: 重力波検出器の感度向上に向けたスクイズド光の生成実験, 修士論文, 2011年.
- < 学術講演 >
- (国際会議)
- 一般講演
- [19] Yoichi Aso, Measuring Coating Thermal Noise with Cryogenic Sapphire Cavities, 2010 Gravitational Wave Advanced Detector Workshop, Kyoto, May 2010.
- [20] Yuta Michimura, Yoichi Aso, Koji Ishidoshiro, Shuichi Sato, Masaki Ando, Akitoshi Ueda, Seiji Kawamura, Kimio Tsubono: *Development of the interferometer module for DECIGO Pathfinder*, The 8th International LISA Symposium (July 2010, California, USA).
- [21] A. Shoda, Y. Michimura, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono, M. Ando, A. Araya, S. Sato, Sensitivity Estimates for the Observation of the Earth's gravity field by DECIGO Pathfinder, 8th LISA Symposium (June 28, 2010, Stanford University).
- [22] Wataru Kokuyama, Masaki Ando, Takeshi Takashima, et al.: In-orbit operation of a compact torsion-bar gravitational wave detector: SWIM $_{\mu\nu}$, 8th International LISA Symposium (June 28, 2010, Stanford University).
- [23] Wataru Kokuyama, Kenji Numata, and Jordan Camp: Simple Iodine Wavemeter for LISA, 8th International LISA Symposium (June 28, 2010, Stanford University).
- [24] A Shoda, K Okada, K Ishidoshiro, M Ando, Y Aso, K Tsubono, Search for a Stochastic Gravitational Wave Background with Torsion-bar Antenna, Gravitational-wave Physics and Astronomy Workshop, (January 26th, 2011, University of Wisconsin-Milwaukee).
- (国内会議)
- 一般講演
- [25] 道村唯太, 麻生洋一, 石徹白晃治, 佐藤修一, 安東正樹, 阿久津智忠, 上田暁俊, 川村静児, 坪野公夫: DECIGO Pathfinder 向けプロトタイプ干渉計実験, 第11回宇宙科学シンポジウム (2011年1月, 宇宙科学研本部).

- [26] 穀山涉, 正田亜八香, 安東正樹, 麻生洋一, 坪野公夫
DECIGO Pathfinder で実現実証される技術の応用
- 惑星重力場観測衛星- 第 11 回宇宙科学シンポジウム
(2011 年 1 月 5 日, JAXA/ISAS).
- [27] 穀山涉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新
谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国
分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎
戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭
光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明, 若林野花: SDS-
1/SWIM 搭載超小型重力波検出器の運用とデータ解
析, 第 11 回宇宙科学シンポジウム (2011 年 1 月 5
日, JAXA/ISAS).
- [28] 道村唯太, 麻生洋一, 石徹白晃治, 佐藤修一, 安東正樹,
阿久津智忠, 上田暁俊, 川村静児, 坪野公夫: DECIGO
Pathfinder 向けプロトタイプ干渉計実験, 第 1 回小
型科学衛星シンポジウム (2011 年 3 月, 宇宙科学研
究本部).
- [29] 穀山涉, 正田亜八香, 安東正樹, 麻生洋一, 坪野公夫
DECIGO Pathfinder で実現実証される技術の応用
- 惑星重力場観測衛星-, 第 1 回小型科学衛星シン
ポジウム (2011 年 3 月 1 日, JAXA/ISAS).
- [30] 穀山涉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新
谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国
分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎
戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭
光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明, 若林野花: SDS-
1/SWIM 搭載超小型重力波検出器の運用とデータ解
析, 第 1 回小型科学衛星シンポジウム (2011 年 3 月
1 日, JAXA/ISAS).
- [31] 正田亜八香, 新谷昌人, 道村唯太, 麻生洋一, 安東正樹,
穀山涉, 坪野公夫, 佐藤修一, DECIGO pathfinder
における地球重力場測定の感度評価, 宇宙科学シン
ポジウム (2011 年 1 月 5 日, 宇宙科学研究本部).
- [32] 正田亜八香, 新谷昌人, 道村唯太, 麻生洋一, 安東正樹,
穀山涉, 坪野公夫, 佐藤修一, DECIGO pathfinder
における地球重力場測定の感度評価, 小型衛星衛星シン
ポジウム (2011 年 3 月 1 日, 宇宙科学研究本部).
- [33] 坪野公夫, 波多野智, 池上健, 鈴木敏一, 麻生洋一,
平松成範, 低温光共振器を用いた超高安定光源の開発,
日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月).
- [34] 松本伸之, 高橋走, 麻生洋一, 坪野公夫, 政田元太,
古澤明, 重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズ
ド光の生成実験 IV, 日本物理学会 2011 年年次大会
(2011 年 3 月).
- [35] 正田亜八香, 岡田健志, 石徹白晃治, 安東正樹, 麻生
洋一, 坪野公夫, 超伝導磁気浮上型ねじれアンテナに
よる東京・京都での重力波同時観測 II, 日本物理学
会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月).
- [36] 牛場崇文, 柴田和憲, 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 II, 日本物理学会 2011 年
年次大会 (2011 年 3 月).
- [37] 川村静児, 安東正樹, 瀬戸直樹, 佐藤修一, 中村卓史,
坪野公夫, 船木一幸, 横山順一, 神田展行, 田中貴浩,
沼田健司, 高島健, 井岡邦仁, 青柳巧介, 我妻一博,
阿久津智忠, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌
人, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石徹白晃治, 石原
秀樹, 和泉究, 市来浄與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上
開輝, 上田暁俊, 植田憲一, 歌島昌由, 江尻悠美子,
榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子,, 大河
正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡
田則夫, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 木内建太, 岸
本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 黒柳幸子, 小
泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在
由秀, 小島康史, 固武慶, 小林史歩, 西條統之, 齊藤
遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親,
佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 正田亜八香, 真貝寿明,
杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 宗宮健太郎, 祖谷元,
高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋忠幸, 高橋弘毅,
高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎,, 高森昭光, 田越
秀行, 田代寛之, 田中伸幸, 谷口敬介, 樽家篤史, 千
葉剛, 陳たん, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居
泰男, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一,
中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤
志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋
本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本宣朗, 平
林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本真克,
二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英
雄, 松本伸之, 道村唯太, 宮川治, 宮本雲平, 三代木
伸二, 向山信治, 武者満, 森澤理之, 森本睦子, 森脇
成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 吉田
至順, 吉野泰造, 柳哲文, 若林野花, スペース重力波
アンテナ DECIGO 計画 (30): 設計・計画, 日本物理
学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月).
- [38] 佐藤修一, 阿久津智忠, 上田暁俊, 新谷昌人, 麻生洋
一, 鳥居泰男, 田中伸幸, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 榎
藤里奈, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太,
坪野公夫, 穀山涉, 安東正樹, 川村静児, DECIGO
pathfinder のための干渉計モジュールの開発 (2), 日
本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月).
- [39] 道村唯太, 麻生洋一, 石徹白晃治, 佐藤修一, 安東
正樹, 阿久津智忠, 上田暁俊, 川村静児,, 坪野公夫,
DECIGO Pathfinder 向けプロトタイプ干渉計実験
III, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月).
- [40] 岡田健志, 麻生洋一, 坪野公夫, 石徹白晃治, 安東正
樹, DPF のマスモジュールにおける残留ガス雑音の
研究 II, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3
月).
- [41] 穀山涉, 安東正樹, 高島健, 森脇成典, 石徹白晃治,
高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 中澤知洋, 高橋忠幸,
国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅
彦, 榎戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一,
高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明, 宇宙実験
実証プラットフォーム (SWIM) を用いた超小型重力波
検出器の開発 X (データ解析), 日本物理学会 2011
年年次大会 (2011 年 3 月).
- [42] 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 辰巳大輔, 山本博章,
安東正樹, 山元一広, 新井宏二, 我妻一博, 西田恵里
奈, LCGT Collaboration, LCGT の干渉計制御, 日
本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月).
- [43] 大石奈緒子, 宮川治, 麻生洋一, 和泉究, 三代木伸二,
斎藤陽紀, 道村唯太, LCGT Collaboration, LCGT
デジタルシステムの構築 (I), 日本物理学会 2011 年
年次大会 (2011 年 3 月).

- [44] 高橋走, 山田裕貴, 菊地悠, 高須洋介, 榎本勝成, 安東正樹, 高橋義朗, イッテルビウム原子の光会合分光による重力逆二乗則の検証実験, 日本物理学会 2011 年年次大会 (2011 年 3 月).
- [45] 川村静児, 安東正樹, 瀬戸直樹, 佐藤修一, 船木一幸, 中村卓史, 坪野公夫, 横山順一, 沼田健司, 神田展行, 高島健, 田中貴浩, 井岡邦仁, 青柳巧介, 我妻一博, 阿久津智忠, 浅田秀樹, 麻生洋一, 新井宏二, 新谷昌人, 池上健, 石川毅彦, 石崎秀晴, 石徹白晃治, 石原秀樹, 和泉究, 市來淨與, 伊東宏之, 伊藤洋介, 井上開輝, 上田暁俊, 植田憲一, 歌島昌由, 江尻悠美子, 榎基宏, 戎崎俊一, 江里口良治, 大石奈緒子/, 大河正志, 大橋正健, 大原謙一, 大淵喜之, 岡田健志, 岡田則夫, 河島信樹, 川添史子, 河野功, 木内建太, 岸本直子, 國中均, 國森裕生, 黒田和明, 小泉宏之, 洪鋒雷, 郡和範, 穀山涉, 苔山圭以子, 古在由秀, 小嶋康史, 固武雅, 小林史歩, 西條統之, 齊藤遼, 坂井真一郎, 阪上雅昭, 阪田紫帆里, 佐合紀親, 佐々木節, 佐藤孝, 柴田大, 正田亜八香, 真貝寿明, 杉山直, 鈴木理恵子, 諏訪雄大, 宗宮健太郎, 祖谷元, 高野忠, 高橋走, 高橋慶太郎, 高橋忠幸, 高橋弘毅, 高橋史宜, 高橋龍一, 高橋竜太郎, 高森昭光, 田越秀行, 田代寛之, 田中伸幸, 谷口敬介, 樽家篤史, 千葉剛, 辻川信二, 常定芳基, 豊嶋守生, 鳥居泰男, 内藤勲夫, 中尾憲一, 中澤知洋, 中須賀真一, 中野寛之, 長野重夫, 中村康二, 中山宜典, 西澤篤志, 西田恵里奈, 西山和孝, 丹羽佳人, 能見大河, 橋本樹明, 端山和大, 原田知広, 疋田涉, 姫本宣朗, 平林久, 平松尚志, 福嶋美津広, 藤田龍一, 藤本真克, 二間瀬敏史, 細川瑞彦, 堀澤秀之, 前田恵一, 松原英雄, 松本伸之, 道村唯太, 袁泰志, 宮川治, 宮本雲平, 三代木伸二, 向山信治, 武者満, 森澤理之, 森本睦子, 森脇成典, 八木絢外, 山川宏, 山崎利孝, 山元一広, 吉田至順, 吉野泰造, 柳哲文, スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (27): 設計・計画, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [46] 佐藤修一, 阿久津智忠, 上田暁俊, 新谷昌人, 麻生洋一, 鳥居泰男, 田中伸幸, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 権藤里奈, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 穀山涉, 安東正樹, 川村静児, DECIGO pathfinder のための干渉計モジュールの開発 (1), 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [47] 岡田健志, 麻生洋一, 坪野公夫, 石徹白晃治, 安東正樹, DPF のマスモジュールにおける残留ガス雑音の研究, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [48] 道村唯太, 麻生洋一, 石徹白晃治, 佐藤修一, 安東正樹, 上田暁俊, 川村静児, 坪野公夫, DECIGO Pathfinder 向けプロトタイプ干渉計実験 II, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [49] 梶田隆章, 黒田和明, 中谷一郎, 大橋正健, 藤本真克, 川村静児, 齋藤芳男, 鈴木敏一, 坪野公夫, 三尾典克, 神田展行, 中村卓史, 安東正樹, その他 LCGT Collaboration Members, 大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 XIII, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [50] 正田亜八香, 岡田健志, 穀山涉, 安東正樹, 石徹白晃治, 西澤篤志, 麻生洋一, 坪野公夫, 超伝導磁気浮上型ねじれアンテナによる東京・京都での重力波同時観測, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [51] 松本伸之, 高橋走, 麻生洋一, 坪野公夫, 政田元太, 古澤明, 重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験 III, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [52] 柴田和憲, 牛場崇文, 大塚茂巳, 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, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [53] 麻生洋一, 穀山涉, 坪野公夫, 高本将男, 香取秀俊, 低温ファイア共振器を用いた超高安定レーザーの開発 II, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [54] 穀山涉, 安東正樹, 森脇成典, 石徹白晃治, 高橋走, 新谷昌人, 麻生洋一, 高島健, 中澤知洋, 高橋忠幸, 国分紀秀, 吉光徹雄, 小高裕和, 湯浅孝行, 石川毅彦, 榎戸輝揚, 苔山圭以子, 坂井真一郎, 佐藤修一, 高森昭光, 坪野公夫, 戸田知朗, 橋本樹明, 宇宙実験実証プラットフォーム (SWIM) を用いた超小型重力波検出器の開発 IX (軌道上運用 2), 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [55] 阿久津智忠, 安東正樹, 川村静児, 佐藤修一, 麻生洋一, 上田暁俊, 新谷昌人, 道村唯太, 穀山涉, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 鳥居泰男, DECIGO pathfinder の信号処理系の開発, 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [56] 宮川治, 麻生洋一, Stefan Ballmer, 辰巳大輔, 斎藤陽紀, 大石奈緒子, 三代木伸二, CLIO Collaboration, 低温レーザー干渉計 CLIO(30) デジタル制御 (IV), 日本物理学会 2010 年秋季大会 (2010 年 9 月、九州工大、北九州).
- [57] 坪野公夫, 重力波で宇宙を見る - 検出実験の現状 - , 理学部オープンキャンパス 2010 講演会 (2010 年 8 月, 理学部 1 号館、東大).
- 招待講演
- [58] 麻生洋一, The LCGT Collaboration, 超高感度重力波検出器のための光学設計と制御第 58 回応用物理学学会学術講演会, シンポジウム「ついに始まった重力波観測用巨大干渉計の建設」.
- [59] 坪野公夫, 重力波をとらえる、河合塾エンリッチ講座 (2010 年 10 月, 河合塾本郷校、東京).
- (セミナー)
- [60] 麻生洋一, 低温光共振器を用いた超高安定レーザー, 先端的極低温冷却技術調査研究会, 高エネルギー加速器研究機構, 2011/3/11.