

レーザー干渉計で探るダークマター

カリフォルニア工科大学, 東京大学大学院理学系研究科付属ビッグバン宇宙国際研究センター

道村 唯太

yuta@caltech.edu, michimura@phys.s.u-tokyo.ac.jp

2022年11月4日

1 はじめに

本稿では、重力波検出などに用いられるレーザー干渉計を用いて、超軽量ダークマターを探索する実験について述べる。超軽量ダークマターはその名の通り軽いため、粒子としてよりは波としてふるまい、その周波数はダークマターの質量を m_{DM} として

$$f = \frac{m_{\text{DM}}}{2\pi} = 242 \text{ Hz} \left(\frac{m_{\text{DM}}}{10^{-12} \text{ eV}} \right) \quad (1)$$

と書ける。重力波の初検出イベントである GW150914 が LIGO で検出されたときの周波数が 35 Hz から 250 Hz であることからわかる通り、地上のレーザー干渉計はこの周波数帯の距離変動に感度が良い。連星ブラックホールや連星中性子星からの波だけでなく、ダークマターからの波も探索してやろう、というのが本稿で紹介する研究である。

ダークマターの候補と言えば、WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) である。10–1000 GeV の質量範囲は階層性問題を解決し、ダークマターの残存量も説明するという理論的な魅力があり、しかも LHC や地下実験で探索しやすいという都合の良さもあった。そのため長年の間、約 2 桁の狭い質量範囲にある WIMP ダークマターに探索が集中してきた。しかし LHC では新粒子の発見に至らず、地下実験による制限も厳しくなっている。よく考えると、ダークマターは超軽量粒子から原始ブラックホールまで約 90 桁にもわたる質量範囲に多様な候補があるのだから、もっと他の候補を新たな発想で探索するべきではないか、という認識が近年広まってきている。Nature にも [1] のような記事が出るほどである。

レーザー干渉計を使ったダークマター探索も、新発想による実験の一つである。LIGO による重力波の初検出でレーザー干渉計の精度の高さが改めて認識されることになったのか、玉石混交の提案論文が近年多数出ている。特に超軽量ダークマターは宇宙論の観点から注目を浴びており、また先に述べたように周波数範囲が重なっ

ていることから、レーザー干渉計と相性が良い。すでに LIGO や Virgo のデータを用いた探索で上限値の更新にも成功しており、今後も目が離せない新分野である。

本稿ではまず、マイケルソン干渉計やファブリ・ペロー共振器といった、レーザー干渉計の原理について説明する。次に、超軽量ダークマターからの信号がどのような性質を持っているのか、どのようにデータを解析するかについて簡単に述べる。そして、アクシオン、ゲージボゾン、スカラーボゾンといった 3 種類の超軽量ダークマターの探索原理とその現状について、余談を交えながら紹介する¹。特にアクシオン探索については、KAGRA や LIGO といったレーザー干渉計型重力波望遠鏡²を使った探索だけでなく、東京大学安東研究室を中心に進めているテーブルトップ実験 DANCE についても紹介する。なお、指摘される前に断っておくが、本稿では Axion-Like Particles (ALPs) のことを単にアクシオンと呼ぶことにする。また、特に断りのない限り $\hbar = c = \epsilon_0 = 1$ とする。

2 レーザー干渉計の原理

2.1 マイケルソン干渉計

レーザー干渉計といえば、やはりマイケルソン干渉計である。この干渉計を使ったマイケルソン・モーリーの実験は特殊相対性理論に繋がったし、重力波観測により一般相対性理論を検証した LIGO もマイケルソン干渉計に基づいている。

マイケルソン干渉計の模式図を図 1 に示した。レーザー光源から出た光は、ビームスプリッターで半分は Y 腕へと反射され、もう半分は直交する X 腕へと透過する。光はそれぞれ両腕の端に置かれた全反射鏡で折り返され

¹ こういう記事では余談や脚注ばかり読んでしまうという方も多いと思う。私ももちろんその一人である。

² 「重力波干渉計」と言われることもあるが、電波干渉計などとは違って重力波を干渉させているわけではないので、長くてもこのように表現する。

て再びビームスプリッターで合流し、一部は光源側へと戻り、残りは光検出器の方へ進む。2つの経路の差によって干渉縞が変化するため、光検出器で検出される光量を測定することで、両腕の長さの差動変動を測定することができる。鏡を固定して長さは一定だと思えば、2つの経路を進む光速の差を測定することができるし、鏡を振り子で懸架すれば重力波による長さの変化を測定することができるわけである³。

現在の地上の重力波望遠鏡では、レーザー光源として波長 1064 nm、光強度 100 W 級の連続光を使っている。光検出器で受ける光量変化の検出限界は、究極的には光子数の量子揺らぎ、つまりショットノイズで決まる。ポアソン分布する光子数揺らぎを距離に換算すると、マイケルソン干渉計の距離の検出限界は

$$L_{\text{shot}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{hc\lambda}{2\eta P}} \quad (2)$$

と書ける⁴。ここで λ はレーザー波長、 η は光検出器が光子を電子に変換する際の量子効率、 P は干渉計に入射する光強度である。 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 、 $P = 100 \text{ W}$ 、 $\eta = 1$ を代入すると、 $L_{\text{shot}} = 5 \times 10^{-18} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ となる。マイケルソン干渉計がいかに高感度かがわかっていただけと思う。

両腕の往復長の差がちょうどレーザー波長分だけ変化すると、干渉縞の明暗が 1 回分変化する (図 1)。地面は常時微動で常に μm 程度は揺れているので、放っておくと干渉縞はどんどん変化してしまい、線形な変位信号を取ることができない。そこでレーザー干渉計を常に高感度に動作させるためには、光検出器で検出した光量変化を打ち消すように鏡の位置を制御する必要がある。鏡の位置を一定に保つために、どのくらい制御しないといけなかったか、というフィードバック信号から、変位信号を得ることができるわけである。

重力波望遠鏡では、光検出器に入る光量がほぼゼロになるように鏡の位置を制御している。そうするとショットノイズが最適になるだけでなく、レーザー光強度の変動の影響を受けにくいという利点がある。また、両腕の長さが完全に等しければ、レーザー波長の変動は両腕の長さが同相で変化すると同等なので、レーザー波長の変動が変動しても干渉縞は変化しない。つまり、レーザー周波数雑音の影響を受けにくくなる。光検出器に入る光量ではなく、入射光量でショットノイズが決まること、光源側の雑音と同相雑音除去されることが、数え切れないほどあるマイケルソン干渉計の偉大な点の一部で

³干渉計に入射する光子 1 個 1 個を考えると、それがどちらの腕に行くかは半々の重ね合わせ状態にあることになり、それがどちらの鏡を揺らすかも重ね合わせ状態になる。LIGO では 40 kg、KAGRA では 23 kg の懸架鏡が使われているが、このような巨視的な物体とその重力場が重ね合わせ状態になるのか、という研究も活発に行われている。重力波望遠鏡は、望遠鏡自体が面白い。

⁴レーザー干渉計の話では h や c を書かないと落ち着かない。

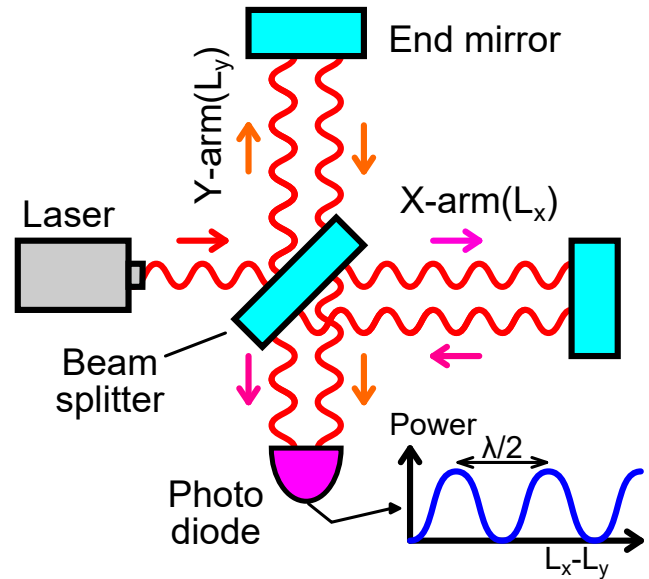


図 1: マイケルソン干渉計の模式図。X 腕と Y 腕の長さの差動変動を干渉縞の変化として検出する。

ある。逆に、両腕に同相で効く変化を検出するのは不得意であるため、ダークマター探索などに利用する際は気をつける必要がある。

2.2 ファブリ・ペロー共振器

重力波にしるダークマターにしる、基本的には干渉計の腕の長さが長いほど望遠鏡として高感度になる。LIGO は 4 km、KAGRA は 3 km で、将来の重力波望遠鏡計画では Einstein Telescope や Cosmic Explorer といった 10 km や 40 km の計画もあるが、地球も丸いので地上ではせいぜいそのくらいが限界である。合わせ鏡を使って、光を何度も往復させることで、実効的に腕の長さを稼ごうというのが、光共振器である。

その中でも 2 枚の合わせ鏡を使ったものをファブリ・ペロー共振器と呼ぶ。鏡が高い反射率を持っていると、一度入った光は何度も鏡間を往復して、なかなか出てこない。鏡間の往復長がちょうどレーザー波長の整数倍であれば、往復する光は強め合うので、共振器内の光強度が増幅され、共振状態になる。一方で、鏡間の距離が少しでもずれると、共振状態から外れてしまい、これを離調と言う。光の平均往復回数は

$$N_{\text{rt}} = \frac{2F}{\pi} \quad (3)$$

と書ける。ここで F は光共振器のフィネスであり、2 枚の鏡の振幅反射率 r_1 と r_2 を用いて

$$F = \frac{\pi\sqrt{r_1 r_2}}{1 - r_1 r_2} \quad (4)$$

である。鏡の反射率が高いほど、フィネスは高くなり、平均往復回数も高くなる。光は往復回数だけ鏡の変位を

感じるため、腕の長さは実効的に N_{eff} 倍され、信号もそれだけ増幅される⁵。一方で、共振状態にないと線形な信号が取れないため、線形レンジがそれだけ狭くなり、鏡の制御の精度もそれだけ厳しくなる。

注意が必要なのは、フィネスを上げることでショットノイズのような読み取りの雑音に対する信号雑音比は上げることができるが、鏡が実際に揺れる変位雑音に対する信号雑音比は変わらないということである。例えば、地面振動による鏡の揺れの影響や、鏡の熱振動の影響は、フィネスを上げて小さくすることはできない。光共振器は光を何度も往復させることで変位雑音も増幅してしまうためである。振り子で鏡を懸架することで地面振動などの影響を抑えようとしても、振り子の共振周波数より高い周波数でしか防振されない。共振周波数は振り子の長さで重力加速度で決まり、地上ではせいぜい 1 Hz 程度になるため、干渉計の構成をどんなに工夫しても、数 10 Hz より低周波の信号を検出するのは難しい。

また、腕の長さやフィネスを上げると最高感度は高くなるが、周波数帯域は狭くなってしまふ。光が光共振器に滞在している時間が、重力波やダークマターの波の周期より長くなると信号のキャンセルが起こってしまうためである。光共振器は 1 次のローパス特性を持っており、これが高周波側の感度の限界を作る。ショットノイズだけを考えると、高周波側の感度は干渉計への入射光強度だけで決まり、基本的には腕の長さやフィネスを上げて感度を向上させることはできない。

2.3 レーザー干渉計型重力波望遠鏡

さて、マイケルソン干渉計と光共振器を完璧に理解したところで、重力波望遠鏡に用いられる干渉計構成を簡単に説明しておく(図 2)。マイケルソン干渉計に光共振器をいろいろ足したものが重力波望遠鏡であることがわかっていただくと、このあとのダークマター探索の話がさらに面白くなると思う。

まず、マイケルソン干渉計 (MI) の両腕にファブリ・ペロー共振器をつけたものがファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計 (FPMI) である。実効的に腕の長さを長くした干渉計である。先述の通り、干渉計では光検出器に入る光量がほぼゼロになるように制御しているので、光はほぼすべて光源側に戻っていく。これを鏡で打ち返して、何度も干渉計に入射させようというのがパワーリサイクリングという技術であり、これを導入した干渉計を

パワーリサイクルド・ファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計 (PRFPMI) と呼ぶ。光検出器へは重力波信号が乗った干渉光が向かうわけだが、これを打ち返すと、今度は信号を増幅することができる。これがシグナルリサイクリングという技術であり、PRFPMI にこれを導入するとデュアルリサイクルド・ファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計 (DRFPMI) になる。シグナルリサイクリング鏡はその位置を調整することによって、信号を打ち返さずに抽出することもできる。これをレゾナント・サイドバンド・エクストラクション (RSE) という⁶。

KAGRA や LIGO では、腕共振器のフィネスを上げることで信号増幅を行っているが、先述のように帯域を狭めてしまうため、RSE 方式を利用して帯域の回復を行っている。単に腕共振器のフィネスを下げるのとは異なり、腕内の光強度を落とさずに信号だけを抽出しているため、通常は入射光強度を上げないといけない、高周波側の感度向上ができるという賢すぎる技術である。なお、腕共振器をなくしたデュアルリサイクルド・マイケルソン干渉計 (DRMI) でも、原理的には同等の感度を実現することができる。ドイツにある GEO600 という重力波望遠鏡は DRMI の構成になっている。腕の長さが 600 m と短いため LIGO と比べると重力波に対する感度は悪いが、後述するようにスカラー場には感度が良い。

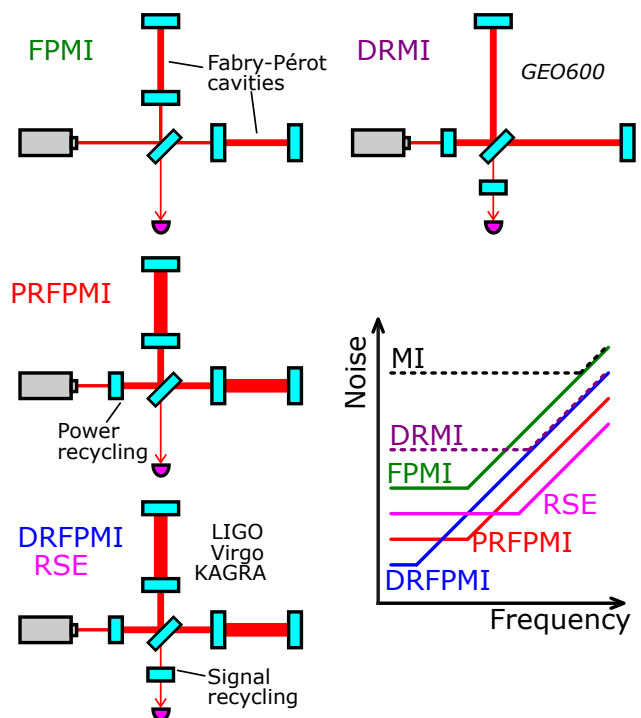


図 2: レーザー干渉計型重力波望遠鏡のさまざまな構成。構成によってショットノイズ等価変位雑音がどのように変わるかも図示した。下に行くほど感度が良い。

⁵マイケルソン・モーリーの実験は、その進化版が現在も続けられているが、レーザーと共振器の登場で精度が飛躍的に向上した。マイケルソンとモーリーの 1887 年の実験では直交する方向の光速の差が $|\delta c/c| \lesssim 10^{-9}$ であるという結果であったが、現在は 9 桁も厳しい上限値がついている [2]。ちなみに、筆者はマイケルソン・モーリー型の実験では測定することができない、光速の行き帰りの差を測定する実験で博士論文を書いた [3]。この実験が 2 つの偏光間の光速の差を測定するアクション探索につながるようになる。

⁶呪文感を出すようにカタカナ表記にしてみた。さらに、シグナルリサイクリング鏡の位置を中途半端な位置に離調すると、特定の周波数のみ信号を増幅したり、標準量子限界を超える感度を実現することも可能である。このあたりの干渉計技術は魔法である。

3 超軽量ダークマターからの信号

レーザー干渉計の基本の話はもうお腹いっぱいであるうから、そろそろダークマターの話をする。アクシオンやゲージボゾンといった各論に移る前に、超軽量ダークマターから期待される信号波形の一般論とデータ解析手法について、まずはここで簡単に説明する。

超軽量ダークマターは非常に軽いため、数密度は非常に高い必要があり、フェルミオンではなくボゾンである。さまざまな位相と速度を持ったボゾンの波が重なってダークマター場を作っていることになる。たまたま波が強め合うこともあれば、弱め合うこともあるだろう。ド・ブロイ波長 λ_{DM} 程度の領域では波の重なり具合は変わらないと考えられ、その領域をダークマターが通過する時間より十分短い間は、場の振幅や位相は一定だと思えることができる。この時間は

$$\tau = \frac{\lambda_{\text{DM}}}{v_{\text{DM}}} = \frac{2\pi}{m_{\text{DM}}v_{\text{DM}}^2} \quad (5)$$

と書くことができ、コヒーレント時間と言う。ここで $v_{\text{DM}} \sim 10^{-3}$ はダークマターの速さである。式 (1) と見比べればわかるように、コヒーレント時間の間に波は $1/v_{\text{DM}}^2 \sim 10^6$ 回程度振動する。例えば $m_{\text{DM}} = 10^{-12}$ eV に対しては、 $\lambda_{\text{DM}} = 1.2 \times 10^9$ m、 $\tau = 4.1 \times 10^3$ sec となり、ド・ブロイ波長は地球の大きさより 2 桁大きく、1 時間程度のコヒーレント時間を持つことになる。

標準的なダークマターハローモデルを用いて、ボゾン場の波形を数値シミュレーションしたものが図 3 である。確かにコヒーレント時間 τ のスケールで振幅と位相が変化しており、 τ より十分短い時間スケールでは連続波と見なせることがわかる。

さて、このようなほぼ連続波の信号を検出するにはフーリエ変換が適している。パワースペクトル密度を計算し、特定の周波数に雑音より十分大きなピークが立っていたら、その周波数に対応した質量のダークマターを

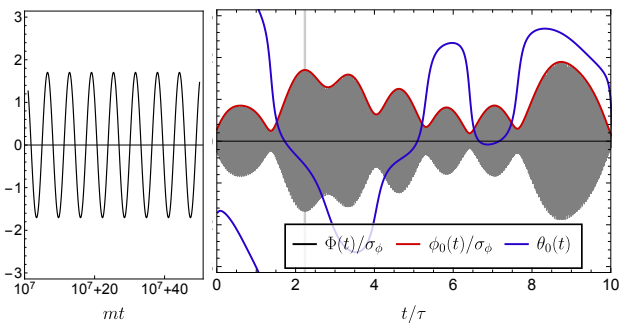


図 3: 数値シミュレーションから得られた超軽量ダークマター場の波形。左図は短い時間スケールでの波形を表しており、右図の一部を拡大したものである。[4] の図 1 より引用。

検出したと言うことができる。またそのピークの高さから、ダークマターと標準模型粒子の結合定数がわかる。有意なピークが見つからなかった場合は、各質量に対する結合定数の上限値を計算することができる。

上限値を計算する場合には、先述のダークマターの確率的なふるまいを考慮に入れることが重要である。測定時間がコヒーレント時間と同等かそれより短い場合は、たまたま場の振幅が小さかっただけの可能性も考慮に入れる必要があるため、場の平均振幅で計算した場合に比べ、上限値は緩くなる。また、この場合は連続波とみなせるため信号雑音比が \sqrt{T} で上がっていくが、測定時間が長くなると $T^{1/4}$ でしか上がっていかなくなってしまう⁷。高質量側の探索はこの理由で難しくなっている。

こうしたデータ解析には、重力波の分野で用いられている手法、特にパルサーなどからの連続波解析の手法を適用することができる。時系列データを扱っているため、波形の特徴を利用して雑音と明確に区別することができる点が強みである。例えば、スペクトルに有意なピークが見つかったとしても、そのピーク幅が $\Delta f/f$ で v_{DM}^2 程度でなければ、機械共振などダークマター由来ではないピークだと言うことができる。

4 アクシオンダークマター

そもそもアクシオンは量子色力学 (QCD) における強い CP 問題を解決するために、1970 年代に提案された未発見粒子である。その後、ひも理論などが様々なアクシオンに似た粒子 (ALPs) を予言することがわかり、特に 1 eV 以下の軽いアクシオンはダークマターの有力な候補として認識されている。アクシオンの探索手法はいろいろあるが、ここではアクシオンと光子の結合を利用して、レーザー干渉計で光の偏光の変化を測定する手法を紹介する。なお、この手法では ADMX 実験や CAST 実験のように磁場を用いてアクシオンを光子に変換をするわけではないため、磁場を用いる必要はない。

4.1 探索の原理

アクシオンと光子の結合があると、左巻きの光子と右巻きの光子の位相速度に差が生じ、

$$c_{\text{L/R}}(t) \simeq 1 \pm \frac{g_{a\gamma} a_0 m_{\text{DM}}}{2k} \sin [m_{\text{DM}} t + \delta_\tau(t)] \quad (6)$$

となる。ここで $g_{a\gamma}$ はアクシオン-光子結合定数、 a_0 はアクシオン場の振幅、 $k = 2\pi/\lambda$ は光の波数、 $\delta_\tau(t)$ は τ

⁷測定時間とコヒーレント時間が同等のときの扱いは厄介である。また、ゲージボゾンの場合はベクトル場であるため、速度依存性も考えなくてはならない。これらを定式化したのが中塚洋佑くんを中心としてまとめた論文 [4] である。理論、実験、解析をきちんと理解していないとできない計算で、非常に刺激的な研究である。

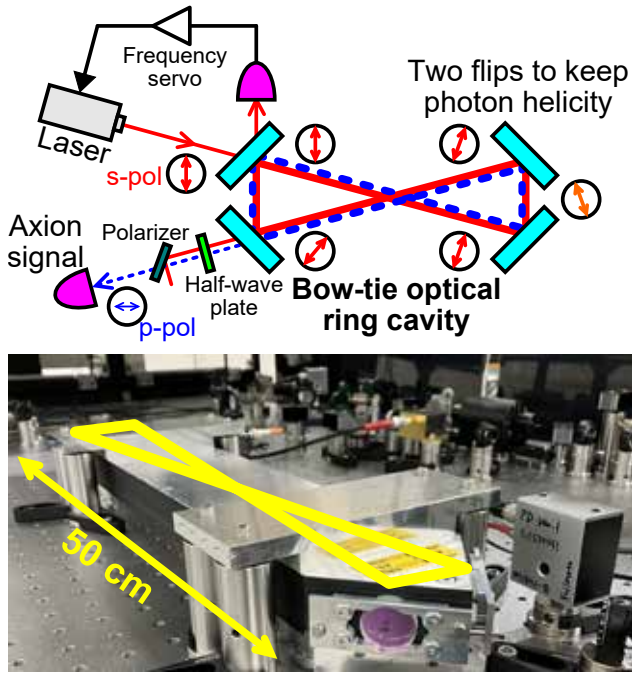


図 4: DANCE の実験原理 (上) と DANCE Act-1 の光リング共振器 (下、撮影: 藤本拓希)。例えば s 偏光を入射した場合、直交する p 偏光の光量を測定することでアクシオン探索を行う。

の間は一定と考えられる位相因子である。ダークマターは全てアクシオンだと仮定し、地球の周りのダークマター密度の測定値 $\rho_{DM} = a_0^2 m_{DM}^2 / 2 \simeq 0.4 \text{ GeV/cm}^3$ を用いると、 $\delta c_0 \equiv g_{a\gamma} a_0 m_{DM} / (2k)$ は

$$\delta c_0 \simeq 1.0 \times 10^{-24} \left(\frac{\lambda}{1064 \text{ nm}} \right) \left(\frac{g_{a\gamma}}{10^{-12} \text{ GeV}^{-1}} \right) \quad (7)$$

と見積もることができる。これは非常に小さな値であるが、レーザー干渉計によって測定可能である。

左円偏光と右円偏光の位相速度の差がこのように周期的に変化していると、直線偏光の基底で見れば、偏光の向きが周期的に左に傾いたり右に傾いたりすることに対応する。レーザー干渉計に入射した偏光とは直交する偏光成分を探索することにより、アクシオン探索ができるわけである⁸。アクシオンの振動周期よりも十分短い間は、光が進む距離が長ければ長いほど偏光の回転角が大きくなるため、感度が良くなる。そこで光共振器を使いたいところだが、2枚鏡からなるファブリ・ペロー共振器だと、鏡の反射で偏光が反転してしまい、偏光の回転が蓄積されない。そこで、光共振器の両端に鏡を2枚おいたボウタイ型の光リング共振器を用いれば、2回の反転で偏光が保存されるため信号が増幅できる (図 4)。これが我々の実験提案である⁹ [5]。周回長 10 m のような

⁸円偏光の基底で考えて、位相速度の変化は長さの変化と同等だからレーザー干渉計で探索できるのだ、とも理解できるし、直線偏光の基底で考えて、偏光の向きが変わると波が完全に干渉しなくなるから探索できるのだ、と理解することもできる。

⁹全ては 2018 年 2 月の小幡一平くんのメールから始まった。京都

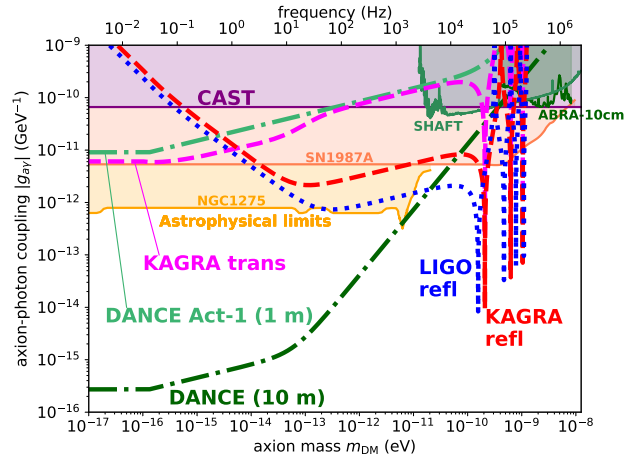


図 5: アクシオン-光子結合に対する DANCE、KAGRA、LIGO の感度。ショットノイズに制限された状態での 1 年間の観測を仮定している。「trans」と「refl」はそれぞれ腕共振器透過光ポート、重力波検出ポートを利用した場合の感度。塗られた領域は CAST など先行研究で排除されている。DANCE の高質量側の感度が悪いのは先述の光共振器のローパス特性のためである。

実験室規模の光リング共振器でも、これまでの制限を数桁上回る感度が期待できる (図 5)。

光共振器の中を光が一周する時間がアクシオンの振動周期に比べて無視できなくなってくると、光共振器の周波数応答を考える必要がある。実はファブリ・ペロー共振器でも、光が往復する時間がアクシオンの振動周期の奇数倍になる場合は、光の行きと帰りでアクシオン場がちょうど反転しているため、鏡による偏光の反転を利用して信号を増幅することができる。重力波望遠鏡の長い腕共振器はこれにうってつけであり、我々は実験提案を行った¹⁰ [6, 7] (図 5)。偏光を測定するための光学系を導入する必要はあるが、重力波は入射した光の位相を、アクシオンは入射光とは直交する偏光の光量を見るため、それぞれ独立な信号で、重力波観測と同時にアクシオン探索ができる。また、重力波観測には雑音となる変位雑音は偏光を回すわけではないため、アクシオン探索には直接は雑音にならないのもこれらの提案の肝である。

の YKIS で、位相速度の差を測定したいと安東正樹先生に相談したところ、筆者の博士論文の装置が使えるのではないかと話になったそう。小幡くんの話を理解できるようになったのは、筆者の中高からの同期である藤田智弘くんのおかげである。持つべきものは Tomo である。3 月の野田での物理学会中に 3 人で議論し、すぐに長いボウタイ型にすることなど方針が固まり、感度計算も完了した。対面の学会は本当に良いものである。

¹⁰より低質量側の探索のため、DECIGO など低周波が得意な宇宙重力波望遠鏡が使えないか、というところから検討が始まった。ボウタイ型にすると重力波にとっては鏡のロスが増えて良くない。重力波の分野で開発されたシンクロナス・リサイクリング干渉計との類推から、ファブリ・ペロー共振器でもできるはずだと長野晃士くんが気がつき、中心となって計算を進めてくれた。偏光反転のため当初はこの方法は低周波極限には感度がないと思っていたが、光共振器の透過光は片道 1 回分の効果を受けるはずではないかと、藤田くんのセミナーで伊部昌宏先生に指摘していただき、もう 1 本の論文 [7] になった。セミナーはしておくものである。

4.2 DANCE 実験

我々はボウタイ型の光リング共振器を用いたアクシオン探索実験を DANCE (Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) と名付け、東京大学で実験を開始した。周回長 1 m、フィネス 3×10^3 、入射光量 1 W という比較的手軽なパラメータでも、ショットノイズに到達できれば CAST 実験と同等の感度を得ることができる。これを DANCE Act-1 と名付けて開発の第 1 幕を進めている (図 4)。2021 年 5 月には初となる 12 日間の観測運転ができ、現在解析結果をまとめている [8]。

また、この運転時には 2 つの偏光が同時に光リング共振器に共振せず、感度が大幅に悪化するという問題があった。共振器で信号を効率的に増幅するためには、入射光の偏光だけでなく、アクシオンにより生じた、入射光とは直交する偏光成分も共振器内で共振する必要がある。しかし、光リング共振器では鏡に 45 度近い入射角が存在するため、鏡での反射時に 2 つの偏光間に位相差が生じてしまい、同時共振が実現できなかったのである。そこで光リング共振器に三角形の補助共振器を追加することで位相差を補償し、同時共振を実現することを考え、2021 年 11 月にその原理実証に成功した¹¹ [9]。現在はより高性能な共振器鏡を利用し、フィネスの向上や雑音の低減を進めている。

4.3 重力波望遠鏡を使った探索の現状

重力波望遠鏡に偏光光学系を追加してアクシオン探索をする手法を ADAM-GD (Axion DArk Matter search with Gravitational wave Detectors) と名付け、開発を行っている。KAGRA には 2021 年 7 月に X 腕、12 月に Y 腕の透過光ポートにそれぞれ偏光光学系を導入した (図 6)。2023 年 3 月に開始予定の O4 観測では、当初設計に比べて低い入射光量での運転になることなどから高感度は期待できないが、世界初となる重力波望遠鏡からのアクシオンデータが取得できる予定である¹²。

また LIGO でも、干渉計を構成する鏡の複屈折の影響を見積もるために、重力波検出ポートに偏光光学系が最近導入された¹³。アクシオン探索のために導入したものの

¹¹これは重力波望遠鏡で言うところのシグナルリサイクリングと同様に考えることができる (図 2)。最高感度を高めるためには信号を持つ偏光成分を共振させるシグナルリサイクリング状態にする必要があるが、離調によりそれができなかった。信号を持つ偏光成分に対してはフィネスを下げることで RSE をしたり、補助共振器の共振状態を調整することであえて離調させて、特定の周波数にのみ高感度化させたりすることができることがわかった。重力波の呪文のような干渉計技術がアクシオン探索にも役に立っている。

¹²なお、ご心配をおかけしているサファイア鏡の複屈折はそれが周期的に変動しない限り雑音にはならない。ちなみに、重力波に対する感度にとっても、O4 時点では複屈折は大きな問題にはならないというのが筆者の見解である。

¹³アメリカに来るまでこのことは知らなかった。いつの間にか LIGO がアクシオン探索にも対応していた形である。これだけでも、思い切って渡米した甲斐があるというものである。

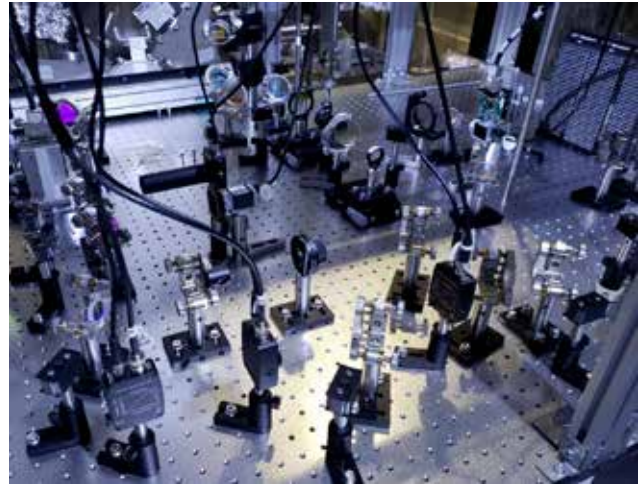


図 6: KAGRA の X 腕透過光ポートに導入された偏光光学系 (撮影: 大島由佳)。この光学系からのデータを利用することで、アクシオン探索ができる。

ではないため、16 Hz と非常に低いサンプリング周波数になっていることや、信号較正のための系が導入されていないことなど課題はあるが、なんとか解決し、O4 観測でのデータを用いた探索を行いたいと考えている。

5 ゲージボゾンダークマター

新しいゲージボゾンも、超軽量ダークマターの候補である。ダークマターの存在は標準模型を超える新物理があることを示唆しているため、標準模型に含まれていないゲージ対称性があってもおかしくない。新しいゲージ対称性として特に有力なのが、バリオン数とレプトン数の差である B-L である。標準模型において B-L は保存量であり、対応する $U(1)_{B-L}$ ゲージボゾンが存在すれば、B-L に比例した力が存在することになる。また、導入に少し工夫は必要だが、バリオン数に比例した力を媒介する $U(1)_B$ ゲージボゾンを考えることもできる。これらが超軽量ダークマターであれば、物体に周期的な力を加えることになるから、その揺れをレーザー干渉計で測定することにより探索が可能となる。

5.1 探索の原理

ゲージボゾンダークマターからの力は、電場中で荷電粒子が受ける力と同様に考えることができる。質量 M 、「電荷」 q_D を持ち、位置 \vec{x} に置かれた自由質点が受ける加速度は

$$\vec{a} = \epsilon_D e \frac{q_D}{M} \sqrt{2\rho_{\text{DM}}} \vec{e}_A \sin [m_{\text{DM}} t - \vec{k}_{\text{DM}} \cdot \vec{x} + \delta_\tau(t)] \quad (8)$$

と書くことができる。ここで ϵ_D は $D = B$ または $B - L$ に比例した力の結合定数で、電磁力の結合定数 e で規格

化したものである。 $\vec{k}_{\text{DM}} = m_{\text{DM}} v_{\text{DM}}$ で、 \vec{e}_A はゲージボゾン場のベクトルの向きを表す単位ベクトルである。

$U(1)_B$ ゲージボゾンについては、物体の質量はほぼバリオンの質量で決まっているから、中性子の質量 m_n を用いて $q_B/M \simeq 1/m_n$ と書け、ほとんど物質によらない値となる。一方、 $U(1)_{B-L}$ ゲージボゾンについては、 q_{B-L} はほぼ中性子数であるから、 $q_{B-L}/M \simeq 0.5/m_n$ となる。原子核における中性子の割合は原子によって異なるため、物質によって異なる加速度が生じることになる。 $a_0 = \epsilon_D e \sqrt{2\rho_{\text{DM}}}/m_n$ と置くとその大きさは

$$a_0 = 3.7 \times 10^{-33} \text{ m/s}^2 \left(\frac{\epsilon_D}{10^{-22}} \right) \quad (9)$$

となる¹⁴。これも非常に小さい値であるが、レーザー干渉計によって測定可能である。

この加速度をレーザー干渉計で測定するには、動かない固定鏡と懸架した鏡の間の距離を測定するか、異なる物質でできた2つの懸架鏡の間の距離を測定すればよい。これは小規模な実験でも可能であり、機械振動子を利用した実験などが提案されている [10]。また、同じ物質でできた鏡であっても、ダークマターの波長に比べて無視できないほど2つの距離が離れていると、2つの鏡の間の位相差を利用して探索が可能となる。レーザー光が2つの鏡の間を往復する時間がダークマターの振動周期に比べて無視できなくなると、光が往復する間に鏡が揺れるため、さらに高感度な探索が可能となる¹⁵ [11]。2つの鏡の物質は同じでも、重力波望遠鏡に用いられているような長い腕共振器は探索にはうってつけとなる。

実は世界の重力波望遠鏡の中でも、唯一の低温望遠鏡である KAGRA は特殊であり、腕共振器の鏡は低温で性質が良いサファイア製である一方、ビームスプリッターなどその他の常温の鏡は石英製となっている。パワーリサイクリング共振器長、シグナルリサイクリング共振器長、マイケルソン干渉計の差動長のような信号に、石英鏡とサファイア鏡に生じる加速度の差が乗っていることになる。このような補助的な長さ信号を利用すると、低質量側では LIGO や等価原理検証実験よりも高感度に $U(1)_{B-L}$ ゲージボゾンを探ることができることがわかり、我々は提案を行った¹⁶ [12](図 7)。干渉計を高感度に運転するために必要な信号ではあるが、重力波信号が含まれておらず、サイエンスデータとしてみなされていなかった信号でダークマター探索ができるというわけである。

¹⁴ アクションの a_0 と記号が被ってしまったが、別物である。

¹⁵ スカラー場の先行研究では取り入れられていたこの効果がゲージボゾンでは取り入れられていないことを指摘したのは森崎宗一郎くんである。我々は森崎効果と呼んでいる。

¹⁶ もともとは量子計測を行っている松本伸之さんから [10] を紹介してもらったのがきっかけであった。新たに量子センサーを作らなくとも、KAGRA でできるのではないかと計算してみたところ、先行研究からの上限値を超えられることがわかった。本来の目的ではなく、しかも補助信号なのにも関わらず高感度とは、やはり重力波望遠鏡はとんでもない。

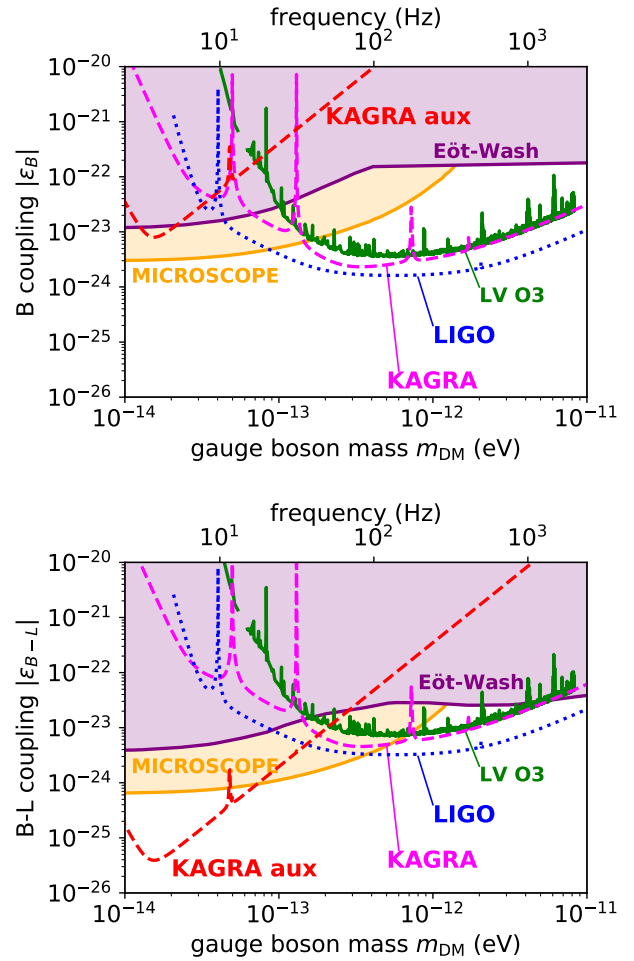


図 7: 上図は $U(1)_B$ 、下図は $U(1)_{B-L}$ ゲージボゾンの結合に対する KAGRA、LIGO の感度。設計感度での 1 年間の観測を仮定している。「KAGRA aux」は KAGRA の補助信号を使った場合の感度。「LV O3」は LIGO と Virgo の O3 観測からの上限値 [13]。塗られた領域は等価原理検証実験により排除されている。

5.2 重力波望遠鏡を使った探索の現状

LIGO と Virgo ではすでに重力波信号データを用いて、腕共振器を構成する鏡に生じるゲージボゾンからの力の探索が行われている。最初の結果は O1 観測の公開データを使ったものであったが、最新の結果では、O3 観測のデータを用いて、等価原理検証実験からの上限値を 1 桁程度更新する上限値が得られている¹⁷ [13](図 7)。

また、KAGRA では 2020 年 4 月に行った O3GK 観測のデータを用いた解析を進めている¹⁸。O3GK 観測では感度が大幅に足りず、上限値の更新は見込めないが、補助信号の較正や疑似信号の除去、データ解析パイプラインなどの実証ができつつある。1つの干渉計からの複数の

¹⁷ O1 の解析では森崎効果が入っていなかったが、O3 では正しく入れることができたため、1 桁程度感度が良くなっている。LIGO-Virgo-KAGRA の一員として、素晴らしい貢献である。

¹⁸ 本来の重力波のデータ解析もやりながら、桑田潤くんと森崎くんが中心となって進めている。

信号を利用した疑似信号の除去手法など、新たな開発も進めている。次の O4 観測では、LIGO-Virgo-KAGRA の全データを用いた相関解析を共同で行う予定である。

6 スカラーダークマターなど

アクシオンは擬スカラー場であるが、スカラー場ももちろん有力なダークマター候補であり、レーザー干渉計で探索可能であるので最後に紹介したい¹⁹。電磁場やフェルミオンに結合するスカラー場があると、微細構造定数 α や電子質量 m_e を変化させる。ボア半径は $a_B = 1/(m_e\alpha)$ であるから、スカラー場は固体の大きさや屈折率を変化させることになり、固体の大きさや光学的厚みを測定することにより、この変化を探索することができる。KAGRA や LIGO は両腕の光共振器が同じであるためほとんど感度はないが、GEO600 は DRMI の構成 (図 2) であり、両腕でビームスプリッタの影響が異なるため、この変化を LIGO よりも高感度に探索することができる。実際に、GEO600 の 2016 年と 2019 年のデータを用いた探索により、等価原理検証実験からの制限を上回る上限値がつけられた²⁰ [14]。

重力波望遠鏡は地面振動防振など変位雑音の低減がすでに行われているため便利であるが、スカラーボゾンやゲージボゾンの探索には必ずしも長基線長である必要はない。テーブルトップ実験でも高感度な探索ができる可能性があり、DAMNED [15] など様々な実験が行われている。超軽量ダークマターの他にも、WIMP やもっと重いダークマターの衝突による鏡の揺れをレーザー干渉計で測定する提案もなされている。また重力波データ自体にも、ブラックホール周りのボゾン雲や原始ブラックホールからの重力波が含まれている可能性があり、活発な解析が行われている。レーザー干渉計によりダークマターの正体が明かされる日が来るかもしれない。

7 さいごに

重力波が専門である私が、高エネルギーニュースに素粒子の話題で記事を書くというのは、とてもありがたいことであり、とても畏れ多いことです。ともかく、レーザー干渉計を使うと、距離の変動や光速の変動を精度よく測定することができ、ダークマター探索にも使えるということを知っていただけたら幸いです。レーザー干渉計を使った素粒子実験というのは、まだまだアイデア次第で様々な可能性のある分野です。なにか楽しい話をお持ちでしたら、ぜひお気軽にご連絡ください。

¹⁹自分の研究ではないが、紹介せずにはいられない面白さである。自分もぜひスカラー場もやりたいものである。

²⁰なお、GEO600 の提案論文では計算が間違っており、こちらは筆者の指摘により 30%ほど損してしまった。[14] では直っている。

本稿の内容は藤田智弘、藤本拓希、桑潤哉、長野晃士、森崎宗一郎、中塚洋佑、西澤篤志、小幡一平、大島由佳、Haoyu Wang ら (敬称略) との共同研究に基づいています。本研究は学術変革領域研究 (A) 「ダークマターの正体は何か? - 広大なディスカバリースペースの網羅的研究」および JST さきがけ「革新的光科学技術を駆使した最先端科学の創出」の支援を受けています。また、KAGRA、LIGO、Virgo の多くの研究者が干渉計を少しでも高い感度、高い安定度で動作させようと日夜努力しているからこそ、本研究が可能となっています。共同研究者の皆様にご改めて感謝いたします。

参考文献

- [1] G. Bertone, T. M. P. Tait, *Nature* **562**, 51 (2018).
- [2] M. Nagel *et al.*, *Nature Communications* **6**, 8174 (2015).
- [3] Y. Michimura *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 200401 (2013).
- [4] H. Nakatsuka *et al.*, arXiv:2205.02960.
- [5] I. Obata, T. Fujita, Y. Michimura, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 161301 (2018).
- [6] K. Nagano, T. Fujita, Y. Michimura, I. Obata, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 111301 (2019).
- [7] K. Nagano *et al.*, *Phys. Rev. D* **104**, 062008 (2021)
- [8] Y. Oshima *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **2156**, 012042 (2021).
- [9] H. Fujimoto *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **2156**, 012182 (2021).
- [10] D. Carney *et al.*, *New J. Phys.* **23**, 023041 (2021).
- [11] S. Morisaki *et al.*, *Phys. Rev. D* **103**, L051702 (2021).
- [12] Y. Michimura *et al.*, *Phys. Rev. D* **102**, 102001 (2020).
- [13] LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, KAGRA Collaboration, *Phys. Rev. D* **105**, 063030 (2022).
- [14] S. M. Vermeulen *et al.*, *Nature* **600**, 424 (2021).
- [15] E. Savalle *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 051301 (2021).