

## KAGRA のサファイア鏡を使った新しいダークマター探索

ダークマターの正体は何か？ 一世紀近くの間、科学者たちはこの質問を問い続けていますが、依然としてこれは宇宙の大きな謎です。様々な宇宙観測から、目には見えないけれども質量を持った何か——ダークマター——が、通常の目に見える物質を重力で集め、銀河や星を形成するのに重要な役割を果たしていることがわかってきました。現在では、我々の宇宙にある全物質のうちの 85% はダークマターであることがわかっていますが、それが何から構成されているのかはわかっていません。例えば、ダークマターは太陽の数百倍の質量を持つ原始ブラックホールかもしれませんが、我々が知っている一番重い素粒子と似たような質量を持つ新しい素粒子かもしれませんし、電子よりも何十倍も軽い超軽量ボゾン粒子かもしれません。こうしたダークマター候補を検出しようと、様々な実験や観測が行われてきましたが、確実な検出に成功した例はまだありません。

LIGO、Virgo、KAGRA は、レーザー干渉計を用いて、重力波が通過したときに生じるわずかな長さの変化を計測する重力波検出器です。これらの検出器は重力波検出のために設計されたものですが、長さの変化を生むようなダークマターにも高い感度を持ちます。そのようなダークマターの一つの候補が、ベクトルボゾンダークマターと言われるものです。電荷をもった物体が、電磁場の中で電磁力を感じるのと同じように、素粒子の標準理論に含まれていないような新しい「電荷」をもった物体は、ベクトル場の中で非標準的な力を感じます。超軽量ベクトルダークマターは、そのような「電荷」を持ったすべての物体に、周期的な力を与えます。そういった物体は、レーザー干渉計の鏡でも構いません。新しい「電荷」は、鏡の中の陽子数と中性子数の和であるバリオン数かもしれませんし、中性子数であるバリオン-マイナス-レプトン数 ( $B-L$ ) かもしれません。レーザー干渉計は、このようなベクトルダークマターからの力によって生じる、鏡と鏡の間の距離の変化を測定することができます。2021 年には、LIGO-Virgo-KAGRA コラボレーションは、Advanced LIGO と Advanced Virgo の [第 3 期観測 \(O3\) のデータ](#) を用いて、このようなベクトルダークマターからの力の強さに最も厳しい**上限値**をつけました。

LIGO と Virgo では、すべての鏡は**石英ガラス**できており、すべての鏡が同じ質量と電荷の比を持つので、ベクトルダークマター場の中ですべての鏡はほぼ完璧に同じだけ動きます。レー

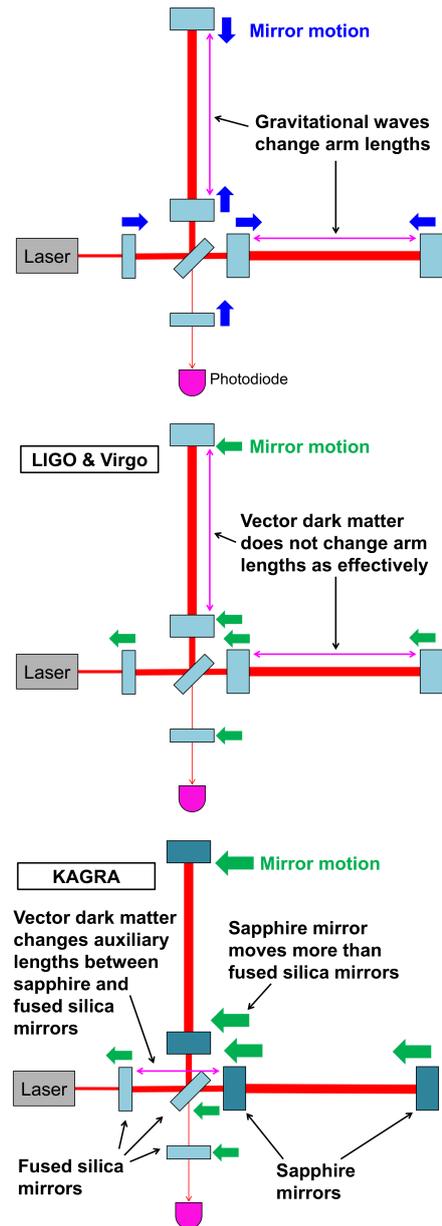


図 1: 上図は重力波に対して、レーザー干渉計の鏡がどのように動くかを表した図。中図は LIGO と Virgo の鏡がベクトルダークマターに対してどう動くかを表した図で、下図は KAGRA のサファイア鏡と石英ガラスでできた補助鏡の間の距離がベクトルダークマターでどう変わるかを表した図。LIGO と Virgo ではベクトルダークマターはほとんど長さを変えないことに注目。

ザー干渉計は鏡と鏡の間の距離を測定するのは得意ですが、すべての鏡が同じように動き、鏡間の距離が変わらない場合は感度がありません。実際、LIGO と Virgo の場合、ベクトルダークマターに対する感度は、鏡が違う方向に動いた場合と比べると約 5 桁も悪くなっています。日本にある KAGRA は、試験質量となる 4 つの鏡はサファイア製で、その他の補助的な鏡は石英ガラス製であるという独自の構成をしたレーザー干渉計です。 $B-L$  数に結合したダークマターの場合、サファイア鏡は石英ガラス鏡に比べると少しだけ中性子の割合が大きいため、少しだけ大きく動きます。つまり、サファイア鏡と石英ガラス鏡の間の距離を測定することで、特に低質量領域では、KAGRA は LIGO や Virgo よりも高感度にベクトルダークマターを探索することができるのです。

今回の研究では、KAGRA がドイツにある GEO600 と初めて共同観測を行った O3GK 観測からの KAGRA のデータを用いました。データの中から周期的な長さの変化を探索するための新しい解析コードを開発しました。超軽量ベクトルダークマターの質量によって、異なる周波数の周期的な長さ変化が生じるため、様々な周波数で長さ変化を探索することで、様々な質量のダークマター粒子を探索することができます。超軽量ダークマターは確率的にふるまうため、こうした長さ変化の大きさはコヒーレント時間と呼ばれる時間スケールで変動します。そこで、こうした確率的なふるまいを注意深く考慮に入れた探索を行いました。O3GK 観測では、KAGRA はサファイア鏡と石英ガラス鏡の間の距離を記録する補助データも取得していました。100 時間以上のデータを解析した結果、ダークマターの証拠となる信号は見つからず、 $B-L$  ベクトルダークマターからの力があつたとしても、これよりは小さいという上限値をつけました。

KAGRA は 2020 年の O3GK 観測の時点ではまだ設計感度に到達していなかったため、我々の上限値は先行研究に比べると数桁悪いものでした。とはいえ、KAGRA のような重力波検出器の補助データが、宇宙物理学的な観測に利用できることを十分に示しました。O3GK 観測が行われた当時は、補助データが宇宙観測に利用できると思われていませんでした。重力波信号が含まれる主データはサファイア鏡の間の距離を記録するものであり、補助データは通常、この重力波データを高精度なものに保つだけのために使われるものだからです。将来の観測では、補助データにも注目して雑音を下げっていくことで、「ダークマターの正体は何か？」という問いに KAGRA が答える日が来るかもしれません。

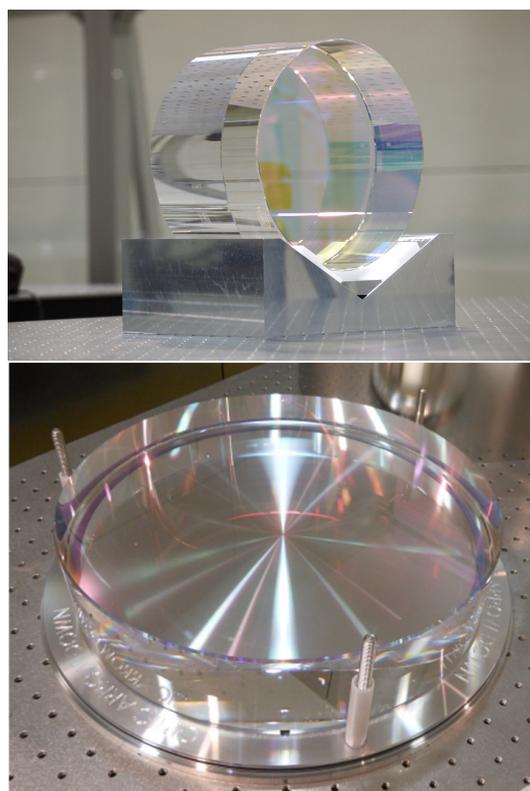


図 2: KAGRA のレーザー干渉計で使われているサファイア鏡(上)と石英ガラス鏡(下)の写真。我々の目にはどちらも無色透明に見えますが、サファイア鏡の方が石英ガラス鏡に比べると少しだけ中性子率が大きく、 $B-L$  ベクトルダークマターとの相互作用で少しだけ大きく動きます。

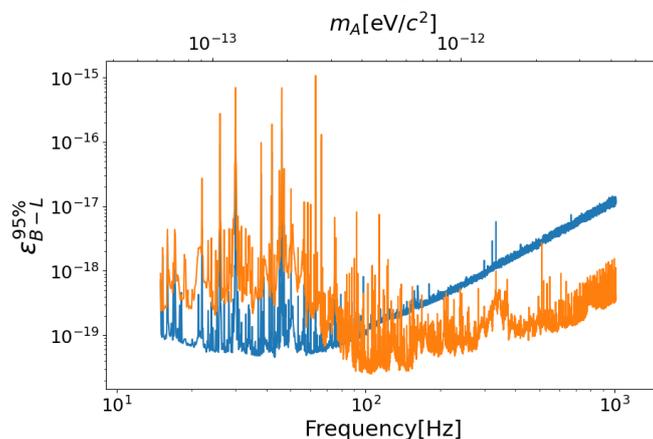


図 3: KAGRA データから得られた、 $B-L$  ベクトルダークマターからの力の強さに対する上限値。2 つの補助データから得られた上限値を色を変えて表しています。力の強さは、電磁力の強さに対する比率として表されています。

## さらに興味のある方へ

私たちのウェブサイトでニュースを更新しています。

<https://www.ligo.org/news.php>

<https://www.virgo-gw.eu/>

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>



本発表の論文

<https://dcc.ligo.org/P2300250/public> または <https://arxiv.org/abs/2403.03004>

## 用語集 (登場順)

- **ダークマター (Dark matter)**: 我々の目には見えないけれども存在し、宇宙の全物質の 85% を占める物質のことです。我々が知っている通常の物質と重力相互作用をする、ということだけはわかっています。
- **LIGO (ライゴ)**: レーザー干渉計型重力波観測所 Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory の略で、アメリカにある 2 台の重力波検出器です。1 台はルイジアナ州リビングストンに、もう 1 台はワシントン州ハンフォードにあります。どちらも直交した 4 km の腕を 2 つ持つレーザー干渉計です。
- **Virgo (ヴィルゴ)**: イタリアのピサにある重力波検出器です。片腕 3 km のレーザー干渉計です。
- **KAGRA (かぐら)**: 日本の岐阜県神岡の地下にある重力波検出器です。低温サファイア鏡が使われた片腕 3 km のレーザー干渉計です。
- **ベクトルボゾン (Vector boson)**: スピン 1 を持つ粒子の種類です。例えば、光子はベクトルボゾンで、電磁力を媒介します。この記事では、素粒子の標準理論に含まれていない、新しい力を媒介するベクトルボゾンを考えています。
- **バリオン-マイナス-レプトン数 (Baryon minus lepton number or  $B - L$ )**: バリオンとレプトンは粒子の種類で、バリオン-マイナス-レプトン数 ( $B - L$ ) はバリオンの数とレプトンの数の差のことです。陽子や中性子はバリオンの仲間、電子はレプトンの仲間です。中性原子では陽子と電子の数は等しいので、 $B - L$  は中性子数に一致します。電荷が保存するのと同様に、素粒子の標準理論では  $B - L$  も保存します。そのため、 $B - L$  は我々が知らない新しい力に関係した「電荷」である可能性があります。
- **上限値 (Upper limit)**: 検出されなかったという観測結果との整合性を保ちながら、ある量を持つことのできる最大値のことです。この記事では、各質量、あるいは各周波数の  $B - L$  ベクトルダークマターからの力の大きさに対する制限を考えていて、95% の信頼度での区間推定を用いて議論しています。つまり、与えられたデータをもとにすると、95% の確率で、真の値はこの値よりも小さい、ということになります。
- **石英ガラス (Fused silica)**: よくあるガラスの素材です。すべての LIGO や Virgo の鏡と、KAGRA の補助的な鏡は極めて純粋な石英ガラス (二酸化ケイ素) で作られています。
- **サファイア (Sapphire)**: KAGRA は、試験質量となる 4 つの鏡に人工サファイアを用いています。天然サファイアは含まれる不純物のため青色ですが、用いられている人工サファイアは極めて純粋な酸化アルミニウムでできており、無色透明です。サファイア鏡は低温で優れた光学的特性や熱的特性を持っています。
- **GEO600 (ジオ 600)**: ドイツのハノーファーにある重力波検出器です。片腕 600 m のレーザー干渉計です。各腕は折り返されて V 字型をしているので、光学的な片腕の長さは 1.2 km になっています。

---

本解説のオリジナルは、<https://www.ligo.org/science/Publication-03KAGRADM/> にあります。

(日本語訳: 道村唯太、真貝寿明)