

捉えどころのない超軽量暗黒物質の探査

第 4 回観測運転第 1 期 (O4a) のデータからは、ディラトン、ダークフォトン、テンソル暗黒物質（ダークマター）の証拠は得られませんでした。しかし、それらの結合に対する上限値は、既存の実験値を桁違いに上回る結果が得られました。

暗黒物質は宇宙の全物質の 85% を占めますが、私たちには直接見ることはできません。しかし、さまざまな天体への影響を観測することは可能です。暗黒物質は各銀河に広がって存在し、恒星が軌道から飛び出さないようにしています。また、遠く離れた銀河からの光線の変え、宇宙の大規模構造の形成を導き、宇宙マイクロ波背景放射（宇宙が誕生してわずか 38 万年だった頃の、宇宙最古で最も遠い宇宙の写真）にも痕跡を残しています。

LIGO, Virgo, KAGRA の重力波検出器は、連星ブラックホールや連星中性子星の合体、自転する非対称形状のパルサー、爆発する恒星、そしてこれらすべての組み合わせから発生する重力波を観測するために設計されました。しかし、これらの検出器は非常に感度が高いため、検出器と直接相互作用する暗黒物質も観測することができるはずで

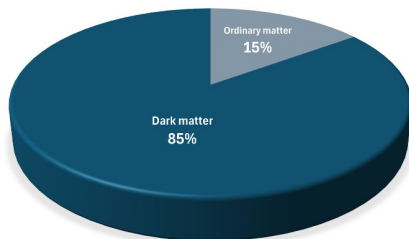


図 1: 暗黒物質が宇宙の主要な構成要素であることを示す円グラフ。「通常の」物質（すべての惑星、恒星、銀河を構成する原子を含む）は宇宙の物質の約 15% を占めるに過ぎないのに対し、暗黒物質（本研究で探査する 3 種類の超軽量粒子を含む可能性がある）は約 85% を占めている。

ここでは、3 種類の暗黒物質を探査します。(1) ディラトン、(2) ダークフォトン、(3) テンソルボゾンです。これらの質量は電子の質量より 20 桁も小さい可能性があります。地球上にこれらの粒子が存在するとすれば、約 300 km/s の速度で運動し、その数も 1 立方メートルあたり 10^{26} 個と膨大です。ディラトンは光子や電子と相互作用し、宇宙の基本物理定数の周期的な変化を引き起こし、それが検出器のビームスプリッターや反射鏡の振動を引き起こします。ダークフォトン検出器の反射鏡内で陽子や中性子、あるいは中性子のみと相互作用します。テンソルボゾンは重力波のように作用し、反射鏡周辺の時空に伸縮・歪みを生じさせます。これら 3 つのケースすべてにお

いて、相互作用の影響として、干渉計の構成要素に時間依存する振動を引き起こすことが予想されます。

それぞれの暗黒物質粒子の質量は一定であるため、これらの相互作用から生じる信号はほぼ単一の周波数になります。また、暗黒物質は常に検出器内を流れているため、反射鏡やビームスプリッター内の粒子と常に相互作用しています。したがって、その信号は常に「オン」で、連続的で、ほぼ一定の周波数です。実際には、暗黒物質粒子は検出器と相互作用する際にそれぞれ異なる速度で移動しているため、信号の周波数は時間の経過とともにごくわずかにランダムに変化します。

私たちの研究では、Advanced LIGO, Advanced Virgo, KAGRA の第 4 回観測運転のデータを用いて、暗黒物質が干渉計に作用を及ぼすかどうか、またその作用の強度はどの程度かを調べました。信号は検出されていませんが、ディラトン、ダークフォトン、テンソルボゾンの 3 つのケースすべてにおいて、暗黒物質の相互作用の大きさの上限値を、暗黒物質粒子の質量の関数として制限することができました。

ディラトンに関する私たちの制限は、Advanced LIGO, Virgo, KAGRA の第 3 回観測運転の制限を 1 桁上回り、ダークフォトンに関する制限は、この粒子を探索するために設計されたいくつかの実験で得られた制限よりも約 10 倍優れています。さらに、テンソルボゾンが干渉計と相互作用する方法に関する初めての制限を得ることができ、この制限は、以前の実験に比べて約 10^5 倍の厳しいものとなりました。LIGO, Virgo, KAGRA の干渉計に対する暗黒物質の影響を測定することで、暗黒物質が現在の宇宙にどのような影響を与え、宇宙がどのように形成されてきたのか、という洞察が得られるのです。

さらに興味のある方へ

- 私たちのウェブサイトでは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/>



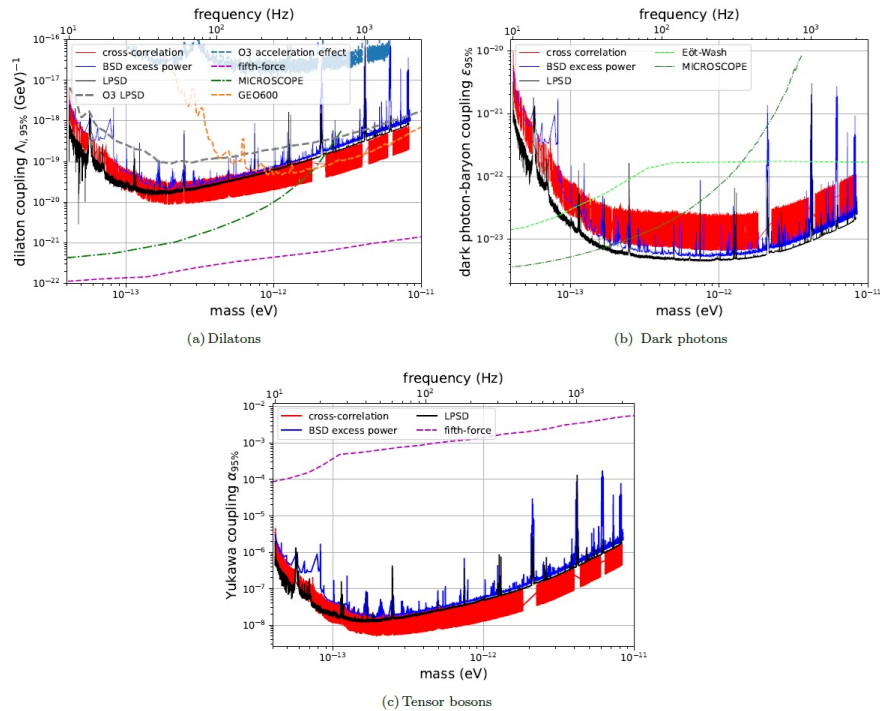


図 2: (論文の図 1 より): 本研究で検討した 3 種類の暗黒物質 (ディラトン, ダークフォトン, テンソルボゾン) について, 暗黒物質が干渉計へ作用する結合定数の上限値を, 暗黒物質の質量 (電子ボルト, eV) と信号周波数の関数として表した. 赤, 黒, 青の線の上部に相当する結合強度は本研究で除外されることになる領域である. この結合強度の上限が低いほど, 制約が厳しいことを意味する. 本研究では, 「相互相関」, 「BSD 強度過剰」, 「LPSD」と呼ばれる 3 つの手法を用いて暗黒物質と重力波干渉計の相互作用を調べ, 一貫した結果を得た. ディラトンに対する上限値は, 前回の観測運転 O3 の結果から得られた上限値を約 1 桁上回る. ダークフォトンに対する上限値は, 多くの周波数において他のダークマター実験 (MICROSCOPE および Eöt-Wash) の上限値よりも 10 ~ 100 倍優れている. さらに, テンソルボゾンの上限値は, 第 5 の力の実験の上限値を 5 桁上回る.

用語集

- **ライゴ (LIGO)**: レーザー干渉計重力波観測所 (LIGO) は, 米国にある 2 つの重力波検出器から構成されます. 1 つはルイジアナ州リビングストンの近くにあり, もう 1 つはワシントン州ハンフォードの近くにあります. どちらの検出器も, 直交する 2 本の 4 km の長さの腕を備えた大規模なレーザー干渉計であり, 通過する重力波によって引き起こされる腕の長さの相対的な変化を測定する装置です.
- **ヴィルゴ (Virgo)**: イタリア, ピサの近くにある重力波検出器. これもレーザー干渉計ですが, 腕の長さは 3 km です.
- **かぐら (KAGRA)**: 日本の富山近郊にある地下重力波検出器. これはレーザー干渉計でもありますが, 3 km の長さの腕と極低温冷却鏡を備えています.
- **感度 (Sensitivity)**: 信号を検出する検出器の能力を示す指標. ノイズレベルの低い検出器は, 弱い信号を検出できるため, 感度が高い (優れている) と言えます.
- **観測運転期間 (Observing run)**: 重力波検出器がデータを取得している期間.
- **上限 (Upper limit)**: ある物理量がデータと矛盾しない範囲で取り得る最大値を示すもの. ここで関心の対象となるのは, 暗黒物質と干渉計との結合強度. 本研究では 95 % の信頼度に基づく上限を用いています.
- **結合定数 (Coupling)**: ある粒子が特定の方法で他の粒子と相互作用するときの強さ.
- **パルサー (Pulsars)**: 主に中性子で構成される, 燃え尽きたあとの回転する星. 高速で回転し, 灯台のように非常に一定の間隔で私たちに光を照射するため, 非常に正確な時計の役割を果たします.

- 本発表の論文

<https://dcc.ligo.org/P2500252/public>

- GWTC-4.0 のデータは [Gravitational-Wave Open Science Centre](#) にて公開しています.

(日本語訳: 真貝寿明, 藤田智弘)