

超軽量の暗黒物質が検出を逃れる

ダークマター（暗黒物質）は宇宙全体の物質の85%を占めていますが、私たちにはまったく見えません。それでも、さまざまな天体への影響を測定できます。ダークマターは各銀河に存在し、星が軌道から外れるのを防ぎ、遠くの銀河からの光線の方向を変え、宇宙の大規模構造を築くことに貢献し、さらには、**宇宙背景マイクロ波放射 (CMB)** にも痕跡を残します。CMBは、宇宙誕生後わずか数十万年の痕跡で、私たちが接することのできる最も遠くて古い宇宙の姿になります。

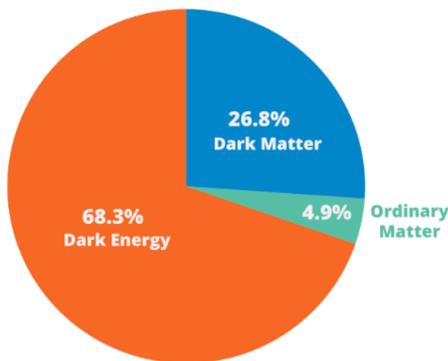


図1: 宇宙の現在の物質とエネルギーの推定量。全体として支配的なのは、宇宙に加速膨張を引き起こすいわゆる「ダークエネルギー」です。残りの約3分の1は、ダークマターと通常の物質（原子など）に由来し、ダークマターは全物質総量の約85%を占めています。（画像クレジット: ATLAS Experiment, CERN）

LIGO（ライゴ）*（*のついた語には用語解説あり）、Virgo（ヴィルゴ）*、KAGRA（かぐら）*の検出器が得意とする重力波源は、ブラックホールと中性子星の合体、非対称に回転するパルサー*、星の爆発、およびそれらの組み合わせです。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ダークマターを観測することもできます。今回の研究では、電子の質量よりも20桁小さい質量を持つ可能性のある特定のタイプのダークマターであるダークフォトン（暗黒光子）を探索しました。地球上では、これらの粒子は約300 km/sで移動していて、個数は $O(10^{50})$ と非常に多く、陽子や中性子と相互作用します。検出器の鏡に影響し、鏡に時間依存する振動力を引き起こします。鏡は、入ってくるダークフォトンに対して異なる位置

にあり、3または4キロメートル離れています。したがって、各鏡はわずかに異なる動きをして、信号を刻印します。

各ダークフォトン粒子の質量が固定されているため、信号はほぼ一定の周波数になります。ダークマターも常に検出器に流れこむため、ダークフォトンも常に鏡の中の粒子と相互作用しています。したがって、信号は連続的で、常に存在し、ほぼ一定のトーンです。実際には、信号の周波数は、時間の経過とともに微かにゆらいでいます。これは、各ダークフォトンが検出器と相互作用するときに、異なる速度で移動してくるためです。

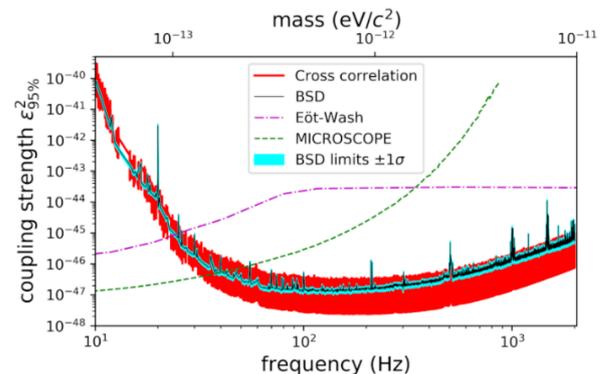


図2: (論文の図3): ダークフォトンが干渉計の鏡に作用を起こす結合の強さ*の上限値*を信号周波数の関数として表す。(探索ではVirgo検出器からのデータも使用されたが、これらの上限値は2つのLIGO検出器のみから得られたもの)。赤と黒/青の線より上の結合の強さは、この研究で除外された領域となる。この値が低いほど、探索に対して厳しい制限が得られることになる。私たちは2つの方法（「相互相関」および「BSD」方法）を用いて、ダークフォトン・ダークマターを探索し、お互い矛盾しない結果が得られました。ここで得られた上限値は、(MICROSCOPEやEot-Washなど)他のダークマター実験よりも、広い周波数帯で10倍から100倍の改良となりました。ダークフォトンの結合強度は、電磁場の結合強度*との比として表しています。

私たちの研究では、アドバンストLIGOとアドバンストVirgoの第3期観測からのデータを使用して、ダークフォトンが干渉計に作用できるかどうか、またどの程度の強度で作用できるかを決定しました。信号は検出されませんでした。ダークフォトンの質量の関数として、結合の強さに上限*をつけることができました。

結果として、重力波検出器へのダークフォトンの作用は、我々が考慮したすべての超軽量質量に対して、電磁結合*の 10^{40} 分の1以下であると測定されました。いくつかの質量に対しては、 10^{47} 分の1以下となるほど低い値が得られました！私たちの得た上限値は、暗黒物質を探索するように設計されたいくつかの実験で得られたものよりも約10~100倍優れています。LIGOとVirgoによるダークフォトンの結合定数の測定により、ダークマターが現在の宇宙にどのように影響し、どのように形成されたのかについての洞察が得られます。

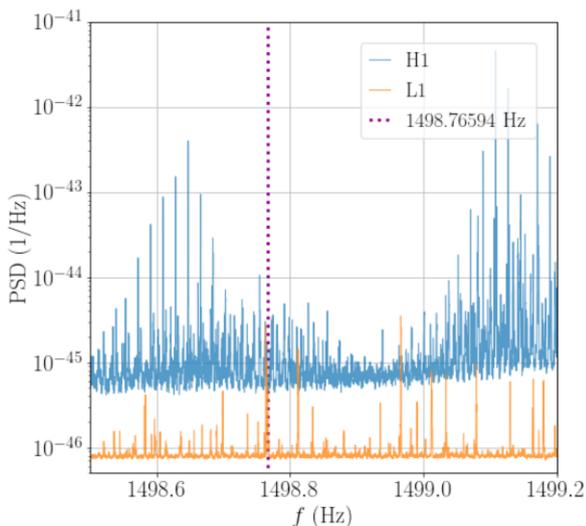


図3: (論文の図2): 私たちの探査では、最初は明らかな候補信号がいくつか見つかりましたが、それらはすべて計器によるノイズと判明したため、確度をもって棄却されました。例として、この図は、2つのLIGO干渉計から得られたデータ品質(パワースペクトル密度)の測定値を示します。ハンフォード検出器(H1)に見られる明確な周期構造とリビングストーン検出器(L1)に見られる狭いピークは、両者とも既知の機器の問題に由来します。これらは、垂直線で示された周波数を有力な信号候補と示したため、ダークマター信号としては除外されました。

用語解説

- **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つの重力波検出器です。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。これもレーザー干渉計ですが、3km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)と言われます。
- **観測期間 (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):** データとの整合性を保ちながら、ある量が持つことができる最大値。この研究では各周波数でのダークフォトンの結合強度に対して上限がつけられました。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小さい、ということになります。
- **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。
- **電磁結合定数 (Electromagnetic coupling):** 荷電粒子間の相互作用の強さ。
- **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、高精度な時計として用いられることもある。

もっと詳しく知るためには

ウェブページを訪ねてみよう。

- www.ligo.org
- www.virgo-gw.eu
- gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



無料で読める論文原稿は[ここ](#)。

このリーフレットの英語版は[ここ](#)。

日本語版への翻訳：真貝寿明，山本貴宏