

重力波による宇宙膨張と一般相対性理論への新たな制限

LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 共同研究グループは、最新の論文で、ハッブル定数 (H_0) の新しい測定値と、宇宙規模でのアインシュタインの一般相対性理論からのずれに対する制限を発表しました。最新の突発性重力波カタログ (GWTC-4.0) では、以前に公開した重力波カタログに追加して、第4回観測運転第1期 (O4a) で新たに観測された76の重力波のデータが含まれます。これを用いて、全部で142のコンパクト連星合体からの重力波信号を解析することにより、私たちは各連星までの光度距離と、その連星を構成する2つのコンパクト天体の赤方偏移質量を直接測定しました。ブラックホールと中性子星の質量分布の特徴と、銀河カタログ GLADE+ を使って各重力波源の存在領域にある潜在的な母銀河の分布情報を用いることにより、重力波源の赤方偏移に関する統計的な情報を得ました。これらの距離と赤方偏移の推定値を組み合わせることで、従来の「宇宙距離はしご」の基準に依存せずに、ハッブル定数に対する独立した制限を得ました。さらに、重力波の伝播に対して、一般相対性理論からのずれの許される値について、新たな制限を課しました。これは、一般相対性理論を超える物理学に制限を与えます。これらの結果は、宇宙の膨張速度を独立して測定し、宇宙を支配する基本法則を検証する「重力波宇宙論」の成長を示しています。

標準音源，宇宙膨張，そしてダークエネルギー

1920年代、ジョルジュ・ルメートルとエドウィン・ハッブルは、宇宙が膨張しているという革命的な発見をしました (図1参照)。それ以来、宇宙論として知られる宇宙の研究は、わずか数個の基本パラメータで定義されたモデルを用いて、宇宙がどのように形成され進化してきたかを説明することを目指す、豊かで独立した学問分野へと発展しました。今日、このモデルは「ラムダ CDM」として知られ、宇宙論の「標準モデル」と考えられています。標準モデルは、アルベルト・アインシュタインの一般相対性理論に基づいています。

しかしながら、現代宇宙論は今日でも依然として大きな未解決の問題に直面しています。最大の謎の一つは、宇宙論の標準モデルの重要なパラメータの一つであるハッブル定数 H_0 に関するものです。この数値 (キロメートル毎秒毎メガパーセク (Mpc) の単位 $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ で表される) は、局所宇宙 (私たちの銀河近傍の宇宙) の膨張速度を表します。簡単に言えば、遠くの天体が互いにどれだけ速く遠ざかっているかを示すものです。しかし、異なる方法で測定すると、その値は異なるのです。ビッグバンの残光である宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を見ると、約 $68 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ という値になります。しかし、Ia型超新星やセファイド変光星を用いて局所的な距離を測定すると、約 $74 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ という値が得られます。今日、これら2つの値の差は測定誤差だけでは説明できません。いわゆる「ハッブル・テンション (ハッブル定数の緊張)」は、現代宇宙論における最も差し迫った謎の一つ

となっています。

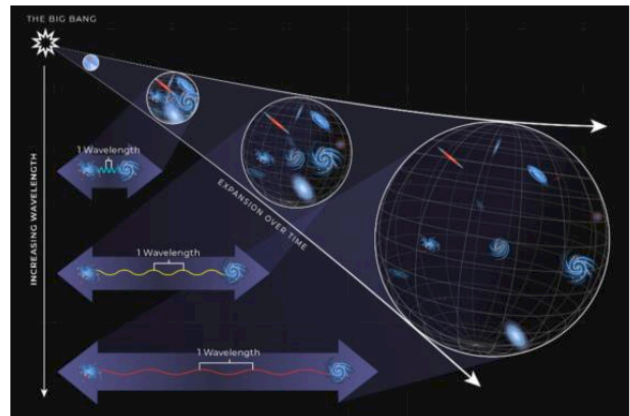


図1: 宇宙膨張と宇宙赤方偏移を示す模式図。宇宙が膨張するにつれて、銀河は互いに遠ざかる。膨らむ風船の表面に描いた点が互いに広がるような状況である。遠方の銀河からの光は、より長く引き伸ばされて赤い波長になる。この赤方偏移は、遠方の波源から放射される重力波にも影響を与える。[クレジット: NASA Scientific Visualization Studio]

一方で、もう一つの謎があります。宇宙の膨張が加速しているという謎は、1998年にIa型超新星の観測によって初めて明らかにされました。宇宙の加速膨張は、ダークエネルギーと呼ばれる新たな要素を宇宙の成分に加えることを必要としてい

て、ダークエネルギーの真の姿を解明することは、現代宇宙論における重要な研究課題の一つです。DESI や Euclid といった地上または宇宙に設置された大型望遠鏡を用いた銀河探査によって、現在、宇宙全体の銀河の分布が極めて高精度に描かれています。これにより、銀河の分布がアインシュタインの理論で完全に説明できるのか、あるいは宇宙の最も大きなスケールで何か新しいものが作用しているのかの検証が可能になります。

こうした背景から、近年、重力波観測が宇宙論的探査の強力な手段として注目を集めています。重力波は、1世紀前にアインシュタインによって初めて予言されました。重力波は、ブラックホールや中性子星の連星が螺旋状に運動したり合体したりするなど、宇宙における大規模な現象によって生み出される時空の波紋です。一般相対性理論によれば、重力波は光速で宇宙を自由に伝播しており、地球上で自由落下する質量間の相対距離に微小な変化を引き起こします。この現象は、2015年にLIGO-Virgo共同研究グループによって初めて検出されました。他の宇宙距離測定とは異なり、重力波は、超新星やセフィイド変光星を用いる複雑な「宇宙距離はしご」に頼ることなく、重力波がどれだけ遠くで発生したかを直接測定する方法を提供します。重力波を用いた距離測定は、一般相対性理論に基づき、地球上の重力波検出器で観測される信号の予測形状を正確に計算することで決まります。観測された信号の振幅と位相を予測値と比較することで、各発生源までの距離を直接決定することができるのです。そのため、重力波源は「標準音源 (standard siren)」と呼ばれています。これは、天文学者が数十年にわたり使用してきた「標準光源 (standard candle)」（Ia型超新星など、固有の明るさが既知の天体）にちなんで名付けられました。標準音源から測定された距離と、その母銀河が地球からどれだけ遠くまで遠ざかっているかという情報を組み合わせることで、ハッブル定数を独立に測定することができます。

しかし、それだけではありません。重力波は、アインシュタインの重力理論が宇宙の最も大きなスケールで成り立つかどうかを検証するのに役立つ可能性があります。もし宇宙の加速膨張の背後に、未知のダークエネルギー場のような新しい物理学が存在するとすれば、重力波が宇宙の広大な距離を移動する様子、特に伝播中にその振幅（サイズ）変化の様子に変更が生じる可能性があります。この効果は、重力がアインシュタインの一般相対性理論が描くものと異なる場合、重力波から推定される距離は、同じ波源から放射される光から推定される距離とは異なることを意味します。重要なのは、この現象を記述するパラメータは、ハッブル定数を決定するのに用いられたものと同じ方法を用いて制限できることです。つまり、重力波は、宇宙論における2つの主要な未解決問題に同時に取り組むために使用できるのです。しかも、このアプローチは、歴史的に用いられてきた他の宇宙膨張の測定方法に依存しません。

本研究では、LVK共同研究チームは重力波観測を用いて、ハッブル定数の測定値を精緻化するだけでなく、重力波がアインシュタインの予測とは異なる振る舞いをする可能性についても制限を加えました。

方法

重力波信号は、距離を直接測定しますが、その波源の赤方偏移を直接測定するものではありません。遠ざかる銀河からの光がより長い（赤い）波長に引き伸ばされるように、合体するブラックホールの質量は宇宙の膨張によって実際よりも大きく見えます。つまり、私たちが見ているのが本当に重い天体な

のか、それともより速く遠ざかる天体なのかを、少なくとも重力波信号だけでは区別することができません。

しかし、一部の天体、特に少なくとも1つの中性子星を含む連星合体では、付随する閃光を発することが予想されています。これが重力波信号と同時に検出されれば、天文学者は母銀河を特定し、その赤方偏移を直接測定することができます。そのため、これらの天体は「ブライツ音源（明るい音源）」と呼ばれています。重力波検出器によって検出された最初の連星中性子星合体であるGW170817がまさにその例であり、この合体は明るい電磁波信号を発しました。この信号により、母銀河（NGC 4993）が迅速に特定され、その赤方偏移と重力波データからの距離を組み合わせることで、ハッブル定数の標準音源測定が初めて実現しました。

残念ながら、第4回観測運転の第1期では、このような電磁信号が一致する新たな連星中性子星は発見されませんでした。その他のすべての重力波源（主に連星ブラックホール）については、統計的手法を用いて赤方偏移を推定しています。この手法は、天体全体の集団に関する外部の情報、言い換えると「事前の」知識を用いています。重要なのは、観測された天体分布の特性が、真の、根底にある集団とは異なるということです。これは、検出器の特性に一部起因しています。検出器は、特定の天体（より質量が大きい、または近い天体など）を、他の天体（より質量が小さい、または遠い天体など）よりも検出しやすい傾向があります。さらに、宇宙の膨張の歴史や重力の法則が異なっていた場合（例えば、ダークエネルギーが予期せぬ特性を持っていた場合）、真の天体分布と観測された天体分布の関係は変化します。したがって、予想される天体分布の特性と観測された天体分布の特性を比較し、異なる検出確率、つまり「選択効果バイアス」を慎重に考慮することで、膨張の歴史などの宇宙の特性に制限を課すことができます。

私たちは、天体分布の根底にある特性に関して、2つの相補的な情報源を同時に利用する統計的アプローチを用いました。これは、一般的に「ダーク音源（暗い音源）法」と呼ばれています。

最初の情報源は、連星ブラックホールの質量分布に関するもので、「スペクトル音源」法とも呼ばれます。宇宙におけるブラックホールは、固有の天体物理学のプロセスにより、特定の質量のものが優先的に形成されると仮定します。例えば、理論上は、極めて質量の大きい恒星は（対不安定性超新星と呼ばれる現象によって）非常に激しく爆発し、ブラックホールを残さないため、恒星質量ブラックホールには質量に最大値が存在すると予測されます。予想される最大質量スケールと観測結果を比較し、宇宙の膨張によってこれらの質量がどのように変化するかを知ることで、膨張速度を推定することができるのです。今回の論文では、私たちLVKの宇宙論の論文としては初めて、連星ブラックホール、連星中性子星、そしてブラックホールと中性子星からなる系など、さまざまなタイプの合体を包含する、あらゆる質量源の質量範囲をカバーするモデルを用いました。

2番目の情報源は、銀河の分布に関するもので、「銀河カタログ」法とも呼ばれます。ブラックホールが銀河内で形成されると仮定し、それぞれの合体が起こった可能性が高い領域における銀河の分布を大規模な銀河カタログと比較し、潜在的な母銀河を特定します。重力波源の天球面上での位置精度は不正確なため、この母銀河の関連付けは確率的なものになります。つまり、潜在的な母銀河は数百、数千存在し、それぞれが真の母銀河である確率は異なります。この確率は、距離と赤方偏移を結び付けるハッブル定数とダークエネルギーの特性に依存しますが、質量や光度といった銀河固有の特性にも依存します。

重力波源となった銀河の確率は、赤外線におけるその光度に比例すると仮定しました。この仮定が最終結果に大きな影響を与えないことは確認済みです。重要な点として、銀河サーベイは不完全であるため、その補正も行う必要があります。暗い銀河や遠方の銀河の一部は、そもそも観測されていない可能性があるからです。

最後に、私たちの検出器は特定のブラックホールの質量と距離に対してより敏感であるため、バイアスを避けるためにこれらの選択効果を慎重に補正する必要があります。これは、ブラックホールの分布特性と宇宙の膨張史を同時に推定する必要があることを意味しています。一方で、銀河カタログからの赤方偏移情報も考慮する必要があることを意味します。本研究では、これまでのLVKによる解析と比較して大きな進歩を遂げました。これまでの解析では、精度と計算コストのトレードオフとして、これらの情報を別々の段階で統合していました。データ分析パイプラインの改良により、完全な同時測定が可能になりました。これは、最も正確な結果を得るための統計的に正しい方法です。

結果

図2はハッブル定数 (H_0) の測定結果を示しています。最良の推定値は、ダーク音源解析と GW170817 のブライト音源解析結果を組み合わせたものです。曲線のピークの位置と幅から、 $H_0 = 76.6_{-9.5}^{+13.0} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ と得られます。ここで、下付き文字と上付き文字の数字は、この測定における68%の信頼水準での誤差を示しています。以前の銀河カタログを用いた私たちの解析では、コンパクト天体の分布を固定したモデルと仮定していたため、 H_0 に対する制約は非現実的なほど厳しいものでした。本研究で用いた手法は、同様の精度を達成しつつ、統計的な堅牢性が向上しています。コンパクト天体の分布を記述するパラメータ（質量分布でどこがどれだけ大きいかなど）が宇宙論的パラメータと併せて測定されているためです。

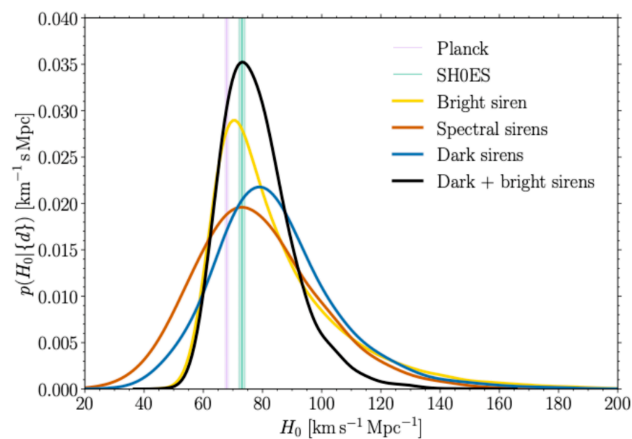


図2: (論文の図5より)。GWTC-4.0のデータ全体からさまざまな組み合わせで得られたハッブル定数 (H_0) の値の事後確率分布。最も良好な結果は黒い曲線で示されており、これはGWTC-4.0の「ダーク音源」とGW170817の「ブライト音源」を組み合わせたものである。比較のために、ダーク音源のみ(青)、スペクトル音源のみ(オレンジ)、そしてブライト音源のみ(黄)の結果も示している。

私たちの研究結果は、コンパクト連星合体の質量分布に関する包括的なモデルを用いることで、少なくとも1つの中性子星を含むわずか5つの追加イベントを含めたにもかかわらず、連星ブラックホール合体のみを用いたモデルによるダーク音源法による制約と比較して、50%も強い制限へと改善しています。それでも、ダーク音源のみからの推定値は、単一のブライト音源GW170817から得られた結果よりまだわずかに広く、これはより多くの重力波源がマルチメッセンジャー天文学として同時検出されることの重要性を強調しています。スペクトル音源を用いて得られたハッブル定数の測定は、これまでの私たちの結果と比較して60%の改善に留まりました。

図3は、重力波が膨張宇宙をどのように伝播するかに関して、アインシュタインの一般相対性理論からずれる可能性に関する制限を示しています。具体的には、重力波の振幅から測定された距離 (D_L^{GW} と表記) と電磁波対応天体から測定される距離 (D_L^{EM} と表記) の比率を調べました。一般相対性理論が正しければ、これら2つの距離は完全に一致するはずなので、比率はすべての赤方偏移で1になるはずですが(黒の破線)。私たちは、2つの異なるパラメータを用いてこの比率をテストし、対応するパラメータに制限を示しました。図の上と下は、各モデルの結果を示しており、互いによく一致しています。色付きの帯は、GWTC-4.0から得られた90%信頼区間を示しています。一般相対性理論からのずれの証拠は見つからず、最良の測定値は、そのようなずれを60%レベル(68.3%信頼区間)に制限し、以前に私たち以外のグループから報告された制限を約40%改善しました。ブライト音源のGW170817はここでは改善には寄与しません。なぜなら、この効果は伝播中に蓄積され、無視できない赤方偏移を持つ天体のみが情報源となるからです。赤方偏移が ~ 0.01 にあるGW170817は単に近すぎる、というのが理由です。

最後に、GWTC-4.0のデータは、宇宙のダークマターの量にも、ダークエネルギーの状態方程式にも何の制約も与えませんでした。ダークエネルギーの最も影響力のある効果は、むしろ重力波の伝播の変化を通して現れるはずですが。

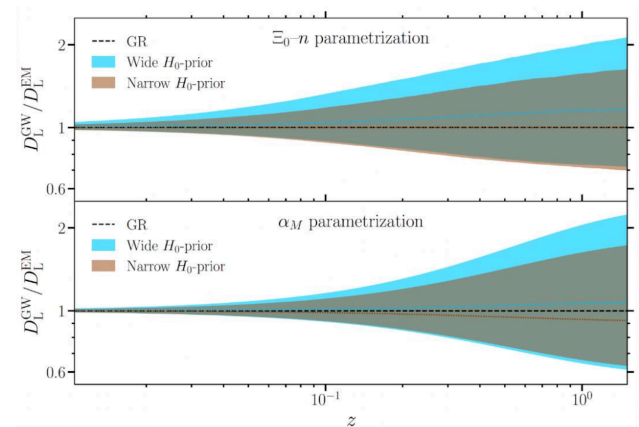


図3: (論文の図10より)。重力波源から測定された距離と、同じ波源からの電磁放射から測定される距離の比を、波源の赤方偏移の関数として表したものの。一般相対性理論が成り立つならば、両者は一致すると予想され、この比はすべての赤方偏移において常に1となる。色付きの帯は、GWTC-4.0から90%信頼区間で得られた制限を示している。一般相対性理論からのずれを示す証拠は見つかっていない。上図と下図は、この効果を記述するために採用された2つの異なるパラメータを示しており、どちらも一貫した結果が得られていることがわかる。

まとめと将来への展望

LIGO-Virgo-KAGRA の共同研究グループによる最新の成果は、ハッブル定数の独立した測定結果を更新し、アインシュタインの一般相対性理論の検証を宇宙規模のスケールで行なった結果を示しました。統計的な「ダーク音源」データと既知の唯一のブライツ音源 GW170817 を組み合わせたハッブル定数の最良推定値は、 $76.6^{+13.0}_{-9.5} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ です。これは、これまでの重力波観測による測定値と矛盾しませんが、統計処理を改善することで得られたものです。解析によると、より包括的な範囲の重力波源を含めることで、連星ブラックホールのみを使用する場合よりも大幅に厳しい制限が得られることが示されていますが、今回の観測では新たなブライツ音源は発見されていません。

現在のところ、電磁波による対応天体がみつからない重力波イベントについては、ブラックホールの質量分布における明確な特徴（ブラックホールが形成される傾向のある優先的な質量スケール）が、結論を大きく左右します。母銀河カタログからの追加情報を用いても、測定値は約 8.6% しか改善されません。これは主に、ここで使用した GLADE+カタログが不完全であること、第 4 回観測運転でこれまでに検出された重力波源の位置特定精度が低いことが原因です。いずれも近い将来、改善されると予想されています。第 4 回観測運転の残りの期間では、Virgo 検出器の感度向上により、重力波源の位置特定がより明確になるはずですが、また、より完全なカタログである UpGLADE が準備中です。

本研究では、重力波が宇宙空間において一般相対論の予測とは異なる伝播をする可能性があるかどうかを検証しました。これはダークエネルギーに関連する概念を検証する上で重要

な手法です。一般相対論からのずれは見られず、その制限は我々以外のグループが重力波を用いて報告した制限値よりも約 40% 厳しくなりました。

これらの結果は、より多くのデータが得られ、堅牢な統計手法が確立されたことで、重力波宇宙論が現代物理学における最大の未解決問題のいくつかに取り組む上で一歩秀でていくことを示しています。

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/>



- 本発表の論文
<https://dcc.ligo.org/P2400152/public>
あるいは <https://arxiv.org/abs/2509.04348>
- 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、樽家篤史)

用語集 (登場順)

- **GLADE+** : 約 2200 万個の銀河のデータを含む、新たに拡張された銀河カタログ集。重力波イベントの潜在的な母銀河の赤方偏移情報を提供するために使用されている。オリジナルの GLADE カタログを解説した科学論文は、[無料でアクセス](#)できる。
- **メガ・パーセク (Megaparsec; Mpc)** : 宇宙論で用いられることの多い距離の単位。1 メガ・パーセクは、100 万パーセクであり、1 **パーセク** は、約 3.26 光年 (3.086×10^{16} メートル) に相当する。
- **ハッブル定数 (Hubble constant)** : 宇宙の膨張速度を測るために使用されるパラメータ。現在の値は記号 H_0 で表され、約 $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ と測定されている。
- **ビッグバン理論 (Big Bang theory)** : 観測可能な宇宙の起源と進化を説明する理論で、宇宙が約 140 億年前に始まり、当初は非常に高温高密度の状態から膨張してきた経緯を説明する。ビッグバン理論は、[軽元素の存在量](#)や[宇宙マイクロ波背景放射](#)の存在など、宇宙の観測されている多くの特性を説明するものとして広く受け入れられている。
- **宇宙マイクロ波背景放射 (CMB; Cosmic Microwave Background)** : 宇宙の初期、宇宙誕生後 38 万年の頃に発生した電磁波で、「ビッグバンの残り火」としても知られている。より詳しくは[ここ](#)。
- **Ia 型超新星 (Type Ia supernova)** : 質量が [チャンドラセカール限界](#) (太陽質量の 1.4 倍) を超えた白色矮星の爆発のこと。Ia 型超新星はいずれもピーク時の固有輝度 (光度) が極めて類似していることが分かっているため、距離は信頼性をもって推定することができ、有用な [標準光源](#) となる。
- **セファイド (ケフェイド) (Cepheid)** : 脈動変光星の一種で、半径と温度が周期的に変化し、その結果、[明るさ](#)も規則的に周期的に変化する。脈動周期を測定することで、セファイド変光星までの距離を信頼性を持って推定することができる。
- **宇宙距離はしご (Cosmic distance ladder)** : 天文学者が天体までの距離を決定する方法の組み合わせのこと。通常、天体間がもつ特徴を経験的な関係式にして遠方の天体までの距離を算出するが、そのスタートとなる距離は、近傍

の天体（通常は天の川銀河内）までの距離をより直接的かつ幾何学的に測定した結果に基づいている。詳細は、[こちら](#)。

- **ブラックホール (Black hole)**: 重力が非常に強いために光を含むあらゆるものが脱出することができない、非常にコンパクトな天体によって生じる時空の領域。
- **中性子星 (Neutron Star)**: 太陽の質量の 10 倍から 25 倍の質量を持つ星が超新星爆発を起こした残骸。典型的な中性子星の質量は太陽質量の約 1~2 倍、半径は 10~15 キロメートルで、これまでに発見された中で最もコンパクトな天体の 1 つ。
- **対不安定性超新星 (Pair-instability supernova (PISN))**: 質量が太陽質量の約 130 倍を超える恒星で発生すると予測される超新星爆発の一種。中心核における **電子・陽電子対**の生成により、恒星を支える圧力が劇的に低下し、暴走的な熱核爆発を引き起こすもので、恒星残骸を残さない。
- **赤方偏移 (Redshift)**: (音, 光, または重力波の) 波源が観測者から遠ざかる運動をすることによって波長が増加すること。 **宇宙膨張**のために、銀河などの天体は私たちから遠ざかりつつあり、遠方の銀河から届く電磁波ほど波長が長くなっている。
- **ダークマター (Dark matter)**: 宇宙の質量の約 85%を占める謎の物質。光を放射せず、電磁相互作用も行わないため、暗黒と呼ばれる。多くの暗黒物質理論では、暗黒物質は何らかの基本粒子であると予測されているが、私たちが知る最も暗い天体（ブラックホール！）が暗黒物質の一つの構成要素と考えるのも興味深い。
- **ダークエネルギー (Dark energy)**: 宇宙の物質とエネルギーを構成する謎の要素であり、宇宙の最も大きなスケールにおける挙動を支配し、 **宇宙の膨張を加速させている**と考えられている。ダークエネルギーの最も単純なモデルは、いわゆる宇宙定数で、負の圧力を及ぼし、結果として宇宙膨張を加速させるというもの。
- **事後確率分布 (Posterior probability distribution)**: データを分析した後、 **ベイズ推論**と呼ばれるプロセスを通じて推定された、特定の物理的特性のさまざまな値の可能性を示すグラフまたはプロット。