

2025 年 9 月 8 日

報道関係者各位

国立大学法人筑波大学
国立大学法人東京大学 国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構

月面電波望遠鏡でダークマターの正体に迫るには

宇宙初期のダークマターの分布や水素ガスの状態を理論計算で精密に再現し、当時の水素から放出された電波に、ダークマターの特性を示す”指紋”が刻み込まれていることを解明しました。月面など大気圏外に電波天文台を設置し、全天から届くこの電波を観測すれば、ダークマターの正体に迫れます。

私たちの宇宙は 138 億年前にビッグバンと呼ばれる灼熱の状態で誕生しました。その後、宇宙はいったん暗闇にとざされ、光輝く天体が誕生するまで「暗黒の時代」が続きます。暗黒時代の宇宙には、ダークマターとうっすらとした水素ガスが漂っていたと考えられています。まだ観測はされていませんが、このうっすらと漂っていた水素の原子は、その微細構造により、波長約 21cm の微弱な電波（水素 21cm 線）を放出することが知られています。その微弱な電波を捉えることができれば、宇宙の暗黒時代の様子や宇宙の成り立ちの解明につながります。

本研究では、暗黒時代に放たれた水素 21cm 線が現在、どのような強度と周波数で観測されるかを、標準宇宙モデルに基づきシミュレーションしました。標準宇宙モデルは、宇宙の加速度的膨張を引き起こすダークエネルギーと、銀河や大規模構造の形成をつかさどる謎の物質「ダークマター」を宇宙の主要な構成要素としています。そして、コンピュータ上に再現された水素ガスの温度や密度の詳細な情報をもとに、全天から地球に届く電波（グローバルシグナル）を正確に計算しました。

その結果、グローバルシグナルには電波輝度温度に換算して 1 ミリケルビン（1000 分の 1 度）程度の特徴的な周波数変動が現れること、さらにはダークマターがどのような性質のものであるかによってその変動具合に差が生じることが初めて明らかになりました。このため、数十メガヘルツ付近の広い周波数帯でグローバルシグナルを観測すれば、ダークマターがどれくらい”冷たい”のか、すなわちダークマターの質量や速度の乱雑さといった性質を測定することができます。

本研究の成果をもとにすれば、地球の大気圏外、例えば我が国が構想する月面天文台で宇宙電波を観測することで、ダークマターの正体に迫ることができます。

研究代表者

筑波大学 計算科学研究センター（CCS）

Hyunbae Park 研究員

東京大学 国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU, WPI）

吉田 直紀 特任教授

研究の背景

宇宙が始まってから数億年ほどは、光輝く天体がまだ一つも存在しない「暗黒の時代」が続いたと考えられています。宇宙望遠鏡や地上大型電波望遠鏡によって、暗黒時代直後に光輝いた銀河は次々と発見されるようになりましたが、暗黒時代の宇宙はこれまで直接観測されていません。

近年のさまざまな深宇宙観測から、宇宙の加速度的膨張を引き起こすダークエネルギーと、銀河や大規模構造の形成をつかさどる謎の物質「ダークマター」を宇宙の主な構成要素とする標準宇宙モデルが確立されました。ダークマターの正体は依然として大きな謎として残っていますが、暗黒時代の宇宙の様子を詳しく探ることで、その性質も明らかにできると期待されています。

研究内容と成果

本研究では、暗黒時代の水素から放たれた波長 21cm の電波（水素 21cm 線）^{注 1)}が現在、どのような強度と周波数で観測されるかを、大規模なコンピュータシミュレーションによって詳細に予測しました。標準宇宙モデルに基づく現実的な初期条件を設定し、宇宙初期の超音速ガス流や化学反応、宇宙背景放射との相互作用など、考えられる全ての物理過程を取り入れたシミュレーションによって暗黒時代の様子を再現しました(図 1)。

電波強度は発生源となる水素ガスの温度と密度、さらには当時の宇宙に飛び交っていた背景放射の温度によって決まります。シミュレーションの結果を基に水素 21cm 線の放出率を正確に求め、進行中あるいは将来の電波望遠鏡計画による観測にも資する予測を行いました。そして、全天から届く電波を足し合わせたグローバルシグナル^{注 2)}には電波輝度温度に換算して 1 ミリケルビン程度の特徴的な周波数変動が現れること、さらにダークマターの性質^{注 3)}によってその変動具合に差が生じることを初めて明らかにしました(図 2)。地球に届く暗黒時代の水素 21cm 線の周波数をカバーする数十メガヘルツ付近の広い周波数帯で観測することで、ダークマターがどれくらい“冷たい”のか、すなわちダークマターの質量や運動速度の乱雑さ（速度分散）といった性質を測定することができます。

この帯域の周波数は、地球の電離層の影響により地上からでは観測が難しいのですが、地球の大気圏外、例えば我が国が構想する月面天文台で観測することでダークマターの正体に迫ることができます。

本研究グループはこれまでに、宇宙初期の超音速ガス流が及ぼす影響（Astrophysical Journal, 2020）や暗黒時代後の宇宙再電離の進行を小さなガス雲が阻害する効果（Astrophysical Journal, 2021）などを次々と明らかにしてきました。これらの成果も基にして本研究の計算を行いました。

今後の展開

最近では、米航空宇宙局（NASA）が打ち上げたジェームズウェッブ宇宙望遠鏡によって、ビッグバン後 2 億 8000 万年という早期に存在した銀河が観測されています。本研究により、数十メガヘルツという FM 放送より低い超低周波数の電波によって、さらに遠方、すなわち過去の暗黒時代やその後の「宇宙の夜明け」を直接観測できるとともに、ダークマターの謎を解き明かす新たな道筋が示されました。

素粒子物理学の分野で近年注目されている温かいダークマターや軽いダークマターなどは、これまでの宇宙観測や地上実験では検証が困難でした。しかし、本研究の提案するグローバルシグナルの測定により、ダークマターがどのような粒子で構成されているか、その正体が明らかになることが期待されます。

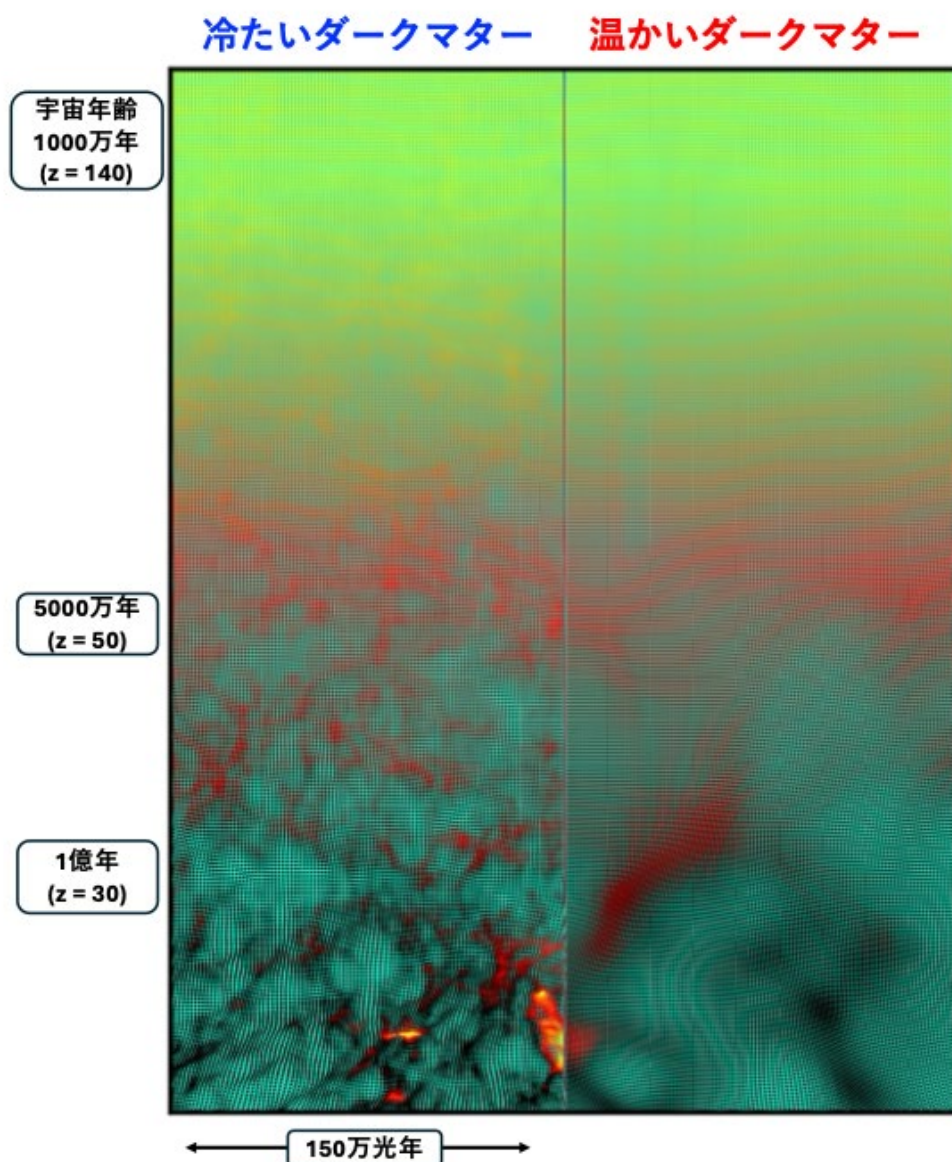


図1 本研究で行なったコンピュータシミュレーションの結果

暗黒時代の水素ガスの空間分布を粒子（つぶつぶ）の位置で表した。一つの粒子はおよそ太陽の1000個分の水素ガスに相当する。粒子の色はガス温度を表しており、黒、赤、黄の順に20, 50, 200度（ケルビン）に対応する。図で左側に表示された標準的な冷たいダークマターモデルの場合には細かな構造がみられ、ガス温度とスピン温度⁴⁾の変動も顕著な一方、右側に表示された温かいダークマターモデルでは全般に滑らかで、温度差も小さい。図の縦軸は時間（宇宙年齢）を表し、対応する赤方偏移（ z ）の値も示した。表示された両矢印の差し渡しの長さは現在の宇宙で150万光年に相当する。

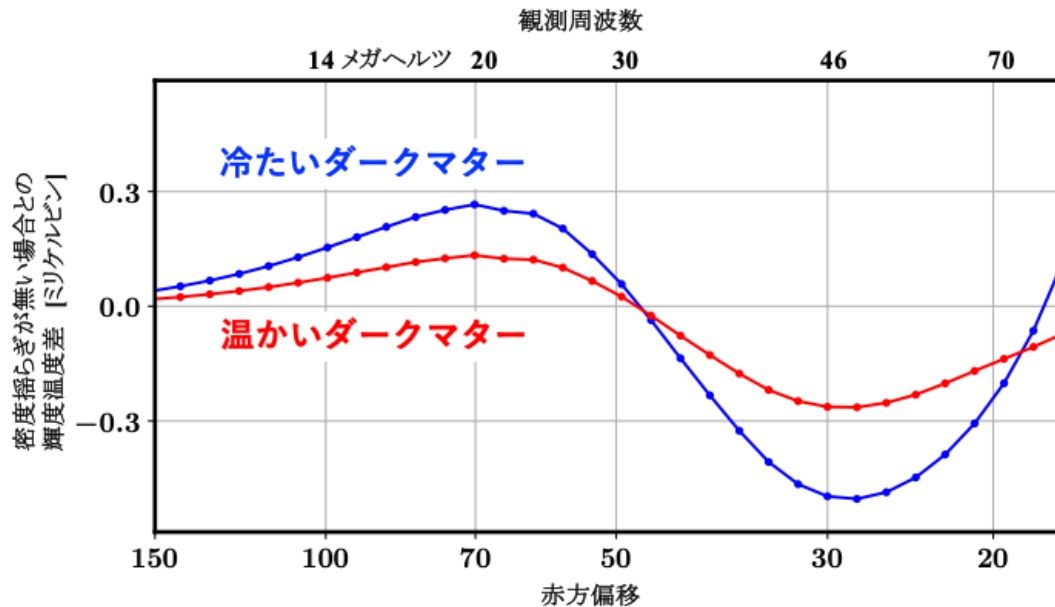


図2 シミュレーションの結果をもとに計算した21cm 線グローバルシグナルの輝度温度

単純な一様等方宇宙モデルによって計算した場合との輝度温度の差を表示しており、冷たいダークマターモデルの場合には密度揺らぎに起因する非線形効果によって輝度温度の周波数依存性が大きい。

用語解説

注1) 水素 21cm 線

水素原子が放射吸収する、波長が21 cm (周波数 1420 MHz) のスペクトル線。水素原子を構成する陽子と電子は共にスピンと呼ばれる物理量を持つ。それぞれ二つの状態を示し、上向き・下向きと呼ぶ。陽子と電子のスピンの向きが一致している時と、逆向きの時とで水素原子全体が持つエネルギーはわずかに異なる。水素原子のこれらの状態が変わる際に放射または吸収されるスペクトル線が21 cm 線である。

注2) グローバルシグナル

電波は天空のあらゆる場所から到来するが、ある波長帯の電波だけを全て足し合わせた強度を測定することができる。特定の波長あるいは広い波長帯に含まれる水素 21cm 線の寄与を全天にかけて平均したものをグローバルシグナルと呼ぶ。

注3) ダークマターの性質

ダークマターの正体は分かっていないが、もし微視的な粒子で構成されるなら、個々の粒子の質量や宇宙の始まるの頃にどれくらい速く動いていたかをあらわす温度に相当する量によって特徴づけられる。冷たいダークマターモデルや温かいダークマターモデルなどと分類される。

注4) スピン温度

水素 21cm 線の強度はスピン温度と呼ばれる、特定のエネルギー準位を占める水素原子の割合によって定まる。また、電波の輝度温度は宇宙背景放射との相対的な温度差によって定まる。

研究資金

本研究は、科研費による研究プロジェクト（23K20035）および外国人研究者招へい事業（S24099）の一環として実施されました。

掲載論文

【題 名】 The Signature of Sub-Galactic Dark Matter Clumping in the Global 21-cm Signal of Hydrogen

（水素 21cm 線のグローバルシグナルに現れるダークマターの密度揺らぎの痕跡）

【著者名】 H. Park, R. Barkana, N. Yoshida, S. Sikder, R. Mondal, and A. Fialkov

【掲載誌】 *Nature Astronomy*

【掲載日】 2025 年 9 月 16 日

【DOI】 10.1038/s41550-025-02637-0

問合わせ先

【研究に関すること】

Hyunbae Park（パク ヒョンベ）

筑波大学計算科学研究センター 研究員

URL: <https://www.ccs.tsukuba.ac.jp>

吉田 直紀（よしだ なおき）

東京大学 国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 特任教授

URL: <https://www.ipmu.jp/ja>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp

東京大学 国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 広報 小森

TEL: 04-7136-5977 / 080-4056-2930

E-mail: press@ipmu.jp