

# 中性水素の遷移線で見える宇宙の暗黒時代



山内 大介†

神奈川大学工学部  
yamauchi@jindai.jp

月に天文台を作る、というマンガのような話が、人類未踏の宇宙を探るために大真面目に検討され、現実になろうとしている。

宇宙の一番星が輝きだすよりも以前の時代(宇宙年齢40万年~1億年ごろ)のことを**宇宙の暗黒時代**と呼ぶ。宇宙の暗黒時代においては、宇宙空間には中性水素ガスとわずかなヘリウムが漂うだけで星や銀河などの輝いている天体は1つとしてない。そのため、可視光や近赤外線による宇宙大規模構造観測や電波による宇宙マイクロ波背景放射観測では見ることはできない。この時代を観測するほとんど唯一の方法は、**中性水素の超微細構造間の遷移に伴う波長約21 cmのスペクトル線である21 cm線**である。21 cm線は宇宙空間の膨張によって波長が伸びるため、観測波長ごとに異なる時刻の宇宙の物理的状態を反映した情報を我々に提供してくれる。

宇宙論観測における中性水素21 cm線の観測量としては、グローバルシグナルと呼ばれる当時の中性水素ガスの平均**輝度温度**を測定する方法と、輝度温度の空間的なゆらぎを測定する方法の主に2つがある。その中でも特に、暗黒時代グローバルシグナルは星形成や宇宙再電離などの影響を受けないことから、純粋に宇宙論のみで理論値が与えられる。もし理論予言と異なるシグナルを測定することになれば、それは「標準宇宙論の破れ」の証拠となる。一方で、暗黒時代21 cm線輝度温度の空間的なゆらぎは、観測周波数ごとに異なる時刻の物質の密度ゆらぎの情報が直接反映されている。バイアス因子などの不定性なく精密な理論予言が行えるだけでなく、宇宙マイクロ波

背景放射や宇宙大規模構造の観測では測定が難しい小スケールのゆらぎを精密に捉えることができるため、インフレーションや暗黒物質などの多様な物理現象への知見を得ることができる。さらに、他の宇宙観測と比較して十分大きな3次元的観測体積を持つことから、これまでにない観測精度で宇宙論パラメータを決定できる。

現在、地上において中性水素21 cm線を用いた遠方宇宙、特に宇宙の夜明けから再電離期(1億年~数億年ごろ)をターゲットとした観測が多数実施・計画されている。その中でも、2018年にEDGES(Experiment to Detect the Global EoR Signature)実験により、宇宙年齢2.3億年ごろに対応する21 cm線周波数帯のグローバルシグナルの吸収線が世界で初めて報告され、注目されている。

一方で、暗黒時代に対応する21 cm線の周波数は50 MHz以下と非常に低いため、地球の電離層の影響により地上からでは観測することが難しい。暗黒時代を観測できる最も有利な、おそらく現時点でのユニークな観測場所として月が注目を集めている。現在、日本を含め複数のグループが検討を進めており、近い将来に実現するかもしれない。実現すれば、宇宙論・素粒子物理学・天文学など複数の分野で、多くの重要な知見が得られると期待されている。

そもそも30 MHz以下の低周波数帯域では天文観測が行われたことがない。この帯域で宇宙がどんな姿を見せてくれるのか、どんな興味深い物理現象が見つかるのか、宇宙論に限らずとも月面天文台は我々に新しい宇宙の側面を見せてくれるはずである。

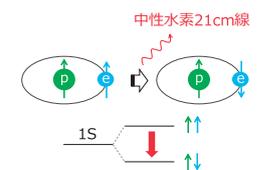
## 用語解説

### 宇宙の暗黒時代：

ビッグバン後の宇宙は高温のプラズマで満たされていた。その後宇宙膨張に伴い、温度が下がり、約40万年後に陽子と電子が結合して宇宙が中性化した。暗黒時代とは、宇宙の中性化後に中性水素ガスとわずかなヘリウムだけが漂い、輝くものが何もない時代である。

### 中性水素21 cm線：

中性水素原子は陽子と電子のスピンの相対的な向きによって異なる2つの準位(超微細構造)を取る。この準位間の遷移によって放出される波長が約21 cmのスペクトル線が中性水素21 cm線である。禁制遷移であるが、宇宙空間においては莫大な数の中性水素原子があるため、観測に利用できる。近傍宇宙の観測において古くから用いられてきたが、暗黒時代を探索するユニークな観測手法として近年注目されている。



中性水素の超微細構造間の遷移により、21 cm線と呼ばれるスペクトル線が観測される。

### 輝度温度：

電磁波の放射強度を表す温度の次元を持つ物理量。ある周波数での輝度 $I_\nu$ に対して $c^2 I_\nu / 2k_B \nu^2$ で与えられる。電磁波が黒体放射で、レイリー・ジーンズ近似が成り立つ場合には、その温度に等しくなる。

† 現所属：岡山理科大学理学部