

宇宙創成はじめの3億年

暗黒時代に生まれる最初の星、銀河、ブラックホール

吉田直紀（東京大学数物連携宇宙研究機構）

次世代の望遠鏡によって宇宙最初期の天体の姿を捉えることができる
と期待されている。謎につつまれた宇宙進化の「暗黒の時代」をコンピューターシミュレーションで再現した。

「もっと遠くを見てみたい」とは、天文学者だけでなく多くの人が持つ好奇心の一つだろう。ガリレオ・ガリレイが初めて望遠鏡を宇宙に向けて以来400年、より大きな望遠鏡を用いることでより遠くの宇宙の姿が明らかになってきた。現在、最新の大型望遠鏡を用いて見る事のできるもっとも遠い天体は我々から131億光年離れた場所にある。ガンマ線バーストと呼ばれる、星の大爆発と考えられている現象が捉えられたのだ。よく知られているように、光速が有限であるために、遠くの宇宙を見るということはすなわち宇宙の過去の姿を見ることに相当する。このため、現在観測できるもっとも古い天体は、宇宙が生まれてからおよそ数億年の頃に存在したものということになる¹。

そもそも宇宙はじめの数億年という早期には、星や銀河などの光輝く天体はほとんどなかったと考えられている。この時期は「宇宙の暗黒時代」と呼ばれ、これまでどのような波長でも観測がなされていない。最初の数億年間、星や銀河などが生まれる前の宇宙には、ガスと暗黒物質が薄く漂い、それにビッグバンの名残である弱い電磁波が飛び交うだけで、文字通り暗黒の宇宙だったと考えられる（文献1）。しかし、後述するように、何もおこっていなかったわけではない。観測されていないために不明な事柄も数多く残っており、宇宙の進化史のまさに暗黒部であると言える。次世代の大口径望遠鏡や宇宙望遠鏡によって見ることのできる「もっと遠くの宇宙」の行き着く先には暗黒宇宙があるはずなのだ。この時期の宇宙の進化、特に「暗黒時代はどのように終わったのか」を解明するために、理論・観測両面で研究が進められている。以下では、最近の遠方宇宙の観測結果や、大規模数値シミュレーションの結果を交えながら、宇宙暗黒の時代の謎に迫っていく。

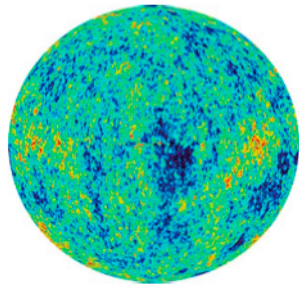
¹最近の様々な観測から推定される宇宙の現在の年齢は137億歳であると考えられている。

観測から定まった「精密」宇宙モデル

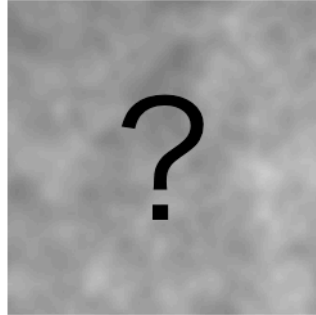
最近の宇宙マイクロ波背景放射の観測や宇宙の銀河分布の解析、さらに遠方超新星の観測によって、宇宙の構成要素や宇宙膨張の歴史を記述する、いわゆる宇宙論パラメータが決定された。これにより、宇宙を加速度的に膨張させる暗黒エネルギーと、重力源となり構造形成に主要な役割を果たす暗黒物質の2つを基本的な構成要素とする標準宇宙モデルが定まった。長らく観測的宇宙論最大の課題であった宇宙論パラメータの決定が驚くほどの精度で達成され、また、銀河など宇宙の構造の種となる初期宇宙の密度揺らぎの起源がインフレーションによるものとほぼ裏付けられたことで、宇宙全体の進化や構造形成について信頼できる予言を与えることができるようになった。実際、この標準宇宙モデルは、大規模構造による重力レンズ現象や、遠方宇宙での銀河間物質の分布など、他の様々な観測結果とも整合し、今のところ致命的な問題はないようである（文献2）。

現在の宇宙の全エネルギー密度の96パーセントをも占める2つの暗黒要素の正体が不明であることが依然として不愉快な問題としては残っているものの、銀河などの天体の形成と進化については標準宇宙モデルの枠組みの中でより重要な事に集中できるようになった。また、本稿で紹介するような初期宇宙での構造形成についても、きわめて明確な理論予言を与えることができるようになった。私のような理論家にとっては、将来の遠方宇宙の観測によって判明する前に理論予言を与えることができるという、まさに千載一遇のチャンスが到来したと考えることもできよう。

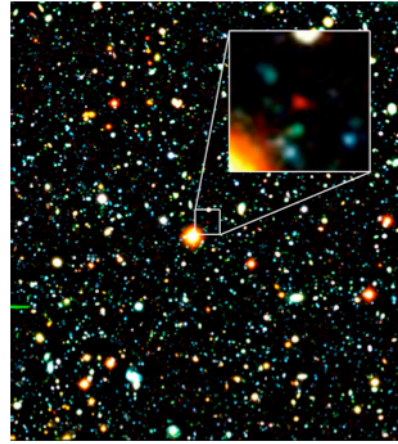
宇宙創成はじめの数億年の頃のことはまだ分かっていない、と書いたが、実はそのうちのある一瞬の宇宙の姿はうかがい知ることができる。全天から来る宇宙マイクロ波背景放射を観測することで、宇宙が38万歳だった頃の姿を直接知ることができるのだ（文献3）。この時期には、ビッグバン以降膨張を続けてきた宇宙の中ではじめて電子が陽子にとりこまれ、水素原子が生成される。その後の宇宙の中で光は自由電子と相互作用せずに直進できるようになり、われわれのもとにマイクロ波背景放射として届く。このおかげでわれわれは38万歳の頃の宇宙の姿 — といってもほとんど一様で僅かな「むらむら」があるにすぎないが — を「直接」見ることができる（図1）。



宇宙の
晴れ上がり期



暗黒時代



最遠銀河

図1 宇宙創成最初の10億年。宇宙が生まれて間もない頃（晴れ上がり期）の姿は現在のマイクロ波背景放射として直接観測できる。また、それから8億年経った頃に存在した銀河からの光を捉えることもできる。天文学のフロンティアはこの間、「宇宙の暗黒時代」にある。

初期の物質分布の「むらむら」が、重力の作用によって成長し、やがて暗黒物質やガスがあつまって最初の星——ファースト・スター——が生まれると考えられている。そして、ファースト・スターが「最初の光」を放つことで暗黒時代は終焉し、やがて光輝く銀河宇宙へと変貌をとげていく。

ファースト・スター

ファースト・スター形成は、遠い宇宙のことと思われるかもしれないが、究極的にはわれわれの起源につながる重要な事柄である。それは次のような事実から考察できる。ビッグバン直後の初期宇宙には、元素としては水素やヘリウムなどの軽いものしか合成されていなかった。ところが、普段われわれが地球上で目にするものは、これらの軽い元素以外のものを大量に含んでいる。そもそもわれわれ自身の人体も元素レベルで考えれば主に酸素、炭素、窒素などから成り、重さの割合で考えると、一酸化炭素分子とそれほど違いはない。また、地球は主に鉄やケイ素、マグネシウムなどから成り、水素やヘリウムといった

宇宙初期から豊富にあるはずの軽元素はむしろマイナーな構成要素でしかない。炭素や鉄などの重元素はいつ、宇宙のどこで合成されたのだろうか（文献4，5）。

核融合により元素合成をおこすには高温高密度の場所が必要である。ビッグバン直後の初期宇宙は高温高密度の状態なのだから、元素合成の場としては最もふさわしそうだ。しかし、元素合成がおこる時期（宇宙創成およそ100秒後）には既にバリオン物質の密度はかなり低かったため、ヘリウムよりも重い元素を合成するには至らなかった。もっと早い時期に元素合成がすすまなかったのは、宇宙が光に満ちあふれていたからである。光子全体の分布から見れば僅かな割合にしかすぎない高エネルギーの光子（ガンマ線）も、数では核子数に比べて多く、原子核は合成されてもすぐに破壊されてしまった。宇宙膨張とともに光子のエネルギーが下がり、重水素合成が進むようになった頃には密度が低く、ヘリウム原子核を合成するにとどまった。

それでは地球やわれわれ自身の体を形づくる元素は一体どこでできたのだろうか。炭素以上の重い元素合成を効率よくおこすことができる場所、それは星である。太陽のように自ら光輝く星（恒星）はその中心部で核融合反応をおこして軽元素から重元素を合成し、その際に発生するエネルギーによって自重を支えている。重元素は星の中で合成され、進化の途中で星風として、あるいは最後の超新星爆発の際に宇宙空間へ放出される。そしてそれらの重元素を含む星間ガスからまた新しい星が生まれる、というサイクルを繰り返して、地球や人体を構成する元素ができてきたのだ。「われら星の子」といわれる所以である（文献6）。

初期宇宙の実験

さて、ものには何でも「始まり」がある。宇宙暗黒の時代、水素とヘリウムだけから成る始原ガスが集積し、やがてファースト・スターが生まれ、進化の後に超新星爆発をおこして最初の重元素を宇宙にばらまく。ここから“すべて”が——銀河形成、惑星形成、そして最終的には生命の誕生が——始まる。かつてどこかに間違いなく存在したはずだが、まだどのような観測によっても見つけられてはいない。ファースト・スターは遥か昔に姿を消してしまったのか、宇宙でまだ観測されていない場所に隠れているのかもしれない。

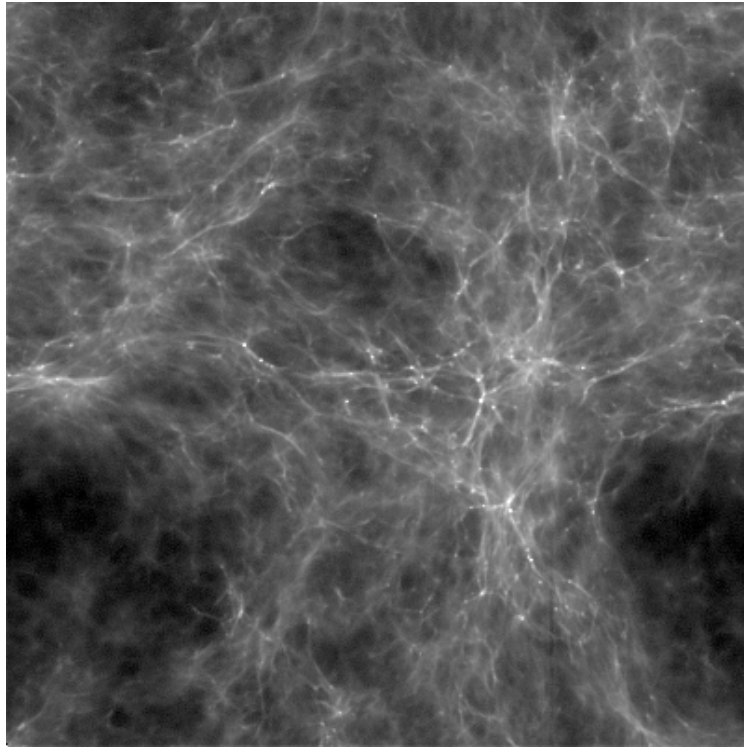


図2a コンピューター・シミュレーションで再現された宇宙年齢3億年の頃の物質分布. 明るい部分にガスが集まって密度が高くなっており, 網目状構造の節点にあたる部分に「星のゆりかご」ができはじめている.

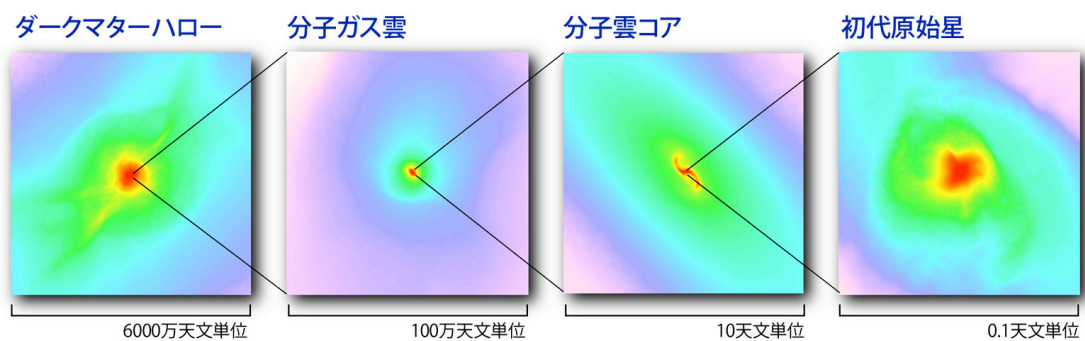


図2b ファースト・スター周辺のガス分布. 左から右に中心部分をクローズアップ. このシミュレーションは, 差し渡し10万光年という大きな宇宙空間の中で, 太陽半径程度の微細な構造までも解像している. 1天文単位とは地球と太陽との距離で定められ, およそ1億 5000 万 km. 左から順に巨大な暗黒物質の塊(ダークマターハロー), その中央にできた分子ガス雲, その高密度中心部, そして一番右のパネルの赤い部分が生まれたばかりの原始星で, その質量はまだ太陽の100分の1でしかない.

将来の観測による発見が待ち望まれるが、ファースト・スターの正体に迫るには、理論的研究がとりわけ有効である。それは次のような理由による。(1) 近年の精密宇宙観測によって、宇宙初期の物質分布の様子が詳しく分かり、また、標準宇宙モデルが定まった。(2) 宇宙初期の星形成に関わる物理過程は重力、気体力学、化学反応など数多いものの、それらはいずれも既知の物理であり、基本的には実験室で確かめられたものばかりである。つまり、極言するならば、ファースト・スターの形成は、現代物理学を結集すれば解けるはずの問題なのだ(文献7)。

われわれの研究グループは、この問題にスーパーコンピューター・シミュレーションを使って挑んだ(文献8)。関連する基礎物理過程をすべて第一原理的に取り入れるという、手間はかかるが確かな結果を得ることができる方法を採った。従来の星形成や銀河形成のコンピューター・シミュレーションでは、星間ガスがどう変化するかについて、いくつかの仮定をおき、簡潔な数式として与えていた。いわば進化の道筋を入力していたことになる。われわれの計算では逆に、やがて星となるガスの進化は計算の結果(出力)である。水素-ヘリウムガス中におこる化学反応や放射輸送過程をすべて考慮し、次にどのような密度、温度になるのかを逐一計算した。

具体的には、標準宇宙モデルにしたがって宇宙膨張を記述するフリードマン方程式、計1億個以上の粒子間の重力相互作用、および同数のガス要素の運動を記述するオイラー方程式、始原ガス中14種化学種の間にかかる51の主要な化学反応式、生成された分子の回転振動遷移により放射され、また吸収される分子線輸送、高密度領域で重要となる赤外連続光輸送を解いたことになる。おそらく、現実的な宇宙論的設定に基づくシミュレーションによってこれまでに解かれたもので最も難しい問題だろう。

シミュレーション領域内の解像度についても、ついに物理的要請を満たすレベルに達した。天体形成の問題で最も重要な物理量は「ジーンズ質量」と呼ばれる、ガスの圧力と自己重力の拮抗によって定まる最小の質量である。われわれのシミュレーションでは、差し渡し10万光年という大領域を設定しつつも(図2)、その中で個々の星形成ガス雲を、ジーンズ質量以下まで解像することに成功した。収縮して密度が高くなった領域の空間解像度を選択的に高める技法を用いて、ダイナミックレンジ10兆を達成した²。

² 一つの数値シミュレーションで取り扱うことのできる最小の長さとの最大の長さの比。

これにより、最終的には太陽程度のサイズの天体の形成を追うことができた。シミュレーションの解像度依存性という長年の問題はもはや物理的になくなったのだ。

必要な基礎物理過程を全て取り入れ、その上十分な解像度を持つわれわれの大規模シミュレーションはいわば「初期宇宙の実験」である。特別に意図して「星をつくるシミュレーション」を行ったのではない。初期宇宙の状態を忠実に再現し、膨張宇宙の中で「何がおこるか」を確かめたのである。極言すれば、われわれは計算機上の初期宇宙に星が自然にできるのを観察した、にすぎない（図2）。

そもそも、「宇宙で最初にできる天体は何か」ということは、天文学の長年の謎だった。宇宙初期には惑星のような小さな天体ができるのか、巨大なブラックホールができ始めるのか。われわれが今回行った大規模コンピューター・シミュレーションからは、個々の星が誕生すると結論づけられる。一つの問題に終止符が打たれたと言ってよいだろう。むろん、今後の観測によって確認されなくてようやく「完全解決」にいたる。

大規模シミュレーションから得られた結果は次のようにまとめられる。まず、ファースト・スターが誕生したのは宇宙創成から3億年ほど経った頃である。われわれの計算では宇宙の平均的な場所を仮定したが、場所によって多少の差があるため、宇宙の一番星が光り出したのは1億～3億年の頃というのが妥当であろう。いずれにせよ137億年の宇宙の進化史のかなり早い段階であることになる。この時期に質量が大陽の100万倍ほどの暗黒物質塊が形成され、その中に始原ガスが取り込まれて、星のゆりかご「分子ガス雲」がゆっくりと形成される（図2）。次に、分子ガス雲の中心に生まれる原始星（誕生初期の星）の質量は太陽の100分の1程度であった。中心温度は絶対温度1万度を超え、また密度は1cm³あたり0.001g程度、ちょうど空気と水の密度の間くらいに相当する。まわりには大量の温かいガスが存在し、それらが中心にむかって落ち込んでいくため、この小さな星の種はすぐに成長し、巨大な星になると考えられる。実際に3次元シミュレーションから得られたガスの降着率を用いて、原始星進化の詳細な理論計算をおこなったところ、最終的には質量がおよそ太陽の100倍以上にもなることがわかった。どうやら初期宇宙の星は小さく生まれて大きく育つようだ。

今後の研究の焦点はファースト・スターがどれくらいまで大きく成長できるか、を解明することである。星の質量が太陽の300倍以上にもなる場合には、進化の最期に重力崩壊をおこして最初のブラックホールが形成されると予想されており、後述のとおり超巨大質量ブラックホールの起源の一つの候補となる。一方で、天の川銀河にも存在する金属量が極めて小さい星の元素組成の解析からは、宇宙初期に太陽の100倍以上という巨大星が存在した証拠は見つかっていない（文献9）。ファースト・スターは典型的にどれくらい大きく、また次の世代以降の星々にどのような痕跡を残したのか、さらなる研究が必要だ。

最初の光と宇宙の再電離

ファースト・スターのもう一つの重要な役割は、「最初の光」を放つことである。文字どおり暗黒だった宇宙に初めて光りを灯し、さらに、それまでに膨張とともに温度を下げてきた宇宙空間のガスを暖める。ファースト・スターの質量が太陽の100倍以上であれば、明るさでは太陽の百万倍以上にもなる。宇宙がまだ数億歳という若さの時に、このようなとても明るいファースト・スターが闇を照らし出し、暗黒時代に終わりを告げたのだろう。同時に、星からの紫外線によって、それまで中性だったガスが電離され、電子と陽子がばらばらのプラズマ状態へと変化する。これを宇宙の再電離とよぶ。それよりもずっと以前、ビッグバン直後にはプラズマ状態だったものが宇宙の晴れあがりの時期に中性化し、その後数億年の時を経て再び電離されるので再電離、と呼ばれるわけだ。

宇宙の再電離は実に40年以上も前から天文観測研究の対象となっている。もともとは1960年代に、遠くにある明るいクエーサー³を観測して、そのスペクトルの中に中性水素による吸収線を探すことが提案された。スペクトルを詳細に調べれば、宇宙空間にどのような元素がどれくらいあるか知ることができる。水素に特有の波長の部分に強い吸収があらわれていれば、そのクエーサーと我々観測者点の間に多量の水素があることとなる。この方法で宇宙の元素の量を特定できると提唱したのはアメリカの二人の天文学者ガン(J. Gunn)とピーターソン(B. Peterson)である(文献10)。しかし、彼らが1965年におこなった解析からは、驚くことに、水素が大量に存在するという証拠はみつからなかつ

³非常に明るくコンパクトな天体。中心に巨大ブラックホールがあると考えられている。

た。宇宙空間には水素は存在しないのか？あるいはビッグバン元素合成で水素が大量に生成されたとする理論が間違っているのだろうか？

実は、観測結果は、宇宙空間に漂う銀河間ガスがほぼ完全に電離した状態であることを示唆していた。つまり、水素が見つからないのではなく、「中性」の水素が見つからなかったのだ。水素がたくさんあってもそれらがほとんど全て電離状態、つまり裸の陽子となっていれば、スペクトルに特徴的な吸収の痕を残さなくても不思議ではない。その後の観測により、銀河間ガスは比較的早期にほぼ完全電離されていたことが分かったが、再電離が具体的にいつおこったかは大きな謎だった。

2000年になって、日米欧共同の観測プロジェクト スローンデジタルスカイサーベイの研究チームが120億光年以上も離れたクエーサーを発見し、そのスペクトルにごく微量の中性水素の痕跡を見つけた。1960年代から探し求められてきた、銀河間ガス中の中性水素がついに見つかったのだ。これにより再電離過程の最終段階が判明したことになる。宇宙年齢10億年の頃には宇宙再電離はほぼ完了したと考えられる。

残る最大の謎は、再電離はどのように起こったか、ということである。ファースト・スターが宇宙再電離の最初の段階に役割を果たしたことは間違いない。しかし、大量にある水素の全てを電離するためには、非常に多くの大質量星が生まれなくてはならない。標準宇宙モデルにもとづく構造形成理論からは、再電離を引き起こす光を生み出したのは、個々のファースト・スターではなく、その後生まれるより大きな天体、おそらく銀河とよべるような星の集団——原始銀河——であろうと考えられている。

銀河の形成は多くの要素が絡み合うために、ファースト・スター形成に比べてはるかに難しい。ファースト・スターからの放射や超新星爆発などの影響を受けるため、宇宙初期から時間を進めて形成過程を追うという手法も上手くいきそうにない。これまでにいくつかの大規模コンピューターシミュレーションが行われたが、確固とした結論を得ることは難しいようである。

理論的にはまだ不明な点が多い一方で、次世代の望遠鏡を用いた観測によって原始銀河が生まれつつある姿を捉えることが可能であると期待されている。アメリカが2013年に打ち上げを計画している次世代の宇宙望遠鏡 James Webb Space Telescope (JWST)や、口径が30メートル以上もある巨大地上望遠鏡が必要となるだろう(図3)。いずれも宇宙暗黒時代の最後の様子を捉え

ることを主要な目的の一つに掲げている。銀河間ガスが電離される様子を直接観測する計画も進行中である。これには中性水素から発せられる波長が 21cm の特徴的な電波を捉えることが必要である。電波望遠鏡群によって初期宇宙の中性水素分布を描き出そうという計画は世界各国ですすんでいる（図 3）。2020 年までには、遠方銀河の観測と合わせて、「宇宙の夜明け」の様子を捉えることができるだろう。

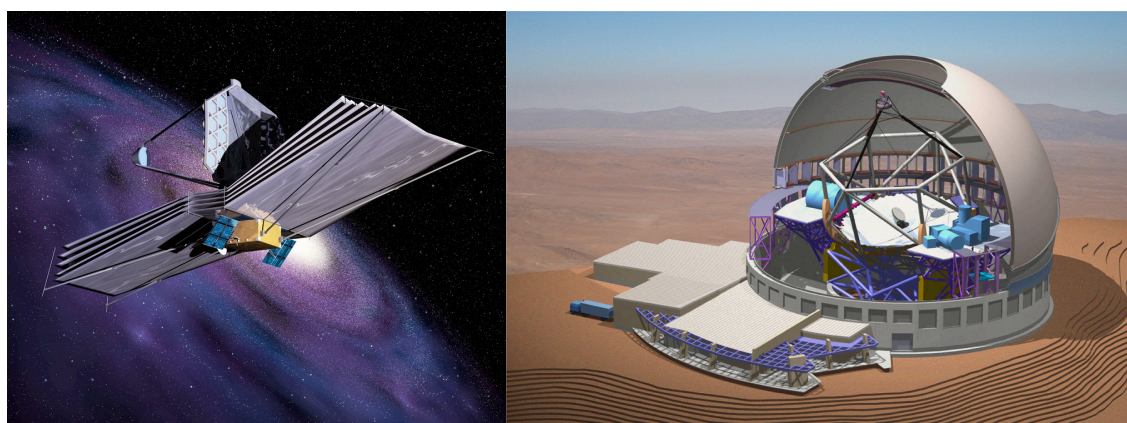


図 3 宇宙暗黒時代の謎に迫る次世代望遠鏡。アメリカが 2013 年に打ち上げを予定している宇宙望遠鏡 JWST(左上)と、カリフォルニア大学や日本が共同ですすめる口径30メートルの地上望遠鏡 TMT(右上)。下の図は、2009 年より観測を開始する、欧州の LOFAR 電波望遠鏡群。初期宇宙の水素分布を明らかにできるだろう。

謎の天体「ヒミコ」

初期宇宙での天体は随分早く進化したとの示唆が得られている。最近、米国カーネギー研究所や国立天文台の研究者らは、初期宇宙に不思議な巨大天体を発見したと発表した（文献11）。研究者らはこの古代宇宙でみつかった謎の巨大天体を「ヒミコ」と名付けた。もちろんこれは弥生時代後期における倭国の女王、卑弥呼に由来している。天体ヒミコは5万5千光年にも広がる大きさを持ち、そして明るい（図4）。宇宙初期の時代のものとしては記録的な大きさで、現在の天の川銀河の円盤の半径に匹敵する。この天体は水素のライマンアルファ線で強く輝き、広がりを持つのでライマンアルファブローブ(Lyman Alpha Blob)と呼ばれる。Blobとはぼんやりとひろがったもの、という意味だ。ヒミコが何故水素のライマンアルファ線で強く輝くのか、その物理機構については諸説あるものの、いまだはっきりとは分かっていない。考えられるのは中心に超大質量ブラックホールをもつ電離ガス雲や、銀河誕生の初期に起こると予想されている大規模なガス流、あるいは数百億太陽質量にもなる1つの巨大な銀河なのかもしれない。もしもそのような巨大銀河が宇宙年齢8億年の頃に既に存在していたとすれば、現在の宇宙の構造形成および銀河形成の理論を大きく修正する必要があるかもしれない。

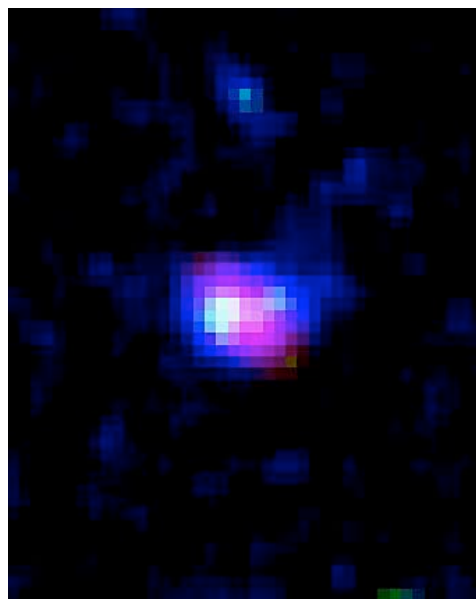


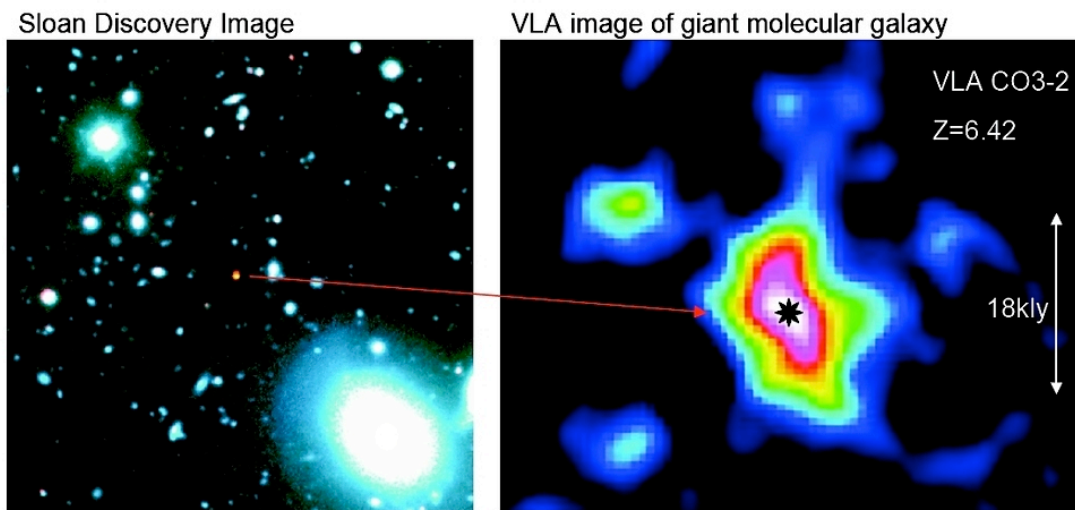
図4 謎の天体「ヒミコ」 宇宙年齢8億歳の頃に存在した巨大天体。大きさは直径5万5千光年ほど。青と紫は、ヒミコから出された水素輝線と紫外線の強度を表している。

ヒミコほど巨大ではないが、初期宇宙に存在し、ライマンアルファ線で明るく輝く天体はこれまでに多く発見されている。その発見には日本のすばる望遠鏡が活躍してきた。これまでに見つかった最も遠くにある銀河もすばる望遠鏡によって発見されたものである。しかし、これらの最遠方銀河も宇宙最初の原始銀河ではないだろう。すでに十分大きく、現在の望遠鏡でも観測できるくらいの明るさを持つということは、それまでに活発な星形成がおこっていたと推測される。理論的には、原始銀河の質量はおよそ太陽の1億倍ほどであると考えられている。それらが衝突、合体を繰り返しながらすぐにヒミコのような大きな天体になったとすれば、宇宙は暗黒時代が終焉した後にすぐ活動期に入ったと考えられる。ここでも JWST や TMT の活躍が期待される。

超巨大質量ブラックホールの起源

最後に、天文学に残るもう一つの未解決問題を紹介したい。これもまた宇宙暗黒時代に関係があるかもしれないからだ。これまでに発見されたクエーサーの中で最も遠方にあるものは SDSS-J1148.5521 と番号のついたもので(番号は天球上の座標、つまり天体の位置をあらわす)、2002年にスローンデジタルスカイサーベイの研究グループによって発見された(図5)。我々からおよそ130億光年離れた場所にある。このクエーサーは電波から可視光まで様々な波長帯で観測されており、次のようなことがわかっている。中心には太陽の30億倍以上もの質量の巨大ブラックホールがあり(文献12)、また周辺ガスは炭素や酸素、マグネシウム、鉄といった重元素を豊富に含む。遠赤外線観測からは、宇宙塵が大量に存在していることも判明した。いずれの結果も大きな謎、あるいは既存の宇宙構造形成理論では説明が困難であると言ってよい。それはこの天体がきわめて初期に存在しているからだ。

そもそも太陽の10億倍以上という超巨大ブラックホールの形成過程は全くわかっていない。これまでに、多くの銀河の中心に巨大ブラックホールがあることが知られており、また、ブラックホールの質量と銀河の中心部にある星の総質量との間に強い相関があることも知られている。つまり、ブラックホールは銀河形成においても大きな役割を果たしたことは明らかである。しかし、上記の SDSS クエーサーは宇宙年齢8億年という早期に既に太陽の数十億倍もの質量をもっていた。あたかもブラックホールが銀河よりも先に生まれたようだ。



J1148+5251: Coeval formation of a super massive black hole and giant elliptical galaxy within 870Myr of the Big Bang

図5 最遠方のクエーサー SDSS J1148+5251 の可視光での姿(左パネル:中央の明るい点がクエーサー)と VLA 電波望遠鏡により撮影した1酸化炭素の分布(右パネル)。このクエーサーの中心には質量が太陽の30億倍以上の超巨大ブラックホールが存在する。

超巨大質量ブラックホールの起源は現代天文学の最大の謎であり、これまでに様々な理論モデルが提唱された。その一つが、ファースト・スターがその最期に重力崩壊をおこしてブラックホールを形成し、それがやがて周辺のガスを吸い込んで成長すると考えるものである。しかし、いくらブラックホールが何でも吸い込むといっても、無限の速さで吸い込めるわけではない。ブラックホールが周辺物質を吸い込み、自らの質量を増やす割合には、エディントン限界という物理的に定まる上限値がある。周辺物質がおおよそ球対称に降り積もる場合には、この上限値を超えてブラックホールに吸い込まれることはあり得ない。これまでの理論研究では、ファースト・スターの崩壊により太陽の100倍ほどのブラックホールの「種」が形成された場合、そのブラックホールが宇宙年齢8億年の頃まで太陽質量の数十億倍になるには、それまでほぼ常にエディントン限界ぎりぎり成長しなくてはならないと結論づけられる。単純に考えてもこれは起こりそうにないと予想されるだろう。SDSS-J1148のようなクエーサーの数は非常に少ないので、ちょうど上手く成長できる場合にのみ超巨

大ブラックホールになったと考えればよいかもしれないが（実際そう考える研究者も多い）、一般にそのような小さな確率あるいは「偶然」に頼る理論を鵜呑みにするのは難しい。

最初のブラックホールの種が太陽の1万倍から10万倍の質量をもつことが必要であるとして、初期宇宙でのこれら中間質量ブラックホールの形成もさかんに研究されている。中には暗黒物質粒子の対消滅をエネルギー源とする巨大天体の形成も提案されており、素粒子物理の研究者を含むホットなトピックとなっている。興味深いことに、中間質量ブラックホールが合体を繰り返して超巨大ブラックホールに成長する場合には、合体の際に強い重力波が放出されることが知られている。アメリカとヨーロッパが共同で計画している重力波検出器 LISA(文献13)は、驚くべきことにそのような遠方から放出される重力波さえも検出できる能力を有する予定であり、2010年代末の稼働が期待されている。ブラックホール合体の様子を観測できれば、初期宇宙での天体形成について多くの事が明らかになるだろう。

最後の一片

宇宙暗黒時代は多くの謎に包まれている。最初の天体は何か。原始銀河はいつ生まれはじめたのか。ブラックホールはどのように成長したのか。これら現代天文学の未解決問題の鍵は暗黒時代にある。

望遠鏡で「より遠くの宇宙」を目指してきた人類は、これまでに宇宙137億年の進化史の多くの部分を解明してきたと言ってよいだろう。そのはじめの3億年、進化史の最後の「ミッシングピース」を手に入れることができる日も近そうだ。宇宙進化の全貌を見渡すことができるという、非常に幸運な時期にわれわれは生きている。

参考文献

- 1 「宇宙を見る新しい目」 日本物理学会編 日本評論社 (2004 年)
- 2 「ものの大きさ 自然の階層・宇宙の階層」 須藤靖 著 東大出版会
- 3 「膨張宇宙とビッグバンの物理」 杉山直 著 岩波講座
- 4 「物質の宇宙史 ビッグバンから太陽系まで」 青木和光 著 新日本出版社
- 5 「元素はいかにつくられたか」 野本憲一 著 岩波講座
- 6 「僕らは星のかけら」 マーカス・チャウン 著 糸川洋 訳 SB 文庫
- 7 V. Bromm, N. Yoshida, L. Hernquist, C. F. McKee: Nature, 459, 49 (2009)
- 8 N. Yoshida, K. Omukai, L. Hernquist: Science, 321, 669 (2008)
- 9 N. Iwamoto et al. : Science, 309, 451 (2005)
- 1 0 J. E. Gunn, B. A. Peterson: Astrophys. J., 142, 1633 (1965)
- 1 1 M. Ouchi et al.: Astrophys. J., 696, 1164 (2009)
- 1 2 C. J. Willott, R. J. McLure, M. J. Jarvis: Astrophys. J., 587, L15 (2003)
- 1 3 米国 NASA のホームページ <http://lisa.nasa.gov/>