

宇宙史のアルバムから抜け落ちた時代
ビッグバンから137億年後の現在までの宇宙の各時代の画像をまとめて1冊のアルバムを作つてみると、宇宙誕生約40万年後の姿をとらえた宇宙マイクロ波背景放射の画像から、約8億年後の最も古い銀河の画像までの間は、何も画像がない。光り輝く星が存在しない間に包まれた「暗黒時代」だったからだ。

宇宙の暗黒時代を探る

宇宙の進化を記録したアルバムには空白のページがある
闇に閉ざされた宇宙の幼年時代の姿を天文学者は探し求めている

A. ロブ(ハーバード大学)

夜空を見上げていると、私たちは自分のことで頭がいっぱいになりすぎているのではないか、という思いにかられことがある。宇宙には、地上では目にすることができないさまざまなものがある。天文学者である私は、それについて考えることで給料をいただく幸せな身だが、そのおかげでものごとをより大局的に見ることができるようになったと思う。

そうでなければたくさんの問題が私

を悩ませていただろう。例えば自分の死だ。誰もがいつかは死ぬ。だが、宇宙全体について考えると悠久の時を実感する。その壮大さに圧倒され、自分の悩みなどいたしたものではないよう思えてくるのだ。

過去数百年、人々は存在の根源にかかる問題の答えを哲学によって探し求めてきた。今、宇宙論研究者は観測と理論から答えを得ようとしている。ここ100年での最大の成果は、膨大なデータに裏付けられた宇宙モデルの構築だろう。だが世間は、そうした宇宙モデルの持つ意義を過小評価する。

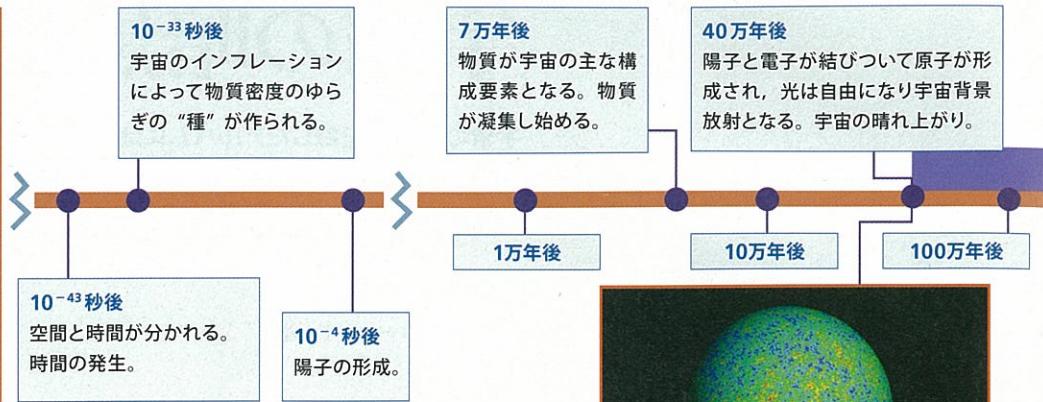
毎朝、新聞を広げると、国境紛争や財産争い、自由を求める闘争などの長文記事をよく目にすると、そうした日々のニュースなど数日もたてばほとんど忘れられてしまう。一方、古来、多くの人々の心をとらえてきた文書、例えば聖書をひも解いたとき、最初の章には何が記されているだろう？そこには宇宙を構成する光や星、生命がどのように創造されたかが述べられている。人間は日常生活に追われながらも、自分が暮らす世界の全体像に興味を持っているのだ。

最初の光はいかにして生まれ、生命はいかにして存在するに至ったか、この広い宇宙で知的生命は人間だけなのか？宇宙の一員である私たちはこうしたことを考えずにはいられない。そして21世紀、天文学者はこれらの重

JEAN-FRANCOIS PODEVIN



ビッグバンの始まり



宇宙マイクロ波背景放射が放出された後、宇宙が中性化した時代と最初の星や銀河が生まれた時代の間に暗黒時代があった。星に光が宿り、その光を受けて銀河間ガスが電離するにつれ、暗黒時代はゆっくりと終焉に向かった。

大な問い合わせを出しうる立場にある。

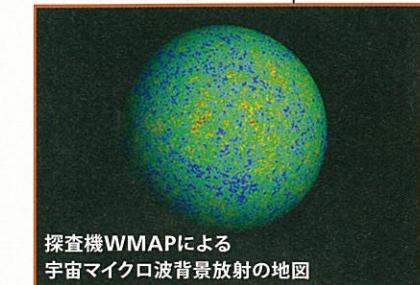
現在の宇宙論が実証科学たりうるのは、私たちが過去を文字通り見通せるからだ。1m離れた鏡の中の自分の姿を見ると、私たちは6ナノ秒前の自分、つまり光が鏡にたどりつき、反射して戻ってきた結果を目にしている。同じように宇宙論研究者は望遠鏡のぞいて宇宙の歴史を見る。宇宙がどのように進化してきたかを推理する必要はないのだ。宇宙はあらゆる方向に対して一様なので、地球から数十億光年先に見えているものは、私たちが存在する場所の数十億年前の姿とほぼ同じだと考えられる。

観測宇宙論の最終目標は宇宙の全歴史をとらえることだ。それによって、

原子より小さい粒子からなるガス状の初期宇宙から、現在私たちがいる世界ができあがるまでの流れを途切れなく知ることができる。私たちの手には、ビッグバンから40万年後の宇宙のスナップ写真「宇宙マイクロ波背景放射」の画像がある。また、それから約10億年後の個々の銀河の写真もある。

米航空宇宙局(NASA)は6~7年後に新しい宇宙望遠鏡「ジェームズ・ウェブ宇宙望遠鏡(James Webb Space Telescope)」を打ち上げる予定で、これによって、宇宙誕生から数億年後にできたとされる最初の銀河の姿をとらえられるだろう。

そうなっても、宇宙の歴史において空白の時代がまだ多く残る。宇宙マイ



探査機WMAPによる
宇宙マイクロ波背景放射の地図

クロ波背景放射が放出されてから最初の星の光が観測されるまでの間、宇宙は暗黒に包まれ、物質分布の状況を知ることができないのだ。

この時期は、ビッグバン後の激変は収まったものの、星々が輝く現在の活気ある宇宙はまだ姿を見せていない。暗黒の時代というと、薄暗い中でゆっくり時間が流れる“劇の幕間”的な印象を持たれるかもしれない。しかし、この時代には実際に多くのことが起きていた。最初の混沌とした宇宙を、私たちが今、目についているさまざまな天体が輝く銀河宇宙にまで進化させたのは、この時代なのだ。漆黒の暗闇の中で重力は宇宙にただよう物質を集め、天体を組み立てていた。

銀河の進化を人間の成長に例えて言うなら、天文学者が今、手にしているそのアルバムには、超音波でお母さんのお腹を調べて、初めて得られた胎児のときの画像と、それからずっととんで、10代から成人になってからの写真しかない。

これらの写真から、アルバムの空白の時代に何が起きたかを推測しても、正しい答えにはたどりつけない。子どもは胎児がそのまま大きくなった姿で



非等方性探査機WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)が、宇宙マイクロ波背景放射がわずかに偏光していることを確認した。背景放射の伝搬途中にある中性水素によって偏光されることはない。電離された水素によって偏光が生じる。観測された偏光強度はビッグバンから数億年後には水素ガスが電離されていたことを示していた。暗黒時代が終わる前に、水素原子は再び陽子と電子に分かれていることになる。「再電離」と呼ばれるプロセスだ。

多くの研究者は水素ガスの再電離の原因を第1世代の星と関連付けている。水素原子を電離するのに必要なエネルギーは13.6電子ボルト(eV)で、紫外線の光子が持つエネルギーに相当する。これはさほど大きなエネルギーではない。水素1kgあたりの電離エネルギーは10⁹ジュールであり、同量の水素による核融合反応で放出される10¹⁵ジュールに比べればはるかに小さい。例えば宇宙に存在するすべての水素原子のうち100万個に1個が恒星内部で核融合を起こせば、残りすべての水素を電離できるエネルギーが得られる。

物質がブラックホールに落ち込む際に放出された光によって水素が電離したとの見方もある。1kgの物質が落ち込むと10¹⁶ジュールのエネルギーが放出されるため、宇宙の水素の1000万分の1が落ち込めば、残りすべての水素を電離できる。

星やブラックホールは銀河の中で生まれるのだから、再電離が起こる前に

宇宙初期の暗闇の中で星や銀河が生まれた

- ここ数年、宇宙論では、ビッグバンから約40万年後の宇宙の姿を映し出す宇宙マイクロ波背景放射が注目されている。しかし今後は、その時期から最初の銀河が出現するまでの期間、わずかな星の光えない「暗黒時代」の研究が本格化するだろう。その暗闇の中に銀河形成の秘密が隠されているからだ。
- 何も見えない時代のことを調べるのは難しい。手がかりは、宇宙背景放射との相互作用によって電気的に中性な水素から放出される微弱な電波だ。その観測が始まることから始まる。
- それから得られる中性水素原子の分布地図は、マイクロ波背景放射の地図よりも興味深いものになるに違いない。宇宙初期の混沌の中から、物質が集まって銀河が生まれてくる過程が3次元で映し出されるだろう。

はなく、大人がそのまま小さくなった存在でもない。銀河にも同じことが言える。銀河は、宇宙マイクロ波背景放射が示す宇宙初期の物質の凝集がそのまま成長したものではない。暗黒時代、宇宙に大きな変遷があったことを観測結果は示している。

天文学者は今、宇宙のアルバムの抜け落ちた“写真”を探している。それが見つかれば、宇宙が幼年期にどのような進化を遂げ、天の川銀河に代表される数々の銀河のもとがどのようにして作られたのかがわかるだろう。

10年前、私が暗黒時代の研究を始めたとき、関心を示す研究者はごく少数だった。それが今や、多くの観測計画が立ち上げられている。この先10年、宇宙論における最もエキサイティングな最先端分野になるに違いない。

再び電離された宇宙

ビッグバン理論によれば、初期の宇宙は高温のプラズマで満たされ、陽子と電子、光子と、それ以外のわずかな粒子が渦巻く“つぼ”だった。そのとき、自由に動き回っていた電子はトムソン散乱と呼ばれるプロセスによって光子と相互作用し、物質と光は強く

結びついていた。

宇宙が膨張して冷え、絶対温度で3000Kまで下がると、陽子と電子は結合して電気的に中性の水素原子となつた。トムソン散乱はもはや起こらず、光は物質との相互作用が大幅に低下して、宇宙をはるか遠くまで飛ぶようになった。この光が宇宙マイクロ波背景放射として観測されている。

宇宙膨張はその後も続いているが、ガス温度が下がり続けたのだから、現在、宇宙に存在するガスは冷えて、電気的に中性だと思われるかもしれない。しかし、驚いたことに、事実はそうではない。私たちの周囲の世界は原子で構成されているものの、現在の宇宙にある物質の大部分はプラズマであり、銀河間の広大な空間に存在している。わかっている中で最も遠い(最も古い)銀河やクエーサー、ガンマ線バーストのスペクトルは、宇宙全体に散らばった水素が宇宙誕生から10億年後には完全に電離されていたことを示している(E.スカナビエコほか「宇宙史のカギ握る銀河間ガス」日経サイエンス2003年1月号)。

興味深い手がかりが見つかったのは3年前。ウィルキンソン・マイクロ波

銀河はすでに存在していたに違いない。多くの人々は銀河を星の集まりだと考えているが、宇宙論研究者は銀河を単なる物質の巨大な集まりとしてとらえており、星はむしろ遅れて銀河の中に登場する。銀河の主要構成要素は「暗黒物質」という目に見えない正体不明の物質だ。

宇宙のある領域が他の部分よりもわずかに密度が高いと、そこにある物質が自身の重力で凝集し、銀河が生まれると考えられている。そうした領域も最初は宇宙の他の領域と同じように膨張していたが、重力によって膨張速度が遅くなり、やがて膨張が収縮に転じ、ついには重力に束縛された天体、つまり銀河が誕生する。

現在のモデルによれば、矮小銀河が形成され始めたのは宇宙誕生から約1億年後だ。時を経るにつれてこれらの銀河は融合し、より大きな銀河に成長した。天の川銀河のような現存する銀河は矮小銀河が100万個も集まつた結果なのだ。

初期の銀河の中ではガスが冷え、多数の細かい塊に分裂し、それぞれが凝集して星が形成されていった(R. B. ラーソンほか「宇宙の最初の星」日経サイエンス2002年3月号)。星から放出された紫外線は銀河間空間に漏れ出し、そこにある原子から電子をはぎ取った。こうして電離ガスの泡が生まれ、膨張していった。

以降、新しい銀河が増えるにつれてさらに同様の泡が多数誕生し、電気的に中性の銀河間ガスは穴がたくさん開いたスイスチーズのような状態になった。やがて電離ガスの泡は互いに重なり合うようになり、最終的には空間全体が泡で覆われ、すべてが電離ガスに変わった。

いかにももっともらしいシナリオだが、今のところ、これは研究者の頭の中で展開されている話にすぎない。実

証を重んじる宇宙論研究者は、再電離期の直接的な証拠を見つけ出したいと考えている。さらに、再電離はもっぱら星によって起きたのか、ブラックホールによるのか、暗黒物質の正体は何なのかという議論に決着をつけられるのは観測事実だけだ。

しかし、暗黒時代が本当に暗闇に包まれていたのなら、果たして観測は可能なのだろうか?

幸運にも、水素は低温でも電波を放出する。原子を構成する陽子と電子は「スピン」という固有の向きをそれぞれ持っている。スピンの向きは2つあ

中性水素原子の3次元地図を作ればマイクロ波背景放射の地図をも上回る情報が得られるだろう

り「上向き」「下向き」という。水素原子内には陽子と電子が1つずつあり、2つのスピンの向きが同じ状態(平行)と、反対向きの状態(反平行)がある。

スピンが反平行のほうが原子のエネルギーは低い。

例えば、陽子と電子のスピンがともに上向きの平行な状態から、電子スピンが反転して下向きに変わり、反平行になると、水素原子のエネルギーは減り、そのエネルギーの差に相当する波長21cmの電波の光子(電波光子)が放出される。逆に波長21cmの電波光子を水素原子が吸収した場合、電子スピンが反転して上向きになり、スピンが平行の状態になる。

波長21cmの電波光子が持つエネルギーは、電子が軌道間を飛び移るときに水素から放出される光子のエネルギーはるかに小さい。そのため、光を放つ星が存在しない状態でもスピン

反転は起こりうる。背景放射や原子間衝突のエネルギーでも、電子のスピン反転を起こすには十分で、水素を弱く光らせることができる。

3種類ある温度

スピンが平行の水素原子と反平行の原子の比率はガスの「スピン温度」として表される。スピン温度が高いほど、スpinが平行の原子の割合が多くなる。

つまり暗黒時代、宇宙の状態は理論的に3種類の温度によって表されることになる。異なるスピン状態の原子の相対的な割合を示すスpin温度、原子の運動によって表される一般的な温度(運動温度)、そして背景放射に含まれる光子のエネルギーを表す放射温度だ。これら3種類の温度は宇宙の物理状態に応じて変わる。

この微妙な3者の関係は、最初のうちスpin温度と運動温度が一致しているが、次にはスpin温度と放射温度が歩調をそろえ、最後に再びスpin温度と運動温度が同じになるといった具合に変化する(右ページの囲み)。

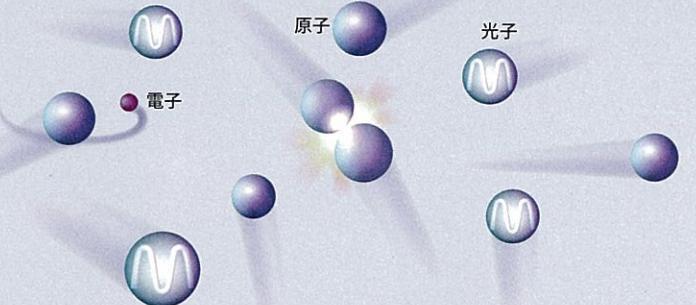
暗黒時代当初、宇宙が膨張するにつれ、ガスと放射の温度は下がった。もし何の制約もなければ、ガスの温度(運動温度とスpin温度)のほうが急激に下がるはずなのだが、そこに歯止めをかけたのは水素原子になりそこねた少数の自由電子だった。自由電子は背景放射のエネルギーを原子に伝える役として働き、3種類の温度を均等に保つ役割を果たしていた。

しかし、ビッグバンから1000万年が経つと、背景放射の強度が低下して自由電子が運ぶエネルギーも少なくなり、ガスと背景放射の熱的な平衡状態は崩れた。ガスの温度は急激に低下したが、運動温度とスpin温度は原子間の衝突によって等しく保たれた。この間、水素原子は波長21cmの電波光子を吸収して、背景放射のエネルギーを

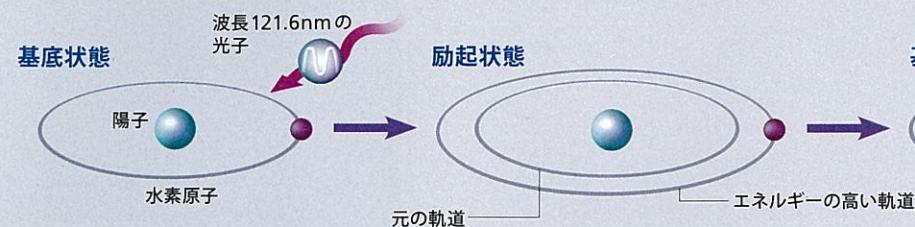
暗闇の中を見る方法

暗黒時代、光り輝く星は存在しなかったが、本当に完全な暗闇だったわけではない。頻繁ではないが、水素ガス内では微弱な光(電波)を発するプロセスが起きていた。

水素が電波を発するにはエネルギー源が必要だ。エネルギー源になりうるのは水素原子の運動エネルギー(原⼦どうしの衝突で生み出される)と背景放射の光子だ。原⼦と結合していない自由電子は原⼦と光子との間のエネルギーのやりとりに一役買っていた。

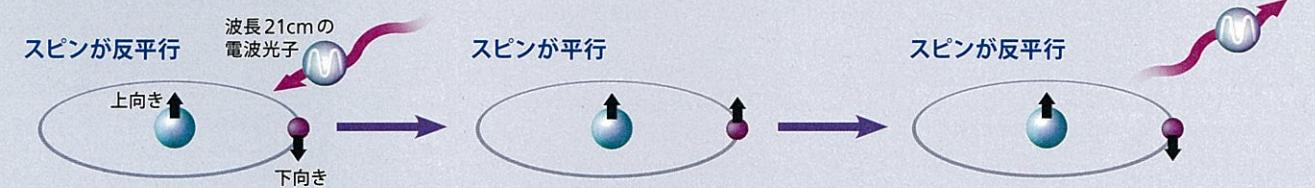


通常、水素原子からの光の放射はエネルギーの高い軌道(励起状態)にジャンプした電子が、元の軌道(基底状態)に戻るときに起きる。しかし、



暗黒時代には自由電子も背景放射も電子をよりエネルギー状態の高い軌道に持ち上げるほど十分なエネルギーを持っていなかった。

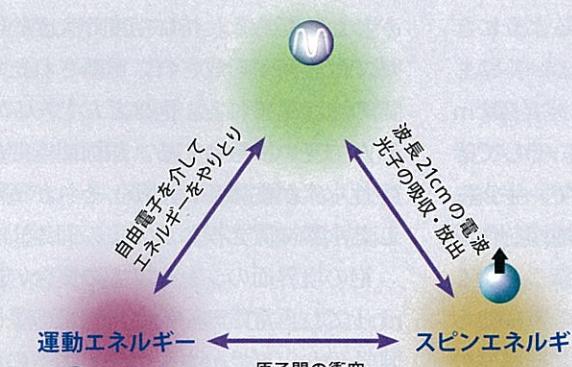
だが、暗黒時代でも、電子のスpinの向きを陽子のスpinの向きと同じにそろえることなら、背景放射の光子や粒子間衝突のエネルギーができる。



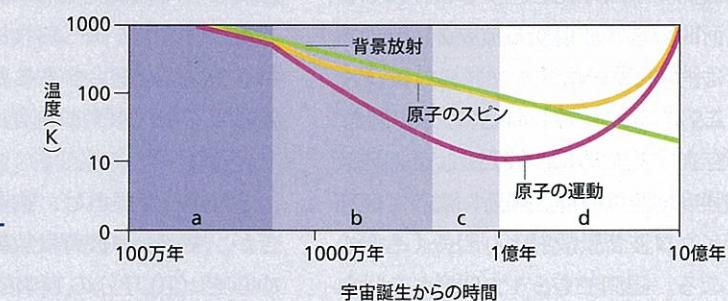
こうして励起された電子のスpinが元の状態(陽子のスpinと逆の向き)に戻るときに波長21cmの電波光子が放出される。

暗黒時代の水素原子が関与するエネルギーには3つの形態がある。運動エネルギー、スpinエネルギー、背景放射光子のエネルギーだ。これらのエネルギーはさまざまな過程でやりとりが生じる。

宇宙背景放射の光子が持つエネルギー



3種類のエネルギーの量はそれぞれ温度で表すことができる。温度が高いほどエネルギーも大きい。暗黒時代が始まった時点では3種類の温度はすべて同じだった(a)。やがて、運動温度とスpin温度が、背景放射の光子の温度よりも速く下がり始めた(b)。さらに時間が経過すると、スpin温度は光子の温度との平衡状態を回復した(c)。最終的には星やクエーサーによってガスが暖められ、運動温度とスpin温度が上昇した(d)。これら3つの温度の相対的関係の変遷を踏まえれば、それぞの時代に応じた水素の観測の仕方や、観測が可能かどうかがわかる。



吸い上げていた（ただし、ガスと放射の平衡を回復するには程遠かった）。

ビッグバンから1億年が過ぎ、2度目の転機が訪れた。それまでは原子間衝突がある程度高い頻度で起きていたためスピニン温度と運動温度が等しく保たれていたのだが、宇宙膨張によってガス密度が下がり、原子間衝突の頻度が落ちた結果、両者の平衡関係が崩れた。その後、スピニンは背景放射からエネルギーを得るようになった。

こうしてスピニン温度と放射温度が平衡を回復すると、水素による波長21cmの電波光子の放射・吸収は実質的に起きなくなった。だから、この時期については水素ガスの様子はわからない。波長21cmの電波光子を観測しても背景放射が見えるだけだ。

最初の星やブラックホールが誕生すると3度目の大規模な転換が起こり、新しい時代が幕を開けた。新しく生まれた天体はX線を放射し、水素の運動温度が上昇した。一方、それら天体から放射された紫外線は水素に吸収・放出され、水素原子内の電子は軌道を頻繁に飛び移ってスピニン温度と運動温度の平衡回復に寄与した。

スピニン温度は背景放射の温度を上回り、水素は背景放射よりも明るく光り始めた。電子スピニンの反転に必要なエネルギーは原子を電離するエネルギーに比べてはるかに小さいので、再電離

が起こるかなり前から銀河では水素が波長21cmの電波を放っていたが、最終的に水素が電離されると、それまでは別の方法で光を発するようになり、銀河間ガスが放射する波長21cmの電波は消えていった。

このように微妙な温度の“三角関係”が存在するために、波長21cmの電波の強度地図は時間と場所によって宇宙マイクロ波背景放射より明るくも暗くなる。観測でもう1つ留意しなければならないのは、宇宙膨張によって光

子の波長が伸びるという点だ。暗黒時代が始まったときに比べて現在の宇宙は1000倍に膨張している。つまり、暗黒時代の初期に放出された波長21cmの電波光子が地球で観測されるときの波長は210mになる。暗黒時代の終わり頃に放出された電波光子の場合は波長が1~2mに伸びている。

この波長域は電磁波の分類でいうと電波にあたり、テレビ放送や無線通信に使われているアンテナと同じようなものを多数配置した低周波アンテナ干渉計で、信号を拾うことができる。現在、複数のグループがアンテナ干渉計を建設中だ。

オーストラリアの西部に建設予定のマイルウラ広視野干渉計MWA (Mileura Widefield Array) では、差し渡し1.5kmの地域に8000本のアンテナを配置し、波長1~3.7mの電波を観測する。分解能は天球の角度にして数分角（1分角は1/60度）。これは暗黒時代では差し渡し約300万光年に相当する広さだ。他にも低周波干渉計LOFAR (Low-Frequency Array) や原始構造望遠鏡PaST (Primeval Structure Telescope)などの計画があり、さらに将来的には1km²干渉計SKA (Square Kilometer Array) 計画も控えている。

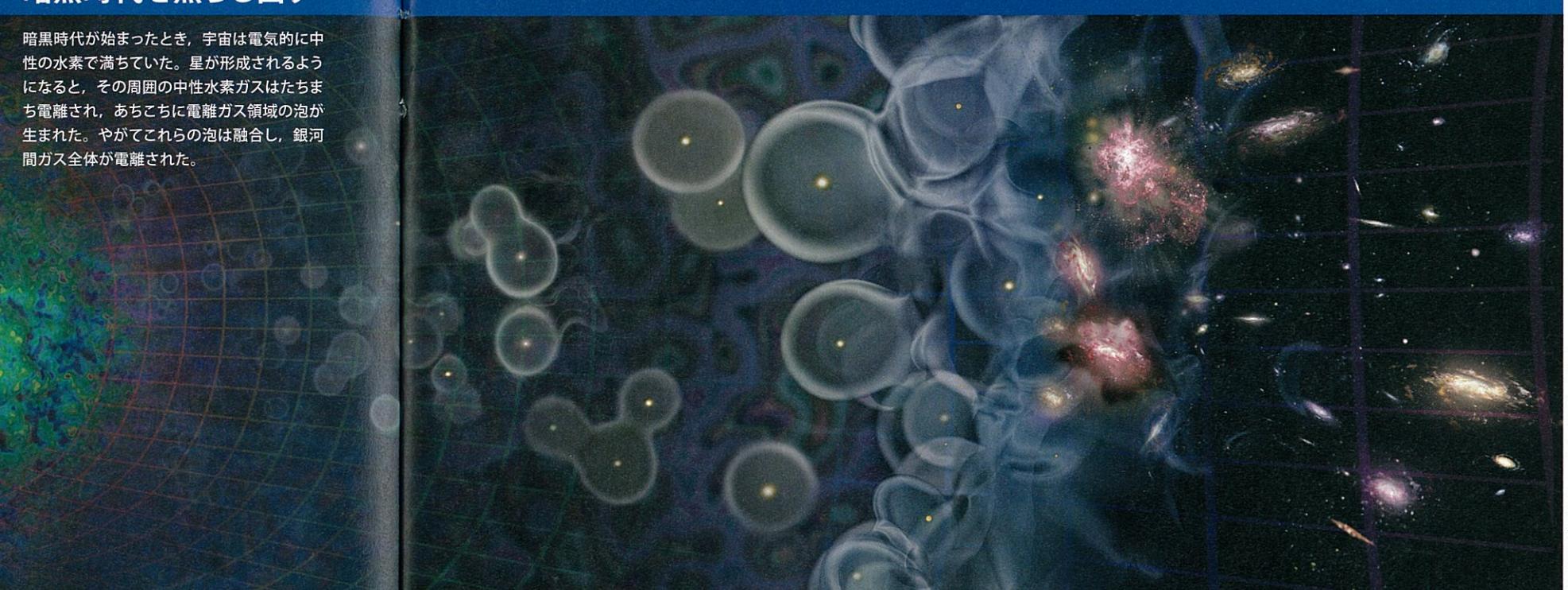
太古の宇宙の断層写真

これらの計画が実現すれば、さまざまな波長の電波が観測できるようになるので、宇宙の歴史におけるいくつもの異なる時代に発せられた波長21cmの電波を詳しく調べられる。そしてそれらの結果を総合することで、宇宙に分布する中性水素の3次元地図を作成できるはずだ。

この地図を見れば、物質の密度ゆらぎが、マイクロ波背景放射と同程度のゆらぎ（10万分の1程度）から時とともに桁違いに大きくなっていく様子

暗黒時代を照らし出す

暗黒時代が始まったとき、宇宙は電気的に中性の水素で満ちていた。星が形成されるようになると、その周囲の中性水素ガスはたちまち電離され、あちこちに電離ガス領域の泡が生まれた。やがてこれらの泡は融合し、銀河間ガス全体が電離された。



水素原子が発する波長21cmの電波の放射量分布が時間を追ってどのように拡大するかを示したシミュレーション。放射量の多い領域は白、中程度の領域はオレンジまたは赤、少ない領域は黒で表示した。この地図は、水素ガスが銀河團に成長するまでのプロセスも表現している。放射の量は中性水素ガスの密度と電離の程度を反映しており、高密度の中性ガスは白、高密度の電離ガスは黒で表されている。宇宙は膨張しているが、図では膨張に応じて縮尺を変えて、最初の図に示す領域の中性水素ガスが星形成によってどのように電離され、その電離領域が全体に広がるまでをわかりやすく示した。宇宙膨張で中性水素ガスが発する波長21cmの電波は実際にはより長い波長で観測される。年代が古いほど波長が長くなる。

| 宇宙誕生からの時間: | 2億1000万年 240万光年 | 2億9000万年 300万光年 | 3億7000万年 360万光年 | 4億6000万年 410万光年 | 5億4000万年 460万光年 | 6億2000万年 500万光年 | 7億1000万年 550万光年 |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 観測される波長: | 4.1m | 3.3m | 2.8m | 2.4m | 2.1m | 2.0m | 1.8m |
| ガスはすべて電気的に中性。白い領域は最も密度が高く、そこから最初の星やクエーサーが誕生する。 | | | | | | | |
| かすかに赤い部分は星とクエーサーが周囲の領域を電離し始めたことを示す。 | | | | | | | |
| 電離されたガスの泡が成長する。 | | | | | | | |
| 星とクエーサーが各所で生まれ、新たな泡を作る。 | | | | | | | |
| 泡どうしが重なり始める。 | | | | | | | |
| 泡が融合して空間のほぼ全体を埋め尽くす。 | | | | | | | |
| 残った中性水素が銀河に集まる。 | | | | | | | |

がわかるだろう。特に密度が大きい領域では銀河が形成され、電離された水素の泡が生まれる。泡はどんどんふくらんで互いに融合する。銀河間空間は中性水素が占めていたが、それが電離した水素に置き換わる（上の図み）。

泡の境界面のシャープさの度合いによって、再電離の原因が大質量の星によるのか、ブラックホールによるのかがわかる。大質量星はそのエネルギーのほとんどを紫外線の形で放出し、紫

外線は銀河間の中性水素で簡単に遮られる。一方、ブラックホールはその周囲から主にX線を放ち、X線は銀河間ガスの深部まで届く。そのため、ブラックホールが原因の再電離なら、大質量星による場合に比べて泡の境界面はぼやけた感じになる。

複数の理由から考えて、波長21cmの電波から得た中性水素の3次元地図には他の宇宙論的観測よりも多くの情報が含まれている可能性がある。もし

かすると宇宙マイクロ波背景放射よりも多くのことがわかるかもしれない。

第1に、ある特定の瞬間（宇宙の温度が3000K以下になったとき）の情報に由来する宇宙マイクロ波背景放射の地図が2次元なのに対し、波長21cmの電波の地図は完全に3次元だ。

第2に、宇宙マイクロ波背景放射はあらゆる場所で同時に放射が起こったわけではないため、いくぶんぼやけている。宇宙の歴史の中では、霧がゆっ

くりと晴れるときのように、完全な透明でもまったくの不透明でもない時期があった。そのような時期には光が比較的短い範囲で拡散し、宇宙マイクロ波背景放射地図上の細かなパターンが不鮮明になる。これに対し波長21cmの電波が水素原子から放出されたときには、空間に伝播を妨げるものが何もなかったため、ぼやけることなくガスの分布を知ることができる。

第3に、宇宙マイクロ波背景放射の

すばる望遠鏡で迫る「暗黒時代」の夜明け

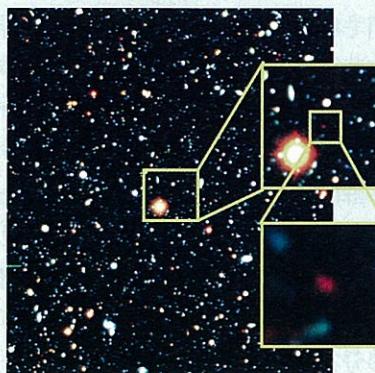
ビッグバン宇宙は急速な膨張とともに急速に冷え、爆発から約40万年後にはそれまでプラズマ状態だった陽子と電子が結合して中性水素原子となった。この後、さらに冷えていく宇宙の中で密度のムラが生じ、濃い部分はますます濃くなって約3億年後には最初の原始銀河が誕生し、その中で若い星が輝き始めたと考えられている。宇宙が現在の大きさのまだ1/15程度だった時代だ。この時代の光は大きく赤方偏移しているため、赤外線での観測が重要となるが、まだ実際にこの時代を見ることはできていない。

現在、世界中の天文学者が追い求めているのは最も遠い銀河だ。それはより遠い銀河を見ることが、より昔の宇宙の姿を直接見ることになるためだ。近年、遠い銀河探しの記録はすばる望遠鏡が独占している。最も遠い銀河ベスト10のうち、第8位（ケック望遠鏡が発見）を除くすべてがすばる望遠鏡による。

41ページの宇宙史年表にも引用されている「IOK-1」は2006年9月に私たちのグループが発見した最遠銀河だ。ビッグバンから約7億8000万年後、宇宙の大きさが現在の1/8の時代の銀河である。遠い銀河に狙いを定めた特殊な赤外線フィルターを、視野の広いすばる望遠鏡の主焦点カメラにつけて、15時間撮影した画像に映った約4万個の天体の色の特徴から候補天体を絞り込んだ。そして、2つの候補をさらに詳しく分光観測し、その距離を測ることに成功した。さらに遠い銀河を狙って、すばる望遠鏡では新しいフィルターの開発を始めたほか、近赤外線カメラによる新たな探査観測も始まっている。

米欧ではスピッツァー赤外線天文衛星を用いた銀河探しや、銀河団の重力レンズ効果によって背後の銀河の光が増幅・拡大されることを利用した遠方の銀河探しの計画も進められている。今後も最遠銀河の記録が更新されて、宇宙史の暗黒時代の解明が一步一歩進むことになる。

すばる望遠鏡には、レーザーガイド補償光学系という新しい装置が完成しつつある。この装置を使うと、今のところ赤いシミにしか見えない最遠銀河を10倍の解像力で撮影できるようになるので、最初の小型銀河が衝突合体して現在の銀河に成長していく過程を直接見ることができるだろう。2010年代にはジ



最も遠い銀河 すばる望遠鏡がとらえた赤外線で輝く銀河「IOK-1」（擬似カラー画像中の赤色で表示した天体）。満月に匹敵する広大な天球上の領域を一度に観測する主焦点カメラによって候補天体が絞り込まれた。

（家正則）



“視力”が格段に向上 観測天体のそばに向けて強力なレーザー光を照射（左）、上層大気を光らせて人工の星を生み出す。この人工の星を望遠鏡で観測、大気ゆらぎによる像のぼけを打ち消すように小型の鏡面を毎秒1000回微妙に変形して調節すると、大気圏外と同じシャープな天体の像が得られる（右上は補償光学系を使わない場合の観測画像、左上は使った場合）。

エームズ・ウェブ宇宙望遠鏡、アルマ電波干渉計、次世代30m級望遠鏡などが動き出す。これらの新しい望遠鏡には、より赤方偏移の大きい時代を詳しく観測できるさまざまな機能が備えられる。最初の銀河が生まれ始めた約3億年以降、宇宙に再び光が満ちあふれ、ビッグバン後にいったん冷えて中性水素原子の海になった宇宙空間が再び暖められて、宇宙の再電離が完了した約10億年後までの「暗黒時代の夜明け」の解明が大いに進むものと期待される。

ロブ教授の記事は、ビッグバンの約40万年後から約3億年後までの宇宙史の暗黒時代を探査する可能性を論じている。この時代には光輝く星や銀河はまだ生まれていなかったので、可視光や赤外線での観測では調べることができない。だが、暗闇の中で中性水素原子からなる雲が次第に濃くなり、銀河を生み出す準備が始まっていたはずだ。理論天文学者は中性水素原子の放つ波長21cmの電波光子をとらえることで、この時代の宇宙で起こっていたことを見る可能性を検討している。このアイデアをもとに、2020年代に次世代のメートル波電波干渉計を建設する構想が議論されている。必要な感度や具体的な装置の基礎検討が始められた段階だが、実現すれば見えない暗黒時代を見る望遠鏡となる。

宇宙背景放射の観測から、宇宙には私たちに馴染みのある水素原子などの通常の物質はわずか4%程度しかなく、謎の「冷たい暗黒物質」が約23%、さらに現代物理では皆目正体不明の「暗黒エネルギー」が約73%あるらしいことがわかつてきた。10年後、20年後の本誌では、どんな解説記事が書かれているのだろうか？ 楽しみだ。

（家正則）

地図は銀河に育つ“種”となった物質の密度ゆらぎに関する情報を持っているが、波長21cmの電波から得た地図には銀河の種となるゆらぎだけではなく、形成された銀河が周囲にどのような影響を及ぼしていったのか、その過程も示されている。

波長21cmの電波の検出にはいくつものハードルがある。まず、地表付近を飛び交う放送電波を除去しなければならない。より難しいのは、私たちがいる天の川銀河内で発生し、地球にやってくる電波の処理だ。この電波は、宇宙の再電離期、つまり距離にして100億光年以上も遠くからやってくる電波に比べ1万倍も強い。

幸いなことに両者は区別できる。銀河からの雑音電波の強度は波長が少しすれても変わらないのに対し、再電離期の信号は電離された泡の空間的構造を反映して波長とともに変わるからだ。いざれば波長21cmの電波の地図とエームズ・ウェブ宇宙望遠鏡などから得た画像を比較できるようになるだろう。赤外光で見えるこれらの銀河は、中性水素の中に浮かぶ電離泡となんらかの関連を持っているに違いない。

こうした観測の問題に加え、理論研究面でも多くの課題がある。最も重要なのは、10億光年規模の宇宙空間の中で銀河の進化などを再現する大規模なコンピューターシミュレーションだ。統計学的に意味がある宇宙のサンプルとして評価でき、矮小銀河のような比較的小規模な対象も再現するには、この程度の大規模シミュレーションが求められる。

放射による電離が銀河からその周囲へと広がる様子も再現する必要があるが、現在のシミュレーションでは大まかにしかモデル化されていない。観測によって何が見えるかが理論的に予測される前に、再電離の様子が実際に観測でとらえられるかもしれない。

暗黒時代の謎解きには 10億光年規模の大規模シミュレーションが必要になるだろう

宇宙論的観測と理論研究を結びつける試みを通じて、銀河形成に関するさまざまな謎が明らかになるだろう。1つは銀河中心にある巨大ブラックホールにまつわる謎だ。

現在の宇宙では、天の川銀河を含め、ほぼすべての銀河が巨大ブラックホールを内包していることが、ここ10年の観測でわかつてきた。ときに銀河どうしが接近して融合し、それが引き金になって膨大な量のガスが巨大ブラックホールに吸い込まれると考えられている。吸い込まれるガスからは電磁波が放射されるが、その輝きは母体となる銀河そのもののよりも強くなり、クエーサーとして観測される。

宇宙誕生10億年後には、質量が太陽10億個分以上に相当する巨大ブラックホールが数多く存在する。この質量を持つ銀河は、銀河の進化を大きく左右する要因となる。しかし、この銀河の進化過程を理解するためには、銀河の内部構造や銀河間相互作用などの複雑なプロセスを考慮する必要がある。

著者 Abraham Loeb

宇宙初期に生まれた星やブラックホール、宇宙の再電離期に関する理論研究の第一人者。「古くからの哲学的問題に対して興味を抱いた」ということから、物理学を志すきっかけになった。現在はハーバード大学の天文学教授で、ワイツマン科学研究所（イスラエル・レホボト）の客員教授も務める。重力マイクロレンズ効果による太陽系外惑星の発見と、銀河間領域で発生するガムマ線検出のパイオニアでもある。ジェームズ・ウェブ宇宙望遠鏡に関する最初の科学作業部会に加わり、2002年にはグッゲンハイム・フェローシップを受賞した。

原題名

The Dark Ages of the Universe (SCIENTIFIC AMERICAN November 2006)

もっと知るには…

MEASURING THE SMALL-SCALE POWER SPECTRUM OF COSMIC DENSITY FLUCTUATIONS THROUGH 21 CM TOMOGRAPHY PRIOR TO THE EPOCH OF STRUCTURE FORMATION. Abraham Loeb and Matias Zaldarriaga in *Physical Review Letters*, Vol. 92, No. 21, Paper No. 211301; May 25, 2004. <http://www.arxiv.org/abs/astro-ph/0312134>で読める。

THE STATE OF THE UNIVERSE. Peter Coles in *Nature*, Vol. 433, pages 248–256; January 25, 2005.

FIRST LIGHT. Abraham Loeb. Lecture notes for the SAAS-Fee Winter School, April 2006. <http://www.arxiv.org/abs/astro-ph/0603360>で読める。

CHASING HUBBLE'S SHADOWS: THE SEARCH FOR GALAXIES AT THE EDGE OF TIME. Jeff Kanipe. Hill and Wang, 2006.

COSMOLOGY AT LOW FREQUENCIES: THE 21 CM TRANSITION AND THE HIGH-REDSHIFT UNIVERSE. Steven Furlanetto, S. Peng Oh and Frank Briggs in *Physics Reports* (forthcoming). <http://www.arxiv.org/abs/astro-ph/0608032>で読める。

ツクホールを持つクエーサーが存在していたことが、宇宙深部を広域観測するスローン・デジタル・スカイ・サーベイによって明らかになっている。これほど若い時代に、これほど大質量のブラックホールがなぜ存在したのか？ そしてその成長が止まったのはなぜだろうか？

もう1つは銀河のサイズ分布に関する謎だ。再電離期、矮小銀河から放射された紫外線によってガスが加熱され、それによって質量が小さい銀河の誕生が抑制されたと考えられているが、そのような抑制はどのようにして解かれたのだろうか？ これまでに発見された矮小銀河の中で、ごく初期から存在していたものはいったいどれだろう？ 暗黒時代の闇の中には、まだ多くの謎の答えが隠されている。

（翻訳協力：関谷冬華）

監修 家正則（いえ・まさのり）
国立天文台教授。すばる望遠鏡を用いて最古の銀河観測に取り組む。次世代超大型望遠鏡プロジェクトのリーダーでもある。