

# 生まれたての銀河を探す

家 正則

現在の宇宙進化論では銀河が誕生した頃の様子がよくわかっていない。理論的によくわかっている  $z > 1000$  の時代と、なんとか観測が始まった  $z < 3$  の時代とにはさまれた、宇宙史上の暗黒時代を解明する鍵を握るのが、生まれたばかりの原始銀河である。このような原始銀河を求めてさまざまな観測がなされている。原始銀河捜しの背景と現状を紹介する。

## 宇宙モデルと赤方偏移

きわめて遠い天体の距離を表わすのに、天文学者は赤方偏移  $z$  という量を用いる。一樣に膨張する宇宙では、遠い天体ほど高速度で遠ざかっている。遠ざかっている天体の発する電磁波は、ドップラー効果のため波長が長くなる。波長の長くなった割合を赤方偏移  $z$  という。天体の光をプリズムで7色(実際は1000色から1万色)の虹(スペクトルという)に分け、水素、酸素、炭素などの原子が放つ光(輝線)の波長を測定すると、この赤方偏移を求めることができる。

赤方偏移  $z$  はまぎれのない観測量だが、 $z$  を距離に換算するには宇宙のモデルを確定しなければならない。宇宙モデルを決めるには、現在の宇宙膨張の速さを表わすハッブル定数  $H_0$  と宇宙膨張率の減速率を表わす減速パラメータ  $q_0$  とを、観測から求める必要がある。今のところいろいろな観測事実から、 $40 < H_0 < 100$  km/秒/Mpc,  $0.02 < q_0 < 0.5$ , であろうということがわかっている(1 Mpc=326 万光年)。モデルが違うと同じ  $z$  でも100 億光年になったり、200 億光年になったりするので、数字を比べるときは注意がいる。

ALCAINO ら<sup>(1)</sup> は球状星団の色-等級図を星の進化的理論と比較してその年齢を  $160 \pm 10$  億年と求めている。一方、BUTCHER<sup>(2)</sup> は半減期の長い放射性元素に着目し、Th/Nd 比の測定から銀河系の年齢を110 億年以下と算出している。この二つの結果は相入れないが、ここでは宇宙モデルとして、 $H_0 = 50$  km/秒/Mpc,  $q_0 = 0.5$  と仮定して、距離や年齢を計算する(図1)。このモデルでは宇宙の年齢は130 億年、宇宙の果てまでの距離は光の伝播距離にして130 億光年となる。仮に  $H_0 = 50$  km/秒/Mpc,  $q_0 = 0$  のモデルだと、宇宙年齢は200 億年となる。

## 宇宙史の暗黒時代(3 < z < 1000)

観測できる最も遠い宇宙からの信号は、絶対温度 3 K の宇宙黒体放射といわれる電磁波で、 $z =$

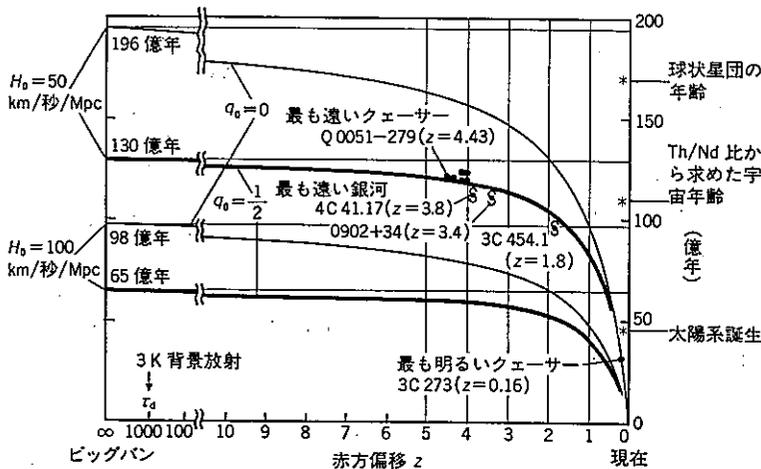


図1 赤方変位  $z$  と経過時間  $t$  (過去へ遡って測った時間)。四つの宇宙モデルについて示す。最も遠いクエーサーと銀河の  $z$  と  $t$  の関係を、 $H_0 = 50$  km/秒/Mpc,  $q_0 = 0.5$  のモデルの場合について示す。

1000の時代からの信号である。波長1 mm程度のマイクロ波領域で最も強く、基本的には宇宙のあらゆる方向から一様な強さでやってくる。

一様な背景放射ではなく、個別の天体として観測できる最も遠い天体は、どんなものだろうか。現在知られている最も遠い天体は、赤色域で20等級のクェーサー Q 0051-279 であり、 $z=4.43$  (光速の93.4%)で遠ざかっている。これは宇宙誕生後約10億年、宇宙年齢の7.7%の時代の天体であり、120億光年の距離にある。Q 0051-279は、視野の広いシュミット望遠鏡にプリズムをつけて、銀河系の南極方向を探しているうちに輝線スペクトルをもつ天体として見つかった。

クェーサーはこのような遠方でも観測できるほどの莫大なエネルギーを放射しているが、それはクェーサーの中心にある底無しのブラックホールにガスが落ち込むためであると考えられている。

それではわれわれの銀河系のようなふつうの銀河は、いったいどのくらいの距離まで観測できるのだろうか。遠い銀河を観測することは、昔の銀河を観測することになる。宇宙の果てに近い銀河を見つけて詳しく調べることができれば、銀河の誕生や進化の様子を探ることができるだろう。

宇宙進化史のなかでも、理論的にかなりよくわかっている  $z > 1000$  の時代と、なんとか観測の手が届いている  $z < 3$  の時代にはさまれた、この  $3 < z < 1000$  の時代の宇宙に何が起こったのか？この謎を解く鍵は原始銀河の発見にある。

### 原始銀河を探して

星は大質量のものほど明るくて寿命が短い。わ

れわれの銀河系が誕生した頃に生まれた大質量の星はとっくに寿命を終えて爆発するか、燃えつきてしまっている。銀河が誕生した頃はまだ物質の大部分は水素とヘリウムとからなり、炭素、窒素、酸素やそれ以上の重元素はほとんどなかった。このため、現在とは星の生まれ方が少し違って、質量の比較的大きい星がたくさん一度に生まれた可能性がある。このような原始銀河では、初めに大質量の明るい星が輝き、銀河全体がわれわれの銀河系に比べて、100倍ほども明るい時期があったはずである。こう PARTRIDGE と PEBBLES は考えた<sup>(3)</sup>。

彼らの論文をきっかけにそのような原始銀河を探そうという試みが始まった。まず、遠い宇宙の原始銀河からの光が夜空の明るさに混ざっていないかを調べる試みがなされた。人里離れたところでも夜空は真っ暗ではない(図2)。夜空の明るさの約1/3は地球の上層大気中の原子や分子が放つ光、1/3は太陽系の黄道面に沈殿した小さな塵が太陽の光を散乱して放つ光である。残りの1/3が太陽系の外からやって来るが、その大部分は銀河系の中の暗くて微かな星からの光である。銀河系の外の宇宙の果てからやって来る光(銀河系外背景光)がどれだけあるかという問題である。

MATTILA<sup>(4)</sup>は暗黒星雲の明るさと暗黒星雲から少し離れた方角での明るさを調べて、宇宙の果てからの光の量を推定しようとした。DUBEら<sup>(5)</sup>は20等までの星を取り除いて空の明るさを測る装置を開発し、背景光の強さを推定した。現在のところ、さまざまな観測から背景光の強さは5000 Å域で27.8等級/平方秒より弱いとされている。PARTRIDGEとPEBBLESの予想よりだい

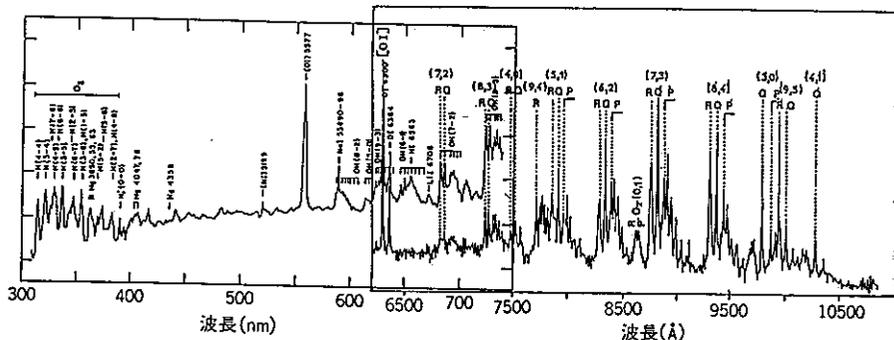


図2 夜空光のスペクトル。

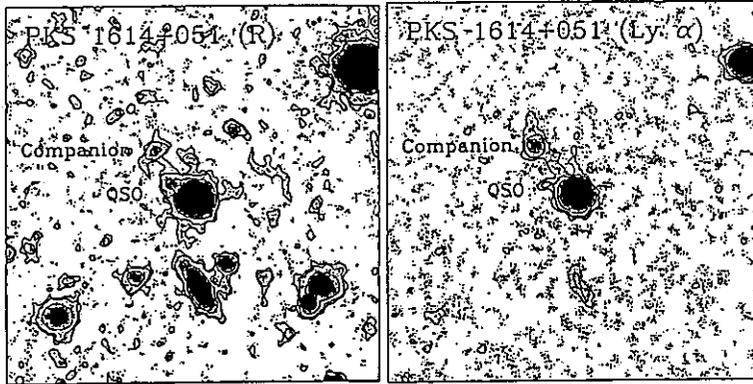


図3 クェーサー PKS 1614+051 ( $z=3.2$ )に付随したライマン $\alpha$ 輝線銀河<sup>(7)</sup>。(左)赤色Rバンド像、(右) $z=3.2$ に合わせたライマン $\alpha$ 輝線像。

お暗いようなのである。

背景光の明るさ自体の測定とは別に、背景光の空間的なゆらぎの有無や遠くて暗い個々の天体探しも工夫を凝らして行なわれた。原始銀河が広がった天体として見える場合には10~30秒角程度でのゆらぎがあるはずである。DAVISたち<sup>(6)</sup>は回転するチョッパーに同期させた光電管を用いて空の明るさに20秒角程度でのゆらぎがないかどうかを調べ上限を抑えた。

### 最近の発見

近年のCCDカメラの発達によって、原始銀河探しも新しい時代を迎えようとしている。CCDカメラは量子効率が写真に比べて約50倍ほど高いので、観測精度が飛躍的に向上し、つぎつぎに新発見が報告されている。

図3はDJORGOVSKIら<sup>(7)</sup>が撮影した $z=3.2$ のクェーサーPKS 1614+051のCCD写真である。左は赤色域、右は $z=3.2$ で赤方偏移した水素原子のライマン $\alpha$ 輝線だけを通すフィルターで撮ったものである。中心のクェーサーの周りに、赤色域ではいくつかの銀河が見えているが、ライマン $\alpha$ 像では左上のもの以外は消えている。この左上の約25等級の天体が、 $z=3.2$ の距離にあることはほぼ間違いない。ただし、紫外線連続光が弱いので、この天体の正体については、原始銀河かどうかまだ論争中である。

銀河系北極天域の撮像観測では、MACKAYたち<sup>(8)</sup>が赤色域で25.7等の銀河まで検出に成功している。天の川から遠く、星がまばらな銀河系北

極方向では22等級より暗い天体はほとんどが遠方の銀河であるといわれている。銀河系南極方向を青色B、赤色R、近赤外Iの3色で観測したTYSONたち<sup>(9)</sup>は、青色域で27等級までの天体を検出し、限界等級ぎりぎりの青い銀河がひしめいていることを指摘した。B-Rは遠い銀河で約1.5等なので、TYSONの青色域での限界等級はMACKAYの赤色域での限界等級とほぼ同じである。これらの暗い天体はその色や大きさからおおむね $1 < z < 3$ 程度の銀河と推定されている。

銀河の進化モデルによると、銀河誕生直後は大質量の高温度星が輝き、銀河のスペクトルは高温度星からの紫外線と紫外線で電離した星間ガスが放つ輝線が強いはずである<sup>(10)</sup>(図4)。PRITCHETとHARTWICK<sup>(11)</sup>は、ライマン $\alpha$ 輝線を放射している $5 < z < 6$ の銀河を探したが見つかることができなかった。

今のところ、確認されている最も遠い銀河はCHAMBERSとMILEY<sup>(12)</sup>が新しく発見した4C 41.17という名前の電波銀河である。4C 41.17の赤方偏移は、水素原子のライマン $\alpha$ 輝線と3回電離の炭素原子が発する波長1550Åの輝線スペクトルの波長がそれぞれ4.8倍になっていることから、 $z=3.8$ と確認された。この銀河は光速の92%の速さで遠ざかっていて、宇宙の果てまでの距離の90.5%のところにあることになる。宇宙の年齢を130億年とすると、われわれは約118億年前の姿を見ているわけである。言い換えると、4C 41.17は宇宙が始まってからほんの12億年後には一人前の銀河になっていたことになる。宇宙年齢のわずか9.5%の時代である。

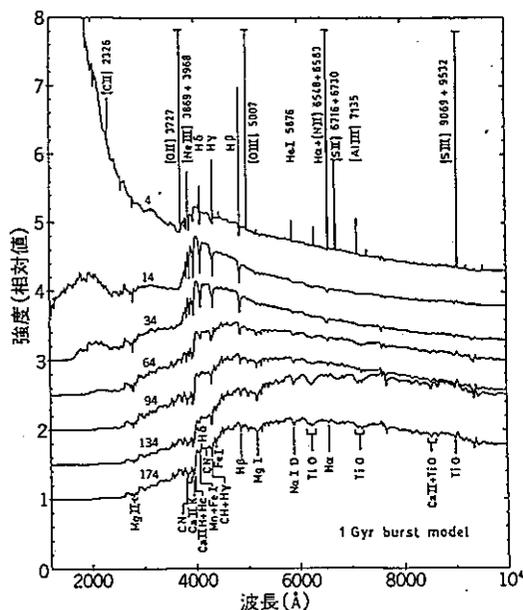


図4 銀河のスペクトルの進化モデル<sup>(10)</sup>。上から順に銀河誕生後4, 14, 34, …億年のスペクトル。初期には高温星からの紫外線と星間ガスからの輝線スペクトルが目立つ。

それまでのレコードホルダーだった電波銀河 0902+34 ( $z=3.4$ ) には、可視から赤外にかけての色から、15億年程度の年齢の星がすでにかなり多く含まれていることが指摘されている。

宇宙が誕生してからわずか12億年の時代にすでに一人前の銀河が生まれていたという事実は、宇宙論上きわめて重要である。なぜなら銀河形成論の中でも最近話題になっている“冷たい暗黒物質”の理論がこの観測で不利になるからである。この理論では、陽子や中性子などのいわゆるバリオンではなく、静止質量の大きい非バリオン粒子(これを冷たい暗黒物質と呼ぶ)が宇宙の質量の大半を担っていると仮定する。この場合、バリオン優勢の古典的なモデルの場合に比べて、銀河が誕生するのに時間がかかるので、 $z>3$ の時代にすでに12億年以上経た天体がたくさんあっては具合が悪いのである。

### 若い銀河と宇宙論

より大きな赤方偏移の銀河を探すためにさまざまな努力が続けられている。現在の観測技術では  $z<7$ (光速の97%, 宇宙誕生後4.6億年) くらい

までの銀河の観測は不可能ではないと思われる。さまざまな努力にもかかわらず、PARTRIDGEらの予想したような銀河がどうしても見つからないということになれば、銀河形成論を根本が考え直すことになる。見つからない理由として、次のような説明が提案されている。(1) 銀河の生まれた時期が  $z>10$  であり、赤外線で見えない。(2) 原始銀河での星の誕生は徐々に起こり、PARTRIDGEらの予想のように一斉に起こるのではないので、あまり明るくはならない。(3) 生まれたばかりの銀河は中心集中度が低いので、表面輝度が低くて観測しにくい。(4) 初期につくられた重元素がダストとなって、 $z>5$ の原始銀河の紫外線を吸収している。(5) 銀河形成が盛んになったのは、 $z<3$ の時代になってからである。(6) 原始銀河が重力的にまとまる前に初代(種族 III)の星生成が起こった。

これらの可能性をひとつひとつ検証してゆかねばならない。

### 日本での試み

私たちが岡山天体物理観測所の188 cm 望遠鏡や夜空の暗い木曾観測所の105 cm シュミット望遠鏡に、液体窒素冷却型の CCD カメラを取り付けて、背景光の空間的なゆらぎの測定を試みている<sup>(13)</sup>。夜空光のスペクトル(図2)を考慮して、大気発光の少ないバンドを選び、原始銀河が広がった淡い像として見える場合を想定し、背景光のゆらぎを評価した。その結果、広がった天体に対する新しい上限として、図5が求められた。図5にはいままでの観測による制限<sup>(6)(8)(11)</sup>も同じ規格に揃えて書き入れた。規格を  $4.5\sigma$  と厳しくしたが、 $3\sigma$  レベルでは R バンド画像にゆらぎが見えるようである。このゆらぎは I バンドや V バンドでは見えないので、有意だとすると  $4.3<z<4.9$  のライマン  $\alpha$  光のゆらぎである可能性も捨て切れない。現在さらに精度の高いドリフトスキャン方式の CCD カメラを開発中であり、この問題に対する決着をつけたいと思っている。

図6は、高遠を中心として私たちが別に開発し

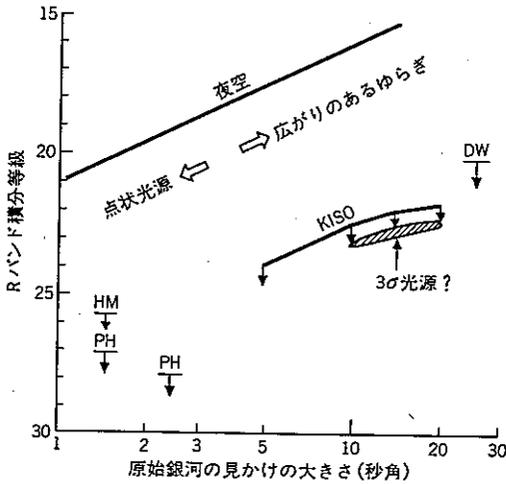


図5 原始銀河の明るさの上限。原始銀河の見かけの大きさとRバンド積分等級の関係を示す。HM<sup>(9)</sup>, PH<sup>(11)</sup>, DW<sup>(6)</sup>, KISO<sup>(13)</sup>。

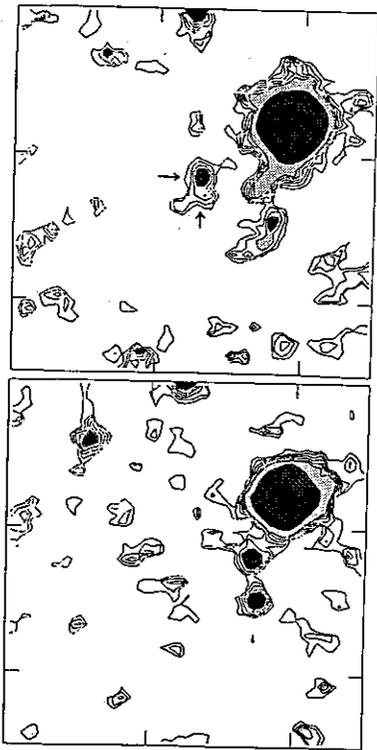


図6 木曾観測所で新しく発見した $z=3.2$ のライマン $\alpha$ 輝線銀河。ライマン $\alpha$ 像(上)と連続光像(下)。クェーサーQ 0636+63( $z=3.2$ )の近傍に矢印のような輝線天体が6個発見された<sup>(14)</sup>。

たジュール-トムソン冷却方式の新しい CCD カメラを用いて、1988年12月に木曾観測所で発見したライマン $\alpha$ 輝線銀河の候補天体である。 $z=3.18$ のクェーサー Q 0636+68 の周囲 12 分角

をライマン $\alpha$ 輝線だけを通すフィルター(中心波長 5040 Å)と連続光を通すフィルター(中心波長 5205 Å)とで撮影したところ、上図中の天体のように、輝線だけで明るい天体を9個発見することができた。

これらの遠くて暗い天体の正体を明らかにするには、大口径の望遠鏡と赤外線での観測能力が決定的に重要である。日本がハワイ島に建設を計画中の7.5 m 大型光学赤外線望遠鏡(JNLT)は、この分野でも世界で最も活躍する望遠鏡となるはずである。例えば、24等級の天体のスペクトル観測( $\lambda/\Delta\lambda=1000$ )を行なう場合、CCDの1画素にやってくる光子数は10個/m<sup>2</sup>/時間ときわめて少ないが、JNLTなら1時間露出でS/N=5となる。また、 $z>3$ の天体を理解するには、1~3 μmの赤外線スペクトルを測定して、近傍の銀河のスペクトルと比べるのが最も確かな方法である。このような夢が実現する日も近そうだ。

(Masanori IYE 国立天文台)

文 献

- (1) G. ALCAINO & W. LILLER: IAU Symp., 136, 633 (1988)
- (2) H. R. BUTCHER: Nature, 328, 127 (1987)
- (3) R. B. PARTRIDGE & P. J. E. PEBBLES: Astrophys. J., 147, 868 (1967); 148, 377 (1967)
- (4) K. MATTILA: Astron. Astrophys., 47, 77 (1976)
- (5) R. R. DUBE et al.: Astrophys. J., 232, 333 (1979)
- (6) M. DAVIS & D. WILKINSON: Astrophys. J., 192, 251 (1974)
- (7) S. DJORGOSKI: in 'Nearly Normal Galaxies', S. M. FABER ed., Springer-Verlag (1987) p. 290
- (8) P. HALL & C. D. MACKAY: Month. Notices Roy. Astron. Soc., 210, 979 (1984)
- (9) J. A. TYSON: Astron. J., 96, 1 (1988)
- (10) B. ROCCA-VOLMERANGE & GUIDERDONI: Astron. Astrophys. Suppl. Ser., プレプリント (1988)
- (11) C. PRITCHET & F. D. A. HARTWICK: Astrophys. J., 320, 464 (1987)
- (12) K. CHAMBERS et al.: announced at XXth IAU General Assembly (1988)
- (13) M. IYE et al.: in 'Big Bang, Active Galactic Nuclei and Supernovae', S. HAYAKAWA & K. SATO eds., University Academy Press Inc., 印刷中
- (14) 高遠徳尚: 東京大学大学院修士論文 (1989)