

## 黎明期の原始銀河観測

高 遠 徳 尚\*

## 1. はじめに

銀河が現在あることは、誰の目にも明らかである（我々も住んでいる！）。しかし、ずっと昔は、宇宙は高温・高密度で、銀河など存在し得なかった。と言うことは、銀河が作られた時期がいつかは必ずあったはずである。このような時期にある、種族 I・II の星によって構造がまだ出来ていない、形成途中の銀河を「原始銀河」と呼んでいる。

観測機器の大幅な改良によって、ここ数年で、原始銀河「らしきもの」がいくつか見付かっている。しかし、「これぞ原始銀河」と誰もが認める天体は、まだ発見されておらず、現在は観測・理論とも好き勝手なことを臆面もなく言える、楽しい発見の時代である。

では、いったい原始銀河はどうやったら発見できるのか？

## 2. 予想される原始銀河像

その答えは「よく分からない」。原始銀河が、どのような姿・形をしているのか、本当のところは誰も知らないからである。しかし、存在することだけは確かなので、各人各様に適当な予測を立てて、原始銀河探しにトライしている。

必要な情報は、

- (1) 何時
- (2) どこで
- (3) どんなスペクトルで
- (4) どのくらいの明るさで
- (5) どのくらいの大きさで

原始銀河ができたのか、である。しかし観測の指針として、ある程度信頼できる予測が理論的に立てられるのは(3)のスペクトルくらいで、他の項目の理論的予測は、先入観を抱いてしまうだけで、原始銀河探しには役立たない。

銀河の中には、その出来はじめに、星形成が活発だったタイプがあったと考えられている。そのような銀河では、当時まだたくさんの OB 型星が燦然と輝いていた。Rocca-Volmerange らのモデル計算によると、この時期の銀河は  $1000 \text{ \AA}$  から  $1 \mu\text{m}$  にわたってスペクトルの強度がほぼ一定である、という結果が得られている。一方、星に成れなかった水素ガスは、OB 型星からの紫外

線によって励起・電離される。電離された水素ガスは、電子と再結合して最終的には基底状態に戻るので、水素原子の出ず輝線のうちでも特に Ly $\alpha$  で明るく光っているはずである。

従って期待される原始銀河のスペクトルは、次のようである。

- (1) 紫外から可視域（赤方変移を受ける前の波長で）にかけての輻射の強度がほぼ一定。
- (2) Ly $\alpha$  の輝線を強く出している。

この特徴を手掛かりとして、それでは、どんな観測が行われているのであろうか。

## 3. 実際の観測

現在までに行われた原始銀河探しの手法は、以下の様に分類できる。

- (1) カタログにでている電波銀河を、しりみ潰しに可視光で観測する。(Spinrad 他)
- (2) 電波銀河のなかで、スペクトルの傾きが急なものを選んで、可視光で観測する。(Chambers, Miley)
- (3) 原始銀河の赤方変移  $z$  を仮定して、その  $z$  での Ly $\alpha$  輝線のみを通すフィルターと、Ly $\alpha$  が入って来ない波長域を通すフィルターとである天域を撮影し、Ly $\alpha$  で明るい天体を探す。(Pritchett 他, Djorgovski 他)
- (4) 可視光から近赤外線にかけての多色測光から、特異な色の天体を探す。(Elston, Rieke)

(1), (2) は、すでに電波で見えている銀河の中から原始銀河の特徴を示すものを探すやり方である。3C, 4C カタログ、あるいは 1 Jy 電波源が観測の対象になっている。当然この方法では、電波を強く出している原始銀河しか見付からない。しかし新たに銀河を探さずに済み、 $z$  を仮定する必要もないため効率が良く、現在までに発見された原始あるいは若い銀河は、1つを除いてすべてこの方法で発見されている。

(2)の方法は、電波銀河の中でもメーター波でのスペクトルの傾き (spectral index) が急なものほど遠方にある、という経験則を使って、より効率良く昔の銀河を探そうとするものである。この方法で、最も遠い銀河 ( $z=3.8$ ) が発見されている。

(3)は原始銀河の  $z$  を仮定し、しかも新たな天体を探す必要があるため、容易ではない。しかし電波活動と無関係な、おそらくより普通の原始銀河を発見できる利点がある。

\* 東大理 Naruhisa Takato: A Brief Review on the Observations of Primeval Galaxies

(4)は BVRIJHK バンドの7色測光から、普通の銀河と違った色の天体を捜し出す方法で、(3)と同じ利点がある。広帯域フィルターでの撮像だから、暗い天体まで写るし、ダストによって  $\text{Ly}\alpha$  の輝線が吸収されていても検出可能である。これまでは、良い赤外線の高次元検出器がなかったので十分な成果が出ていないが、ここ数年で良い検出器が出来てきたので、これからの成果が期待される。

では、これらの方法によってどんな天体が発見されているのだろうか。  $\text{Ly}\alpha$  を強く出していることが確認されている銀河は、Spinradによると (i) 若い銀河 (ii) 原始銀河(?) (iii) コンパニオンの3種類に分類される。次に、これらの天体をそれぞれ見ていこう。



図1 最も遠い銀河 4C 41.17 の  $\text{Ly}\alpha$  像  
20'' (100 kpc) もの大きさに広がっていて、しかもデコボコした形をしている。  
(C. Miley et al. ESO, THE MESSENGER NO. 56 (1989) より)

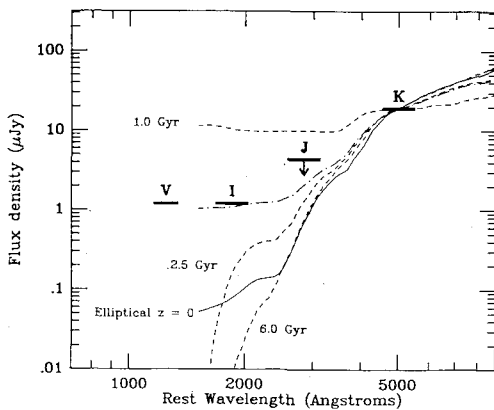


図2 若い銀河 0902+34 の多色測光データと理論計算との比較。図中の数字は、銀河のなかで星が出来はじめからの時間。少なくとも 1 Gyr 以上はたっていることが分かる。(S. J. Lilly 1988, Ap. J., 333, 161 より)

#### 4. 若い銀河

原始銀河と呼べるほど若くはないが、現在の銀河ほど年寄りでもない、「若い銀河」が十数个発見されている。

図1を見て載きたい。これは現在知られている銀河のうちでもっとも遠い銀河 4C 41.17 ( $z=3.8$ ) の  $\text{Ly}\alpha$  像である。連続光では 30 kpc の大きさであるが、  $\text{Ly}\alpha$  では 100 kpc (20'',  $H_0=50$  km/s/Mpc,  $q=0.5$ ) にも広がっていて、しかもデコボコと不規則な形をしている。場所による視線方向の速度の差は 2000 km/s もある。この速度は現在の銀河団の速度分散と同程度である。

連続光でも銀河の中心部分が光っているの、すでに星がかなり出来ていると考えられている。いかにも星形成が進行中の小さなガス塊が合体しているように見えるが、詳しいことは分かっていない。

銀河の年齢の下限が求められている銀河もある。1 Jy 電波源 0902+34 ( $z=3.4$ ) がそれである。VIJK の4バンドでの明るさと、先に述べたような銀河のスペクトル進化の理論とを比べると、この銀河の中には10億年以上の年齢の星が含まれていることが分かった(図2)。図の理論曲線は、銀河は初めの10億年間だけ星が出来て、その後は星ができないとしたときの銀河のスペクトルを、星ができ始めてからの時間毎に示している。 $z=3.4$  で既に10億年以上たった星が存在するのだから、この銀河が出来たのはさらに昔で、 $z>10$  と考えられる。

この例のように銀河の年齢を求めるには、広い波長範囲で理論と比べるの必要があり、 $z$  が大きくなればなるほど赤外域での観測が決定的に重要になる。

若い電波銀河の多くは、現在の電波銀河と同様にいわゆる「二つ目玉」になっている。この二つ目玉を結ぶ方向が、可視光で見たときの銀河の形の長軸方向と一致していることが、若い電波銀河でしばしば観測される。図3の 3C 368 ( $z=1.1$ ) はその例である。

現在の電波銀河の二つ目玉の間には、コンパクトな電波源があって、目玉の方向にジェットが出ている。3C 368 には中心の電波源が観測されていないが、この銀河にもおそらくそれがあって、ジェットと銀河のガスとの相互作用によって、ジェットの方向に星が形成されたのではないかという説が出されている。しかしこの説で、観測されている  $10^9 M_\odot$  もの星を作ることが出来るとは考えにくく、分かっていない問題のひとつである。

#### 5. 原始銀河(?)

発見されている天体のなかで、最も原始銀河らしい銀河といわれているのが、3C 326.1 ( $z=1.8$ ) と 3C 294 ( $z=1.8$ ) である。100 kpc 以上に広がった  $\text{Ly}\alpha$  像、弱くて、銀河中心に集中していない星の連続光、が特徴である(若い銀河との区別ははっきりしていない)。

図4は 3C 326.1 の B バンドと  $\text{Ly}\alpha$  の像である。図中

の M, W はそれぞれ手前の星と銀河である。Ly $\alpha$  では一つの大きな塊に見えるが、連続光では 3 つの塊に見える、それぞれの明るさは V 等級で約 23.5 等, 24.5 等, >25 等である。図には示さなかったが、この天体にも電波の二つ目玉の方向と、Ly $\alpha$  像の長軸方向の一致が見られる。

3C 294 のスペクトルと速度場は、図 5, 6 の様になっている。ビッグ・バンでできる元素は水素、ヘリウムおよび僅かのリチウムだけであるが、この銀河のスペクトルには炭素や窒素の輝線がある。したがって既にこの銀河内で超新星爆発を何度か起こしていたか、銀河が出来る以前に、種族 III など何らかの原因によって重元素に汚染されていたと考えられる。また、炭素や窒素を C IV や N V の輝線が出るくらいの高電離状態にするエネルギーは何か、という問題も興味深い。

2000 km/s におよぶ速度勾配があることは、若い銀河 4C 41.17 と同じである。

$z=1.8$  という比較的最近に「原始銀河」があり、また

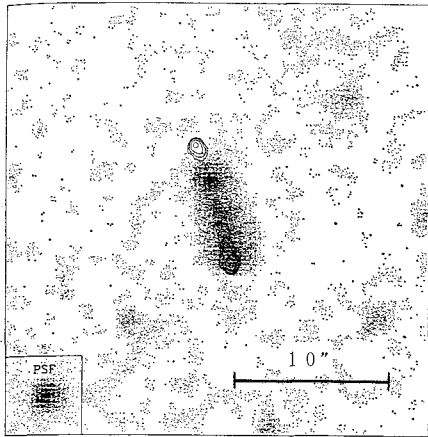


図 3 3C 368 の [O II] 輝線像と 6 cm 電波像  
等高線で書いてある方が電波像。電波の「二つ目玉」の方向と、光の像の長軸方向とが一致していることに注目。(S. Djorgovski et al. 1987, A. J. 93, 1307. より)

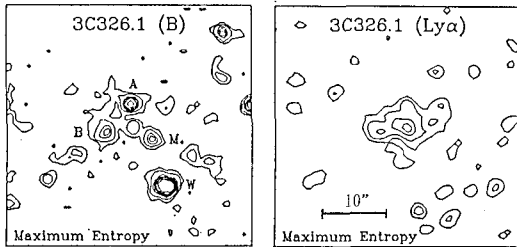


図 4 原始銀河(?) 3C 326.1  
(左) B バンド像 (4400 Å) (右) Ly $\alpha$  像  
(S. Djorgovski "Towards Understanding Galaxies at Large Redshifts" (1988) より)

$z=3.8$  で既に 10 億年以上たった銀河があることから、銀河形成が起こる時期は、環境によって、あるいは自分の大きさによって、早かったり遅かったりして、広い範囲に分布しているのではないと思われる。

### 6. コンパニオン

QSO のすぐ近くで、Ly $\alpha$  で明るく光っている天体が、確からしいもので 1 例だけ発見されている (PKS 1614+051C;  $z=3.2$ , 図 7)。電波銀河でない唯一の例である。発見者の Djorgovski は、この天体は QSO の方向に伸びているが、それは QSO に落ち込んでいるからであろうと言っている。

Heckman らは新しいコンパニオン・サーベイを実行中らしいので、この種の天体のサンプルが増えるかもしれない。

### 7. 我々の観測

家と筆者は前述の観測方法の (3) のやり方で、原始銀河探しを行った。図 8 は、それによって見付けた原始銀河の候補の一つである。探す方向や  $z$  を闇雲に決めてもうまく行きそうにないので、 $z=3.2$  の QSO Q0636+

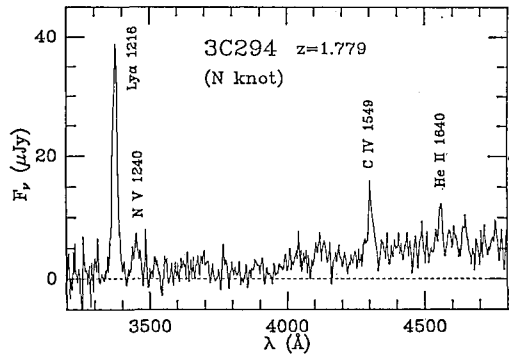


図 5 原始銀河(?) 3C 294 のスペクトル  
C, N の高電離輝線が見える。すでに重元素で汚染されている。連続光成分が、長波長側に向かって上がっているのは、近くの星の散乱光が入ったため。(出典は図 4 と同じ)

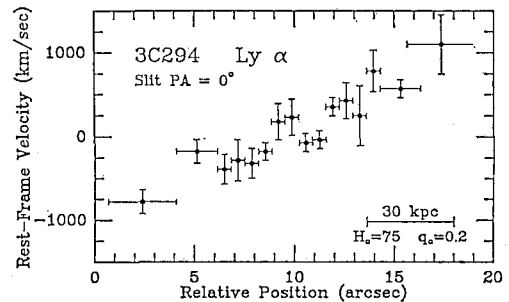


図 6 3C 294 の Ly $\alpha$  で見た速度場  
スリットは銀河の長軸方向にとってある。2000 km/s におよぶ速度差がある。(出典は図 4 と同じ)

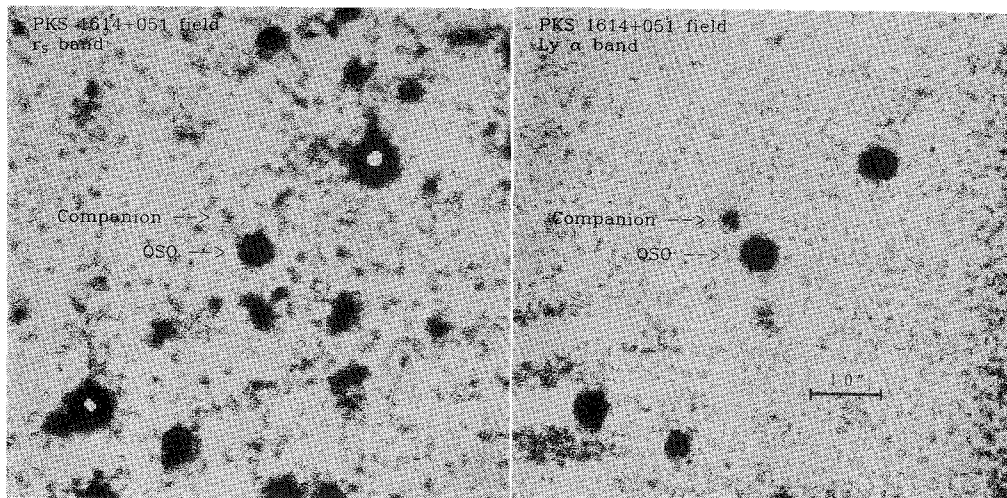


図7 コンパニオン銀河 PKS 1614+051C  
(左)  $r_s$  バンド像 (6890 Å) (右) Ly $\alpha$  像  
(S. Djorgovski et al. 1985, Ap. J. (Letter), 299, L1.)

68 の周囲  $10' \times 10'$  を探した。QSO も銀河の一種だから、QSO が出来るときには、その周りで普通の銀河も出来ているであろうと考えたわけである。さらに  $z=3.2$  の QSO が見えているので、そこまでは少なくとも途中の星間・銀河間物質に邪魔される事なく見えていることが分かっている、という利点がある。観測した波長は、Ly $\alpha$  だけを通るフィルタ (中心波長 5040 Å, 半値幅 100 Å) と連続光を通すフィルタ (中心波長 5205 Å, 半値幅 130 Å) 及び R バンドである。使った装置は木曾観測所の 105 cm シュミット望遠鏡に自作の CCD カメラを取り付けたものである。図 8 のような、Ly $\alpha$  のバンドで明るい天体が、この観測で他にも数個発見された。

この天体が本当に  $z=3.2$  の原始銀河であるかどうかはスペクトルを撮って見なければ分からない。もし本当ならば、電波銀河でもなく、QSO との相互作用もない、より「普通の」原始銀河ということになる。残念ながら日本ではこの天体のスペクトルが撮れる装置がない。ラ・パルマ島のウィリアム・ハーシェル望遠鏡で 1989 年の 1 月にスペクトルを撮ることになっている (晴れて、原始銀河のスペクトルが撮れますように！)。

#### 8. 他の種類の原始銀河

今までは、銀河形成初期に星形成が活発に起きる場合に注目してきた。しかし星形成がなかなか起こらなかった天体もあるにちがいない。QSO のスペクトルに見られる飽和した Ly $\alpha$  の吸収線 (damped Ly $\alpha$  absorption systems) を作っている天体は、明るく光っていないので、そのような天体なのかもしれない。

1989 年 8 月 29 日付けのニューヨーク・タイムズ誌にちょっとびっくりする記事が載った。アレンボの電波望

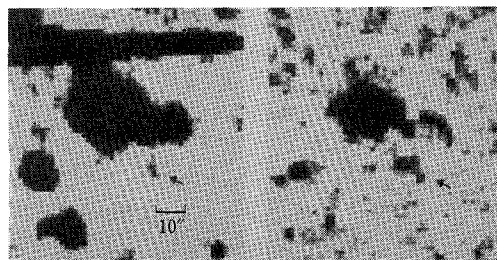


図8 原始銀河の候補  
(左) R バンド像 (6800 Å) (右) Ly $\alpha$  像  
このような天体 (22 等) のスペクトルがすぐに撮れて、真偽がすぐに判るような観測環境が望まれる。  
(パリティ Vol. 4, No. 9 (1989-9) より)

望遠鏡で、65 億光年のところ ( $z \sim 0.01!$ ) に巨大な水素雲でできた原始銀河を発見したというのである。

この新聞記事の真偽はともかくとして、今までここに述べてきた天体の他にも、多種多様な天体があると考えられる。

#### 9. 雑 感

多少愚痴になるが、原始銀河捜しで成果を挙げている人達と我々日本人の間には、愕然とするほど研究環境に差がある。それは『22~23 等星のスペクトルを撮れる装置が、自由に使えるかどうか』である。例えば 3C 326.1 の McCarthy らの観測では、キットピークの 4 m, MMT (4.5 m), リックの 3 m を 1986 年の 3 月から 6 月にかけて毎月 (!!!), 計 9 夜も使っている。もし我々がこのような観測をしようと思えば、良い共同研究者でも深さない限り、うまくいっても 3 年はかかってしまうであろう。我々が見付けた原始銀河候補の確認観測も、こ

のような環境であれば、1年間も御預けを食わずにすんだのである。

現在は22~23等級の天体が話題の中心であるが、これは4mクラスの望遠鏡+分光器の性能の限界が、この辺にあるからである。撮像観測では既に27~28等級の興味深い天体が見付かっている(Tyson 1988)。あと10~20年後には、このような天体のスペクトルが撮れる様になっていないと、その頃にまた誰かがどこかで、この文章のような愚痴を書いているかもしれない。

原始銀河捜しのような時間のかかるサーベイを、1つの大きな望遠鏡だけで行うのは、他の観測との関係から無理である。「測光専用望遠鏡」、「分光専用望遠鏡」のような〇〇専用望遠鏡が、4mクラスの中口径でよいか

ら(8mクラスならなお良い)必要となるだろう。

分光器も、今までのような空間的に0または1次元のものでなく、2次元の画像とスペクトルを合わせた3次元情報が、同時に得られるタイプが重宝がられるだろう。このような装置には、光回路の技術が使われるかも知れない。

日本の工業技術は、世界に誇れるものがある。可視域の検出器として一世を風靡している CCD も、その製造技術では日本が世界一と言ってよい。観測天文学で一流の成果を出すためには、研究者の独創は当然として、天文台の将来を見据えた柔軟な運営思想と、この優れた工業技術の活用が大切だと考える。

## 日本学術会議だより

## No.15 より抜粋

日本学術会議は、去る10月18日から20日まで第108回総会(第14期4回目の総会)を開催しました。

### 日本学術会議第108回総会報告

第108回総会の主な議事概要は次のとおりであった。

**第1日(10月18日)の午前。**まず、会長から、前回総会以後の経過報告が行われ、続いて、各部・委員会の報告が行われた。さらに、今回総会に提案されている3案件についてそれぞれ提案説明がなされた後、質疑応答が行われた。

**第1日の午後。**各部会が開催され、午前中に提案説明された総会提案案件等の審議が行われた。

**第2日(10月19日)の午前。**前日提案された案件の審議・採決が順次行われた。

まず、第7部の専門別の会員定数の変更並びに同部世話担当の研究連絡委員会の再編成(統合3件、分割2件、新設1件、名称変更6件)を内容とする、会則の一部改正が採択された。

続いて、第4部及び第7部の「会員の推薦に係る研究連絡委員会」の指定の変更を内容とする、関係規則の一部改正が採択された。

これらの改正は、具体的には第15期からの組織・活動に係るものである。

さらに、生命科学と生命工学特別委員会の提案による「ヒト・ゲノム・プロジェクトの推進について(勧告)」が採択された。なお、この件の審議の際には、研究成果公開の原則とプライバシー保護等の問題、「プロジェクト・チェック機構(仮称)」の果たす具体的役割等について、討議が行われた。この勧告は、同日午後直ちに内閣総理大臣に提出され、関係省庁に送付された(この勧告の詳細は、別掲参照)。

また、本総会においては、会長から、日本学術会議の移転問題に関し、前回総会以降の主な動きとして、①去る8月「国の行政機関等移転推進連絡会議」において、本会議の移転先が横浜市「みなとみらい21地区」となったこと、②これに対し三役及び運営審議会のとった対応、などについて報告があった。種々質疑応答が行われた後、これまで

の三役及び運営審議会の対応については、基本的な了承がなされた。また、今後の移転に関する諸問題については、当面、三役及び運営審議会にその処理を一任することで了承された。

**第2日の午後。**「地球環境問題」について、活発な自由討議が行われた(この自由討議の詳細は、別掲参照)。

**第3日(10月20日)午前**には各常置委員会が、**午後**には各特別委員会が、それぞれ開催されさ。

### 電圧、抵抗および温度の維持方式の1990年1月1日からの変更について一標準研究連絡委員会報告(要旨)

第77回国際度量衡委員会(1988年10月開催)は、電圧、抵抗の各標準の維持方式の変更と、温度目盛の変更の3つの勧告を採択し、1990年初頭からの実施を求めた。この変更を国内に事前に周知するため、関心の高い9学会に、勧告の要旨を掲載した。以下に勧告の骨子を記す。

電圧標準はジョセフソン効果で実現し、電圧周波数係数を $K_J$ と記号し、その値を $483\ 597.9\ \text{GHz/V}$ と定義した。抵抗標準は量子ホール効果で実現し、量子化ホール抵抗を $R_K$ と記号し、その値を $25\ 812.807\ \Omega$ と定義した。温度スケールは、 $\text{ITS-68}$ に変わり、 $\text{ITS-90}$ (1990年国際温度目盛)を定義した。変更は多岐に亘るので、詳細は関連学会誌を参照されたい。

以上の変更により、電磁気計測の精度と国際的整合性が著しく改善され、温度計測の熱力学温度との一致と低温域への拡張が達成される。

御意見・お問い合わせ等がありましたら、下記までお寄せください。

〒106 東京都港区六本木7-22-34

日本学術会議広報委員会・電話03(403)6291