

# ALMAは何を見るのか

## — ALMA が切り開く新しいサイエンス —

長谷川 哲夫

〈国立天文台 ALMA 計画準備室 〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1〉  
e-mail: tetsuo.hasegawa@nao.ac.jp

ミリ波・サブミリ波の望遠鏡である ALMA は、その高い感度と空間分解能によって、天文学の幅広い分野に大きな進展をもたらす。ここではその中から特に重要な、銀河の誕生と進化の問題と、星・惑星系の誕生の問題について、具体的にその威力を考えてみよう。

### 1. はじめに

#### 1.1. 野辺山から ALMA へ

ミリ波による天体観測は 1970 年代から、サブミリ波による天体観測は 1990 年代から本格化した比較的新しい観測手段である。1982 年に完成した野辺山宇宙電波観測所の 45 m ミリ波望遠鏡は、その大きな集光面積と高い空間分解能、そして観測周波数の多様さと優れた分光能力とで、世界のミリ波天文学を進める原動力の一つとなった。さらに 1986 年から観測を開始した野辺山ミリ波干渉計は、IRAM (ミリ波天文学研究所) のプール高原干渉計、カリフォルニア工科大学の OVRO 干渉計、およびカリフォルニア大学バークレイ校などの連合による BIMA 干渉計と、現在も激しくしのぎを削っている。

野辺山宇宙電波観測所のこれらの望遠鏡は、国内外のたくさんの天文研究者によって共同利用されてきた。その成果は、星間分子雲に含まれる多様な分子種の発見、原始星を取り巻く円盤状構造の発見とその中での質量降着の直接検出、原始惑星系円盤の進化の解明、SiO メーザー天体による銀河系バルジの運動の解明、銀河系中心の活動性を示唆する特徴ある偏波構造やアークの発見、スターバースト銀河の中心領域の解明、そして赤方偏移 4.69 にあるクェーサーからの一酸化炭素分子

輝線の検出など、多方面にわたっている。

日本、北アメリカ、ヨーロッパの国際協力で建設しようとしてる ALMA は、日本から見れば、野辺山宇宙電波観測所のこれらの成果を踏まえ、サイエンスをさらに大きく発展させるものと位置づけられる。

#### 1.2. ALMA は幅広いサイエンスをカバーする

ALMA の特徴は、(1) ミリ波からサブミリ波の波長域で、(2) かつてない高い感度と最高 0.01 秒角の分解能で、天体の画像を描き出すことにある。表 1 に ALMA の主な観測対象を挙げるが、これらの優れた特徴のため、きわめて遠方の原始銀河から、太陽系内の天体にわたるさまざまな天体が、これまで人類に知られていなかった姿を見せることが期待される。ALMA による観測で展開することの出来るサイエンスは、光学赤外線望遠鏡に劣らずきわめて幅広いものになる。このことは同時に、天文学のさまざまな分野で、『すばる』などの光学赤外線望遠鏡、そして地上からは観測できない波長帯をカバーする赤外線天文衛星、X 線天文衛星などとタイアップすることにより、多波長における高分解能観測を展開し、天体現象の物理学に多角的にアプローチできる時代が到来することを意味している。ごく大げかみに言えば、可視光や近赤

表1 ALMA はどのような天体を観測するのか

距離	天体	実際の広がり	見かけの広がり	ALMAによるプロジェクトの例
z~5以上	原始銀河	10 kpc	3"	原初天体の無バイアスサーベイ、銀河誕生の姿を初めて描き出す
z~0.5-3	銀河団	1 Mpc	200"	スニヤエフ・ゼルドビッチ効果、宇宙論パラメータの決定
z~0.1-3	赤外超過銀河	10 kpc	6"	大きな赤外光度の原因、銀河合体、AGN形成
z~0.01	進化途上の銀河	10 kpc	50"	銀河の形態（楕円銀河や円盤銀河）はどのようにして作られたか
10 Mpc	AGNトーラス	1 pc	0.02"	トーラスの構造を初めて描き出す
10 Mpc	AGNを取り囲むスターバースト領域	1 kpc	20"	構造・運動・物理状態、AGNとのつながり
100 kpc	大小マゼラン銀河の分子雲	50 pc	100"	金属欠乏星間物質の物理・化学、星団形成のメカニズム
8 kpc	銀河系の中心	5 pc	100"	ブラックホールを取り巻くガスの構造・運動
5 kpc	大質量星形成コアや超コンパクトHII領域	0.05 pc	2"	大質量星はなぜできるか、ラインサーベイ、偏波観測
1 kpc	超新星残骸	0.05 - 0.5 pc	10 - 100"	衝撃波物理・化学の実験場として、ラインサーベイ
1 kpc	晩期型星	0.02 pc	4"	質量放出の歴史、双極性の起源、ラインサーベイ
0.1-1 kpc	星団形成中の分子雲コア	0.01 - 0.1 pc	2 - 100"	星団形成のメカニズム、偏波観測
0.1-1 kpc	双極分子流	0.01 - 0.5 pc	2 - 500"	発生メカニズム、衝撃波、周囲へのインパクト
0.1 kpc	原始星	5000 AU	50"	質量降着、星の質量はなにが決めるか
0.1 kpc	原始惑星系円盤	400 AU	4"	構造・運動・ギャップ、原始巨大惑星、ラインサーベイ
10 pc	主系列星を取り巻くデブリディスク	400 AU	40"	惑星を示唆する構造やギャップ
	惑星とその衛星		1 - 40"	大気の構造と運動
	彗星		2 - 100"	コマ中の物質分布、ラインサーベイ、ジェット
	太陽		1800"	活動領域、リムブライティングによる彩層構造解明

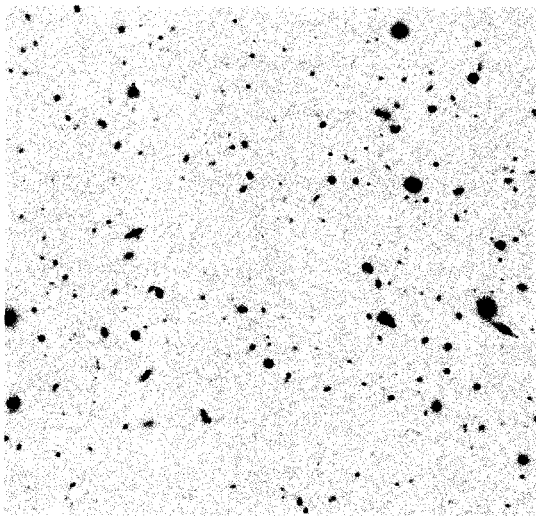


図1 「すばる」により近赤外線（1.25ミクロンと2.13ミクロンの2バンド合成）で撮影された、かみのけ座の一角<sup>1)</sup>。淡い銀河を強調するため、白黒を反転して表示している。（国立天文台 提供）

外線がすでに誕生した星や銀河を見るのに対し、X線では天体の死に伴う高エネルギー現象を、そしてミリ波・サブミリ波では星や銀河が誕生する材料となる物質をとらえることができ、それらを総合することによって宇宙における天体の誕生と死、そしてその中で進む物質の進化を解き明かすことができるのである。

以下では多彩なALMAのサイエンスの中でも特に重要な進展が期待される2つの分野、銀河の誕生と進化、そして星と惑星系の誕生について、やや具体的に見ていきたい。

## 2. 銀河の誕生と進化

### 2.1. 宇宙の暗黒時代

ビッグバン以来、後戻りすることのない進化を続けるこの宇宙の中で、銀河がどのように誕生し進化して、現在見るような姿になったのか？ その物理の解明は、21世紀の天体物理学者に課せられた大きな課題である。そのためには、実際に誕

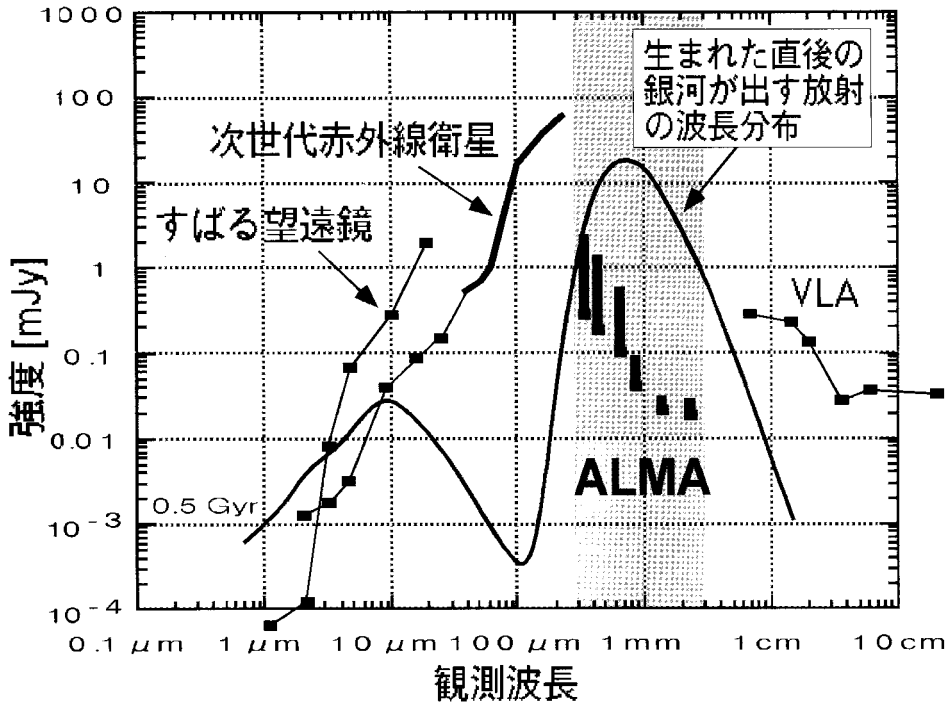


図2 塵に包まれた原始銀河が放射するスペクトルのモデルとさまざまな望遠鏡の感度<sup>2)</sup>。z = 5で誕生した $10^{11}$ 太陽質量の原始銀河を、誕生後5億年で観測した場合に対応する。ALMAとVLAは8時間の観測、「すばる」は1時間、次世代赤外線望遠鏡ASTRO-Fはポインティング観測の感度(すべて $5\sigma$ )を表している。ALMAの感度を示す黒い点はベストコンディションでの値、上に伸びる青いバーは1年の50%の観測条件がその範囲にあることを表している。

生している銀河を、ズバリ見てみるのが一番であるが、これまでそれには大きな困難があった。

図1は「すばる」望遠鏡が長時間の露出により近赤外線撮影した「すばるディープフィールド」の画像である。かみのけ座の一角の、特に著名な天体があるわけでもない一角を撮影したにもかかわらず、おびただしい数の天体が写っている。これらのほとんどが、銀河系の外の、宇宙の奥行きの中に漂う銀河である。明るく大きく写っている天体は比較的近い銀河であるが、暗い天体の多くは100億光年を超える距離にあるものと推定される。言うまでもなく、100億光年の距離にある銀河の像は、100億年前の銀河がどのようなものであったかを私たちに教えてくれる。詳しく画像を検討すると、これらの昔の銀河は最近の円盤銀河や

楕円銀河等のような整った形をしているようには見えない。このことは、ハッブル宇宙望遠鏡が可視光で撮影した「ハッブルディープフィールド」に写った銀河の像からも指摘されている。つまり、現在の比較的整った銀河も、その進化をさかのぼると、かつては形の歪んだあるいは不規則な銀河であったと考えることができる。では、それ以前はどうなっていたか。その観測には本質的な困難が伴う。銀河の材料となる原初天体で第1世代の星が誕生すると、およそ1億年で銀河の材料物質に炭素などの元素が混じり、個体微粒子ができて光を遮ってしまうからである。「塵に包まれた原始銀河」は可視域から近赤外線では見ることができない。赤方偏移がおよそ1000の「宇宙の晴れ上がり」から銀河が塵の蔭をやぶって可視光で輝き出すまでの赤方偏

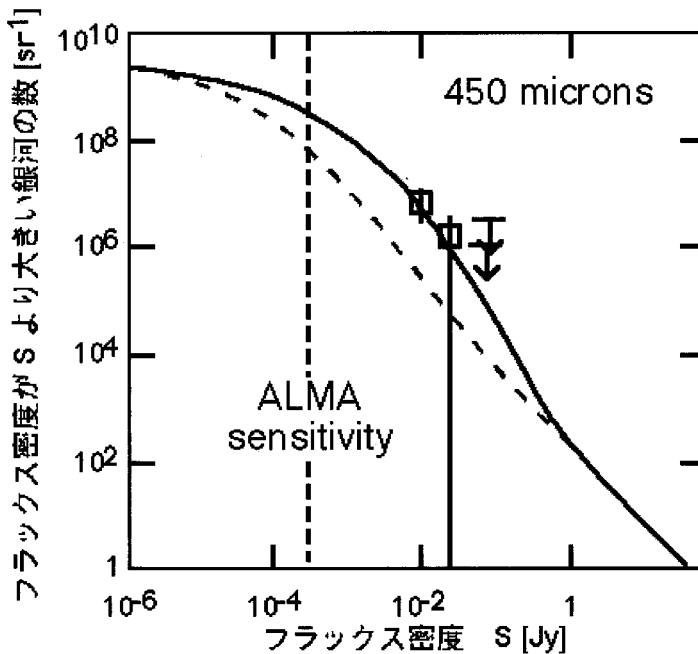


図3 サブミリ波における銀河の計数<sup>3)</sup>。□や下向き矢印は既存の望遠鏡による観測結果を示し、波線は銀河の光度進化をないとした場合、実線はあるとした場合のモデルである。ALMAの感度は8時間の観測で5 $\sigma$ の検出限界を示す。

移5ないし10程度までの時代は、「宇宙の暗黒時代」と呼ばれ、銀河形成のカギを握っていると思われる。

## 2.2. 原始銀河を探す

コールドダークマターのゆらぎに従って集積した、水素とヘリウムと若干のリチウムからなる原初ガスは、限られた冷却メカニズムで重力エネルギーを放出しながら第一世代の星ぼしを誕生させる。それら第一世代の星はたちまち超新星爆発を起こし、まだ豊富に存在する銀河の材料物質を重元素で汚染する。その重元素によりはるかによく電磁波を吸収・放出するようになった銀河の材料は、効率よく重力エネルギーを放出しながら、銀河の骨格となる星ぼしを活発に誕生させる。誕生した星が放つ可視光や紫外線は、原始銀河を包む塵に吸収され、遠赤外線として再放出される。それは大きく赤方偏移して、私たちにはミリ波・サブミ

リ波で観測される。図2はそのような原始銀河の放つ連続スペクトルのモデルの一例である。誕生間もない銀河のエネルギーの大部分が、ミリ波・サブミリ波で観測されることがわかる。ALMAは、赤方偏移5において $10^{10}$ 太陽光度の原始銀河を検出することができる。

このような原始銀河は、可視光や近赤外線では見ることができないため、それらを探すにはミリ波・サブミリ波で無バイアスサーベイを行う必要がある。図3は既存の望遠鏡による観測に基づいて推定した、サブミリ波強度と銀河の個数の関係である。ALMAは、わずか8時間の観測で既存の装置の数十倍の感度を達成することができる。このとき任意の空に向けたALMAの視野に、平均1ないし10個の原始銀河が検出される。ALMAの高い分解能のおかげで、コンフュージョン限界により制限される心配はない。ALMAの1ヶ月の観測時間

をこのような「原始銀河ハンティング」に使うことによって、私たちは数百個の原始銀河候補のサンプルを得ることができる。

### 2.3. 赤方偏移を定める

得られた原始銀河候補のカタログは、その後のすばらしい研究の出発点に過ぎない。一般に遠方の天体は、光学同定され赤方偏移が定められてはじめて天体の光度などの基本的な物理量がわかる。そこでまず、候補天体が他の波長で観測されていないか同定を試みることになる。S/N比にもよるが、ALMAにより検出された天体の位置精度は0.1秒角程度なので、宇宙望遠鏡や『すばる』のような高精度の地上望遠鏡との比較は容易である。しかし上に述べたように、ALMAソースの多くは可視光や近赤外線では検出されないかもしれない。ではどうするか？

ALMAは自力で赤方偏移を決定する2つの方法を用意している。測光による方法と、分光による方法である。図2を見ると、ALMAが観測する波長帯は原始銀河の塵からの放射スペクトルのピークを含み、波長の長いミリ波側はレイリー・ジーンズ領域、波長の短いサブミリ波側はウィーンの領域にある。したがって、銀河の赤方偏移が変化すれば、ミリ波とサブミリ波のフラックス密度の比は大きく変わることが予想される。モデル計算の結果、赤方偏移が0.5から5まで変化すると、波長450マイクロメートルと1.3 mmでの強度の比は1桁以上変化し、赤方偏移を0.5程度の精度で推定できることがわかった。

次は分光で正確な赤方偏移を求める。上に述べたように、原始銀河といえども炭素や酸素などの重元素は含まれているので、一酸化炭素分子などの強いスペクトル輝線を放っていると期待できる。測光的に推定された赤方偏移をたよりに、スペクトルスキャンによってそのような輝線を探すのである。こう書くと、途方もなく長い時間を要するように思われるかもしれない。しかしもし問題の天体

が赤方偏移5付近にあるとすれば、静止系では115 GHz間隔で観測される一酸化炭素の回転遷移は、その間隔がおよそ20 GHzに縮まる。ALMAに備えられる予定の、帯域幅合計8 GHzを一度に分光することができる広帯域の受信機と相関器システムを使えば、最悪でも3回の観測で一酸化炭素のどれかの輝線をとらえることができるのである。

### 2.3. 誕生する銀河の姿をまのあたりに

原始銀河候補天体の赤方偏移が定まれば、いよいよ次はそこで何が起きているかを詳細に調べることになる。赤方偏移を定めるための分光観測は、表面輝度に対する感度を稼ぐためにコンパクトなアンテナ配列を使うので、空間分解能は0.5秒角程度である。しかし、表面輝度の高い天体については、分解能0.1秒角程度の観測が可能になるだろう。波長1 mm付近の場合、分解能0.1秒角、20 km/sの速度分解能で8時間観測すると、輝度温度およそ1 Kのスペクトル線が5 $\sigma$ で受信できる。0.1秒角という見かけの大きさは、天体が宇宙のどこにあっても、1 kpc以下に対応する。この空間分解能と、20 km/sの速度分解能で、誕生しつつある銀河の形態と運動を描き出せるのである。さらに広い帯域幅を生かせる連続波観測では、S/N比が向上するためにより高い空間分解能でのイメージングが可能になる。アルマの最高分解能である0.01秒角で原始銀河を分解したときに、私たちはそこに何を見るのだろうか。

興味深いのは、大きい赤方偏移によって、[CII]の158マイクロメートル輝線などの、遠赤外域の有力なスペクトル線がサブミリ波およびミリ波の領域に入ってくることである。これらは数百度以上の星間ガスの冷却を支配するので、スターバーストなどの活発な星形成の指標となる。ALMAは、[CII]の輝線光度がArp 220の10分の1であっても余裕をもって検出できる。私たちは、銀河のどこで、どのように星が誕生していくかを、実際に見定めることができるのである。

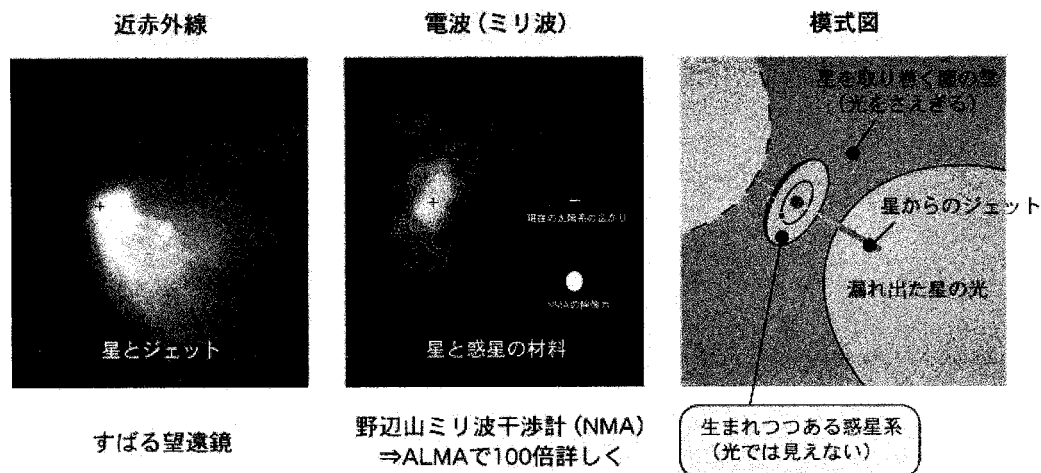


図4 おうし座暗黒星雲内の原始星 L1551 IRS5 の、「すばる」による近赤外線画像<sup>4)</sup>と、野辺山ミリ波干渉計が描き出した  $C^{18}O J=1-0$  ミリ波輝線によるイメージ<sup>5)</sup>。近赤外線では、原始星のジェットと、双極流によって作られた空洞からもれ出す原始星の光が見えるのに対して、ミリ波では星を取り巻く原始惑星系円盤が見える。ALMA によれば、100 倍の分解能でその詳細な構造と運動を調べることができる。(国立天文台 提供)

### 3. 星と惑星系の誕生

#### 3.1. Are we alone?

私たち地球上の生命体は「ひとりぼっちの宇宙人」なのだろうか・・・この問いは、宇宙の始まりや銀河の誕生と並んで多くの人々の関心を集めている。ある意味で、天文学者はこの問題に取り組むことを社会的に請託されているのかもしれない。宇宙における生命を考える際には、まず地球のように生命が誕生し進化しうる惑星の存在が前提となる。では、第二の地球はあるのだろうか？

この疑問に対するアプローチは、最近の 20 年ほどで大きく進んだ。まず、誕生する星のまわりにガスと塵からなる円盤が見つかった。野辺山宇宙電波観測所の海部宣男氏らのグループが、45 m 望遠鏡を用いて分子雲に埋もれた若い星のまわりに円盤状のガス雲を発見したのが 1984 年であった<sup>6)</sup>。はじめはそれが惑星系のもとになる円盤そのものかと思われたが、その広がりには数千天文単位と、太陽系よりもはるかに大きかった。その後、日本や

アメリカのグループがミリ波干渉計を使って、おうし座 T 型星のまわりに円盤を見つけていった。こちらは直径が数百天文単位で、その内側はいかにも原始惑星系円盤と言えそうである。45 m 望遠鏡が見た大きな円盤は、星誕生プロセスのより初期の段階で、誕生する星を包みかつその材料を提供する「原始星エンベロープ」だったのだ。そのエンベロープが時とともに晴れ、星のまわりに残された円盤の中で、惑星の誕生が進むと考えられる。

まだ分子雲に包まれた原始星、L1551 IRS5 の例を図 4 に示す。近赤外線では原始星からもれ出す光やジェットが観測されるが、ミリ波では原始惑星系円盤を直接とらえることができる。その半径はおおよそ 500 天文単位であるが、現在のミリ波干渉計の分解能（おうし座分子雲の距離で 300 天文単位程度）では、その内部構造を知ることは難しい。まわりのエンベロープを失って、中心星と円盤だけになったケースを図 5 に示す。これはハッブル宇宙望遠鏡によるオリオン星雲のイメージの中に見つかったもので、主星を取り巻く塵の円盤が、

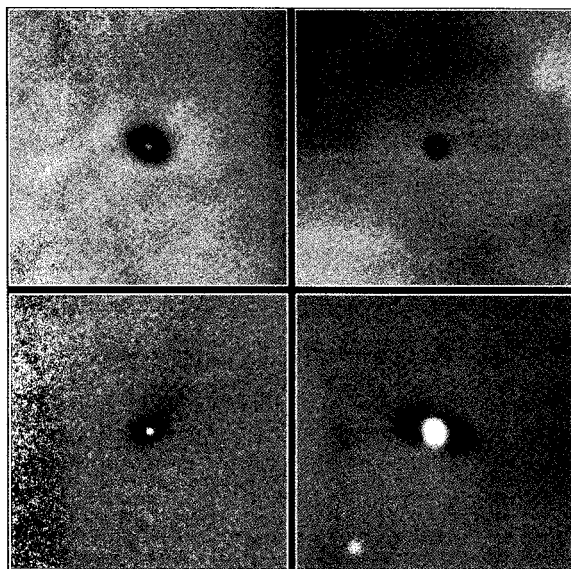


図5 ハッブル宇宙望遠鏡で撮影したオリオン星雲の画像の中に見つかった原始惑星系円盤<sup>7)</sup>。黒くシルエットのように見えるのが、惑星系の材料となる塵の円盤で、その中心に光っているのが若い主星。ALMAは10倍の分解能で塵から放射されるサブミリ波受信し、円盤の中で進む惑星の誕生を描き出す。(NASA 提供)

星雲の拡散光をバックにシルエットとして見えている。可視光による観測なのでシルエットとしてしか見えないが、これもALMAを用いてミリ波・サブミリ波で観測すれば円盤そのものが輝いてみえる。しかも10倍の分解能で、円盤の姿が描き出されるのである。原始惑星系円盤の中で惑星が誕生すれば、その原始惑星による摂動で円盤には空隙が作られる。そのようすをシミュレーションで示したのが図6であるが、ALMAで近傍の星形成領域を観測すれば、このような空隙は確実にとらえられると予想される。さらに、原始惑星が起こす波のパターンが主星のまわりを回転していくようすも、1～2年の間隔を置いて観測することで検出できるだろうし、巨大惑星を取り巻く降着円盤が見えるかもしれない。私たちは今度は惑星誕生の現場をまのあたりにすることになるのである。

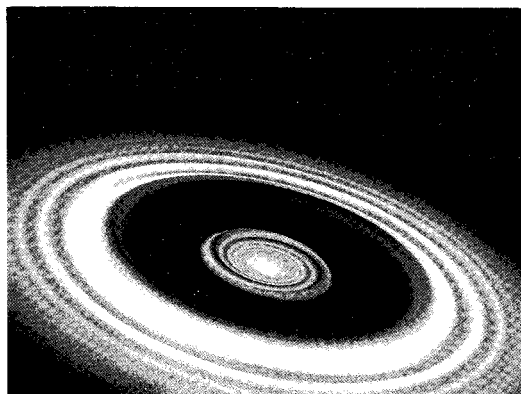


図6 円盤内に原始惑星が形成されたときに、それが円盤に空隙を作るようすを理論計算に基づいて描いた想像図<sup>8)</sup>。

### 3.2. 比較惑星系形成論

第二の地球を探するという点で、もう一つの大きな進展は、惑星の公転により揺らぐ主星の運動をドップラー効果で検出するという、間接的な惑星ハンティングの成功である。1995年にこの方法でペガス座51番星のまわりに初めて惑星が検出されて以来、その数は着実に増え続け、今では太陽系のほかに60を超える惑星系が知られるほどになった。この方法は、当然のことながら、質量の大きな惑星が主星に近い軌道をとっている場合に検出されやすい。その分を割り引いて考えても、つぎつぎに発見された太陽系外の惑星は、奇妙なものが少なくなかった。あるものは、木星程度の質量を持ちながら主星から0.1天文単位以下というごく近くを回る「灼熱巨大惑星」であったり、またあるものは、離心率が0.5以下の軌道を取る「長楕円軌道惑星」であったりして、実に多様である。私たちは太陽系のような惑星系が「普通の惑星系」だと漫然と考えていたが、どうもそうばかりとは言えなくなってきた。

このような多様な惑星系は、どのようにして作られたのだろうか。この疑問は、比較惑星系形成論とも呼ぶべき学問分野をひらいた。現在盛んに理

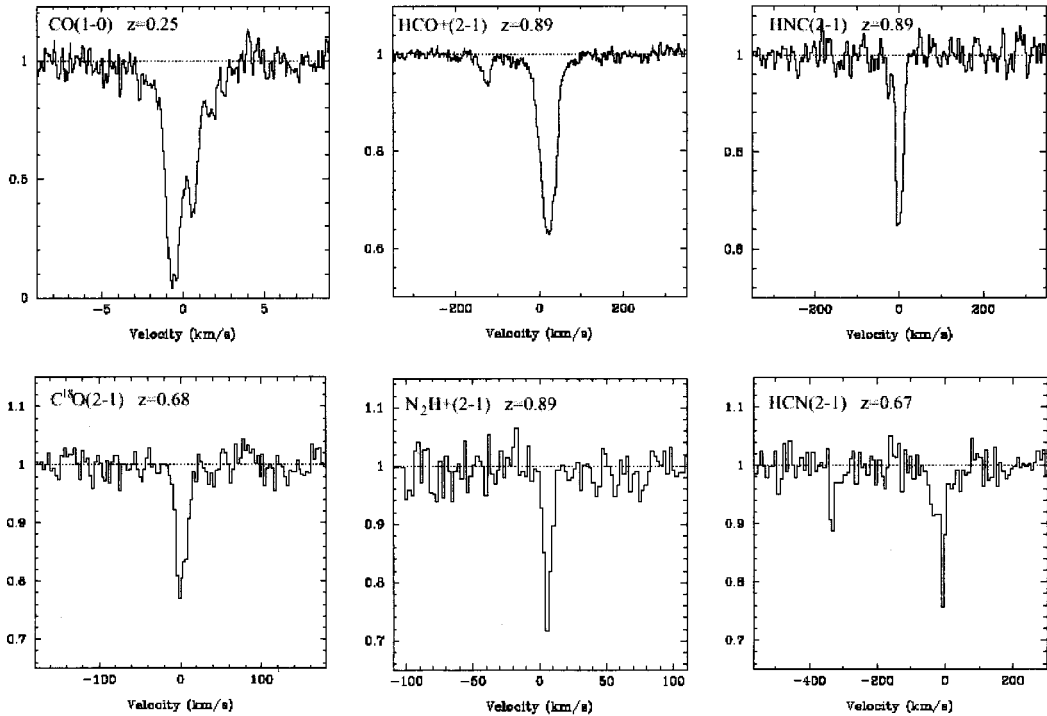


図7 クェーサー PKS 1830-211 を背景として観測された分子吸収線<sup>10)</sup>。チリのESO ラシヤ天文台にあるSEST15 m ミリ波望遠鏡で観測された。遠方の銀河間空間に漂う多彩な分子は何を物語っているのだろうか。

論的研究が進められているが、おそらく惑星系形成の初期条件となる原始惑星系円盤の違いが、大きな役割を負っているだろう。ALMAは、さまざまな環境のもとにあるおびただしい数の原始惑星系円盤を観測することができる。第二の地球はあるかという問題を解くカギを、観測から提供することができるだろう。

### 3.3. 星の多様性：質量はなぜ決まるか

惑星系ばかりでなく、主星である恒星もまた多様性を持っている。その代表的なものが星の質量である。星は、小さいものは質量が0.08太陽質量にみたく水素核融合に至らない褐色矮星から、大きいものは100太陽質量に及ぶ3桁以上の範囲を持っている。なぜこのような大きな違いが生じるのだろうか。

原始星の誕生は、分子雲の中でも特に密度の高

くなった「高密度コア」が重力収縮することで始まることがわかっている。中心に誕生した原始星は、まわりに降着円盤を伴いながら質量を増大させてゆく。降着する質量は、高密度コアに含まれていたものである。この高密度コアとは上に述べた原始星エンベロープと同じものである。質量降着とともに原始星から吹き出す双極流が角運動を持ち去ってさらなる降着を可能にするとともに、まわりの原始星エンベロープ(=高密度コア)のガスは徐々に消失する。その結果、エンベロープから降着円盤への質量供給が止まり、誕生する星の質量が決まる。

この一連のプロセスの中で星の質量が決まるのだが、それには(1)高密度コアの質量、(2)高密度コアの中で誕生する星が獲得する質量、という二つの要素があると考えられる。(2)については、原始星の双極流が重要な役割を果たしている



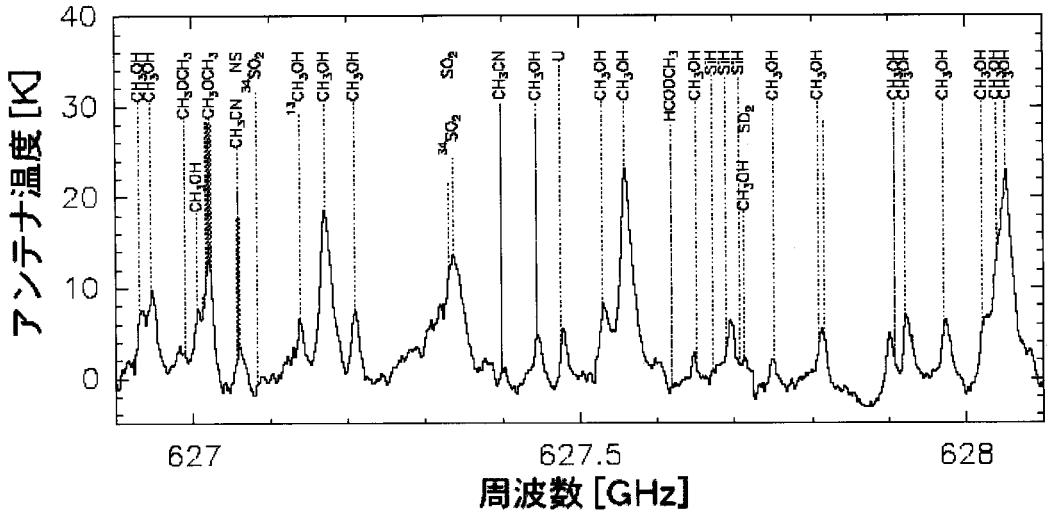


図8 オリオン KL 天体の 630 GHz 付近の「スペクトル輝線の林」<sup>11)</sup>。カリフォルニア工科大学の 10 m サブミリ波望遠鏡による観測。

とする理論を中野武宣氏が提出したが<sup>9)</sup>、その観測的実証はまだである。(1)の方については、フラクタル的とも乱流的とも言える分子雲の構造の中に発生する高密度コアの形成メカニズムすら、必ずしも十分理解されていない現状である。さらに、3桁もの質量の幅をどう説明するか。特に、大質量の星を誕生させる大質量高密度コアはどのように形成されるかもよくわかっていない問題である。これらのどの課題も、ALMA の高い空間分解能による分子雲や星形成領域の観測が解決の決め手になることは疑いない。また、ALMA の精密なイメージングは、ミリ波・サブミリ波での偏波観測を可能にすると期待され、これらの問題に本質的な働きをしていると予想される磁場の形態が明らかになるのではないかと期待される。

### 3.4. 連星系や星団形成のメカニズム

質量とならぶ星の多様性は、連星や星団などのシステムの誕生である。銀河系には、銀河系誕生の時期に形成された多数の球状星団が見られるが、

現在はそのような星団が形成されている兆候がない。狭い領域で 1 万から 10 万の星が極めて高い効率で誕生する球状星団の形成は、星の誕生という観点から見るときわめて特殊な状況といわざるを得ない。なぜ過去には球状星団が生まれたのかという問題は、銀河の誕生の時代における星形成プロセスを解くカギにもなるかもしれない。

その点で重要な情報を与えてくれるのは、アンデスの空に高くかかる大小マゼラン銀河である。特に大マゼラン銀河には多数の若い、密集した星団が見られる。その星数は銀河系の球状星団に比べるとやや少ないが、いわゆる散開星団とは明確に異なる星の集中を見せている。ALMA はマゼラン銀河の分子雲を、高密度コアのスケールにまで分解することができる。そこで現在進行している星の形成を調べることで、銀河系の過去を見ることができるともかもしれない。

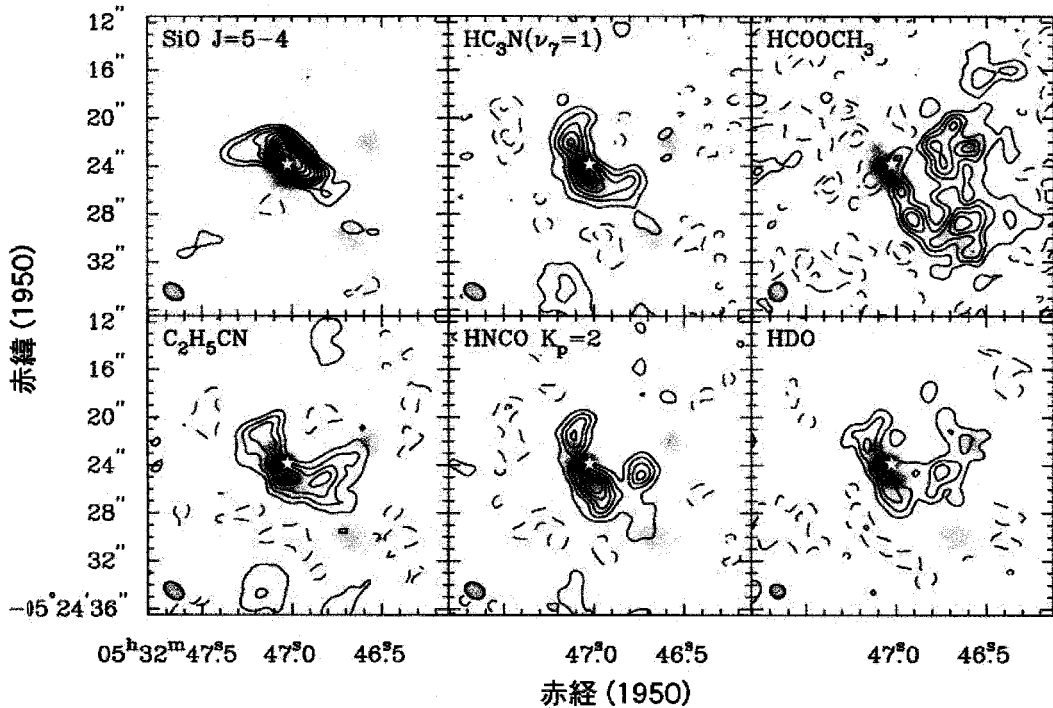


図9 オリオン KL 天体のミリ波輝線による高分解能イメージ<sup>12)</sup>。分子種により分布が異なることに注意。

## 4. 宇宙における物質の進化：

### ビッグバンから生命まで

#### 4.1. 初期の宇宙に漂う分子ガス

これまで、銀河の誕生、星・惑星系の誕生という天体の誕生の研究において、ALMA がもたらすであろう新しい展開について考えてきたが、別の視点として、宇宙における物質の進化という問題意識がある。ビッグバンで始まった限りなく滑らかな宇宙に、いま私たちが見るような実に多様な構造が発現するにいたったのは、重力だけのせいではない。星や飛び散る超新星の中で合成された元素が、化学反応を起こしてさまざまな分子となり、またその一部は惑星をつくりその上に生命を誕生させる。単純から複雑への、後戻りしないこの一連の変化は、物質の「進化」と呼ぶことをある程度は正当化するのではないだろうか。これは単純を尊

ぶ天体物理学の観点からはあまり注目されてこなかったことであるが、可視光および赤外線の広帯域・高分散エシエル分光器の稼働や、極めて高いエネルギー分解能を持つ X 線カロリメータなどに代表される最近の観測装置の進歩は、宇宙における「物質」に正面から取り組むことを可能にし始めている。ALMA もその例外ではなく、日欧が協力して開発中の 8 GHz の帯域幅を 8000 以上のチャンネルに分けて分光できる分光相関器は、宇宙における低温の物質を見るミリ波・サブミリ波でも、物質の科学を展開する可能性を大きく広げている。

その一つの例として、遠い宇宙に漂う冷たい分子ガスを挙げたい。図 7 は、キューサー PKS 1830-211 を背景として観測された分子吸収線である。赤方偏移 0.25, 0.67, 0.68, 0.89 というはあるかな銀河間空間から、CO, HCO<sup>+</sup>, HNC, HCN, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> という多彩な分子の吸収線が検出されている。これらの分子はどのような雲の中にあるのだろうか。それら

は、ライマン $\alpha$ の吸収として見られる雲と、実際に星を誕生させる銀河との間をつなぐミッシングリングになるのだろうか。この観測は口径 15 m の単一パラボラで行われたが、ALMA を用いると、約 10 日でおおよそ 100 ほどの天体について、同様の観測を行うことができる。これによって、まったく新しい研究の分野が開けるかもしれない。

#### 4.2. 弱いスペクトル線にこそ重要な情報が

もう一つ、物質という点で興味深いのは、星・惑星系形成領域のガスに含まれる分子である。1970 年代から始まった星間分子発見のゴールドラッシュにより、ミリ波帯で観測できるおもだった分子は調べ尽くされた感がある。しかし、もし星間分子雲中の物質と太陽系や生命との関係を探るとすれば、アミノ酸に代表されるような、はるかに複雑な分子を調べる必要がある。そのような分子は、その複雑さ故に、一本一本のスペクトル線は弱い。そのため、たくさんの強いスペクトル線が観測される星形成領域では、「輝線の林」に埋もれて検出が困難だ(図 8)。しかし、ALMA はこの問題を空間分解能で解決できるかもしれない。図 9 は、オリオン KL 天体をさまざまな分子で観測したイメージであるが、分子毎にその分布はかなり異なる。つまり、単一パラボラの太いビームの中では互いにブレンドしていたスペクトル線が、高い分解能で観測すれば空間的に分離され、その中に微弱な、しかし非常に重要なスペクトル線が検出される可能性がある。ALMA の高い空間分解能と、優れた分光能力の組み合わせは、原始惑星系の中に生命の材料となる物質を見つけるかもしれないのである。

#### 5. 私たちは天体誕生の目撃者になる

以上に見てきたように、ALMA は 21 世紀の天文学・天体物理学のさまざまなフロントで、きわめて重要な役割を果たすと期待されている。その主要なパートナーとして日本が主体的に加わることは、私

たちの前にすばらしい研究の機会が広がっていることを意味している。完成までまだ時間はあるが、ALMA が動きはじめたときに、そのポテンシャルを余すことなく発揮させられるよう、しっかり準備しておきたい。ALMA は電波天文学者だけのものではない。天文学、天体物理学、あるいは惑星科学など近隣分野も含めた広いコミュニティーが活用できる装置である。そのコンセプトのもとに、現在私たちは ALMA の最終設計を進めている。ALMA の稼働によって、世界の、そして日本のサイエンスがまた大きく飛躍することを期待しよう。

#### 参考文献

- 1) Maihara T., et al., 2001, PASJ, 53, 25
- 2) 国立天文台 ALMA 計画準備室編, 2001, 「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) 計画」
- 3) 竹内 努, 2001, 天文月報, 第 94 巻, 10 号, 487 ページ
- 4) 伊藤洋一, 2000, 天文月報, 第 93 巻, 第 4 号, 210 ページ
- 5) Momose M., et al., 1998, ApJ, 504, 314
- 6) Kaifu N., et al., 1984, A&A, 134, 7
- 7) McCaughrean M., O'Dell, C. 1996, AJ, 111, 1977
- 8) Bryden G., Lin D., 1999, ApJ, 514, 344 (<http://www.ucolick.org/~bryden/>)
- 9) Nakano T., et al., 1995, ApJ, 450, 183
- 10) Wiklind T., Combes F., 1998, ApJ, 500, 129
- 11) Schilke P., et al., 2001, ApJS, 132, 281
- 12) Blake G., et al., 1996, ApJ, 472, L49

#### Science With ALMA — Doors to Novel Science to be Opened —

Tetsuo HASEGAWA

National Astronomical Observatory 2-21-1 Osawa,  
Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Scientific potential of ALMA is reviewed. It covers a wide range of science and objects ranging from very distant protogalaxies to the planets and their satellites. Out of these, two specific fields are introduced; the formation and evolution of galaxies, and the formation of stars and planetary systems around them.