

大型ミリ波サブミリ波アレイ計画

川 辺 良 平

〈国立天文台・野辺山宇宙電波観測所 〒384-13 長野県南佐久郡南牧村野辺山〉
e-mail: kawabe@nro.nao.ac.jp

ミリ波及びサブミリ波帯における天文学は、数多くの星間分子を発見し、銀河の中の低温で高密度の分子ガス及び星間塵の観測から、光では観測困難な暗黒星雲中でおこる星形成、若い星の周りの塵の円盤—原始惑星系円—の研究そして銀河スケールでおきる爆発的星形成、銀河中心部の活動性などの研究を飛躍的に発展させ、多彩でダイナミックな宇宙物質の様相を明らかにしてきた。大型ミリ波サブミリ波アレイは口径 10 m クラスのアンテナ約 50 台（口径 71 m 相当）からなり、日本の電波天文学の次期大型観測装置として計画されている。地上におけるミリ波サブミリ波帯の観測装置としては究極的な大型干渉計である。観測周波数は 35 GHz（波長 8.5 mm）から 850 GHz（波長 350 μm ）までを狙い、地上に残された最後の窓で、これまでにない高い感度と 0.1" の空間分解能の達成を目指す。LMSA による観測は惑星系の形成過程を詳しく明らかにし、同時に太陽系の特殊性、惑星系における位置づけを解明するであろう。また遠宇宙においては、原始銀河や遠方銀河における中心核（QSO）形成を探るなど、現代天文学の重要課題に広く迫ることを目指す。

1. はじめに

ミリ波サブミリ波帯の分子輝線（主に回転遷移）をプローブとした低温の星間物質の研究は、ここ 20 年で大きな飛躍をしてきた。この飛躍は、Townes たちによるアンモニア分子輝線（波長 1.3 cm）の銀河系中心方向での発見、Penzias たちの一酸化炭素分子輝線の発見に始まったと言って良い（二人ともノーベル賞学者である）。これらの発見から、宇宙空間に極めて低温で、高密度の分子ガスが存在し、中性水素原始ガスと共に星間空間のガスの質量のほとんどをになっていることが明らかになり、銀河系円盤中で数千の巨大分子雲が存在すること、分子雲は、分子ガスが材料となって星が新たに生まれている場所であること、これらの分子以外にも多くの種類の分子が存在することが、野辺山 45 m などの電波望遠鏡で明らかになり、星形成プロセスや星間物質の進化の様子が次第に明らかになりつつある。また、ここ数年の

ミリ波電波天文学の技術的な進歩、特に高感度ミリ波検出器の開発、ミリ波干渉計技術の進歩により、系外銀河における分子雲の構造も高い空間分解能で調べられるようになり、銀河スケールでの星形成課程、銀河中心部や、相互作用する銀河合体する銀河での爆発的星形成の研究が進み、これまで光学観測にたよってきた銀河の構造進化の理解・認識に、新たな知見を得て来ている。

また、星形成プロセスや、銀河系内、および系外銀河における星間物質の研究が進化した理由として、電波分光の重要性があげられる。分光することにより、色々なスペクトル輝線が同定できるのはもとより、高分散の分光でスペクトル線のドップラー遷移を測定することにより、分子ガスの運動（原始星周りの回転、収縮、膨張運動など）が細かく調べられることになった（現在では、速度分解能は約 0.01 km/s まで達成可能）。

巨大分子雲、暗黒星雲中での星形成の研究を進める一方で、星形成の延長として、若い星の周り

の円盤の研究が進み、原始惑星系円盤の形成、構造の進化にまで発展してきた。また遠方の若い銀河における星形成活動や QSO における分子ガスの構造の研究も最近では始められている (つい最近にも z (赤方偏移)=2.5 の “Clover leaf” QSO (H1413+117) で CO 分子線が検出され多量の分子ガス及びダストが存在することが明らかになった) (Ref 1, 2)。野辺山ミリ波干渉計では、その高い空間分解能を利用して、高密度分子ガス構造の詳細観測、原始星ガス降着円盤 (accretion disk)、原始惑星系円盤の観測に威力を発揮してきた (Ref 3, 4, 5, 6, 7)。

しかし、これまでの既存のミリ波干渉計の数秒角の分解能では、原始惑星系円盤を十分に分解してその構造を調べることが出来ていない。一方、素子数が少ないので多くの天体を効率よく観測し進化過程を研究する事も困難であった。また、ミリ波帯では、比較的温度が高い (星から 10~200 AU 離れた領域で 100 K~20 K の温度を持つ) 原始惑星系円盤の中心部を観測する事は難しい。このような領域では、星間塵、分子スペクトル線共にサブミリ波帯での観測が本質的に重要である。

現在、国立天文台を中心に大型ミリ波サブミリ波アレイ (LMSA) 計画が進められている。この大型ミリ波サブミリ波アレイ (LMSA) では、最も近傍の星形成領域 (距離は約 140 pc) の若い星で、惑星形成の起こると考えられる中心部を調べるため、0.1 秒の分解能 (14 天文単位に相当)、及びこれまでにない高い観測感度を目指している。また、星間塵の観測効率を飛躍的に向上させ、より星に近い中心領域を調べるために不可欠な高い励起状態の分子線を観測するために、未開拓のサブミリ波帯の観測に挑戦する。これにより、遠方銀河、原始銀河、銀河進化の研究を新たに進めることも可能になるであろうと考えられている。

2. 高解像サブミリ波天文学の意義

ミリ波天文学は、これまで述べたように低温の

星間物質について、そしてそれらの中で起こる種々の現象について多くの新たな知見をもたらした。我々はさらに、さらに波長帯をサブミリ波へと拡張し、新たな天文学を開拓しようとしている。では、サブミリ波の重要なところはどこなところなのであろうか？

サブミリ波で宇宙を眺めたとき、宇宙は必ずしも明るく輝いているわけではない。むしろ、この宇宙はサブミリ波では極めて暗い。サブミリ波は、波長で 1 mm 帯でピークを持つ 3 K マイクロ波背景放射と波長 100 μm でピークを持つ近傍銀河のダスト成分からの熱的放射 (温度約 30-50 K) のちょうど谷間に位置しているからである。

しかし、この波長領域は、これまでほとんど調べることが出来なかった原始星 (主に重力エネルギーを開放して光っている生まれつつある星) の周りにあるガス降着円盤や若い T-タウリ型星の周りの原始惑星系円盤の 10 AU-100 AU の構

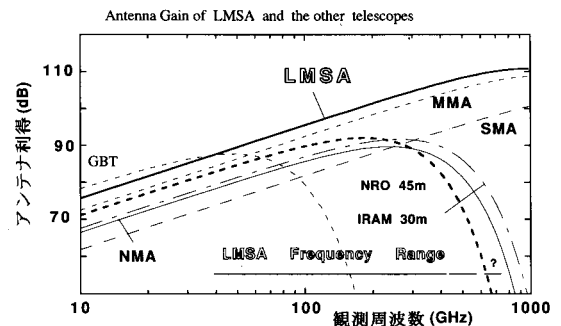


図1 LMSA と他のミリ波サブミリ波望遠鏡のアンテナ利得を比較した図。(アンテナ利得は、 $G=f \cdot 4\pi/\lambda^2 \cdot Ae$ 表される。 $0.5 < f < 1$, λ は観測波長, Ae は実行的な開口面積で、アンテナの口径 D , 鏡面精度 ϵ を用いると、 $Ae = \pi(D/2)^2 \cdot \exp(-4\pi\epsilon/\lambda)^2$ となる)

LMSA はミリ波サブミリ波帯で最高のアンテナ利得を目指す。NMA (野辺山ミリ波干渉計), NRO45m 鏡, フランスドイツ共同の IRAM (ミリ波天文学研究所) 30m 鏡は現存する単一鏡, SMA (Sub-Millimeter Array), NMA (Millimeter Array), そして GBT (Green Bank Telescope) はアメリカの計画。

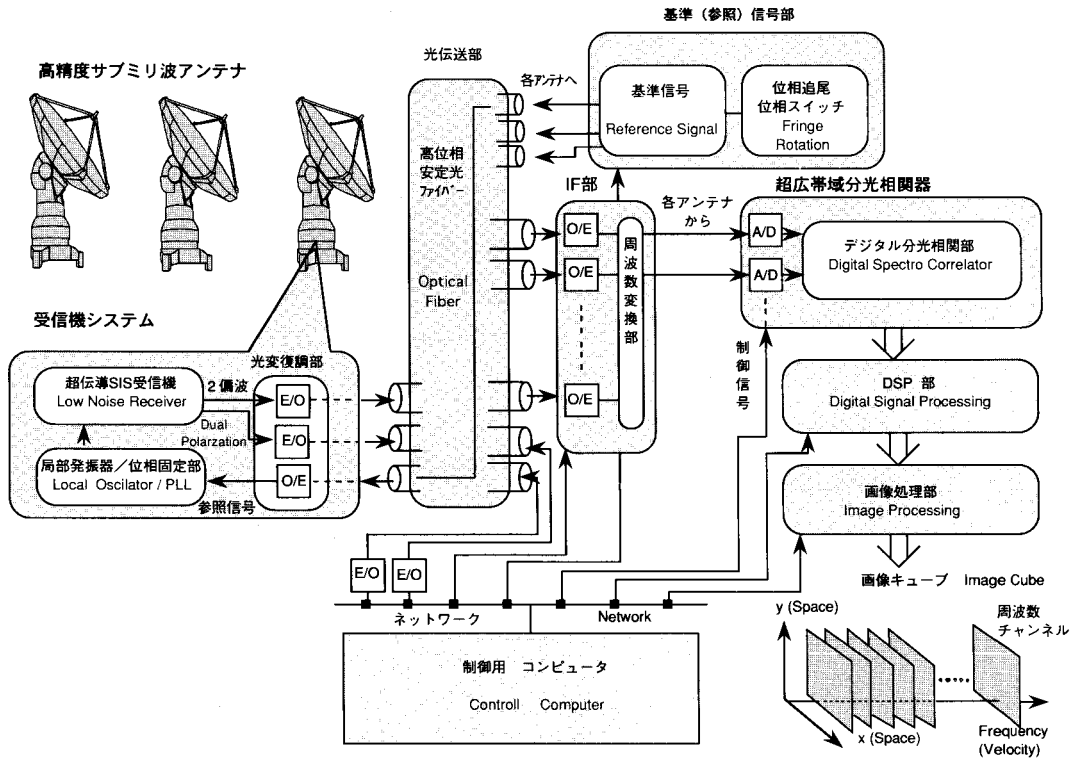


図2 LMSAの装置の概要。相互相関スペクトルを求める分光相関器には、時系列データを分光（フーリエ変換）してから相関をとるFXタイプと、相関をとってからフーリエ変換してスペクトルを求めるXFタイプがある。これらの2つの方法は、分光の方法としては等価である(Wiener-Khinchinの定理)ことが知られている。LMSAではFXタイプを採用する。DSP部は、相関器から得られたデータに対し種々の較正(遅延補正, 位相補正など)や時間積分をほどこす機能を持っている。DSP部からの信号は計算機上は蓄えられ、画像処理部で“CLEAN”法やMEM法(最大エントロピー法)を用いて電波画像に変換される。

造を調べるのに最も適している。これらの領域は、星間空間(温度 10-15 K, 密度 $n(\text{H}_2) = 200 \text{ cm}^{-3}$)に比べれば高密度・高温状態(30-100 K, $n(\text{H}_2) = 10^6 - 10^8 \text{ cm}^{-3}$)であるので、サブミリ波帯の強い、高回転励起の分子輝線を用いることによって、それらの領域のみを選択的に観測する事ができる。

一方、サブミリ波帯での観測で重要になってくるのはダストからの熱輻射である。ダストは、星の重元素合成及び星間空間への放出による化学進化のたまものである。ダストの関連した天文学的に重要な天体現象は、宇宙論から惑星系形成まで様々なものがあるが、その本質的な解明はあまり進んでいない。その妨げとなっているのは、ダス

トを直接的にしかも高分解能で観測することが難しかったからである。サブミリ波での干渉計によるダスト熱輻射の観測は、10 K—数 100 K にあるダストの唯一可能な直接的な高分解能観測を実現する。ダスト放射スペクトルは黒体放射とダストの放射率との組み合わせで決まるが、サブミリ波ではこのスペクトルの光学的に薄い“レーリー側”を観測することが出来、ダスト質量の定量的な測定を行なうことも可能である。原始惑星系円盤中のガス及びダスト成分の両方について調べることができるメリットは、原始惑星系円盤の進化を探る上で極めて重要なことである。Tタウ型星自体は、代表的な星形成領域であるおう

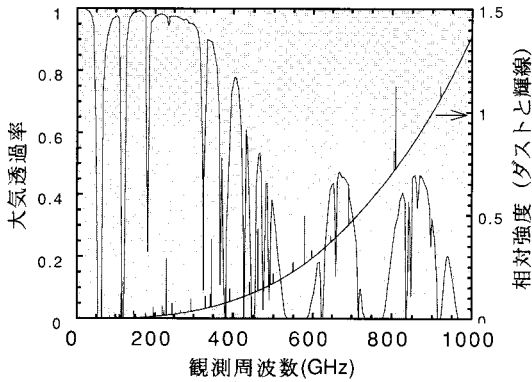


図3 大気透過率と星形成、惑星系形成領域からの電波放射強度（星間塵からの熱輻射及び分子、原子からの輝線放射）の周波数依存性（可降水量 P.W.V.で1mm の場合の計算値）。300GHz 以上のサブミリ波領域では、星間塵からの熱輻射が非常に強くなり、350GHz、650GHz、850GHz などの大気の窓を利用して、効率よく観測を行なうことができる。LMSA では、ミリ波から850 GHz (350 μ m) のサブミリ波帯までの観測を行なう。

し座分子雲やオリオン分子雲などに数百個存在する。中心星の年齢と質量は、HR 図上での星の位置から推定できる数多くの原始惑星系円盤を LMSA で観測することにより、種々の年齢にある原始惑星系円盤の比較ができるので、惑星系形成過程が直接観測的に研究可能になるばかりか、惑星系形成過程の中心星の質量に対する依存性や、連星であった場合等の惑星系形成過程についても調べることが可能である。LMSA による観測的研究から惑星系形成論が飛躍的に進展することが期待される (Ref 8, 9)。

一方、サブミリ波帯は遠方の若い銀河（“原始銀河”）、若い QSOs を研究する上でも重要である。銀河は、100 kpc スケールの原始銀河雲（水素原子、水素分子からなり、重元素はほとんど含まない）の収縮及びそれに伴う最初の星形成（Initial Starburst）で（観測可能な形で）姿を現す。Initial Starburst で作られた大質量星の超新星爆発が起こると、Hubble Time（宇宙年齢）に比べて極め

て短いタイムスケールで星間空間は星内部で作られた重元素で汚染され、若い銀河はダストで満たされると考えられている。ダストは、その後も続く Starburst で作られた大質量星からの UV 光を吸収し数 10 K に暖まり、その熱輻射によって若い銀河は遠赤外線で見える輝きであろう。また、強い UV 光で出来た炭素の光電離領域から強い CII 輝線（静止波長は 158 μ m）が放出される。遠方の天体からのダスト放射や CII 輝線は赤方偏移を受けて、いずれもサブミリ波帯に落ちてくる。LMSA によりサブミリ波帯での極めて深い観測を行なうことにより、これまでほとんど観測されてこなかった $z=1-5$ に存在する原始銀河や“原始クエーサー” (Ref 11, 12) が見えてくるのではないかと期待されている。具体的な試算では、波長 1 mm で連続波の観測を行うと、約 1 万視野のイメージング観測を行い約 1 平方度をカバーすることにより（1 視野あたり 5 分の観測で、トータル 800 時間）、進化効果を考慮しない場合でも、 $10^{12}L_{\odot}$ 以上の $z=1-5$ の遠方の銀河で約数 10 個検出できることがわかっている (Ref 9)。LMSA では、ある限られた領域については、遠方の若い銀河や原始銀河候補の探査を行うことが可能であり、これにより銀河の形成や進化に関する重要な情報を得ることができよう。

3. 大型ミリ波サブミリ波アレイ (LMSA) 装置と特徴 ：高分解能・高感度、クイックイメージング、スペクトルイメージング

以下に、LMSA の特徴についての簡単に解説を行う。

LMSA にとって、0.1"の分解能は本質的である。1"の分解能では、十分に原始惑星系を分解して観測することはできない。しかし、ミリ波やサブミリ波で、LMSA の目指す 0.1"という分解能を実現することは極めて難しい。後述するように、新たな技術開発が必要にである。

表1 LMSA の感度

連続波観測
(観測帯域幅=4GHz, 観測時間(on-source)=8hours, 2
偏波観測を仮定)

5σ=35 μJy at 40GHz
50 μJy at 100GHz
70 μJy at 230GHz (Tsys=300K)
100 μJy at 350GHz
1 mJy at 650GHz (Tsys=2000K)
1.5 mJy at 850GHz

分光観測
(観測帯域幅=1MHz, 観測周波数=300GHz, システム雑
音温度, Tsys=300K, 8hours, 2偏波観測)

5σ=8.7 (a_{FWHM} × b_{FWHM} / 0.1" × 0.1")⁻¹K

表2 LMSA 装置仕様

アンテナ D径=10m
アンテナ数=50
鏡面精度=20μm (×20→400μm)

基線 基線数=1225
最小基線長=20m, 最大基線長=2km

空間分解能=0.1" at f=300GHz

受信機周波数
HEMT 35-50 GHz, 80-115GHz
SIS 80-115GHz, 130-170GHz,
200-300GHz, 330-350GHz
390-490GHz, 690GHz, 820GHz

2偏波受信機システム
80-115GHz, 200-300GHz, 330-350GHz,
(650GHz)

中間周波周波数=4-8GHz (4GHz 帯域幅)

相關器 FX タイプデジタル分光相關器
帯域幅=4GHz (両サイドバンド (USB &
LSB) とともに)
周波数チャンネル数≥10000ch.
最大周波数分解能=40kHz (0.1km/s at
115GHz)
偏波観測対応

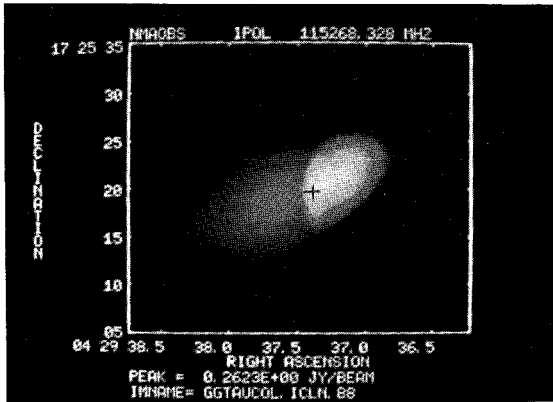


図4 野辺山ミリ波干渉計によるCOの分光観測で見
いだされた若い星 GG-Tau 星の周りの原始惑
星系円盤。太陽系の約10倍 (半径500AU) で、
分子ガスと塵からなり1km/s の速度で回転し
ている。HL-Tau 星で見られたような、自由落下
するガスは見られず、より進化した若い星で
ある。LMSA では、さらに高い空間分解能、感
度でもっと内側(半径10AU-100AU)の惑星系形
成領域の構造に迫ることができる。

一方、0.1"分解能を達成するためには、十分な
観測感度、集光力も必要になる。空間分解能を上
げるとビームの中に入ってくる電波強度は減り、
より高感度が必要であるからであり、特に遠方の
銀河、原始惑星系などからの微弱な天体の検出す
るためには、集光力、受信感度がものをいう。
VLBI で取り扱う非熱的な輻射であれば、輝度温
度は数千億度まで期待でき、それ故1ミリ秒角の

高分解能でのイメージングが可能であるが、ミリ
波サブミリ波で取り扱う 10-100 K の熱的な輻射
では輝度温度はせいぜい 100 K である。このた
め、十分な集光力なしには、0.1"の分解能は達成
できない。0.1"分解能で原始惑星系円盤の分子輝
線観測を行い運動・構造を明らかにするためには
10 m アンテナで 50 素子程度の集光面積が必要に
なる。

感度は、集光力(実行的な開口面積)と検出器
及び大気雑音(システム雑音)で決まる。連続
波電波源の場合には、観測帯域幅も寄与する(感
度 ∝ 集光面積 × (観測帯域幅・観測時間)^{1/2}/システ
ム雑音)。

大型ミリ波サブミリ波干渉計の場合、観測感度
(1σ 検出限界)は連続波に関しては、

$$\begin{aligned} \delta S_{rms} &= \sqrt{2} \alpha k T_{sys}(SSB) / A \eta \sqrt{BtC} \\ &= 28 \alpha (T_{sys}(SSB) / 300K) (\eta / 0.7)^{-1} \\ &\quad \cdot (B / 4GHz)^{-0.5} (t / 8 \text{ hours})^{-0.5} \mu Jy \end{aligned}$$

である。1Jy = 10⁻²⁶ Wm⁻²Hz⁻¹。α はある種の感

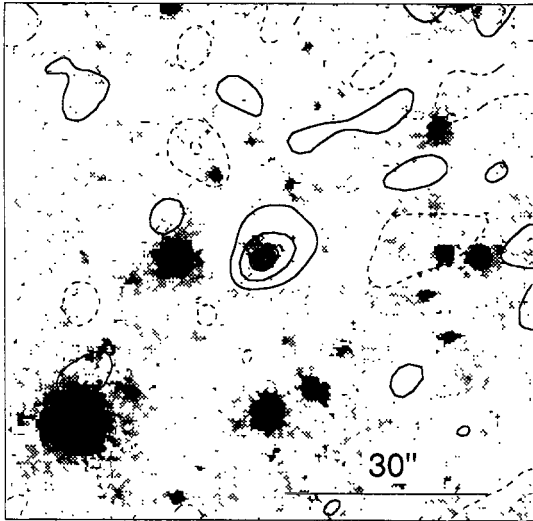


図5 原始銀河の候補である、赤外線衛星で発見された天体 IRAS F10214+4724. 約110億年の距離 (z=2.286) に位置している. 太陽の約 10^{14} 倍の光度を持ち, そのほとんどをダストの熱輻射の形で放出している. 光学像 (青) に野辺山ミリ波干渉計で得られた CO 輝線強度分布 (等高線) を重ねてある. 分子ガスは銀河スケールより小さく分布し, 銀河の中心部に集中している. LMSA は, このような原始銀河候補天体の観測に威力を発揮する.

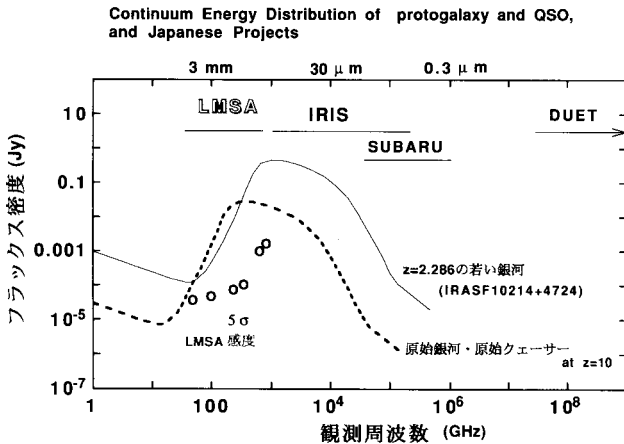


図6 予想される原始銀河, 原始クエーサーの連続波スペクトル (強度の周波数依存性) と LMSA の各周波数帯での検出限界. LMSA では, 銀河形成の時代 (z=5-10) まで遡って, ダスト放射で明るく “輝いている” 原始銀河や原始クエーサーの検出を行なうことができる. これらの遠方の天体の観測では, ミリ波からサブミリ波までカバーする LMSA は, 日本の他の大型計画, IRIS (赤外線天文衛星), SUBARU (8m 光学赤外線望遠鏡), DUET (次期 X 線天文衛星) と相補的な関係にあり, それらの望遠鏡との協力によって, 惑星系形成, 銀河形成の解明に大きく近づくことができるであろう.

度パラメータ (例えば, 1 for 単一偏波 & 単一側帯域 (SSB) 観測, 1/2 for 2 偏波 & 両側帯域 (DSB) 観測), k は Boltzmann constant, $T_{\text{sys}} (SSB)$ は単一側帯域 (Single Sideband) 換算の入力換算システム雑音温度, A は素子アンテナの物理的開口面積 ($\pi/4 \cdot D^2$), η は素子アンテナの開口能率, B は観測帯域幅, t は on-source の積分時間, C は相関関数 ($_{50}C_2 = 50 \times 49 / 2 = 1225$) である.

スペクトル線分光観測に関しては, 1σ 検出限界は以下のようなになる.

$$\delta S_{\text{rms}} = 1800(T_{\text{sys}}(SSB)/300K)(\eta/0.7)^{-1} (B/4\text{GHz})^{-0.5}(t/8 \text{ hours})^{-0.5} \mu\text{Jy}$$

輝度温度に対する感度に変換すると,

$$\begin{aligned} \delta T_{\text{b rms}} &= \delta S_{\text{rms}} \lambda^2 / (2k W_{\text{beam}}) \\ &= 2.5 \alpha (T_{\text{sys}}(SSB)/300K)(\eta/0.7)^{-1} \\ &\quad \cdot (\lambda/1\text{mm})^2 (B/1\text{MHz})^{-0.5} \\ &\quad \cdot (t/8\text{hours})^{-0.5} \times (\alpha(\text{FWHM}) \\ &\quad \times b(\text{FWHM}) / (0.1'' \times 0.1''))^{-1} \text{K} \end{aligned}$$

λ は観測波長, W_{beam} はビームの立体角 (α (FWHM), b (FWHM) はビームの長軸, 短軸方向の直径). $0.1''$ 分解能でも十分な感度が得られ, 数 10 K のガス成分の高分解能観測が可能であ

る。

LMSA のもう一つの特徴は、クイックなイメージングである。これまでのミリ波干渉計では十分な数の空間周波数成分を得るのに、数回のアンテナ配列変えや、地球回転を利用して半日程度連続で観測することが不可欠で、1つのマップを得るのに数カ月を必要とし、一日に観測できる天体の数も極めて制限されていた。LMSA では、一度に1000以上の空間周波数成分を得ることが出来、強い天体に対しては数分の観測でイメージを得ることが可能である。このことはLMSAを用いた大規模なサーベイ観測を可能にする。一方、サブミリ波の観測では、たとえLMSA建設サイト候補地であるハワイマウナケア山の山頂やチリ高地の砂漠(Ref. 13)でも、観測条件(大気吸収、位相ゆらぎ)は時事刻々と変化する(特に650 GHz, 800 GHz帯では観測可能な割合は10–20%程度)。LMSAは、観測条件のよい時間帯を選んで観測することににより、大気変化に左右されないユニフォームなデータ、そして短い時間でも十分な空間周波数成分を得ることができる。サブミリ波の観測では、クイックにイメージングができることは、高分解能でクオリティのよいイメージを得るために必要不可欠なことである。

LMSAでは塵からの熱輻射などの連続波の高感度観測と分子の分光観測の両方を可能にするため、4 GHz以上の帯域幅(8 Gspsのサンプルレート)、10000チャンネル以上の分光イメージングを目指す。そのためには、超高速のA/D変換器や、その後パラレル処理法などの超光速デジタル技術を応用して、超LSIで構成される超巨大なデジタル分光相関器(データレートは1225相関/秒、1相関あたり10000チャンネル)を開発する必要がある。

4. サブミリ波、0.1秒角分解能への挑戦

70年代後半から90年代にかけて、ミリ波天文学は大きく躍進し、また80年代の後半からはサブ

ミリ波天文学が新たに生まれ、多くの天文学的成果が産み出された。この発展は、ミリ波サブミリ波での観測装置の技術革新と天文学との相互の刺激によって生みだされたものであった。ホモロジー構造を応用した大型ミリ波アンテナと電波ホログラフィ法による鏡面測定法の開発、80年代に実現され、今やスタンダードになった超伝導ミキサー(準粒子トンネリングミキサ)素子を用いたミリ波超低雑音受信機、そしてミリ波の干渉技術など、LMSAでサブミリ波での観測を実現するうえでエレクトロニクスをはじめとする最先端の技術の動員、そしていくつかのキイとなる技術の開発が必要である。すなわち、サブミリ波までの波長で効率の良い観測を行なうためには、高精度のサブミリ波アンテナの開発、低雑音のサブミリ波受信機の開発がキイとなるであろう。一方で、干渉計特有な技術としては、0.1"の空間分解能を達成するための革新的な技術を開発する必要がある。

大気中を伝播する電波の波面は、水蒸気の密度の場所・時間によるゆらぎ(通常、大気による位相ゆらぎと呼ぶ)で乱され、そのために電波干渉計で得られるイメージはぼけてしまったり、そもそもコヒレンシーの低下のため長基線での干渉計観測が不可能になってしまう。この大気による分解能の壁は、1" (電波シーイングの平均的な値)ぐらいのところに存在する。電波シーイングの良いサイトを見つけることも重要であるが、それだけでは0.1"を達成することは難しい。この壁を克服するためには、新しい位相補償法(大気による波面のゆらぎを補正する方法)を開発する必要がある。輝度温度がきわめて高く、コンパクトな構造もしくは点状の成分をもつ天体では、“Self Calibration”と呼ばれる方法をもちいて電波波面を補正して、シャープなイメージを得ることが出来る。超長基線干渉計(VLBI)ではこのような方法で非常に高い分解能(例えば100 μ arcsec.)を達成している。しかし、ミリ波サブミリ波干渉計が観測対象とするのは、分子やダストからの熱的な輻

射が主である。そのため、このような方法は一般的ではなく、他の位相補償法の開発が必要である。その一つの方法は、高精度の差動ラジオメータを用いて波面の歪みの原因となる水蒸気密度のゆらぎを検出する方法（大気の位相ゆらぎを大気放射ゆらぎで推定する方法）で、その基礎研究は始まりつつある。

宇宙から来るミリ波サブミリ波帯の信号は微弱であるため、超高感度、超低雑音な検出器を必要とする。40 GHz 帯を除き、LMSA では超伝導素子 (SIS 素子) を受信機に応用し、ミリ波サブミリ波帯で雑音の限界 (量子雑音限界 $\cong hv/k$; 波長 1 mm では 14.4 K (雑音温度換算)) 近くまで雑音レベルをさげ、超低雑音化を実現する必要がある。一方で、サブミリ波帯、350 μm (850 GHz)、450 μm (650 GHz) での干渉計観測を実現するためには、新しいチャレンジが必要である。現在の Nb (ニオブ) ベースの超伝導 SIS 素子ではせいぜい 650 GHz までのミキサー受信機しか構成できない。それ以上の周波数では新たに、ギャップ電圧のより高い NbN (窒化ニオブ) を用いた SIS 素子でミキサー受信機を開発する必要があると言われている。しかし、現時点では、NbN ベースの SIS 素子を安定に製作できたグループは世界のどこにもない。その開発は、今後のチャレンジングな開発課題のひとつであろう。

サブミリ波領域では、分子スペクトル線の観測に加えて、ダストからの熱放射の観測が重要になってくることは既にのべた。短ミリ波や、サブミリ波帯では、このダストの選択放射の偏波観測から星間磁場 (ダスト雲中の磁場) の方向を推定することができ、磁場方向をはかる天文学的に重要な手段となる。LMSA では、偏波観測も考慮して、デュアルチャンネル (2 偏波) の受信機を導入することを検討している。このことは、独立な 2 偏波を検出し ($\sqrt{2}$ 倍だけ) 感度を向上させるという観点でも重要である。

おわりに

—21 世紀の宇宙大航海時代に向けて—

LMSA は、我々人類にとって、宇宙を観測する全く新たな手段である。LMSA を早期に建設、実現することによって、我々は惑星系形成の謎を解明し、人類の起源に迫ることができるであろう。また、遠方の銀河や QSOs の観測から、宇宙創成の謎に肉迫できるかもしれない。LMSA は、このように、21 世紀に人類が新たな宇宙像を獲得するための装置である。

一方、現在日本が進めている大型天文観測装置としては、ハワイ・マウナケア山山頂で建設が進められている SUBARU 計画 (口径 8.3 m 光学赤外線望遠鏡)、宇宙科学研究所を中心に進められている “DUET (Deep Universe Exploring Telescope)” と呼ばれる次期の X 線衛星計画および IRIS (Infrared Imaging Satellite) 赤外線衛星計画など世界有数の装置がある。これらの装置が実現すれば、日本の装置のみでミリ波帯から X 線にかけての電磁波のほとんどの領域をカバーし、しかも宇宙奥深くまで観測ができるようになる。LMSA がこれらの他波長の大型装置と協力し、宇宙の物質の諸基礎過程、物理状態、そして構造の研究を通して、宇宙における種々の天体形成及び進化について総合的に調べることは重要な課題であり、それが 21 世紀の宇宙大航海時代のさきがけになると期待したい。

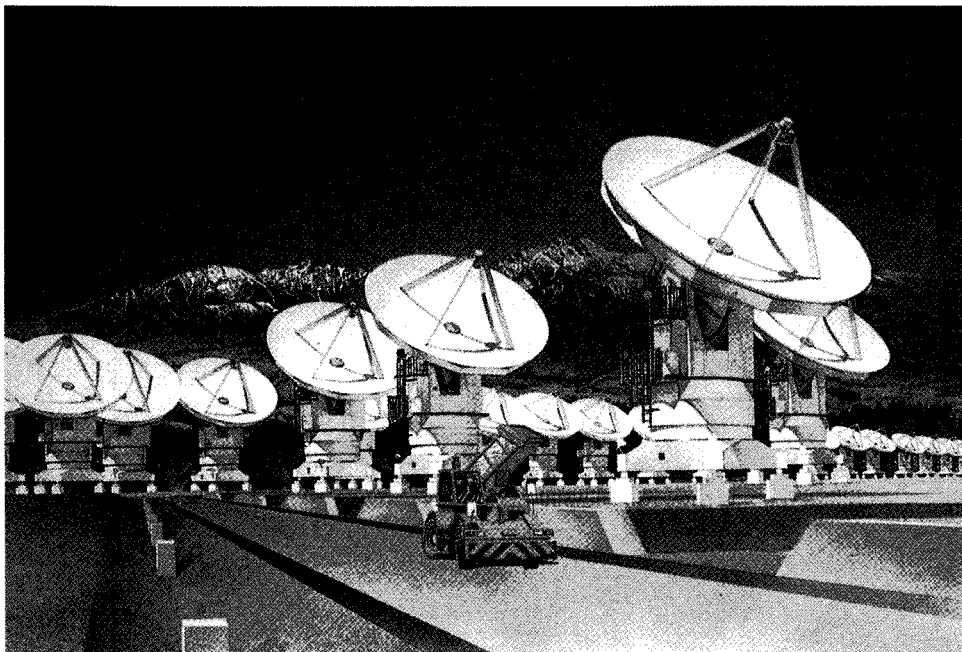
参 考 文 献

- 1) Kawabe R., Sakamoto K., Ishizuki S., Ishiguro M., 1992, ApJ 397, L23
- 2) Sakamoto K., Ishizuki S., Kawabe R., Ishiguro M., 1992, ApJ 397, L27
- 3) Kawabe R., Ishiguro M., Omodaka Y., Kitamura Y., Miyama S.M., 1993, ApJ 404, L63
- 4) Hayashi M., Ohashi N., Miyama S. M., 1990, ApJ
- 5) Handa T., et al., 1994, ApJ, submitted
- 6) Saito M., et al., 1994, ApJ, submitted
- 7) Ohashi N., Kawabe R., Hayashi M., Ishiguro M.,

- 1991, AJ 102, 2054
- 8) 観山正見, 1993, 物理, 48(7), 513
 - 9) NRO Workshop “Large Millimeter & Submillimeter Array によるサイエンスと技術” 集録, 1993
 - 10) 池内 了, 1993, 科学, 63, 82
 - 11) 谷口義明, 1993, 日本物理学会誌, 48, 861
 - 12) Loeb, A., 1993 ApJ, 404, L37
 - 13) 中井, 石黒 (1993) 天文月報 86(12), 517

Abstract: Millimeter and submillimeter astronomy has been developing many researches of astronomically important, invisible phenomena in cool interstellar matter in our Galaxy and external galaxies from the observations of molecular gas and dust; many interstellar molecules has been found and our understanding of star formation process, protoplanetary gas disks around Young stars, and of starbursts in galaxies have been greatly improved.

Large Millimeter and Submillimeter Array (LMSA) is a big project of radio astronomy in Japan. LMSA consists of 50 10-m antennas and covers observing frequencies from 35 GHz (wavelength=8.5 mm) to a submillimeter region, 850 GHz (350 μ m). LMSA will challenge 0.1" spatial resolution never achieved in millimeter and submillimeter arrays. A big advance in researches of planet formation, protogalaxies, and the evolution of galaxies is expected mainly from the submillimeter observations with LMSA.



大型ミリ波サブミリ波アレイの想像図