

図1 LMSAをはじめとする大型観測装置の連続波に対する検出感度 (5σ)。実観測時間はLMSAとVLAについては8時間、すばるについては1時間とし、ASTRO-Fについてはサーベイ観測とポインティング観測の両方を示した。図から明らかなように、LMSAはミリ波の領域ではVLAの波長7 mmでの観測感度を1桁、サブミリ波帯においてもASTRO-Fの遠赤外線での感度を2桁以上も上回る。これは、ASTRO-Fの遠赤外線での空間分解能が1分角程度とあまり高くないためコンフュージョン限界により観測感度が決まっているのに対し、LMSAは非常に高い空間分解能を持つためコンフュージョン限界が極めて低く、観測時間を増やすことで感度を向上させられるからである。

イルになるであろう波長横断的な研究において重要な一翼を担うと期待されている。

2. 今、なぜミリ波・サブミリ波なのか？

LMSAの観測するミリ波やサブミリ波については説明が必要であろう。ミリ波はその名の通り波長が10 mmから1 mm (周波数では30 GHzから300 GHz) までの電波である。AMラジオやFMラジオの電波がそれぞれ波長300 mと4 mの程度、衛星放送でも3 cmの程度だから、極めて波長の短い電

波である。一方のサブミリ波は波長が1 mmから0.1 mmまでとさらに短く、波長が0.1 mmよりも短いものは遠赤外線と呼ばれている。

我々はなぜこのミリ波やサブミリ波の観測に期待しているのだろうか。それは、星や銀河の母体となる星間ガスが絶対温度30度 (摂氏-240度) 程度の極低温であるため、可視光はおろか近赤外線すら放射せず、よりエネルギーの低いミリ波やサブミリ波で検出されるからである。

これまでにも我々は、長野県の野辺山高原に45 m鏡やミリ波干渉計といった世界有数のミリ波観測装置を建設し、これらを用いた観測によって原

始惑星系円盤の発見⁴⁾や形成初期にある銀河の発見⁵⁾などの世界的な成果をあげてきた。名古屋大学や東京大学をはじめとする日本の大学研究者グループも、中小口径のミリ波サブミリ波望遠鏡を開発し、ユニークなサーベイ観測により国際的に高い評価を得ている。LMSAは分解能・集光力・撮像能力のいずれにおいても45 m鏡やミリ波干渉計を大きく上回る装置であり、ミリ波天文学を飛躍的に発展させるとともに、本格的なサブミリ波天文学を開拓することを目標にしている。LMSAでは、分子輝線の観測では0.1秒角の分解能を、そして星間塵からの熱放射の観測では0.01秒角という未到の分解能と超高感度をミリ波サブミリ波帯で実現する。これにより、現代天文学の重要な課題である星・惑星系形成過程の解明と、原始銀河の探査、銀河形成過程の解明を目指している。また、それ以外にも天文学、物理学、惑星科学の広い研究分野において大きな貢献が期待される。

以下では銀河形成過程の解明と星・惑星系形成過程の解明においてLMSAが果たす役割について簡単に触れることにしよう。

3. 宇宙の暗黒時代に挑む

宇宙の晴れ上がり($z=1000$)から銀河の形成時期($z=5$)までの間は宇宙の暗黒時代である。最近では大型の光学赤外線望遠鏡群やミリ波干渉計の観測により、進化の初期段階にあると考えられる銀河が検出されるようになってきているが、銀河の形成過程についてはその基本的なシナリオを含めてほとんど分かっていない。これは、銀河のほとんどが宇宙の誕生後間もなく誕生したからである。

銀河の形成過程を調べるためには、深宇宙を観測することで時の流れを遡る必要がある。遠方天体からの微弱な放射をとらえるためには高い感度が必要であり、遠方天体の構造を調べるためには高い空間分解能が必要である。また、遠方の誕生間もない銀河からの放射はその銀河自体に含まれる星間塵による吸収で減光されるほか、我々との

間に分布する銀河や銀河系内の塵などからの放射によるコンフュージョンの影響を受ける。これらの影響を軽減しつつ遠方天体を検出するためにはサブミリ波帯での高分解能観測が有効である。これには以下のような複数の理由がある。

まず第一に、サブミリ波帯は深宇宙への窓である。というのも、この波長帯は短ミリ波領域に極大を持つ宇宙背景放射と遠赤外領域に極大を持つ星間塵からの熱放射との谷間に相当し(図2)、これらの影響を受けにくいからである。第二に、この波長域では近傍の赤外銀河よりも遠方の原始銀河からの放射が卓越する。これは負のK補正と呼ばれ、遠赤外域に極大を持つ星間塵からの熱放射が赤方偏移してサブミリ波となるような深宇宙の天体の探査に有利に作用する。そして第三に、サブミリ波は高い透過力を持つ。形成初期の銀河はわずか数億年(これは宇宙の年齢が約150億年であることを考えると極めて短い)程度の間には重元素で汚染され、星間塵による著しい減光を受けると予想されるため、可視光では検出されにくいと思われるが、遠赤外線やサブミリ波ではむしろこの星間塵からの熱放射が途中で顕著な減光を受けることなく検出されるのである。

サブミリ波の持つこのようなメリットは、口径15 mのJCMTサブミリ波望遠鏡などを用いた原始銀河探査で実証されている(詳しくは谷口氏の記事⁶⁾を参照)。サブミリ波で検出された天体の多くは可視の対応天体を持たず、予想される遠方銀河の描像と合致している。ただ我々にとっての不幸は、既存の装置だけではそれが何者なのかを知ることができない、ということである。サブミリ波領域でのみ検出されたこれらの天体の正体は、サブミリ波領域での高解像度撮像と分光観測によって明かされる。

また、現在我々が目にしていて銀河は初期の爆発的星形成の直後から現在のような形で存在したわけではなく、何世代にもわたる星形成活動によって現在の形態を作り上げていったと考えられる。LMSAは、形成初期から現在に至るさまざまな赤

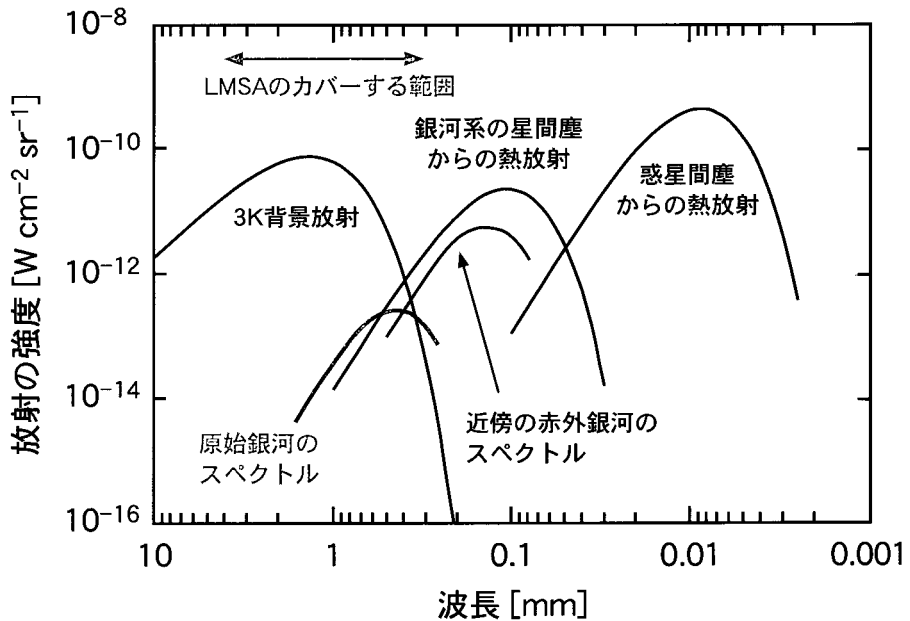


図2 3K背景放射，銀河系の星間塵，惑星間塵のスペクトルと，近傍と遠方の銀河の代表的なスペクトル．サブミリ波帯は3K背景放射と星間塵からの放射の谷間に位置しており，一方で原始銀河の放射のピークに対応している．

方偏移の銀河に対して，星の材料となる分子ガスや星間塵の量と分布を示すことができる．これを近赤外線の観測で得られる星の量や分布と比較することで，さまざまな形態の銀河における星形成史と形態の変化を辿ることができるであろう．

また，LMSAは近傍のさまざまなタイプの銀河について，銀河構造や中心核の活動性の決定要因と考えられる高密度分子ガスの空間分布のデータベースを提供する．他波長での観測から得られる情報との詳細な比較により，星間物質の凝集や星形成，角運動量の輸送など，銀河構造の決定要因の定量解析のための基本的な理解が得られるであろう．

4. 星と惑星系の誕生を探る

宇宙をかたちづくる最も基本的な単位は恒星である．また，生命を育む場として恒星を周る惑星がある．星と惑星の誕生のしくみを知ることは，人間

が宇宙を理解するうえで欠くことのできない課題である．

LMSAのもたらすサブミリ波での高い角度分解能と感度は，この方面の探求においても大きな飛躍をもたらすに違いない．というのも，サブミリ波帯には高い励起状態の分子スペクトルが多く，星や惑星の誕生の直接の母体となる10万-100万個/ccの高密度ガスが選択的にとらえられるからである．

星とそれを取巻く惑星系は，ゆっくりと回転する星間分子雲のなかで形成される．星形成の最初の兆候は，高い密度で中心に集中した分子ガスのコンパクトな塊である．コンパクトとはいっても，さしわたし1万天文単位(0.1光年)ぐらいの，太陽系からみれば巨大なガス塊である．このようなガス塊では，まだ星は生まれていないが，ガスが重力によって中心に向かって落下する様子が見えるはずである．

最近，サブミリ波の観測によって星の誕生の最も

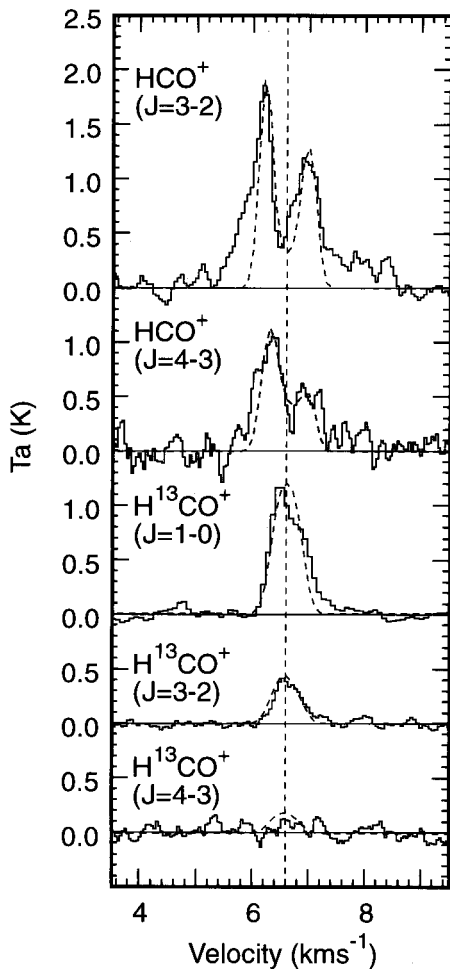


図3 おうし座に発見されたMC27という天体のサブミリ波スペクトルによる観測結果。横軸は周波数のずれを速度に換算したもの、縦軸は信号の強度を示している。中心に向かって比較的低密度の分子ガスが落ち込んでいると考え、我々に近い側から中心に落ち込むもの(赤方偏移成分)は中心付近の高密度のガスを背景にして吸収線として観測されるが、我々から遠い側から落ち込むもの(青方偏移成分)については吸収としては観測されない。したがって、このサブミリ波スペクトルに見られる非対称な吸収は、分子ガスの落下運動を示しているものと考えられる。このような兆候は中心に星があるものについては報告されているが、MC27のようにまだ星を伴わないものについては初めての検出例であり、星の形成の現場をとらえることに初めて成功したものと考えられる。

本質的な瞬間がとらえられた⁷⁾。おうし座に発見されたMC27と名付けられた天体は太陽系から450光年の距離にあるガス塊であり、今のところ光でも赤外線でも全く輝いていない。しかし波長約0.8mmのサブミリ波でみると、中心における水素分子ガス密度が100万個/ccという高い値を示す。しかも、中心から2000天文単位離れたあたりでは、分子ガスが秒速300mくらいで中心にむかって落ち込んでいる様子が分子線スペクトルの非対称な自己吸収となってあらわれている(図3)。

これは、30年あまり前に理論的に予言された原始星コア誕生の瞬間をとらえたものと考えられる。ミリ波帯での観測では周りの分子ガスの吸収によってマスクされてしまうためにとらえることができなかった分子ガスの落下運動が、サブミリ波帯での観測でようやく見えたのである。

残された課題は分解能の向上である。現存するサブミリ波望遠鏡は口径10m級であり、おうし座の距離では数1000天文単位の大さの構造をようやく識別できるに過ぎない。これに対してLMSAは10天文単位に迫る角度分解能をもたらす。注意深い高感度観測を行えば、塵からの熱放射の観測では1天文単位を分解して惑星の形成の様子をとらえることも十分可能である。これにより、従来あまりにも間接的にしか論じられなかった星誕生の瞬間の分子ガスの降着や、原始星コアの形成、このコアによってはねかえされた衝撃波面などが手に取るように見えてくると期待される。

さらに、大小マゼラン銀河などの星団形成の様子など、系外銀河での星集団の形成プロセスの観測にもLMSAは偉大な力を発揮することになるだろう。そのような観測は、星の質量がどのようにして決定づけられるかなどの宇宙進化の法則を解き明かす大きな一歩となるはずである。

5. 着々と進む技術開発と予備調査

LMSAの実現のためには技術開発が不可欠であるが、このための準備も着々と進んでいる。ミリ波



天文学の推進によって蓄積された日本の技術水準は世界のトップレベルにあり、高精度アンテナやサブミリ波帯の超高感度検出器、超広帯域・超多チャンネル分光相関器などの主要な開発項目については具体的な検討と試作を既に開始している。技術開発についても国立天文台と大学が共同であたっており、各開発項目ごとに組織されたワーキンググループを中心に、今後の2-3年間でさらに検討を詰める予定である。

LMSA の建設場所については、サブミリ波での大気の透過率やシーイング、10 km 基線の実現可能性、アクセスの利便性などの観点から世界のさまざまな地域を調査したうえで、チリの北部山岳砂漠地帯のうちの Pampa la Bola-Chajnantor 地域を第一優先の候補とした。アンデス山脈西麓の標高およそ 5000 m のところにあるこの候補地では、大西洋側からの湿った空気がアンデスに遮られるために非常に乾燥しており(年間降水量 100 mm 以下)、サブミリ波の透過率が非常に高いことが我々の測定により分かっている。ほぼ 10 km にわたる平坦な土地が広がっており、大規模な干渉計を展開することも可能である。また、最寄りの村からは車で 1 時間ほどの距離にあり、アクセスも容易である。現在は現地の諸制度の調査や費用の見積もりなど、建設開始に向けた第 2 段階の調査に力点を移している。

6. そして科学は国境を越えて

LMSA 計画は日本において独自に構想が進められてきたが、これと同様の性格を持つ計画が米欧でも独自に検討されてきた。アメリカではアメリカ国立電波天文台 (NRAO) が、センチ波帯での大型干渉計である VLA や VLBA に続く電波天文学の大型観測装置としてミリ波干渉計 (MMA) 計画を構想してきた。一方ヨーロッパでも大型のミリ波干渉計の必要性が認識され、1990 年代初めからヨーロッパ南天天文台 (ESO) が中心になって VLT 以後の大型装置として大型南天干渉計 (LSA) 計画

の検討を開始した。MMA 計画は当初案では口径 8 m のアンテナ 40 基で構成され、ミリ波での広視野を活かした広がった天体の高画質マッピングに狙いを定めていた。また LSA 計画は当初は遠方の微弱天体の観測を重視し、ミリ波での大集光力を狙った口径 16 m のアンテナ 50 基よりなる干渉計の建設を想定していた(図 4)。そしてこれらの計画のいずれもが、各国の将来計画の中でトッププライオリティに位置づけられるに至ったのである。

最近になって米欧は、日本が LMSA で目指しているサブミリ波観測の重要性を認め、日本の構想に同調してサブミリ波に重点を移しつつある。1997 年には LMSA / MMA の結合案や MMA / LSA の融合案など国際協力の議論が活発に行われ、アンテナ口径を 10 m (MMA)、12 m (LSA) にそれぞれ変更するなどの動きが出てきた。その後いずれの計画も LMSA の建設候補地付近を建設候補地として選んだため、日米欧の 3 計画の合同により国際大型干渉計を実現し、飛躍的な観測性能を達成したいという気運が高まってきた。1997 年 11 月に実施された国立天文台の第三者評価で国際大型干渉計を視野に入れた米欧との協力による研究開発を進めるよう提言されたことも踏まえ、日本の天文学組織は、1998 年 11 月に開催された日本学術会議天文学研究連絡委員会主催のシンポジウムの席上で国際大型干渉計構想を推進する方針を打ち出した。米欧の参加者もその方向に基本的に賛意を表明した(長谷川氏の報告⁸⁾参照)。国際大型干渉計では、同規模の 3 計画の結合により、個々の計画に比べて 3 倍暗い天体の検出、9 倍広い天域の探査、10 倍の空間分解能を達成することが可能となる。これは単に観測時間を増やすばかりでなく、質的に大きな飛躍をとげ、ミリ波サブミリ波天文学の発展に計り知れない効果をもたらすであろう。

国際大型干渉計の実現のためには、これまで大型干渉計画のイニシアチブをとってきた日本の役割は重要であり、日本の持つミリ波・サブミリ

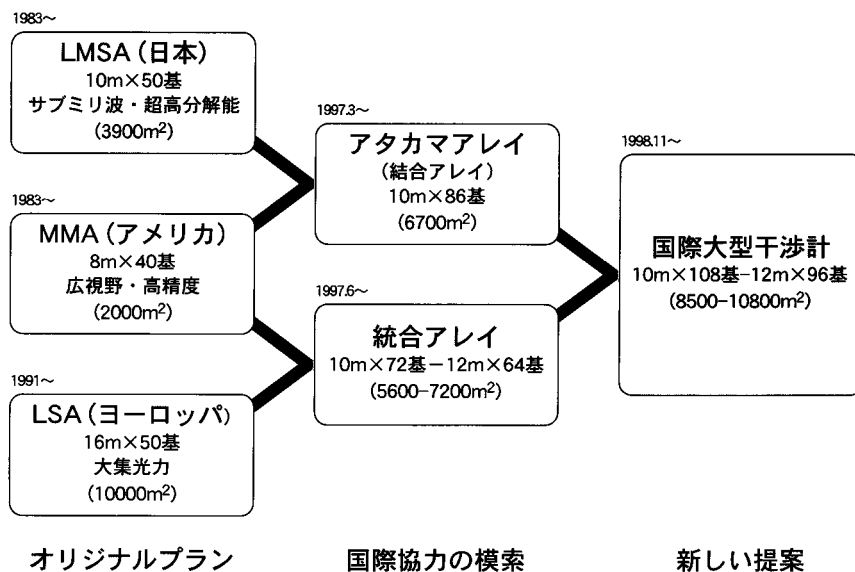


図4 各国の大型のミリ波サブミリ波干渉計計画の推移。

波の高い技術力と相関器技術への期待も大きい。国境を越えた協力による人類にとって究極の観測装置の実現にむけて、我々は今まさに大きな一歩を踏み出そうとしている。

参考文献

- 1) Ishiguro M., & LMSA working group, 1998, Proc. SPIE, 3357, 244
- 2) 中井直正, 石黒正人, 1993, 天文月報, 86, 517
- 3) 川辺良平, 1994, 天文月報, 87, 481
- 4) Kawabe R., et al., 1993, ApJ, 404, L63
- 5) Ohta K., et al., 1996, Nature, 382, 426
- 6) 谷口義明, 1998, 天文月報, 91, 528
- 7) Onishi T., et. al., 1998, PASJ, submitted
- 8) 長谷川哲夫, 1999, 天文月報, 92, 3月

The Large Millimeter and Submillimeter Array (LMSA) Project and the World Array

Masato ISHIGURO, Ryohei KAWABE,
Seiichi SAKAMOTO
Nobeyama Radio Observatory
Yasuo FUKUI
Nagoya University. Nagoya 464-8602

Abstract: LMSA is a top priority project of large ground-based astronomical facilities of Japan, which will provide a 0.01" resolution at millimeter and submillimeter wavelengths and a very high sensitivity corresponding to a 70 m dish. LMSA is planned to be located on a high, dry, and flat site in the northern Chile, and to be operated from around 2008. Its main scientific targets include planetary system formation and galaxy formation/evolution. A big advance in the researches of cosmology, AGN, star formation, ISM, and planetary science is also expected. Discussion about international collaboration toward the World Array has been started.