

ALMA とは何か

川辺良平, 近田義広

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kawabe@nro.nao.ac.jp CHIKADA.Yoshihiro@nao.ac.jp

ALMA (アルマ) は、口径 12 m のアンテナ 64 台から成るミリ波サブミリ波の干渉計で、日本・北米・欧州が協力してチリの標高 5000 m のサブミリ波観測の好適地に建設する地上の究極的な観測装置である。日本では、野辺山宇宙電波観測所に 45 m 鏡、ミリ波干渉計を実現するなど、ミリ波天文学を飛躍的に発展させてきた。アルマは、集光力、分解能、撮像力のいずれにおいても、45 m 鏡、NMA をはるかに上回る装置である。地上では、ほぼ限界の波長 300 ミクロンまでの観測を可能にし、サブミリ波天文学を開拓するとともに、惑星系形成や銀河形成などの現代天文学の重要課題においてブレイクスルーをもたらす装置である。また、アルマと相補的なすばる望遠鏡などの光赤外線の大規模望遠鏡や大規模シミュレーション等との共同により、宇宙における天体の形成と進化を総合的に研究することが可能になり、天文学以外の広い分野の研究にも大きな貢献をし、21 世紀における宇宙や生命の理解の深化に大きな貢献が可能となる装置である。アルマの装置仕様や、アルマ実現に向けた開発研究の最近の動向について紹介する。

1. 装置スペック・設置サイト・期待される性能

アルマでは、光や赤外線では直接観測できない星間雲の中での星・惑星系が誕生する現場や初期宇宙にある誕生過程にある銀河、そして生命の材料物質である分子などの物質を、ミリ波サブミリ波帯での分子輝線やダストからの熱輻射で探査・観測を行なうことを目指している(詳しくは、本月報長谷川哲夫氏の記事参照)。最も近い惑星誕生の現場で、地球型惑星の生まれる現場も調べることが出来るように 0.01" 分解能(ハッブル宇宙望遠鏡の 10 倍の分解能で、100 pc の距離で、1 AU の構造を分解可能)を実現する。受信機システムは、波長 1 cm から波長 300 ミクロンまでの大気窓のほとんどをカバーするように、全部で 8 組の受信機で構成される(9, 3, 2, 1.3 ミリ波帯, 850, 600, 450, 350 ミク

ロンの 8 つの受信バンド)、様々な分子輝線や炭素原子輝線の観測、またダスト放射のミリ波からサブミリ波での観測などが可能となる(図 1)。受信した信号の相関を取り「分光」する役割を持つ相關器は、広帯域性能と高分散性能(すなわち高い

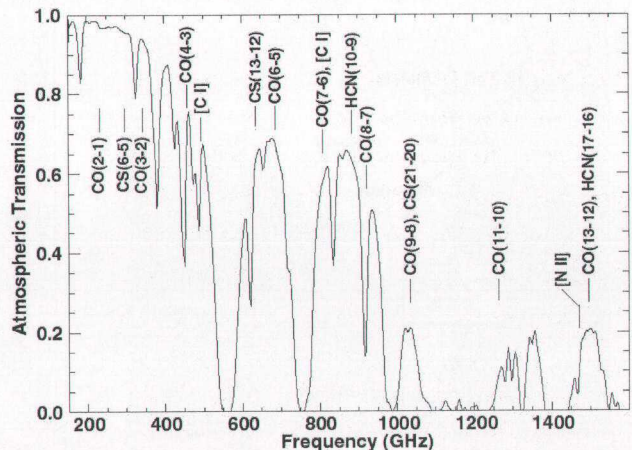


図 1 ALMA の建設サイト (Pampa la Bora) で実測された大気透過率。1 THz を超えるところにも大気窓が見られる。

表 1 ALMA の装置性能の諸元。日本が構想してきた LMSA 計画の諸元を併せて示す。

	ALMA (本計画)	参考: LMSA (初期構想)
アンテナ	可搬型口径 12m アンテナ 64 台 :鏡面精度 20 μ rms :指向追尾性能 0.6" rms 及びコンパクトアレイ (ACA) (口径 7m アンテナ 12 台)	可搬型口径 10m アンテナ 50 台
基線数	2016 (コンパクトアレイを除く)	1225
総開口面積	7240m ² (コンパクトアレイを除く)	3920m ²
最大基線長	14km	10km
移動台車	12m アンテナ運搬用 3 台	10m アンテナ運搬用 2 台
受信機	30GHz-950GHz の 8 組の周波数帯	80GHz-900GHz の 6 組の周波数帯
基準信号/IF 伝送	光ファイバ伝送系 (総データ転送量: 4.5Tbit/秒)	光ファイバ伝送系 (総データ転送量: 1.5Tbit/秒)
相関器	総帯域=16 GHz/基線 分光チャネル数>16384/基線 8064 相互相関	総帯域>16GHz/基線 分光チャネル数>128000/基線 4900 相互相関
計算機システム	同左 (総データ発生量: 9GB/秒)	システム制御、データ 1 次 処理、データアーカイブ用 (総データ発生量: 1GB/秒)

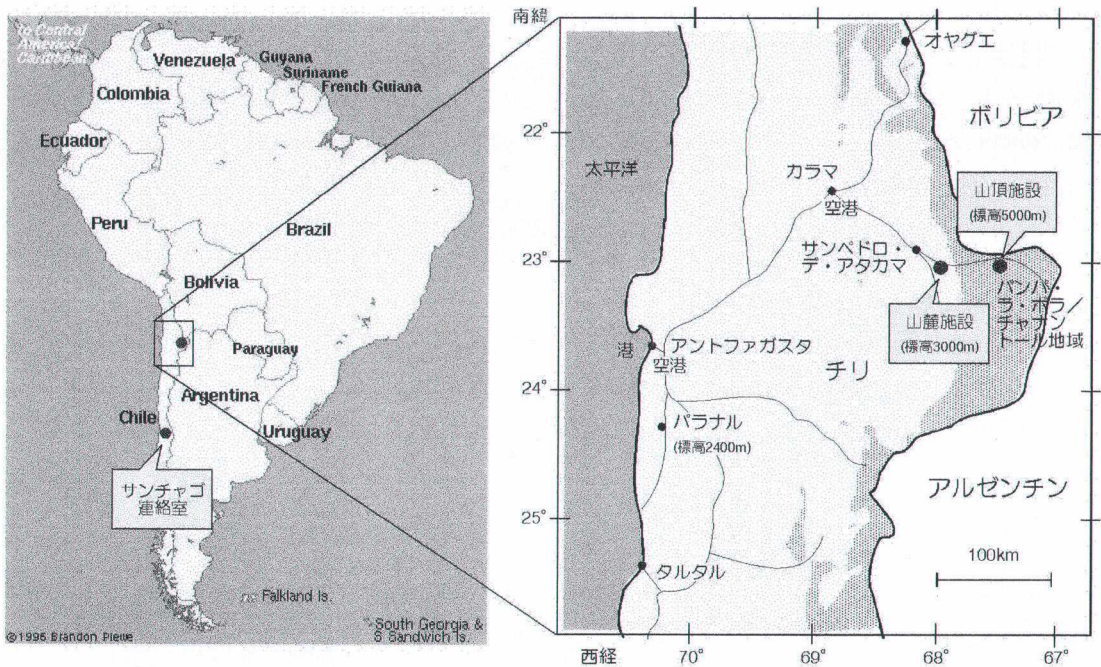


図 2 ALMA の設置サイトとチリの ALMA 観測局 (山頂施設・山麓施設・サンチャゴ連絡室) の位置関係。

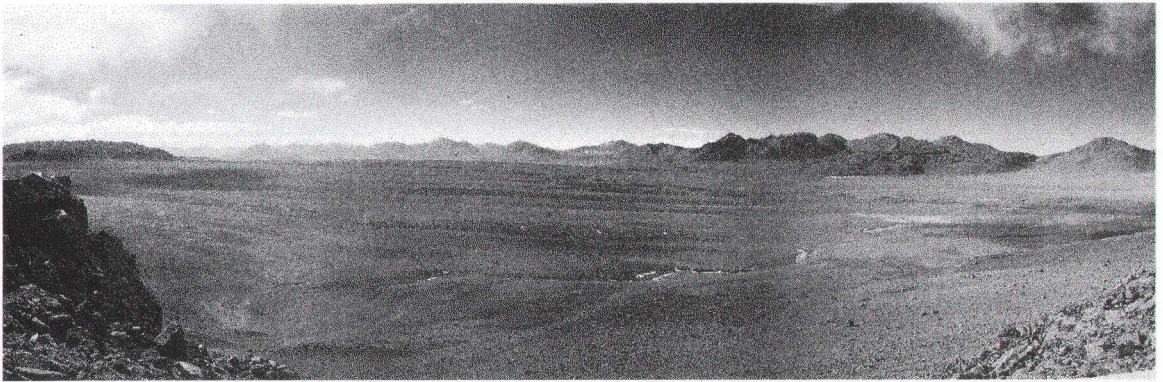


図3 Chascon 山の中腹から展望した, ALMA のサイト (Pampa la Bora 地域). 前方には, 約 3km 四方に渡り平坦な土地が広がっている. 14km 基線を得るための平坦地も隣接して存在する. 写真中央 (やや左寄り) が, ASTE10 m 鏡の設置サイトである.

周波数分解能) を合わせ持つように考えられている. 前者は, 原始銀河等からのダスト放射を感度良く受信するため, 後者は, 原始惑星系円盤や, また原始星周囲の収縮中の分子雲コアなどのガスの運動を詳細に調べるために, 高い速度分解能 (およそ 0.03 km/s ; $R = 10^7$ に対応) が必要なためである.

12 m アンテナの台数は, 64 台であるので, 一度に 2016 基線 (空間周波数成分) の Visibility (干渉縞の位相・振幅) を得ることができ, スナップショット (数分の短い時間) でも非常に高品質な電波画像を得ることが可能である. これはアルマの特徴の一つであり, 多くの天体のサーベイ観測, それを基にした統計学に道が開かれる. 一方, 口径 96 m の単一アンテナ相当の大集光力をミリ波サブミリ波で実現している, これにより初期宇宙の原始銀河の探査が可能となる. アルマの仕様は, LMSA^{1), 2), 3)} (日本の初期構想) の仕様とともに表 1 にまとめた.

サブミリ波観測のためには, 水蒸気量の極めて少ない高山地帯が適している. アルマの建設サイトは, チリ北部のアタカマサイト (標高 5000 m の Pampa la Bola/Chajnantor 領域) で, ここは世界の中でも最もサブミリ波に適したサイトの一つであり

(図 2), アンテナを 10 数 km の範囲に展開できる平坦な場所がある (図 3). 国立天文台では, 1992 年よりチリで予備の調査を始め, 1994 年からは大気の透過率, 電波シーイングや気象を測る装置を持ち込み本格的な調査を進めてきている. 最近では, 東大・物理の山本氏のグループとも協力し, サブミリ波での透過率の集中的な調査を行ってきたが, それらの結果から, 1) 冬季の約半分の時間 (昼夜を問わず), 夏季でも約 25% の時間で, 350,450 ミクロン波帯で大気の光学的厚みが 1 を下回り, 効率的な観測が可能であること (この時間数はハワイ山頂より 5 割多い), 2) 冬季の良い条件では, 可降水量がわずか 0.25 mm であることなどが明らかになり, 定量的にサイトが優れていることが実証されている (図 1 参照). ベストに近い大気条件での期待されるおよその観測感度 (連続波の 16 時間観測: 5 シグマレベル) は, 波長 3 ミリ, 1.3 ミリ, 850, 450, 350 ミクロンで, およそ 7, 9, 12, 70, 100 μJy である (図 4 参照, 波長 3 mm では, NMA のおよそ 100 倍の感度).

64 台の 12 m アンテナから構成されるアルマといえども, 多種の観測に対応するために, アンテナ移動を行い配列を変更する. 最小な配列は, 出来る限り狭い領域 (およそ直径 150 m) にアンテナを

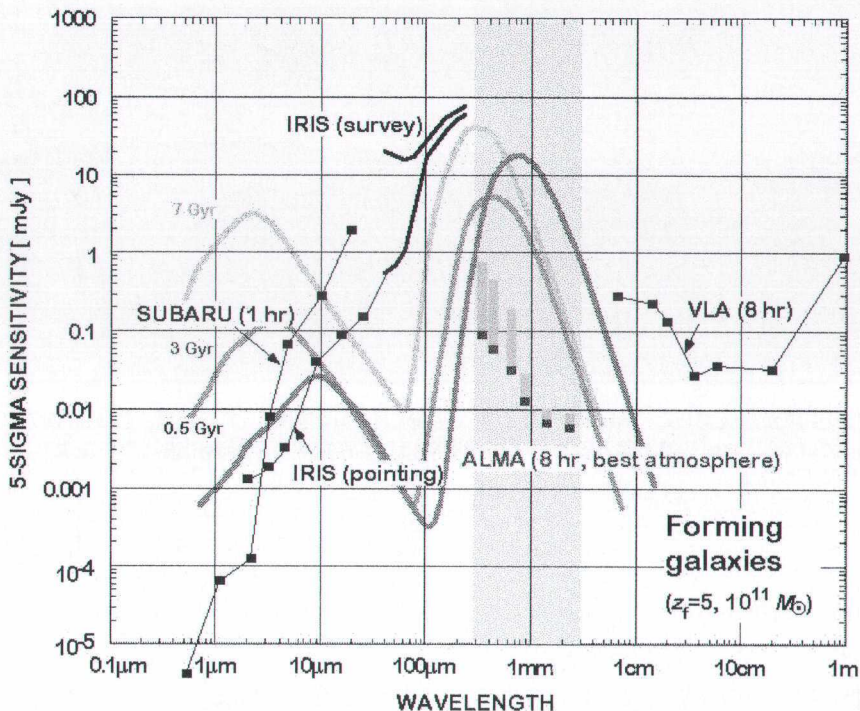


図4 ALMAの5シグマ検出感度(連続波観測の場合)。最良の場合が下に位置した四角で、平均的な大気の状態の時の感度は、たての棒の上の部分。観測時間は、16時間を仮定。

配置する「最小配列」といわれるものである。この配列は、広がった天体の広視野モザイク観測(たとえば、SZ効果のイメージング観測)や、また出来るだけ高い感度での、(高い角度分解能を必要としない)プランクスカイでの遠方銀河探査などに用いられる。一方最大配列は、標高5800mのChascon山を取り囲む直径がおよそ14kmのリング状の配列であり、これにより波長1ミリで0.01秒角を実現する(ビームサイズは、観測波長に比例して小さくなる)。この間を埋める配列が必要であり、配列の検討が進められている。欧州からは、スパイラル状にアンテナを配置する案がだされている。この案では、自己相似配列にすれば、配列サイズの変動的な変更が可能で、またいつでも比較的サイドロープレベルの低い合成ビームが得られることなどから、現在広く支持されている。

また、より広がった天体の高精度のイメージン

グを行なうためには、12m鏡を単一鏡として用いたマッピング観測でDC成分も追加して画像合成を行なう手法を採用する予定である。しかし、DC成分と12m鏡で得られる低空間周波数成分の間にデータのギャップが生じ、これが特にサブミリ波での画像の質の劣化の原因となるため、それを補いイメージの信頼性の向上を可能とする口径7m程度のアンテナ12台程度からなるACA(アタカマ・コンパクト・アレイ)も導入することになっている。

一方で、上述した取得データの質・量の画期的な改善に加えて、ソフトや運用方法の工夫により、アルマを電波プロパーだけでなく、誰でも使用可能な撮像装置とすることを目指している。

2. 生きる日本の技術

アルマを実現するためには、鍵となる最先端技術(特にサブミリ波技術)へ挑戦し、また最先端

技術を応用しての量産や 5000 m サイトでのそれらの装置の安定な運用・保守へも挑戦することが不可欠となる（そして技術面以外でも、3極で進めることから発生するマネジメントの困難さ等を克服することが不可欠）。特に本格的な建設に入る前に、技術開発を行い量産のめどをつけるために、多くの時間、多くの人、多大な費用を要するが、アルマのような大計画においては、避けて通れず、計画実現の一つの条件でもあろう。米欧では、97年、98年からそれぞれ正式な Phase-I 予算で、設計・開発を開始している。日本でも、正式予算化はないものの、同様な時期もしくは、それ以前より、ミリ波サブミリ波の主要装置の開発を進めてきている。特に、日本は当初からサブミリ波観測の天文学的な重要性を考慮し、サブミリ波アンテナ、受信機、そして高分散でしかも広帯域な相関器の技術等の開発を集中的に行なってきた。3者 ALMA の方向を目指す方針を決めた、99年の3者決議以降は、できる限り米欧と協調・調整した設計・開発を進めてきており、さらに今年度4月の3者決議後は、3者合同の装置開発グループ等を形成し、そこで開発テーマや進捗の確認等を行いながら、設計・開発が進められている^{3), 4)}。

アルマの装置仕様は、ASAC (ALMA 科学諮問会議)でも議論され、また現在の技術レベル等を判断して、策定され、ほぼ内容は確定している。ここ1-3年の設計・開発の主たる目的は、その仕様で試作機を作り（場合によっては、複数の種類の試作機）、技術の評価・実証を行い量産機の詳細仕様・設計を固めることにある。サブミリ波技術や相関器技術に関しては、日本に対して米欧からも大きな期待が寄せられており、この間の議論で固まった分担案には、それらを反映させ、結果として日本がある程度満足できるものとなっている。その分担案では、日本は具体的に12 m アンテナの1/3の製作、最も波長の短いサブミリ波受信機、高分散分光器の開発・製作を行なうことになっている（これ以外に、インフラ整備や計算機・ソフ

ト開発関連でも1/3程度の分担を行なうことになっている）。しかし、実際に分担案を決めるにあたっては、3極の間で厳しい議論、様々な交渉があり、平坦な道のりではなかった。1月に一回の膝詰め会議、1週間に1回のレギュラーな電話会議や臨時の電話会議、そして頻繁な、場合によっては、2-3時間毎のメールの交換を昼夜関係なく行うこともあり、体力・気力が要求される交渉であった。ここでは、現在 ALMA 実現に向け米欧と協調して進めている技術開発（主にアンテナ、受信機システム、分光相関器など日本がアルマに持ち込む技術）やまた ASTE 計画についての現状などについて報告する。なお、ALMA の概要、サイエンス、観測装置、設置場所などのより詳細な説明やまた、参考文献は、「ALMA 計画説明書」⁵⁾にあるので、それを参考にしていきたい。

1) アンテナ

ALMA では、波長 950 GHz（およそ波長 300 ミクロン）までの観測を目指しており、アンテナにも高い精度が要求される（表1参照）。これまで、サブミリ波のアンテナは、ほとんどアストロドームやレドームに収納され日射や風の影響を極力低減し、サブミリ波観測を実現してきた。一方、ALMA ではアンテナ配列を変えるためにアンテナを頻繁に移動させるので、ドームの導入が不可能であり、風・日射にさらされた条件でも、高精度なアンテナを実現する必要がある。このようなアンテナの開発は、非常にチャレンジングであり、量産を前に日本、アメリカ、ヨーロッパの3極でプロトタイプアンテナの製作と、評価試験を行う予定である。そして、それをもとに統一デザインを策定し、アンテナの量産を行なうことになっている（統一デザインで、3極が1/3ずつアンテナを作る予定）。統一デザインにすることで、運用コストの低減、イメージング精度向上が期待できる。米国は、現在 Vertex-RSI 社（アメリカ）で既にプロトタイプアンテナの製作に入っている。欧州は、EIE 社（イタリア）

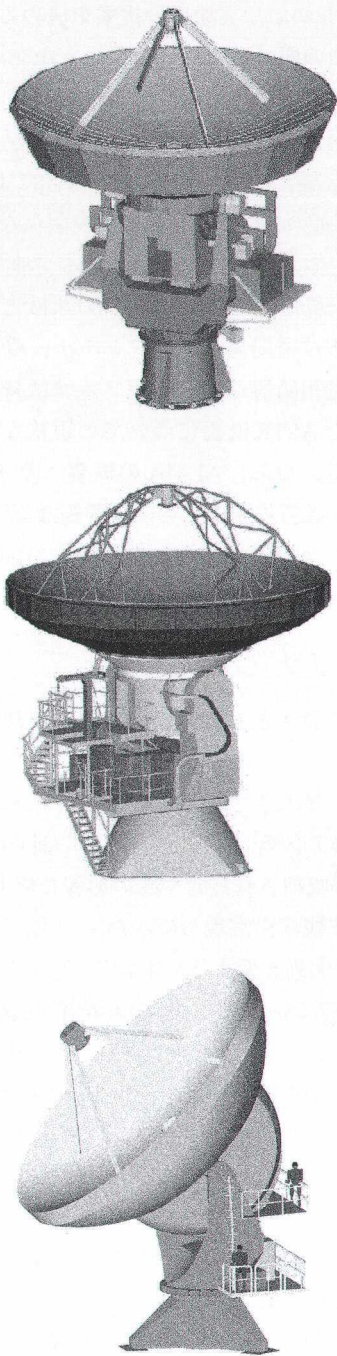


図5 上から順に、日本、米国、欧州のそれぞれの12 mプロトタイプアンテナ（模式図）。2003年度には、米国ニューメキシコ州ソコロで、3台並べて評価試験を行なう予定である。

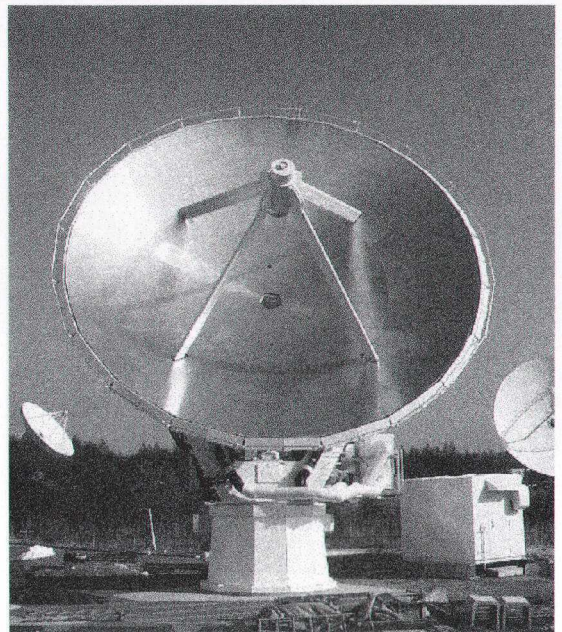


図6 超高精度10 mサブミリ波アンテナ（ASTE 10 m鏡）。2000年3月に野辺山に完成。2001年11月にチリへ輸送し、ALMAのサイト（標高4800m）に来年2月に設置する予定。

が最後のデザインの詰めを行なっている最中である。日本はプロトタイプのデザインの検討を行なっており、来年度の研究開発の予算が通れば、直ぐに建設に入る予定である。それぞれのアンテナは、ALMAの基本仕様を満たしつつも、デザインには特徴がある（図5）。日本のプロトタイプアンテナの基本デザインは、日本が既に開発・建設した超高精度10 mサブミリ波アンテナ^{6), 7)}のデザインを基にしている。このアンテナは、現在ASTE（アステ）10 mアンテナと呼んでいる（図6；ASTE計画について後述）。主鏡面部は、アルミモノブロックの切削パネル（ある固まりからNCフライスで削り出す方法で製作）からなり、太陽光を乱反射させる特殊な表面処理を施す。ASTE10 m鏡では、80 cm角のパネルで、5マイクロン（rms）の精度を実現しており、かつ裏面をリブ状に肉抜きして平米15 kgと軽量なパネルを実現している。パネルを

支える主鏡部は、CFRPで出来たハニカムサンドイッチボード（厚さ約15 cm）からなる円盤構造とその下面を支えるCFRPチューブのトラス構造からなる。円盤構造を導入したことで、高精度の小型主鏡パネルを支えることを可能にしている。円盤部には、パネルに応力をかけないように3点で支えるためのパネルの支持機構が取り付け可能である。ASTE10 m鏡の場合は、全部で205枚のパネルを支持するのに615個のアクチュエータが取り付けられている。仰角軸、方位軸ともに駆動方式はギア駆動だが、ASTE10 m鏡では非常に精度の高い歯車とベアリングの実現で、従来の常識を覆し高精度の駆動性能を実現している。また、超高精度のエンコーダが開発されており、これを組み合わせることにより高性能の駆動・追尾が可能になると期待されている。日本のプロトタイプは全体重量が約90トンとなる予定である。Vertex-RSIが作る米国のプロトタイプアンテナの特徴は、主鏡部は、CFRPのハニカム板材で箱構造で構成しており、我々のCFRPトラス構造とは大きな違いである。副反射鏡の支持柱は非常にユニークで、風負荷に対して剛構造の設計となっており、また電波をさえぎってしまう射影効果が少ない。主鏡面パネルは、キャストアルミ・パネル（裏面のリブ構造を鋳造で製作し、表面だけNCフライスの切削）を採用している。総重量はおよそ100トンと若干重いアンテナになっている。数年前のことであるが、米国のアンテナ開発に携わっていた人々は、我々が製作しようとしていたASTE10 m鏡の重量（50トン以下を目標にしていた）を聞いて、「そんなに重いアンテナを作るのか？俺たちの12 mアンテナでも60トンぐらいなのに」と驚き、「そのぐらいの重量がないと、風や重力などに対して剛構造のアンテナにできないし、サブミリ波観測の要求を満たせないのだ」と答えたことがある。我々は、12 mプロトタイプアンテナのデザイン過程では軽量化の努力をした。一方、米国は我々の言ったことの正しさをデザイン過程で認識したに違いない。重量におい

て逆転したと考えるよりは、主鏡構造は多少違って、お互いのデザインがほぼ近いものになったと考えるべきであろう。一方、ヨーロッパのアンテナの特徴は、CFRPを多く使用して軽く作り、アンテナの高速駆動を可能にする構造となっている点である（位相補償法の1種である高速アンテナスイッチング法のために、高速駆動は重要な性能の一つ）。CFRPの板材とハニカムの板材の2種類を使って主鏡構造を作り、またセンターハブも受信機室もCFRPで作り軽量化している。主鏡パネルについては、当初は、革新的なアイデアを検討していたが、現在は米国と同様な保守的な方式を検討している。駆動はダイレクトドライブで、追尾精度の向上を目指している。予想総重量は45トンと驚くべき軽さである。日米欧の3種のアンテナの主鏡部の構造の違いを家にたとえると、米欧が面で構造を作る2×4（ツーバイフォー）で、日本が、伝統的な柱で支える「従来工法」と2×4の良いところ取り（もしくは、複合案）だといえる。3者のスケジュールが予定通り進むと、来年度末には、3台のプロトタイプアンテナが揃い、干涉実験等も行いながら評価試験をおよそ1年間行なう予定である。その後、統一デザインの策定（2003年度末）、量産機の契約（2004年度中）、各極の第一号機のチリサイトへの搬入（2005年度中）という段取りになっている。さて、2年後にはどの「工法」に軍配が上がっているだろうか（日本でアルマのアンテナの開発に日々骨身を削っているNU氏は、日本のアンテナに自信を持っている）。

2) 受信機システム

受信機は、波長1センチから350マイクロンまでを、8組の受信機でカバーする計画である。それぞれの波長の受信機は、1つの「カートリッジ」にまとめられる。8組の受信機カートリッジは、一つのクライオスタットにモジュールとしてはめ込んで使用することになっており、その全体はアンテナのカセグレン焦点に設置される。日本は、この

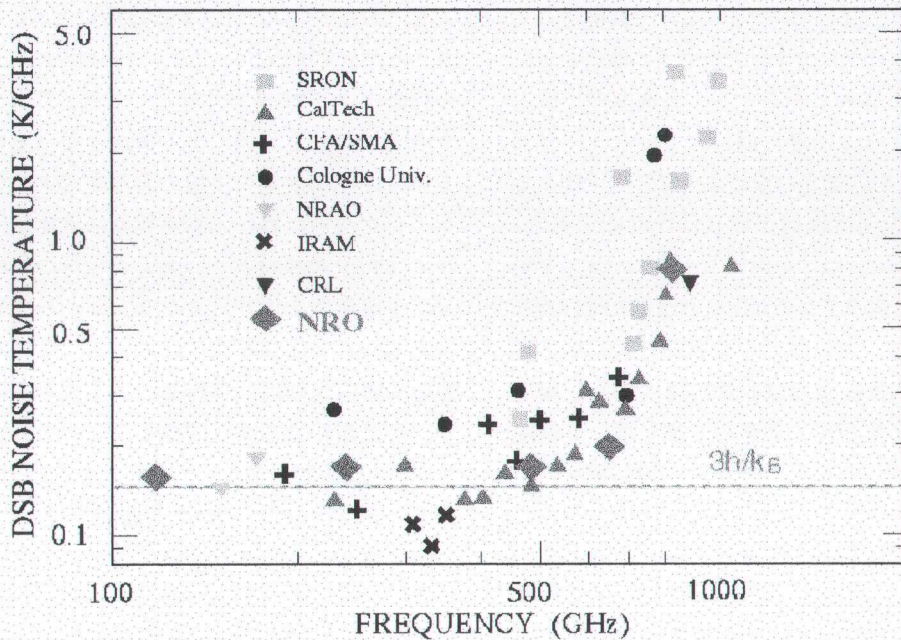


図7 世界で達成されているミリ波サブミリ波帯の受信機雑音温度（量子雑音と比較するため周波数で規格化されている）。野辺山宇宙電波観測所（NRO）では、世界の最高レベルの受信機を実現しており、700 GHz 以下では、量子雑音の3-4倍のところまで低雑音化に成功している。今後の課題は、700 GHz 以上でのさらなる低雑音化。

内 band-10 と呼ばれる最も波長の短い波長の受信機カートリッジ（周波数では 797-950 GHz、波長 350 ミクロン帯）を含めて3つのバンドの開発・製作を担当することになっており、既に試作機の開発を実施している。この band-10 は、天文学的にも重要であるばかりか、サブミリ波の先の THz（テラヘルツ）領域の入り口であるため技術的に非常に重要なバンドで、サブミリ波の代表格である。国立天文台では、受信機の中でも技術的に最もチャレンジングなこのバンドの開発にあたり、サブミリ波用の超伝導ミキサ素子の基礎的な開発、それを組み込んだミキサの開発を始め、さらにはカートリッジ型の受信機システムの冷却系、そして光局部発信源システムの開発に力を入れている^{8), 9)}。電波天文では、100 GHz 帯（波長 3 ミリ）より高周波では、超伝導トンネル素子である SIS（Superconductor-Insulator-Superconductor）をミキサとして

用いた受信機が主流となっている。これまでは、ニオブ（Nb）をベースにした SIS 素子（Nb/AlOx/Nb 等）を開発し、天文観測に応用してきた。しかし、ニオブ（Nb）の素子ではギャップ電圧が低く、波長 400 ミクロン以下の観測に適さない。そのため、band-10 で超低雑音受信機を実現するためには、ギャップ電圧が Nb に比べて大きい窒化ニオブチタン（NbTiN）や窒化ニオブ等を用いた超伝導素子が不可欠となる。天文台では、ニオブの SIS 素子で極限の性能追求を行い、観測に使用可能な band-10 の受信機開発を行なうとともに、また同時に窒化ニオブチタン（NbTiN）素子の開発の準備を開始している。今後は、理化学研究所やまた一方では、窒化ニオブの素子の開発を開始している通信総合研究所のグループと共同して、また必要な素子の製造設備の導入を行い、サブミリ波の素子開発を行なってゆく予定である。一方、band-10 より低周

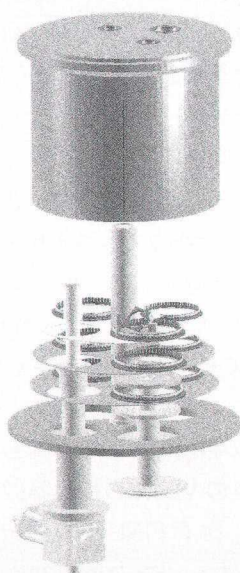


図8 関本等によって開発されたカートリッジタイプの受信機（プロトタイプ）の構造（3次元イメージ）。カートリッジの抜き差しが簡単にできる熱接触の構造が取り入れられている。デュアーの上面に3つの入力窓があるが、実機は、8つの窓が並ぶことになる。このデザインで試作機の製作を行い、評価試験が始まっている。

波数の受信機の開発に関しては、国立天文台では理論的に到達限界である量子限界の約3倍の受信機雑音を達成しており、世界のトップクラスの受信機の実現に成功している（図7）。これらの受信機は、45 m 鏡、ミリ波干渉計、また富士山望遠鏡などに搭載され観測に用いられている。しかし、アルマでは広い周波数帯域での低雑音性能が要求されており、それらについても、今後改良・開発が必要となっている。日本分担となっているミリ波帯の受信機カートリッジの開発は、大阪府立大、名大、東大などグループを中心に進められている。

受信機の冷却システムの開発についても、米欧からも大きな期待が寄せられている。アルマの受信機の冷却システムは、全部で8つの受信バンド（カートリッジ）を冷却する必要がある、かつメンテナンス性を考えて、カートリッジをモジュール化し、簡単な抜き差しでモジュールの交換が出来る

ような設計を目指している。しかし、このような設計を可能にする熱接触等の構造が今までほとんど無かった。日本では、いち早く独自のアイデアを導入してこの開発に取り組み、そのような構造を実現している。また一方では、冷却システムの屋台骨である4K冷凍機の開発がある。複雑なJT（ジュール・トムソン）弁を用いなくて、GM（Gifford-McMahon）サイクルのみの簡単な構造で信頼性の高い冷凍機は、日本のメーカーのお家芸であり、既に2段の温度ステージの冷凍機の技術は確立している。アルマで要求されているのは、3段の温度ステージGM冷凍機である（中間ステージで、IFアンプを冷却するため）。国立天文台では、国内メーカーと共同でこの冷凍機の開発を進めており、アルマの仕様に近い冷凍機の実現にこぎつけている。この2つのキーとなる技術を組み合わせることにより、日本が初めてアルマ型の冷却システムの開発に成功している（図8）。この冷却システムは、評判が良く、米欧の受信機開発グループからは、カートリッジ評価用に我々の分も製作してほしい、との依頼がきている。一方、受信機の局部発振源（通常LOと言う）のまったく新しいタイプであるフォトダイオードを用いた光LOの開発も日本で進められている。これまでは、数GHzの参照信号に位相ロックされた3 mm 波帯のGunnダイオード発振器と周波数通倍器でミリ波からサブミリ波のLOを作り出すという方式が一般的に用いられてきたが、光LOは、光ファイバで2周波数のレーザー光を伝送し、アンテナサイトでその差周波を取り出してミリ波サブミリ波信号を取り出すという画期的な方式である。この方法の実現に大きく貢献しているのは、NTTフォトニクス研究所が開発した、レーザー光からサブミリ波を取り出すことの出来る超高速フォトダイオードで、この間NTTと国立天文台で、光LOの開発を進めてきている。この方式のメリットは、最高1 THzに近い高い周波数まで、SIS受信機に必要なLOを取り出すことが可能となること、光ファイバーを用いて高精度に参照信号

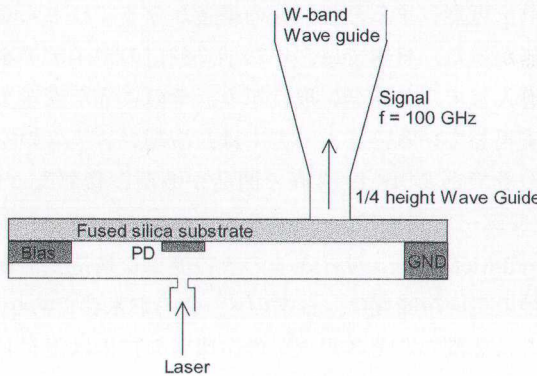


図9 100 GHz用の光LOの模式図。PDがフォトダイオードで、LO信号は導波管モードで得られる。このタイプの試作機で、-1.5 dBmの導波管出力を得ることに成功している。

(すなわち2色のレーザー光)をアンテナサイトまで送信が可能となることである。これまで、100 GHzで十分な出力のLO信号の取出しに成功しており(図9)、今後サブミリ波での信号取り出しが重要な課題となっている。高速光通信のための要素技術は近年急速な進歩を遂げており、今後一層の技術革新が期待される。

3) 相関器システム

相関器は、各素子アンテナからの信号間の相互電力スペクトルを計算する超高速専用計算機であり、出来るだけ広い帯域幅の信号を高い周波数分解能で観測できる性能が要求される。装置の大きさは帯域幅の1乗、素子アンテナ数の1~2乗、周波数チャンネル数の2を底とする対数~1乗に比例する。何乗に比例するか幅があるのは装置の方式によって幅があるからである。

野辺山宇宙電波観測所開設時の20年前のスペックとALMAを比較すると：

帯域幅	320 MHz	→	16 GHz	50倍
素子数	5	→	最少64	最少13倍
チャンネル数	1024	→	最少8192	最少8倍

先ほどの「何乗」というのに当てはめると、最低

でも $50 \times 13 \times 3$ と約2000倍、最悪 $50 \times 169 \times 8$ で約7万倍の物量ということになる！が、一方、技術の進歩で物量は2年で半分くらいになったのでこの効果で千分の一ということで、結局、数倍から数十倍の物量で実現できることになる。「広帯域、高周波数分解能」をどこまで極められるか、かつ物量をどれだけ小さく(つまり安く)出来るかが、頭と腕の見せ所である。相関器は、日本が得意とする装置の一つである。というのも、XF型、FX型と2種ある相関器のうち、FX型相関器は日本で発明されたといっても良いもので^{例えば10)}、NMAやVSOPの相関器として活躍しているばかりか、米国NRAOのVLBAの相関器にもその方式が採用されている(Xは相関、Fは分光のためのフーリエ変換を意味する。FXは、最初にフーリエ変換し、その相関を取ることを意味し、XFはその逆)。日本としては、この「日本式」の相関器がLMSAの相関器として最適であると考えてきた。というのも、サブミリ波には、ミリ波以上に多くの分子輝線があると同時に、ミリ波以上に強いダストの連続波がある。これら両方を効率良く、精度良く観測するためには、非常に広帯域で、しかも0.1 km/sを上回る速度分解能も要求される。FXは、これらの科学的な要求を満たす最適な相関器である。すなわち、

(1) アンテナ数Nに対して、XF型がNの2乗で、FX型は1乗と2乗の中間の増え方で物量が増えるので、アルマのような $N = 64$ の大型の干渉計では、FXが有利である。

(2) また、同じ総帯域幅一定の条件で分光チャンネル数をmとするとXF型がmの1乗で、FX型は2を底とする対数で物量が増えるので、「広帯域『かつ』高分解能」が必要なアルマの場合、この点でもFXが有利である。もちろん、こうした方式上のことだけでなく、「雑巾と同じで、頭も絞れば絞るだけ知恵が出てくる」という方針のもと、さまざまな工夫を盛り込んでLMSA/ALMAの相関器仕様案を練り上げてきた¹¹⁾。

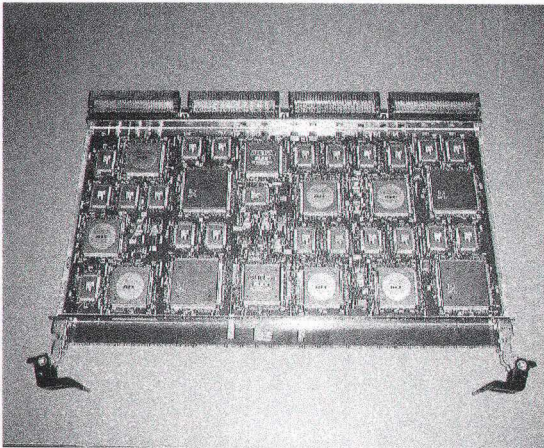


図10 超高分散分光相関器の試作ボード。

しかし、アルマは三極共同の仕事である。日本の思うとおりに行くとは限らない。日本がアルマ phase-I の研究開発フェーズに予算がつかないでいる間に、米欧の二者アルマ（ただし、phase-I）は動き出し、相関器はアメリカの分担として、作り始めてしまった。この相関器は非常にオーソドックスな XF 型の相関器で「広帯域『または』高分解能」な性能しかない。言い換えれば、連続波とスペクトル線の同時観測はできないものであった。我々は、「広帯域『かつ』高分解能」の相関器がアルマには必要なことを訴え、ヨーロッパの相関器グループとも連絡をとりあった。その甲斐あって、アメリカの『または』の相関器はアルマの部分運用や初期運用の時に用いる相関器として低分散型の分光器と位置付け、『かつ』の相関器をアルマ完成時に出来上がる第二世代（本命の）相関器と位置付けようということになった。

ヨーロッパの相関器グループも（まだ詰められてはいない段階だが）独自案を持っている。これは、日本案と「広帯域『かつ』高分解能」という点は同じだが基本的には XF 型で、そこに FX 的な考えを入れた構成になっている。どこが FX 的かというと、相関 (X) させる前に全帯域幅を分割してそれぞれ別個に相関させることである。全帯域幅、

周波数分解能一定の条件で分割数を増やしていくと、XF 型の場合、分割数に反比例して物量が小さくなることを利用して物量を小さくしようというわけである。しかし同時に、「全帯域幅を分割」するためのデジタル・フィルタの物量が発生する。こちらのほうは今のヨーロッパ案では分割数の 1 乗に比例して大きくなる。そこで当然最良の分割数が存在し、彼らの案では 32 となっている。分割数という言い方をすると、日本案の FX は分割数の対数に比例する物量の FFT デジタル・フィルタの後ろに lag 数が 1 の XF をつけたものだともいえる。もしかすると、lag 数が 1 よりも大きいところに最良のやり方があるのかもしれない。

ともあれ、「広帯域『かつ』高分解能」相関器は一つしか作れない。日本とヨーロッパはひとつの案に収束させねばならない。日本案はすでにもう成案に近いものであり試作機の評価試験も開始しているが（図 10）、ヨーロッパは案がまだ固まっていない。あと一年間の期間を置いて、ヨーロッパの案ができた段階で、両者共通のメーカーからの見積もりをもとに、性能、価格の比較を行い、どちらかの案を選んで統一された案を作るという手はずになっている。統一案を作るのは、competition ではなくて choice と呼ぼうという事になっている。つまり、二つのグループが競争して片方だけが勝ち残るのではなく、もともと一つの日欧グループが 2 案を比べて一つを取って、統一案に基づいて以後も仕事を分担していくという含みである。

うまく日本案が採用されれば、我々は日本の主導権のもとに国際的な大規模共同開発作業を進めるというまだない経験をできることになる。

4) ASTE 計画

この節の最後に、ASTE 計画について簡単に補足しておきたい。ASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) 計画は、国立天文台で製作した超高精度の 10 m アンテナを、チリのアルマ建設サイト (Pampa la Bola, 標高 4800 m) に移設し、アン

テナを中心として、サブミリ波受信機やサブミリ波の観測法の技術評価試験を行うとともに、南半球での本格的なサブミリ波天文学を世界ではじめて展開することを目的にした計画である。この計画は、基本的にはALMA計画と独立な計画であるが、アルマの前段の計画として、装置技術、インフラ開発、運用、サイエンスなどの様々な面でアルマを進めるうえで貴重なノウハウを獲得する事が可能となる重要な計画であり、一部の評価試験は米欧のアルマのグループと協力して行うことになっている。日本国内では、東大、名大、大阪府立大などのグループの協力も得て進めている。来年の2月には、望遠鏡はサイトに完成する予定である。

同様な計画(APEX: Atacama Pathfinder Experiment)を、マックスプランク研究所のK. Mentenのグループが進めている(計画立案当初から、我々のASTE計画に相当影響を受けており、それが名称にも現れている)。彼等は、米国の12mプロトタイプアンテナのコピーをアルマのサイト(ASTEより標高の高い場所)に設置する計画で、ESOやオンサラ天文台と共同で進めると聞いている。この計画は、ASTEのおよそ1年遅れで進んでおり、いずれサイエンス面での競争が予想される。しかし、人間には環境の厳しいアルマサイトで望遠鏡を運用しようという「同志」であるので、様々な面での協力を行なおうという話になっている。また、ASTEの実行においては、キャルテクの「CBI(Cosmic Background Imager)」グループが先陣であるので、彼等との協力も不可欠なものと考えており、3者(この場合も、日本、米国、欧州!)で「Atacama Club」でも作ってノウハウを共有し、また絆を深める必要があると考えている。

3. 進む運用形態の検討

建設・運用期の体制・形態の検討も同時に進められている。これまで、3極で合意していることとしては、1) 1ヶ所(米国を予定)にALMA計画合同本部をおき、3極共同建設の指揮をとる、2)

チリは、山頂観測施設とともに、山麓に「干渉計運用センター」(標高3000m)、サンチャゴには連絡室を置く、3) 3極のそれぞれの地域に、データアーカイブシステムを備えたデータセンターを置く、などである。運用開始時期は、2007年1月頃より、その時点で完成したアンテナ(10数台)を用いた部分運用を、2011年より本格運用を開始している。今後、日本国内において天文関係者と意見交換しながら、データセンターの役割と機能の検討、また観測プロポーザルの提案から採択、ユーザへのデータの供給までのスキーム案作りを進めていく必要がある。

4. 終わりに

アルマの「前身」であるLMSA計画(その前はLMA計画)に筆者の一人(川辺)が参加し始めてもう10年以上が立つ。LMAからLMSA計画と名前を改称した頃にLMSA計画の概要や装置仕様について天文月報に記事を書いたのが94年である¹⁾。その頃は構想であったものが、今ではサイトも決めて、また建設に向けて試作・開発を進めており、米欧と共同で進める計画までに進展してきた。この十数年の活動の総括という意味でも、来年度の予算をぜひ獲得し、大きな一歩を踏み出したいと考えている(MI氏はこの間に、ALMA計画の推進とともに白髪が増え、RKは2人の子持ちとなり、YCは野辺山からすばるへそしてアルマへ戻ってきた。みんなも大きな「変化」を経験してきた)。

一方、すばるは純国産計画、アルマは3極の共同建設計画であり、今我々はお手本のほとんど無いところで、手探りで計画を進めてきている部分も多い(ただし、すばるが外国に観測所を設置したという貴重な経験は大いに生かされている)。特に、国際交渉ということ、様々な局面で経験することとなった。それは、意思決定の最高機関であるEACCだけでなく、この間実行者レベルのEAECレベルや、実際に技術開発を行なっているグループ内でも頻繁に行なわれてきた。これらの交渉など(中

には、雑談レベルのものもあった)で得た教訓を3例を(読み手によってはあたりまえのことかも知れないが,)紹介し、この記事の終わりとした。

(1) 一人勝ちはできない: 最初はこの部分は全部掻っ攫うんだと勢い込んで始めたのだが、どこかが完全な負けになるようなことはできないと悟った。また、たくさんのグループが生き残ることによってこそ、それで競争が促進され、天文学が発展する。

(2) 3者の世界では、一者を説得できれば2対1で勝てる: 相関器に関してはヨーロッパを味方にしたので日本の意見がとおった。band-10の分担を決めるときも、米国が俺等がやりたいと言ったが、同様にして日本の意見を通すことができた。

(3) 同意できないときは、はっきり disagree と言う: 何もいわないと、agree だと思われるので、意思表示することが大事。また、disagree と言っていると、相手の disagree に対しても免疫力ができてくる。

参考文献

- 1) 川辺良平, 1994, 天文月報, 第87巻, 第11号, 481ページ
- 2) S Sakamoto., et al., 1999, IEEE Terahertz Electronics Proc., 284,
- 3) R Kawabe., 1999, 1999, IEEE Terahertz Electronics Proc., 102
- 4) 石黒正人, 川辺良平, 阪本成一, 福井康雄, 1999, 天文月報, 第92巻, 第3号, 131ページ
- 5) アルマ計画説明書2001年度版7月版, (<http://www.nro.nao.ac.jp/~lmsa/index.html>)
- 6) N Ukita., et al., 2000, Radio Telescopes, Proc. SPIE, 4015,177
- 7) H Ezawa., et al., 2000, Radio Telescopes, Proc. SPIE, 4015, 515
- 8) Y Sekimoto., et al., 2000, Radio Telescopes, Proc. SPIE, 4015, 605
- 9) 野口 卓, 2000, 制御と計測, 39,395
- 10) Y Chikada., et al., 1987, Proc. IEEE, vol.75, no. 9, 1203
- 11) S K. Okumura., et al., 2000, Radio Telescopes, Proc. SPIE, 4015,64

What is ALMA?

KAWABE Ryohei

CHIKADA Yoshihiro

National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo 181-8588

Abstract: ALMA is an ultimate radio telescope on the Earth that have 64 12m antennas to observe millimeter and sub-millimeter radio waves, and it will be built by collaboration between Japan, North America, and Europe on a plateau at the altitude of 5000 m which is best site for observing sub-millimeter waves. Japan realized the 45m telescope and the millimeter wave interferometer, and has been greatly developed millimeter wave astronomy. ALMA is far superior to the 45m telescope and NMA in every respect of collecting area, resolution, and imaging capabilities. It will enable us to observe up to the wavelength of 300 micron that is the limit for ground telescopes. It will cultivate the unknown land of sub-millimeter astronomy, and make breakthroughs in important problems of modern astronomy such as formations of planetary systems and galaxies. In collaboration with the large telescopes for visual light and infrared and also with large-scale simulation experiments, it will become possible to investigate the whole process of evolution of the Universe. We are now capable of contributing to the vast areas of science extending from astronomy to deepen the understandings of the Universe and the life.