

総合科学技術会議 評価専門調査会  
「アルマ計画」評価検討会（第2回）

府省への質問事項への回答  
平成15年10月6日

文部科学省 研究開発局宇宙政策課  
国立天文台

はじめに

質問事項全般に関わる事項である「アルマの共同建設・共同運用についての基本的考え方」について、再度整理して説明させていただきたい。

### **アルマの共同建設・共同運用についての基本的考え方**

アルマでは、一つの国際機関を創設しそこに各極が資金を出して建設・運用することはしない。これは、アルマが日米欧それぞれの単独計画から出発した経緯があること、国際機関の創設はチリ共和国を含めた関係国間の条約レベルの手続きが必要となり手続きに長い時間がかかることなどが懸念されたためである。

このため、各極は主に"in kind"(装置)の担当による貢献を基本としている。ただし、各極はそれぞれが貢献した装置を独占あるいは優先して使用するのではなく、統一したシステム全体を共同で運用し、それぞれの貢献度(「バリュー」:以下に説明)に応じた観測時間の配分を行う。

日米欧それぞれの貢献度は、三者で合意した統一の評価基準を用いて「バリュー」という形で定量化される。このため「バリュー」比は、必ずしも実際の支出額比と一致するわけではない。

日本が製作する ACA システム、受信機、相関器なども全体システムに組み込まれて運用され、特殊な場合を除き単独の運用は行わない。(完成までの立ち上げ・総合試験、科学評価試験などでは、ACA 単独で運用されることがある。)

12m アンテナ 64 台及び ACA システムを含むアルマ全体のシステムの観測時間のうち、日本の「バリュー」に比例した観測時間が日本に割り当てられる。日本枠の中の観測プログラムは、日本が主体的に公募・採択して決定する。

運用経費については、望遠鏡時間にほぼ比例した分担を基本としている。観測運用はアルマ観測所で一括して行う。観測所の運営は、現地採用スタッフに日米欧からの派遣スタッフも含め、三者協同で統一的に行う。

## 1. 計画の枠組み等について

### (1) 経緯

- ・ アルマ計画に至るまでの、各国の計画と実績の経緯を説明されたい。
- ・ 今日に至るまでの、各国による国際共同研究の研究についての打ち合わせ(交渉)の詳細な経緯及び我が国の対応と計画の変遷を説明されたい。

### (回答)

添付資料 1、2 に計画の推移を示す。

#### 計画構想以前： ミリ波で世界に先駆ける

国立天文台の前身である東京大学東京天文台は、ミリ波天文学では世界に先駆けて 45m 大型ミリ波望遠鏡とミリ波干渉計(10m×6 台)を建設(1982 年)。日本は、ミリ波天文学で世界をリード。

独仏は共同でミリ波天文学研究所(IRAM)を設置、30m ミリ波望遠鏡とミリ波干渉計(15m×4 台)を建設(1985 年)。

米国は、2つの大学グループがミリ波干渉計を個別に建設(BIMA(6m×10 台)1983 年; OVR0(10m×6 台)1985 年)。

#### 計画構想期(1983 - )： 計画構想を主導

1983 年、野辺山ミリ波干渉計の次期装置として、国立天文台が LMA(大型ミリ波干渉計)構想を立案。ほぼ同時期に、米国国立電波天文台(NRAO)が、MMA(ミリ波干渉計)構想を立案。

日本ではサブミリ波天文学の重要性を考慮し、1987 年に LMA 計画をサブミリ波中心とした LMSA(大型ミリ波サブミリ波干渉計)構想へ発展させ、世界で初めてサブミリ波の大型干渉計計画を立案。国外適地への設置の検討を開始。

国立天文台は、1992 年よりチリサイトの調査を開始。米国は当初、米国内に MMA 設置を計画していたが、1995 年チリサイトの調査開始。同年、欧州が LSA(大型南天ミリ波干渉計)構想を立案、1997 年チリでのサイト調査を開始。米欧も日本の目指すサブミリ波天文学の重要性を認知し、かつチリのサイトの調査にも追随することとなった。

#### 三者アルマへの統合構想期(1994 - )： アルマの先進部分は日本が提案

米国も日本と同じサイトへの建設を目指すことになり、1994 年に日米間で協力に関する協議を開始。1995 年、日米間で覚書締結。1997 年、日

米で国際協力事業として共同開発研究を開始。1997年3月、日米ワークショップを開催し、日本は、チリ・アタカマサイトでサブミリ波を中心とした2計画結合干渉計計画を検討し、0.01秒角分解能の達成可能性を示すとともに、それによるサイエンスを提案。

### 三者合意の形成とアルマの概算要求

一方欧州も同じサイトでのミリ波干渉計の建設を目指すことになったことを受けて欧米は計画の合同で合意し、1998年米欧のアルマの設計開発期(Phase-I)がスタート(二者協定書は1999年1月に締結)。欧州が遅れて計画立案したにもかかわらず、極めて短期間で米欧間の協定にこぎつけることができたのは、ESOが有する各国の分担金とその予算決定権によるところ大である。日本は協定には参加できなかったが、「世界望遠鏡」である三者アルマを実現するとの合意のもとに、建設・運用に関するアルマの計画案作りを三者で進めた。

2001年4月、東京にて三者協議、三者アルマの共同決議書を締結。これをベースに分担計画を具体化し、2002年からの同時スタートを目指した。三者はそれぞれこのアルマ原案を基に、建設費(02年スタート;9年計画)を概算要求。

### 米欧先行(2002-)による日本計画

日本では、厳しい財政事情により2002年度からの建設がスタートできなかったため、概算要求は02年、03年の研究開発経費とし、2004年からの建設を目指すこととなった。

一方、米欧の予算要求はほぼ要求どおり認められ、先行して2002年度より建設をスタートさせることとなった(米欧の二者協定締結は、2003年2月)。米欧は、日本が万一参加できない場合でも独立した望遠鏡として成立しうるよう、12mアンテナ64台、受信機4バンド、基本型相関器を含む基幹部分一式を製作することとし、それまでの三者分担案を若干組み替えて、二者による建設計画をスタートさせた。

日本は米欧と協議しつつ、米欧の基幹計画に上乘せして三者アルマの全体計画を実現完成するための、日本の技術がより生かせる高性能部分を含む装置を分担する計画案へと修正を進めた。結果的に、日本の主体的な寄与が可能で、かつ独自のサブミリ波技術を生かせる計画を確保できた。

この修正計画について、科学技術・学術審議会 天文ワーキンググループで妥当であるとの評価を受けるとともに、さらに米欧との具体化の調整

を進めた。

上記計画案に沿い、2004年度から8年の建設計画で、文部科学省から概算要求が提出された。日本の計画は、完成時以前に米欧から2年の遅れを取り戻せる計画となっている。

なお、当初のアルマ計画からの新たな分担への変更を、表1に示す。

表1. アルマ計画における装置の分担内容の変更

装置等	当初分担計画	現在の分担計画
64 素子アンテナ	日：24、米：20、欧：20	米：32台、欧州：32台
ACA アンテナ	欧州	日本
受信機バンド（80台）		
バンド3	日本	米国（64）、日本（16*）
バンド4	日本	日本（80）
バンド6	米国	米国（64）、日本（16*）
バンド7	欧州	欧州（64）、日本（16*）
バンド8	米国	日本（80）
バンド9	欧州	欧州（64）、日本（16*）
バンド10	日本	日本（80）
相関器		
64 素子用	米国：基本相関器 日本：高分散相関器	米国：基本相関器 日本：機能強化
ACA 用	日本：高分散相関器	日本：高分散相関器

\* ) 米欧から購入

## ( 2 ) 不利克服への対応

- ・ 現状の不利（貢献金額の差、参加決定の遅れ、2年遅れで無理を言って割り込むような状況等）からくる様々なハンディキャップや不利益をどこまで克服し、どの程度の貢献（主体的で質の高い研究）が可能であるのか、その具体的な理由と根拠、今後の欧米との対応（交渉）の方針（戦略）と実施計画（戦術）及び見通しについて、説明されたい。

( 回答 )

### 貢献金額の差について

貢献では、日本の高度なサブミリ波技術なども要素として評価される。貢献は、計画に持ち込んだ装置(in-kind)の貢献度、すなわち「バリュー」（「0 . はじめに」参照）の形で三者で合意した基準をもとに三者の協議により評価され、観測時間割り当てに反映される。日本としては、全体の22%以上、25%前後の貢献（1-(7)の説明を参照）を獲得することを目標として米欧との協議を行っており、現時点でこのレベルの貢献を獲得できる見通しを得ている。この値は日本の国力に比較して妥当な値であり、主体的な参加および日本が目指すサイエンスの実行が可能であると考えている。

すでに、現在日米欧で交渉中の三者アルマ(日本参加)協定書の案では、日本は欧米と同等に「三パートナーの一員」と規定され、運用において同様な発言権を持つことを明記することになっている。

### 参加決定の遅れについて

参加決定の遅れにより、日本の分担の内容が多少変わったが、日本が指向するサブミリ波天文学を推進する上で本質的に重要でありかつ日本の技術を生かせる装置の分担を行う計画となった。したがって技術的には、当初の三者アルマ(原案)の分担案に比べて大きなデメリットはない。むしろこの間の組み換えで、担当するサブミリ波受信機のバンドは1つ増え、2つとなった。実際、新たな三者アルマ協定書案では、アルマの正式名称を「アタカマ大型ミリ波サブミリ波アレイ」とすることになっている（二者アルマでは「アタカマ大型ミリ波アレイ」であった）。

また、スケジュール的にも、この2年間に米欧とも連携しつつ研究開発を進めてきており、平成16年度開始であれば米欧の計画の完成年である2011年に合わせられることとなり、不利な状況はない。2004年からの建設

は必須であり、これにより、完成時はもちろん、2007年からの立ち上げ観測においても対等に初期成果を獲得できる。また、日本は科学面でも富士山望遠鏡などサブミリ波観測で世界に先行している。

### 「2年遅れで無理やり言って割り込むような状況」について

以上で述べてきたように、日本が参加することにより、目標であった三者アルマが完成する。従って米欧は日本の参加を歓迎し、また三者アルマの実現を強く期待し希望している。

「無理やり言って割り込む」といった状況は、存在していない。

### これまでの交渉方針について

以上を踏まえて、これまでの交渉では下記の具体的方針で臨み、それぞれ米欧との合意に至っている。ただし、持ち込む装置の貢献度(バリュー)については、協議すべき点を若干残している。

- 米欧と同じ格の建設・運用パートナーとして、国立天文台を認知。
- その保障として、アルマの最高意思決定機関であるアルマ評議会、建設のための各種委員会などの主要組織は、三者による構成とする(2004年度から正式に)。
- 貢献度(バリュー)では、日本の高度で独自のサブミリ波技術等を考慮。
- 日本の計画と米欧の建設とを整合し、2011年にはすべて完成させる。
- 2007年に始まる部分運用では、初期サイエンスの重要な成果が期待される。この時期までに必要な日本の装置をチリサイトに納入し、部分運用に日本が十分参加できる建設スケジュールとする。

### 今後の交渉の実施計画について

現在すでに交渉の最終段階にあり、上に述べてきた方針に基づく最終合意の見通しは十分に立っている。合意事項に基づいて米欧と取り結ぶ三者アルマの協定書の準備が進んでおり、現在、本文は第2ドラフトからさらなる詰めを進めている。年末までに付属文書のドラフトも完成する予定である。

9月のワシントン協議で以下の予定を合意した。ぜひこの線を進めたい。

- 来年2月に最終的な交渉のための三者会合をもち、日本の予算状況も踏まえて最終ドラフトを合意する。

- 各国関係機関の承諾を得て、日本の予算通過を踏まえ、6月に協定書を正式に締結する。
- 協定書は、NSF、ESO、自然科学研究機構による署名とする。アルマ委員会等に、日本が3パートナーのうちの正式の一員として参加する。

### この回答のまとめ

全体として、三者で協議を行いながら進めなければならないという国際協力に伴う負担は生じるが、それを乗り越えて技術的・科学的に予算分担以上の寄与・成果を得ていける力を日本は十分に有しており、それが可能な状況にあると考えている。もちろん基礎科学研究の長期計画である以上、非常な努力と熱意と工夫、また国内国外の協力が必要であることは認識している。

私たちはこれまで、さまざまな困難な中でもこの種の計画を実行し成功させてきた実績を、誇りに思っている。

### (3) リーダーシップを発揮する仕組み

・サブミリ波という日本の得意技術をこれから持ち込むわけだが、この分野で日本が実際にリーダーシップを発揮できるような仕組みをどのようにして整えるのか。

(回答)

#### **装置の分担面**

サブミリ波3バンドのうち2バンドの受信機の開発・製作  
高精度のACAシステムの分担(サブミリ波観測にとって特に威力)  
相関器の高性能化(サブミリ波に多い微量分子スペクトルの検出)

#### **技術面**

日本の独自技術によるバンド10用超伝導素子の開発や、民間研究所との共同研究による独創技術の開発(フォトニクス技術など)による技術面でのリーダーシップ発揮(すでに実績)

共同開発研究の例

- 通信総合研究所との研究協力(サブミリ波超伝導素子の開発)
- NASDAとの研究協力(サブミリ波受信機の開発)



- NTTとのフォトニック LO の開発
- 大阪府立大等との研究協力（ミリ波受信機）
- 広島大学との協力（超高速 A / D 変換器の開発）

### サイエンス実行面（サブミリ波天文観測の準備、他プロジェクトとの相乗効果）

科学面では、アルマの部分運用開始時にいち早く成果を挙げて、その後のサブミリ波による天文観測研究のリーダーシップをとることができるか否かは、アルマ部分運用開始以前にどれだけ準備研究ができるかにかかっている。

大学共同利用機関である国立天文台としては、蓄積されたサブミリ波観測技術を大学の研究グループと共有して国内研究グループの研究を一段と強化するとともに、年 2 回の天文学会でのアルマ特別セッション(毎回 200 名以上が参加)や各種研究会を開催したり、日本物理学会、日本化学会、日本惑星科学会など近隣分野の学会にも働きかけて研究者層をより広げ、アルマを用いた研究における日本のリーダーシップを確かなものとするための仕組みを整えている。

アルマを用いた研究の主体となる国内の大学の研究グループも、ミリ波望遠鏡で南天の領域の観測を進めたり(名古屋大学ほか)、独自に富士山頂にサブミリ波望遠鏡を設置(東京大学ほか)するなどの独創的な研究展開により、ミリ波・サブミリ波天文学において世界をリードする成果を挙げてきている。

また、日本が所有する「すばる」などの地上観測装置や X 線・赤外線などの観測衛星のプロジェクトチームとは、観測研究計画の段階から意見を交換しており、装置の相乗効果を最大限引き出して日本独自の優位性を生み出す。一例をあげれば、2005 年打ち上げ予定の赤外線観測衛星 Astro-F による初期観測結果をアルマの初期観測への日本提案に生かすこと、逆にアルマの初期成果を次世代の赤外線衛星ミッションと組み合わせることが構想されている。

### 体制面（三者アルマの意思決定、マネージメント体制への日本からの参加）

意思決定（アルマ評議会）や諮問委員会（アルマ科学諮問委員会、アルママネジメント諮問委員会）への参加、マネージメント体制（マネジメン

トチーム、各装置担当チーム、サイエンスグループ)等の全てに三者の一員として加わる(現在はオブザーバ参加)。これらを通じて、日本のサブミリ波天文学の技術開発および研究実績を背景にしたプロジェクトに貢献し、日本の得意分野でのリーダーシップを確保する。

#### (4) システム比較

・システムの性能、達成できる研究の質、及び考えられるメリットとデメリットについて、客観的、公正な視点(欧米だけではここまでしか出来ず、日本が加わることでこんなによくなるというようなプロモーションのための主観的な論旨ではないように)で、次に関するケーススタディを説明されたい。(簡潔に整理して、分かりやすく、全体的に比較できる形で説明されたい。)

米欧日の全体システムで行ったとき

米欧(メインフレーム)のみで行ったとき

日本(サブフレーム)のみで行ったとき

日本が参加しなかった場合(チャンネル4, 8, 10の受信機の提供もなし)

#### (回答)

質問にある - のケースのうち、(ACA システムを単独で運用するケース)については、このような運用が想定されていないため、 : 日本が参加し、全てのシステムが使用できる場合、 : 日本が参加して実現されるシステムのうち、ACA システムを使用しない場合、 : 日本が参加しない場合、の3つのケースについての比較を、添付資料3に示す。

#### (5) 計画の妥当性

・計画の妥当性について、定性的な説明はあったが、より具体的な妥当性の説明が必要であり、特に予算、体制、責任者、人材確保などの努力目標を示して説明されたい。

#### (回答)

技術的な妥当性

アンテナ、受信機、相関器などプロトタイプ製作・評価を科学技術・

学術審議会において平成 14 - 15 年度の 2 年間で実施し、日本の分担する装置を実現できる見通しを得ている（前回資料参照）。

#### 予算面での妥当性

計画実施に必要な予算については、これまでの大型装置建設の経験、試作機の開発経験、市場調査、等により、予算計画を立案した。

経費については受信機の設計・開発・組立までを国立天文台に設置した高度環境試験棟に展開中の設備を用い、メーカーからの派遣技術者を加えた体制で自家製作するなどして節減を織り込んでいる。また、国立天文台としても相当な内部努力を実施して、現在の電波干渉計の運用停止、関係観測施設の運用停止、計算機システムの集中化などの合理化を行う。その結果、建設予算の 35% 以上を内部努力でまかなうことを計画している。

#### 体制での妥当性

現時点での人的体制（常勤スタッフ数、30 名）に加えて、大学共同利用機関法人化後のフレキシブルな職員雇用や天文台内の人員の再配置等により、任期付き人員を大幅に増員して、アルマの建設にあたる予定である。具体的な計画としては、毎年数名の任期付き常勤スタッフ増、任期付き研究員増を計画している。人員体制については添付資料 4 に示す。

#### 責任者の妥当性

以下のように適切な責任者を当てて対応している（前回資料も参照）

➤ 石黒正人（58 歳）：プロジェクトリーダー

世界的なミリ波サブミリ波干渉計のリーダー的研究者であり、アルマプロジェクトにあっては最も計画に精通したものの一人である。1970 年代から野辺山ミリ波干渉計の建設・運用を指揮、さらにはこの 20 年間、LMA、LMSA から現在のアルマに至るまで、その推進の中心となってきた。各国のプロジェクトの評価委員、国際学術団体の分科委員、国際シンポジウムの組織委員長・組織委員を数多く努め、多方面で国際的に活躍している。野辺山宇宙電波観測所所長、電波天文学研究系主幹も歴任し、責任者として最適である。

➤ 川辺良平（46 歳）：プロジェクトマネージャー

マネージャーとして、日本のアルマの研究開発や建設計画の立案及び

実行の指揮を執っている。世界との競争の中で、野辺山ミリ干渉計の装置性能の向上、それを用いたサイエンスの実行を主導。非常に遠方にある生まれたての銀河の発見や回転する原始惑星系円盤の発見など、世界的に知られた重要な研究を行っており、科学者としての能力も高い。一方、ミリ波干渉計を軸として、計画当初から石黒とともにアルマの推進の中核を担ってきており、プロジェクトマネージャーとして適任である。

➤ 長谷川哲夫(48歳): プロジェクトサイエンティスト

アルマの科学的な仕様決定や観測立案の面で、国際的にも指導的な立場にある。野辺山 45m 鏡によるミリ波天文学の黎明期に世界的な発見を行うなど、日本におけるミリ波天文学の発展にその初期から大きな貢献を行った。また、東京大学において独自にサブミリ波天文プロジェクトを南米チリで展開し、南天でのサブミリ波天文学にも先鞭をつける先進的な研究を展開してきた。日本のアルマのサイエンス面の責任者として国立天文台に戻り、重要な役割を果たしている。

#### 人材確保

これまで、米欧に比べて少ない人数で観測所の運営を行ってきた。法人化後は、天文台内で必要な運用スタッフを育成し、運用や装置の改良等に必要な技術的な基盤も獲得して効率良く運用するための人材確保のプランニングを行っている。ただし、企業からのある程度の人材派遣技術者や、共同利用や研究開発のサポートのためのポスドク研究員は今後も重要である。

#### 人材育成

一方で、優秀な人材の育成も重要な課題であり、アルマ計画のために以下のような人材育成の努力を行っている。

- 国立天文台での年 1 回の干渉計サマースクールの実施(本年度は約 50 名が参加)
- 野辺山宇宙電波観測所での大学院生教育(総合研究大学院大学)
- 大学と連携した大学院生教育
- 大学における集中講義等による学部学生教育への協力
- 日本人ポスドクの外国への「派遣」(国際協力でリーダーシップを発揮できる人材の育成)、及び海外からの大学院生・ポスドクの受け入れ。

## ( 6 ) 国際的推進

・日本の参加が決定した後の、具体的参加者構想について説明されたい。特に、すでにある体制への参加者と貢献度について具体的に説明されたい。

### ( 回答 )

以下の各国が以下の負担額で建設する (単位は百万 US ドル)。

日本 210 ( 22.5% )

北米 ( 米国、カナダ ) 376 ( 40.2% )

米国とカナダとの負担比率は公表されていないが、カナダは米国の10%程度と言われている。

欧州 376 ( 40.2% )

欧州からはESO (ヨーロッパ南天天文台、10カ国が加盟) とスペイン (ESO加盟予定) が参加する。ESO参加各国は、ESOのプロジェクトとしてアルマ計画へ参加しているため、加盟国毎の負担額という考え方を持っていない。仮にESOへの出資比率を参考にあえて各国の負担額を推計すると次のようになる。なお、ESO加盟各国は、下記の負担額以外に、各国独自、あるいは複数国の協力により各種の望遠鏡を建設・運用している。

➤ イタリア	58
➤ オランダ	21
➤ スイス	15
➤ スウェーデン	11
➤ デンマーク	8
➤ ドイツ	73
➤ フランス	67
➤ ベルギー	12
➤ ポルトガル	6
➤ イギリス	77
➤ スペイン	28

以上の負担によりそれぞれが持ち込む装置の貢献度 (バリュー) で観測時間は決定される。したがってそのバリュー比は負担額の比と同一にはならないが、その値は近いものと予想される。

・現在、中国、台湾、韓国などとの個別的協定を予定しているとのことだが、本計画のような長期的大型研究計画では、最初からアジア諸国の合同体制と将来の展開計画が必要であると考えられるが、今後の具体的構想について、どのように考えているか説明されたい。

(回答)

#### 基本認識とこれまでの経過

アジア諸国との協力関係構築は極めて重要だが、経済格差、科学水準・技術水準の格差等から、容易なことではない。

我々はこのことを早くから認識し、東アジアからの若手を多く育成すると共に、中国・韓国・台湾と日本の「東アジア天文学協力圏」を築くことを目標に、長期にわたり信頼関係と協力を組織的に積み上げてきた。

#### ➤ 野辺山を中心に東アジアの電波天文学者・技術者を育成

中国のミリ波天文学研究／技術のリーダーはみな、野辺山で育った。例えば韓国国立天文台の台長（電波天文学）は野辺山で学位（指導：海部）を取得し、ミリ波技術のリーダーも野辺山で技術修得して学位を得た。

台湾では、野辺山育ちの日本研究者多数がSMA（スミソニアン天文台がマウナケアに建設中のサブミリ波アレイに台湾が参加）で中心的に活躍中。

#### ➤ 東アジア天文学会議で継続的に天文学交流と協力を推進

経済と科学の水準、技術レベル、研究者数などに大きな違いがある中で、1990年以来東アジア天文学会議を継続開催、信頼と実績を積んできた。

（添付資料5参照）

#### アルマに関する協定の状況

以上の実績を踏まえ、アルマに関して以下の個別協力協議を進めてきた。

- 中国とアルマに関する協力協定を既に締結（2002年）、研究／技術協力。
- 台湾とアルマに関する協力協定を締結（2003年）、建設一部参加も視野に。
- 韓国とは、現在協議中。一部大学ともミリ波での協力を推進。

これらにより、当面はミリ波サブミリ波での共同観測・技術開発での協力や若手の交流を定常化し強化するとともに、共同シンポジウム等を通じて東アジア地域の研究者層の開発を進めることが、将来的にも重要と認識している。

### アルマ「東アジアグループ」へ

これらの活動を数年継続し中・韓・台の国内基盤を強化しながら、アルマの完成までには北米グループと同様な「東アジアグループ」の形成に至りたいと考えている。

当面の縦系は中・韓・台との協力協定、横系は「東アジア天文会議」(1月に台湾で若手天文学者会議、来年中国でサブミリ波ワークショップ、ソウルで総会を予定)である。協定を基礎に2~3年のうちに「アルマ東アジア委員会(仮称)」を立ち上げ、完成時までには東アジアグループに発展させたい。

### 「東アジアグループ」に想定する機能

- アルマの完成までは、技術協力、既存装置での共同観測、立ち上げ観測の協力などを組織し、協力体制を構築。
- アルマの完成後は、日本観測時間枠の一部を「東アジア枠」とし、その運用やプログラム割り当て、評価などをグループの共同で行う。
- 「東アジア枠」の範囲は、東アジア諸国の運用への寄与(人的・物的・資金的寄与)に応じ、フレキシブルに変えてゆく。
- アルマやサブミリ波に関連する技術開発、将来計画等の共同企画の検討。

### (7) 運用

・現在想定されているアルマの運用方法を簡単かつある程度具体的に説明されたい。特に次のことがわかるように説明されたい。

日本のデータの取り分が\*%であるということが、どのように実行されるか。また、\*はどのように決定されるか。

日本の天文学研究者(さらにアジアと世界の天文学者)にアルマはどのように利用されると想定しているか。

### (回答)

研究者がアルマに観測提案を行い研究を進める大きな流れを添付資料6に示した。

まず大前提として、アルマは日本からの貢献分も含め全体として1つの

装置として日米欧の研究者による共同利用観測に供されるのであり、その点ではどの参加国からどの装置が持ち込まれたかということには意味がない。

質問中で「日本のデータの取り分」と表現されているが、これは「日本の天文学コミュニティが採択権を持っている観測時間」とご理解いただきたい。観測時間は、各国がアルマ計画へ持ち込む装置、施設の貢献度(バリュー)で決まる。観測時間はバリューに応じて各参加者へ採択権の形で公平に配分される。

配分された観測時間を使ってどのような観測をするかは研究者による観測提案(プロポーザル)をピアレビューにより、採択して実行することとなる。その詳しい手続きは検討中であるが、採択権を持っている国が主導的に決定することとなっている。

日本に配分される観測時間は日本の研究者による観測に主に割り当てられることが想定されている。国立天文台は、中国国立天文台および台湾の中国科学院天文学天体物理学研究所とアルマに関する機関間協力協定を締結しており、それぞれの機関が実施するアルマ計画への貢献(運用経費、人的協力、等)に応じて、一定の観測時間枠を設けることも検討している。

・すばる運用費とアルマの運用費とあわせると 60 億円を超え、現在の国立天文台の予算を大きくオーバーするが、自然科学研究機構の予算において、すばる、アルマが適切に運営されうるのか、具体的に説明されたい。

(回答)

国立天文台の予算については、平成 16 年度概算要求において 15 年度配分実績を基礎として、約 89 億円(人件費を除く)の運営費交付金が要求されているところであり、16 年度以降についても同額程度が運営費交付金として配分されることを想定している。

「すばる」「アルマ」の両望遠鏡は国立天文台の中核的設備であり、予算の集中的な投資により運用することとしている。その運用経費の確保については、今後、一部観測装置の運用停止を含む運用の合理化を図る、及



び各観測所電子計算機の一部機能の三鷹地区への集中化を図る等により経費の節減を行うことにより、可能な見通しである。

( 8 ) 三者合意

・米欧と日本の三者で計画し、すでに合意されていたとのことですが、この合意は公的合意でしょうか、個人的同意でしょうか。同意に対する責任は何処にあるのでしょうか。

( 回答 )

基本的に、三者合意は、予算面等での責任を伴わない機関間の合意である。文部省・学術審議会での早急に進めるべきであるとの答申を基に、文部科学省とも協議を行った上で、国立天文台は2001年4月に三者アルマに関する決議を締結した。しかし、現状では決議のみで、責任の発生するような合意はない。日本の予算案成立後、来年6月頃に締結が予定されている協定書が結ばれると責任が生じる。

( 9 ) リスク

・この研究計画にリスク(期待している観測成果が機器・設備の不具合等のために得られない)が存在するか。  
・仮にリスクがあるとすれば、それはどのようなシナリオが想定されるのか。  
・それぞれの想定リスクに対しては、どのように対処するのか。

( 回答 )

**リスクの種類と想定される具体的なリスク**

日本の参加計画に関しては、技術面、スケジュール面、コスト面での問題となる大きなリスクは存在しない。科学技術・学術審議会 学術分科会 基本問題特別委員会 天文学研究WGでも、以下のように評価されている(「アルマ実施計画案に関する学術評価作業班の報告書概要」より)。

- アンテナ：アルマ仕様12mプロトタイプアンテナで25μm精度を達成する技術的開発に目処が立っており、極めて先端性の高い日本の技術的成果と評価できる。
- 受信機：バンド4及び8についての技術的目途は立っている。バンド10については、今後3年以内で実用化設計を完了し、量産化のため

の適切な開発計画が立てられている。

- 相関器：高分散相関器は、日本が最も進んだ開発実績をもち、通常の開発体制で十分完成が可能と判断できる。

日本の分担の中でも最も技術的にチャレンジングなバンド 10 の開発、量産に関しては、予想されるリスクを十分回避できる開発、量産体制を採用している（添付資料 7 参照）。

一方、国際協力には、米欧二者のうちの参加国の規模縮小や撤退など、一定のリスクが考えられる。米欧二者のうちの参加国の撤退があった場合には、全体計画の縮小を図ることにより対処せざるを得ない。参加国の計画縮小や撤退で、他の参加国に財政的な不利益が波及しないような協定書の内容とする。

### リスクへの対処法

現時点では、日本参加案の実行に関しては、ほとんどリスクは伴わないと思われる。しかし、万が一の場合に備えて、リスクへの対処法を検討している。基本的には、コストと建設期間は有限であるので、それを守れるようなリスク・マネジメントを行ってゆく。具体的には、以下の通り。

#### 技術的リスクへの対処：

技術的に難易度の高いものについては、バックアッププランを持っておくこと、もしくは複数の技術的な可能性を追求することで技術的リスクを回避する計画となっている。また、しっかりしたレビュープロセスを経ることにより、リスクの早期発見に努め、かつ開発の方針や量産方式などについてのチェック機能を持たせる。製造に入る前には、必ず CDR (Critical Design Review) を実施する。

（バンド 10 の開発・量産の方法について（添付資料 7）を参照）

#### スケジュールリスクへの対処：

技術開発が遅れることにより、スケジュールが大幅に遅れる可能性がある場合には、当初のスペックを再検討してスケジュールを守れるように対処する。この場合には、建設終了後に改良を施し、最終目標を達成する計画とする。また、米欧へ製作依頼する物品に関しては、しっかりした契約で、納入時期を縛るとともに、万が一納入が遅れた場合でも、日本担当装置の組み上げや立ち上げに支障のないような計画としている。日本担当装置の製作の critical path となる部品等は、できる限り独自生産とし、米欧への依頼を避けて対処している。

コスト面でのリスクへの対処：

技術開発の遅れは、開発コストがかさむことにより、コストリスクを生み出すこととなる。このような場合には、やはり、当初スペックを再検討する等の対処によりコスト内で装置が完成するようにする計画である。(米欧の場合は、各装置毎に予備費を持っており、その予備費のフレキシブルな運用が許されている。日本においても、交付金についてのフレキシブルな運用が不可欠である)

外部評価：

三者アルマ全体のプロジェクトマネジメントについては AMAQ アルママネジメント諮問委員会：国際的大型プロジェクトリーダー経験者により構成、年 2 回開催)により、プロジェクトの進捗状況についての監査が行われる。

## 2. 意義、役割、効果等について

### (1) 日本参加中止等の場合の意義等

- ・もし来年度予算において認められず、日本が参加中止あるいは計画縮小となった場合には、建設を既に開始した米欧自体の研究の意義と効果はどのように変わるでしょうか。要するに、米欧のみの場合の具体的な研究目的、内容とその効果はどうなるのでしょうか（全く意味がなくなるとは思えない）。
- ・また、日本における天文学研究に対する損失を説明されたい。

### (回答)

#### <米欧の研究の意義と効果の変化>

米欧は、万一日本が参加できなくなった場合にも対応できるような基本システムの建設をスタートしている。基本システムだけでも現存する装置に比べて格段に高い能力を有するので、米欧の研究者はそれを利用して研究をリードして行くであろう。しかし、項目1の(4)で述べたとおり、(a) サブミリ波天文学の本格的な推進による原始惑星系や原始銀河の形成の研究、(b) 天体の強度の正確な測定に基づく定量的研究の展開、という重要な部分はアルマから失われる。

#### <日本の天文学研究に対する損失>

「項目1(7) 運用」で述べたように、アルマの観測時間は各国の貢献価値「バリュー」に応じて比例配分されるので、万一日本が参加できない場合、日本の研究者がアルマを使って研究を行う可能性はきわめて制限される。その結果として、野辺山宇宙電波観測所を中心として世界のトップランナーとして走り続けてきた日本の電波天文学は致命的な打撃を受けることになる。日本の天文学全体でも、下記(2)に述べるようにきわめて大きな損失を被る。

## (2) インパクト

- ・ アルマに日本が関わる場合の(あるいは不幸にして関われなかった場合の)電波天文学以外の分野を含めた日本の天文学全体へのインパクトをどのように予想しているか。
- ・ さらに、日本のサイエンス全般、青少年を含む一般の人たちへのインパクトをどのように予想しているか。

(回答)

### 日本の天文学全体へのインパクト

天文学の研究は、さまざまな波長の電磁波やニュートリノなどの観測情報、理論的予測等を比較対照し組み合わせることによって、宇宙で展開している現象を理解し、そこから新しい法則を見いだすというものである。従って、日本がアルマ計画に参加できることは、日本の電波天文学にさらなる飛躍をもたらすことはもちろんのこと、「すばる」を擁する光学赤外線天文学や、観測衛星を用いたX線・赤外線天文学、理論天文学など、天文学のほとんどの分野において、アルマとの強い相乗効果により、さらに大きな発展を約束するものである。世界の最先端に肩を並べる現在の日本の天文学・天体物理学の隆盛は、長期にわたり文部省および文部科学省が行ってきた、野辺山宇宙電波観測所や「すばる」、数々の天文観測衛星、そしてカミオカンデなどに対する研究投資の成果として花開いたものである。アルマ計画に参加することにより、この資産をさらに大きくすることができる

逆に万一日本がアルマに参加できなくなった場合、日本の天文学は多くの分野において米欧に対し大きなハンディキャップを負うこととなり、今後数十年の研究に深刻な停滞が訪れるであろう。優秀な研究者の国外流出も予想され、日本の天文学の将来に大きな禍根を残すことになる。

### 日本のサイエンス全般へのインパクト

アルマを用いた研究は、天文学の枠を超えて、隣接する物理学、化学、惑星科学、あるいは生命科学にまで関連していくと考えられる。分野の境界に新しい研究領域が拓け、若い研究者や学生を引きつけると期待できる。

また、アルマ計画はボトムアップで立案された大型の国際協力プロジェクトの試金石として他の基礎科学分野からもその動向が注目されている。構想段階から計画をリードしてきた日本が適切な形で参加することは、今後ますます

まず国際化する基礎科学研究において日本が十分な役割を果たせることを示すものとなり、日本の基礎科学研究の国際化を促進するものと期待される。

### 一般の国民へのインパクト

とかく実益重視と批判されがちな日本が基礎科学分野にも注力していることを国内外に象徴的かつ印象的に示すものとなり、国民に文化国家の一員としての誇りを与えることになる。青少年が科学に興味を持つばかりでなく、将来に向けた夢や希望を持つきっかけにもなるであろう。

#### (3) 天文学への役割

・現在の天文学研究では、宇宙創生、宇宙における生命探査の2つが重要であるが、両者について、アルマ計画のみならず、ACA が果たす役割について具体例を示して説明されたい。

(回答)

<宇宙創生>

ビッグバン直後の宇宙の揺らぎから、銀河や銀河団、そして宇宙の大規模構造が形成されていったと理論的には予測されている。この過程を観測により実証することはアルマの重要な科学的使命の一つである。中でも原始銀河および原始銀河団の誕生の観測が重要である。個々の原始銀河の検出はACAシステムなしでもある程度は実行可能であるが、原始銀河団は広がり数十秒角～百秒角程度あるためスニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果<sup>1</sup>などによりそれらを検出するためにはACAシステムが必須である。

<宇宙における生命探査>

星間空間や原始惑星系円盤中を漂う生命関連分子を、ミリ波・サブミリ波のスペクトル輝線観測からとらえ、宇宙の物質から生命へのつながりを解明することは、アルマのもう一つの重要な科学的使命である。特にアルマはその高い感度と解像力でアミノ酸等のさまざまな生命材料物質の分布を描き出すことが期待されるが、対象が空間的に十秒角から数分角以上の広がりを持つため、その存在量を表すスペクトル線強度はACAシステムなしでは正確

---

<sup>1</sup> 宇宙背景放射のスペクトルが銀河団の高温プラズマにより歪められて検出される効果。

に測れない。ACA システムなしでは最悪の場合百分程度以上の誤差が想定される強度測定の精度が、ACA システムの導入により一気に誤差数%にまで向上すると期待され、生命に至る物質の進化を定量的に追うことが可能になる。

#### (4) 技術的波及効果

・先端技術をさまざまな民生技術にスピノフさせていくために、産業界等との連携体制をつくるべきと考えるが、国立天文台あるいは文科省としてはどう考えるか。

#### (回答)

フォトニクス技術における NTT との共同研究に代表されるように、国立天文台ではすでに産業界との連携を進めてきており、アルマに関連して共同開発された先端技術の一部については既に実用化に向けた連携体制は整っている。また、アンテナや超高速デジタル信号処理装置については技術検討や試作等を通じて我が国の宇宙航空や計算機に関連する産業界にもノウハウが蓄積されており、その転用により民生技術にスピノフされるものと期待される。さらに、アルマ共同開発研究を通じて、産業界との強いパイプを持つ大学等の工学系の研究者との連携も進めている。

#### (5) ミリ波とサブミリ波の違い

・ミリ波観測とサブミリ波観測の本質的な違いを、3つの主要な科学目的からめて、整理して説明されたい。

#### (回答)

##### サブミリ波観測の特徴

・ミリ波と比較してサブミリ波観測の最大の特徴は、星や惑星、あるいは銀河などの天体が形成される最終段階に肉薄できるという点にある。

その理由は以下の2点に集約できる。

干渉計のアンテナ間距離が一定であれば解像力は波長に逆比例し高くなるので短波長ほど有利である。サブミリ波はミリ波に比べて波長が短いため、高い解像力で天体の構造を描き出すことができる。

サブミリ波は、暖かく高密度のガスや塵から選択的に放射される。

そのため、そのような条件を持つ形成中の天体のすぐ近傍の姿をよ

り的確に描き出すことができる。

- 塵粒子から放射されるサブミリ波連続スペクトル成分の強度はミリ波に比べて2桁以上強くなり、検出効率が飛躍的に高くなる。
- 暖かく高密度の領域で塵粒子からガス中に放出されサブミリ波分光観測で検出される分子の中には、生命に関連する複雑な分子が存在すると期待される。
- ・ 上記の特徴のほかに、サブミリ波から遠赤外線に至る波長帯には中性炭素原子(CI)をはじめとする原子や原子イオンの微細構造遷移線が存在し、それらの観測から星間物質進化の初期段階を追うことが可能になる。

### 主要な研究テーマにおけるミリ波観測とサブミリ波観測の違い

添付資料 8 に示すように、両者は天体の異なる部分、異なる進化段階を見る。サブミリ波は、天体形成により近い部分、段階を見せてくれる。



### 3. 設備・機器等について

#### (1) 受信機の開発

・今後の受信機開発予定として、研究体制の確立、目標とする性能の実現等の見通しを説明されたい。

#### (回答)

研究・開発体制は以下のように確立されており、目標性能の実現の見通しが得られている。

	検出素子開発	受信機開発	量産技術	現在の状況
バンド4	国立天文台 (Nb 素子)	大阪府立大学 名古屋大学	大阪府立大 名古屋大学	目標性能をほぼ達成
バンド8	国立天文台 (Nb 素子)	国立天文台	国立天文台	目標性能をほぼ達成
バンド10	国立天文台 (NbTiN 素子) 通信総合研究所 (NbN 素子)	国立天文台 通信総合研究所 (ミキサ一部)	国立天文台	素子の開発に成功  素子の開発に成功

#### (2) システム構成

・12mアンテナはメインの64台のアンテナのうち、いくつかと共用できないのか。

#### (回答)

ACA システムの 12m アンテナは、単一アンテナモードで正確な画像を取得するための、他の 64 台にはない特殊な機能を付加したアンテナであり、共用は不可能である。

### (3) 耐用年数、更新投資

- ・この施設の機器の運用年数（研究テーマとして陳腐化するまでの年数）と物理的耐用年数を説明されたい。
- ・運用開始後の施設・機器の更新投資はどれくらい必要か。

#### (回答)

- ・サブミリ波天文学の歴史は浅く、特にサブミリ波帯での高感度・高分解能観測はアルマにより初めて実現されるものであるため、銀河形成や惑星系形成などの主要な研究テーマには運用開始後すぐに大幅な進展が期待されるものの、研究テーマやサブミリ波天文学という研究手法自体が数十年で陳腐化するものではない。科学的にはむしろ、このような大規模な装置の実現が新たな現象の発見につながり、それが新たな学問分野の創出に至る場合が多い。アルマが世界唯一無二の大規模なミリ波サブミリ波観測装置となり、これを上回る性能の装置が構想されていないことに鑑みると、アルマはその物理的耐用年数を迎えるまで運用されるものと思われる。なお、物理的耐用年数としては30年程度を想定している。
- ・運用開始後の施設・機器の最低限の更新にかかる投資は、日米欧の運用経費の中で実施できる程度の規模である。具体的には以下の通り：  
(日本負担年額はアルマ全体での必要年額の25%と想定。)
  - 受信機改良・開発：4年毎に1バンド程度開発
  - 相関器改良・開発：10年程度で新相関器開発
  - 計算機システム改良・開発：10年程度で新システム開発
  - 施設改良：山頂施設、山麓施設、山頂-山麓連絡道路・ネットワーク、サンチャゴ事務所の改良以上、日本負担年額の内数として合計 約3億円

### (4) メンテナンス等

- ・アンテナのメンテナンスは3000m級の場所へ移動して行うことになっているが、その効率はどうか。予備アンテナ等は存在するのか。一部のアンテナが動作していないときのシステムとしての動作は保証されているのか。

#### (回答)

山頂施設は標高5000mであり、低酸素や低い気温などに起因する安全上

のリスクや作業効率の低下を伴うため、5年に1度程度のアンテナのオーバーホールは標高2800mの山麓施設において行うこととしている。このための移動に伴うロスは1日程度である。予備のアンテナが存在しないためオーバーホール時の観測効率は低下するが、干渉計システムは一部のアンテナが動作していなくても観測自体は実施することができる。

#### (5) 高地対応

- ・5000mの辺境の地に、液体ヘリウム冷却を要するような高度な施設と設備と400人もの技術者が駐在するが、機器メンテナンスは適切に行うのか。具体的に説明されたい。
- ・また、電力等の機器のためのユーティリティ確保、人員駐在のためのインフラなどは、建設費の中に含まれているのか。具体的に説明されたい。

#### (回答)

- ・山頂施設は標高5000mにあり、受信機モジュールの交換などの簡単な作業以外は実施せず、簡単なメンテナンスは山麓施設で、また複雑なメンテナンスについては装置製作を担当した機関においてそれぞれ行う。部品の共通化等によって保守作業とコストの軽減を図るほか、定期的なメンテナンスは現地雇用の技術者にも実施できるよう建設段階において教育する。なお、受信機は液体ヘリウムでなく閉サイクルヘリウム冷凍機により冷却されるため維持は容易である。また、400人とされる現地職員には望遠鏡の運用保守のみならず、ハウスキーピング等のために現地雇用される職員も含まれる。
- ・インフラの整備は、主要部分(宿泊施設などの山麓施設、山頂施設、その間の道路など)については先行する米欧が実施することとなっており、米欧の建設費に既に含まれている。残る電源については、建設期にはレンタルの仮電源設備で対応する予定である。完成後の本格的運用時の電源については、商用電源利用案と専用電源設備導入案の2案について現在三者で検討を行っている。いずれの場合にせよ運用経費で対応する計画であり、日本も応分の負担をする予定である。

( 6 ) 冷凍機

・液体ヘリウム温度冷凍機の信頼性 (MTBF)、全アルマシステムにおいて約 100 台の冷凍機が支障なく運用される確率 (見込み) とその根拠、現在までの最大規模システムの実績について、説明されたい。

( 回答 )

アルマで使用する Gifford-McMahon 式 4K 冷凍機は、10000 時間毎のメンテナンスを正しく行えば、ワイブル解析により見積もられる MTTF (Mean Time To Failure) は 275 年以上と極めて超寿命である。また、同型の冷凍機は医療用超伝導 MRI に 4500 台以上 (2003 年 9 月現在) の使用実績があり、標高 4000m 以上のハワイ島・マウナケア山とアタカマ高地でも、合計 7 台が 2 年以上支障なく稼働している。以上より、故障の頻度は 3 年で 1 台程度以下であり、約 80 台の冷凍機は支障なく運用されると思われる。

#### 4 . その他

##### ( 1 ) 情報公開

・ 納税者に対する説明やフィードバックは、このような大計画では特に重要です。アルマ計画の波及効果の中で、国民的夢の創出効果が上げられていますが、具体的にはどのような方策で行おうと考えてるのでしょうか。これまで、すばるなどの観測結果は、インターネットやマスコミなどで公開されていますが、アルマでは何か、新たな計画をお持ちでしょうか。もし見学希望（関係者以外）があればどのように対応する考えか。

##### ( 回答 )

- ・ 日本が米欧に伍して巨大な電波望遠鏡を共同建設することによる国民的な夢の創出効果についてはアルマ計画推進を求める署名に添えられたコメントなどからも明らかで、計画段階から国民と夢を共有すべく、さまざまな方策を凝らしている。具体的には、国立天文台が運用するアルマ計画ホームページの上で計画の概要や進捗を随時公開しているほか、アルマ計画推進に賛同する人のためのメーリングリスト(一般市民を中心に約 5000 名が参加)やインターネット上の掲示板において詳細な進捗報告を行ったり、計画を推進する国立天文台や大学等の研究者が各地で講演会等を毎年約 20 回の頻度で開催したりしている。記録のための映像も撮りためている。さらに、マスコミなどを通じて計画の知名度自体も上がってきており、計画に対するマスコミの論調も好意的である。
- ・ 観測成果の公開については、ハッブル宇宙望遠鏡などに準じて速やかに行われる。国民全体に対する成果の公開という観点では、マスコミやインターネットを通じた公開に加え、ビジターセンターを国内外に設けることなどを計画しており、4次元宇宙シアターなどの可視化技術も活用する。
- ・ 施設見学に関しては、アルマが標高 5000m の十数 km の範囲に展開される装置であることを踏まえ、ビジターセンターを山麓施設に併設し、通常はそこでのアンテナメンテナンス風景などを見学いただくことを想定している。現地はチリ北部の観光拠点であるサンペドロ・デ・アタカマに近いので、実際にビジターセンターを訪れる邦人の数も少なくないと期待される。一方、山頂施設の見学については、見学者の安全確保にも配慮しつつ慎重に検討を進めている。また、日本国内にも見学者用コースを設け、

観測成果や開発された最先端機器の公開を行うことも計画に盛り込まれている。また、国民向けにインターネット上での仮想ツアーも準備する。

## (2) プライオリティ

・文科省内における本ビッグプロジェクトのプライオリティは？

### (回答)

- ・ アルマ計画は、銀河や惑星等の誕生と進化の解明につながる非常に意義深いものであり、天文学の発展に大きく寄与するものと考えている。
- ・ 本計画については、科学技術・学術審議会において評価をいただき、本年1月、「日本が相応の規模でアルマ計画に参加することは、国際的に日本の学術的及び文化的側面からのプレゼンスを高める重要かつ絶好の機会になり、・・・その実現に向けて最大限の努力をすること」「早期の正式参加の決定を実現すること」などとする報告をいただいたところである。
- ・ したがって、平成16年度概算要求における最重要のプロジェクトの一つであると考えている。

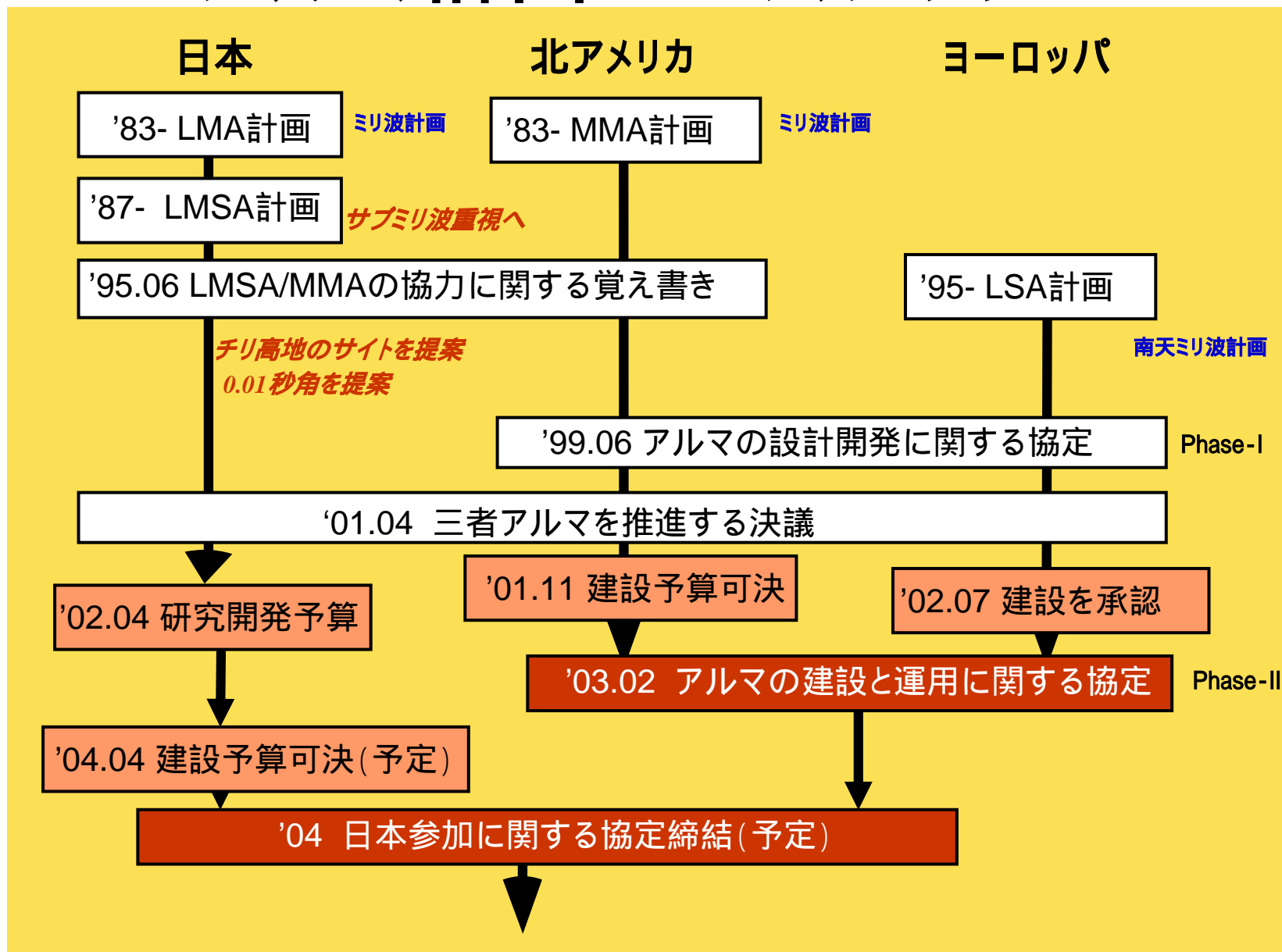
## (3) 日本発のプロジェクト

・アルマを利用した、日本発の新しい国際連携プロジェクトを何か考えてないのか。

### (回答)

日本はこれまで、チリ高地サイト調査(1992年～)を世界に先駆けて開始したり、日本学術振興会/米国国立科学財団による重点研究国際協力事業「サブミリ波天文学の日米共同開発研究(1997～1999)を組織するなど、「大型干渉計によるサブミリ波天文学の開拓」において世界をリードしてきた。その結果、米欧計画もサブミリを重視するように計画変更を行い、アタカマサイトへの変更や望遠鏡のサブミリ波対応を進めてきた経緯がある。日本の主導的な計画推進が無ければ、アルマはミリ波干渉計にとどまっていたであろう。アルマ完成後は日本のこれまでの蓄積を生かし、サブミリ波天文学を中心とした国際的な観測プロジェクトを組織すべく、準備を進めている。

# アルマ計画へのステップ



## ミリ波サブミリ波帯の大型干渉計計画の経緯

国立天文台の動き	米欧の動き	備考
'82 野辺山宇宙電波観測所開所		
'83 <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">大型ミリ波干渉計(LMA)構想</span>	'83 米、 <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">ミリ波干渉計(MMA)構想</span>	
'87 <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">大型ミリ波サブミリ波干渉計(LMSA)構想</span> (サブミリ波・国外設置重視)	'91 米、バーコール報告で MMA 計画の勧告 欧、大型のミリ波干渉計の構想	
'92.02 チリサイト調査開始(国際学術研究 '94-'95)	'95 欧、 <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">大型南天干渉計(LSA)構想</span> 米、チリサイト調査開始	'94.07 日本学術会議天文学研究連絡委員会「21世紀に向けた天文学長期計画」で LMSA 計画の勧告
'94.03 日米間の協議開始		
'95.06 国立天文台/米国立電波天文台間で <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">LMSA/MMA の協力に関する覚書の締結</span>		
'96.05 LMSA 調査費要求開始		'95.11 野辺山宇宙電波観測所第三者評価で LMSA 計画についての調査研究の勧告
'97.02 日本学術振興会/米国立科学財団による重点研究国際協力事業「サブミリ波天文学の日米共同開発研究」開始		
'97.03 日米ワークショップ「0.01 秒角分解能によるミリ波サブミリ波天文学」で <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">LMSA/MMA 結合計画の提案</span>		
	'97 欧、チリサイト調査開始	'97.04 サブミリ波部門新設
	'97.06 米国立電波天文台/欧州南天天文台間で <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">MMA/LSA 合同計画に関する決議書の締結</span>	'97.11 国立天文台第三者評価で LMSA 計画(特に国際協力)の勧告
'98.03 国立天文台/米国立電波天文台間で <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">LMSA/MMA の協力に関する覚書の更新</span>		
	'98.10 米、MMA の設計開発研究開始(~27MS/3年)	
'98.11 第1回天文学研究連絡委員会シンポジウム「宇宙探求のフロンティアと LMSA」で国際大型干渉計の提案		
'98.12 野辺山宇宙電波観測所/チリ大学天文学教室間で <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">LMSA への協力に関する覚書の締結</span>	'98.12 欧、ヨーロッパコンソーシアム結成決議 <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">LSA の設計開発研究開始(~15MS/3年)</span>	
	'99.01 米国立科学財団/欧州調整委員会間で MMA/LSA の合同に関する決議書の締結	
'99.03 国立天文台/米国立科学財団/欧州調整委員会間で <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">LMSA/MMA/LSA の統合に関する決議書の締結</span>		
	'99.06 米国立科学財団/欧州調整委員会間で <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">ALMA の合同での設計開発に関する協定の締結</span>	
'99.08 国際電波科学連合総会で大型のミリ波サブミリ波干渉計計画についての国際ワークショップ開催		
'99.09 ALMA 東京会議で LMSA-ALMA 両計画の連携と合同のための決議書の提案		
'99.10 ALMA ワシントンサイエンスシンポ ALMA 科学諮問委員会結成決議		
'99.11 国立天文台/ALMA 調整委員会(ACC)間で <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">LMSA-ALMA 両計画の連携と合同のための決議書の締結</span>		ALMA リエゾングループ(ALG)結成決議
'00.01 第2回天文学研究連絡委員会シンポジウム「LMSA と日本の自然科学」		
'00.02 LMSA/ALMA 技術会議(東京)で設計開発期における日米欧の技術協力に関する意見交換		
'00.03 ALG より国立天文台/ALMA 調整委員会宛てに <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">日本分担案の提案</span>		
	'00.04 ACC 会議(ワシントン D.C)で ALG 提案の報告	'00.04 星・惑星形成部門新設
'00.06 ALG 会議(シャーロットビル)で <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">日本の参加に関する具体案の検討</span>		
	'00.10 ACC 会議(パリ)で 3者共同建設に基本合意	'00.12 学術審議会総会への特定領域推進分科会から ALMA 計画推挙の報告
	'01.04 ACC 会議(東京)で <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">3者共同建設の決議書の締結</span>	
'02.04 大型ミリ波サブミリ波干渉計のための調査研究開始(2年)	'01.11 米、大統領が NSF 予算案に署名、建設開始	
	'02.07 欧、評議会で予算計画を承認、建設開始	'02.11 ALMA 計画に関する中国国家天文台との協力協定締結
	'03.02 <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">米欧 2者共同建設協定の締結</span>	'03.01 科学技術・学術審議会基本問題特別委員会天文学研究ワーキンググループによる ALMA 実施計画案の評価報告
	'04.04? <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">共同建設協定への日本の参加</span> 〔予定〕	'03.01 高度環境試験棟完成 '03.08 ALMA 計画に関する台湾 ASIAA との協力協定締結 '03.08 文部科学省アルマ計画概算要求
'11 ALMA 完成〔予定〕		



## システム比較

ACAシステムの単独運用は想定していないため、比較からは除外した。  
表中の 、 、 などはケース に対する相対評価である。

ケース		米欧日の全 体システムで 行ったとき	米欧(メインフ レーム)のみで行っ たとき【日本貢献分 含む】	:日本が参加しな かった場合
想定するシステム構成		64素子アレイと ACAシステムに 7つの受信バン ドと高分散相関 器を搭載	64素子アレイに7つ の受信バンドと高 分散相関器を搭載	64素子アレイにミリ 波中心の4つの受 信バンドと低分散 相関器のみ
シ ス テ ム の 性 能	感 度	コンパクトな成分		(約13%減)
		滑らかに広がった成分		×(検出不可)
	解像度			(最高周波数低 下により最高解像 度が30%低下)
	電波強度の 測定精度		(空間的に広がっ た成分を欠測)	同左
	周波数帯域	(7バンドで総 帯域625GHzを カバー)		(4バンドで総帯 域309GHz。サブミリ 波を中心に半減)
	分光性能	(広い周波数 範囲を同時に詳 しく分光)		(広い周波数範 囲を同時には詳しく 分光できない)
	サブミリ波観測		(視野が狭い)	(最高周波数帯を 含め70%を失う)
達成できる研究の質 (総合評価)			+ (原始惑星系 円盤や初期銀河な どの広がった天体 では、正確な構造 が描けず決定的に 力不足となる)	- (に加え、サ ブミリ波天文学の 本格的な展開が不 可能となり、宇宙物 質進化の研究が大 きく制限される)

## アルマ計画：国立天文台人員体制

	現在（総計 30 人）	建設・運用期（総計 78 人）
マネージメント他	9: 教 3、助教 2、助 1、秘 3	14: 教 3、助教 3、助 2、秘 6
アンテナ他	6: 助教 1、助 3、技 1	11: 教 1、助教 1、助 4、技 3、 研究員 2
受信機他	9: 助教 2、助 2、技 3、 研究員 2	20: 教 2、助教 2、助 4、技 6、 研究員 6
関連器他	2: 教 1、助教 1、（助 1）	8: 教 1、助教 3、助 2、 技 2、研究員 2
計算機、 データベース他	4: 助教 2、研究員 2	11: 教 1、助教 3、助 2、 技 1 研究員 4
観測法・サイエンス 運用サポート他	0; (教 1、助教 1)	14: 教 2、助教 2、助 4、 技 2、研究員 4

注 1) 教：教授、助教：助教授、助：助手、技；技官、秘：秘書

注 2) ( )内は、他のセクションとの併任

注 3) チリ現地で雇用する運用人員や、また大学院生を含まず)

## チリでの運用人員（日本担当約 100 名）の内訳

職種		補足
国立天文台 スタッフ	20 人	国立天文台スタッフ総数 78 人の内数。約 3 交代制 で対応
チリ人スタッフ	40 人	2 交代制で、主にサイトの運用支援センターで勤 務。
業務委託スタッフ	40 人	2 交代制で、主にサイトの運用支援センターで勤 務。

（注 1）業務委託スタッフ（契約スタッフ）は、主に観測オペレータ、データバックアップ、レストラン運営、宿泊施設維持、観測施設維持、物品輸送などのルーチン業務に従事する。

## 各運用チームでの職種別内訳

職種別内訳	国立天文台スタッフ	チリ人スタッフ	業務委託
マネージメント他 計 6 人	4 人	2 人	-
科学運用 計 30 人	6 人	12 人	12 人
装置維持・管理 計 30 人	10 人	20 人	-
施設維持・管理他 計 34 人	-	6 人	28 人

### 東アジア天文学会議（EAMA）の活動一覧（主要なもの）

- 1990年 「星の形成」日中シンポジウム（中国） 韓国も参加  
「東アジア天文会議」の組織を合意
- 1991年 第2回EAMAシンポ「ミリ波・赤外線天文学とアジア国際協力」韓国
- 1993年 「東アジア天文台サイト合同調査」実施（中国青海・チベット地域）
- 1995年 第3回EAMAシンポ「アジアにおける地上からの天文学」東京
- 1999年 第4回EAMAシンポ「アジアの観測天文学とその将来」中国
- 2001年 第5回EAMAシンポ「東アジアにおける天文学将来計画」台湾  
活動強化のためEAMA組織委員会を設置（議長は海部）
- 2002年 EAMAワークショップ「東アジア望遠鏡構想」中国
- 2003年 EAMAワークショップ「東アジア若手天文学者会議」台湾
- 2004年 EAMAワークショップ「サブミリ波天文学とALMA」中国（予定）
- 2004年 第5回EAMAシンポ（タイトルは協議中）韓国（予定）

### 東アジア諸国（地域）の現状

東アジア諸国（地域）それぞれの現状は、概略以下のようである。

台湾は現在国立天文台の設立を検討中で、アルマを当面する計画の中心に据えることも視野にある（海部はそのための評価委員会のメンバー）。ただ中国との関係もあり、極めて微妙な段階である。

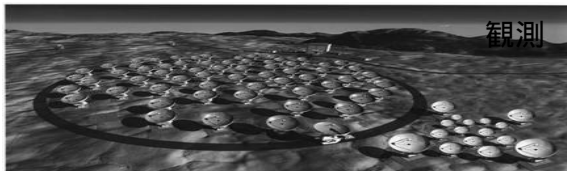
中国は国家天文台としてアルマに協力することを決めた（協力協定）が、建設段階への費用負担は極めて困難であり、日本の協力で研究者層を育成したい考え。

韓国は、国内政策との関係もありまずVLBIの建設を進めている（国立天文台と協力協定を締結）。アルマはその先の計画として参加したい考え。

以上のように、アルマで最初から合同体制を作ることはそれぞれのレベルや状況の違いから得策ではないので、ボトムアップで着実に東アジアの合同体制を作り上げてゆきたいと考えている。

# 現在想定されている観測提案からデータ取得までの流れ

日本の持ち込む装置を含むアルマ全体を、一つの観測装置として共同運用



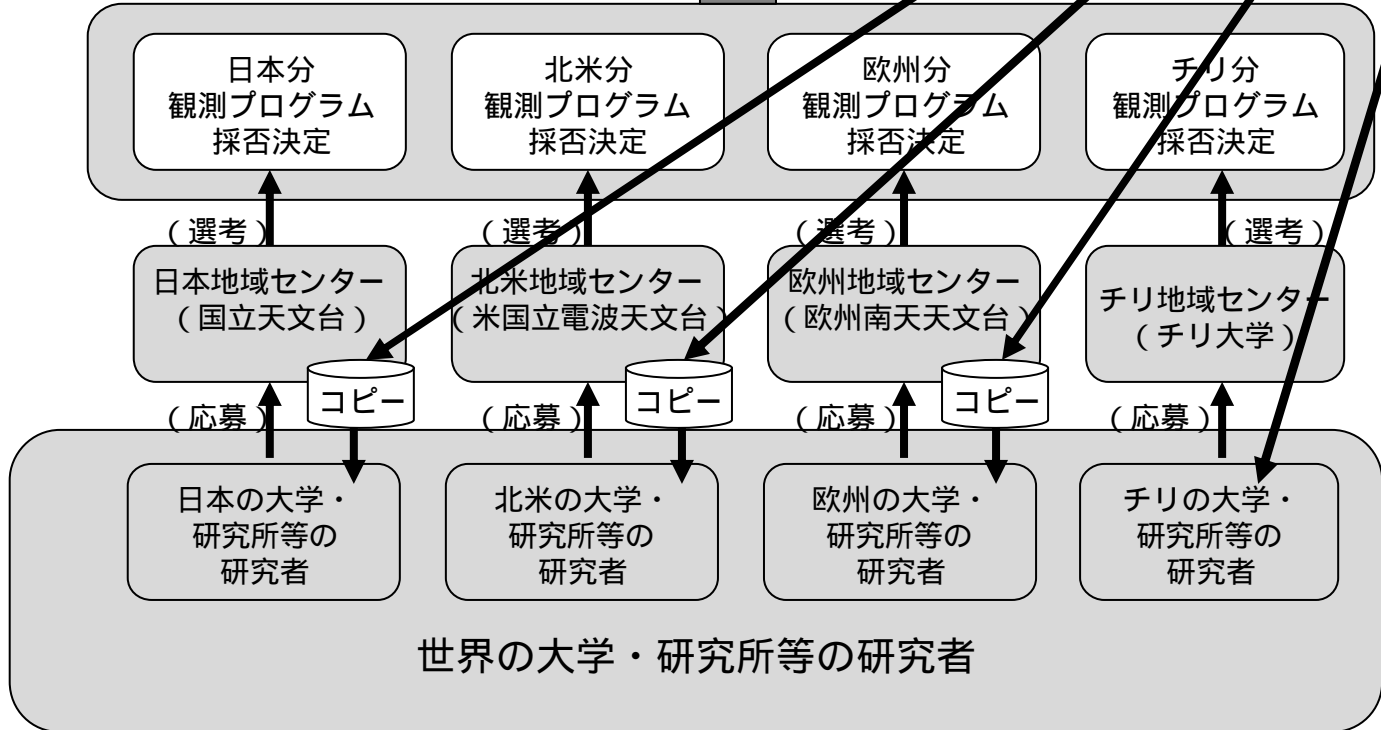
**観測時間の配分比を保証**  
 (チリ時間10%を除く観測時間を100%としたときの割合)  
 日本: X (%)  
 北米・欧州それぞれ: (100 - X) / 2 (%)

アルマ観測実施プログラム

世界の研究者に公開

(観測から1年後)

他地域枠への応募も可能だが、共同観測以外はハンディキャップとなる



日本分  
観測プログラム  
採否決定

北米分  
観測プログラム  
採否決定

欧州分  
観測プログラム  
採否決定

チリ分  
観測プログラム  
採否決定

日本地域センター  
(国立天文台)

北米地域センター  
(米国立電波天文台)

欧州地域センター  
(欧州南天天文台)

チリ地域センター  
(チリ大学)

日本の大学・  
研究所等の  
研究者

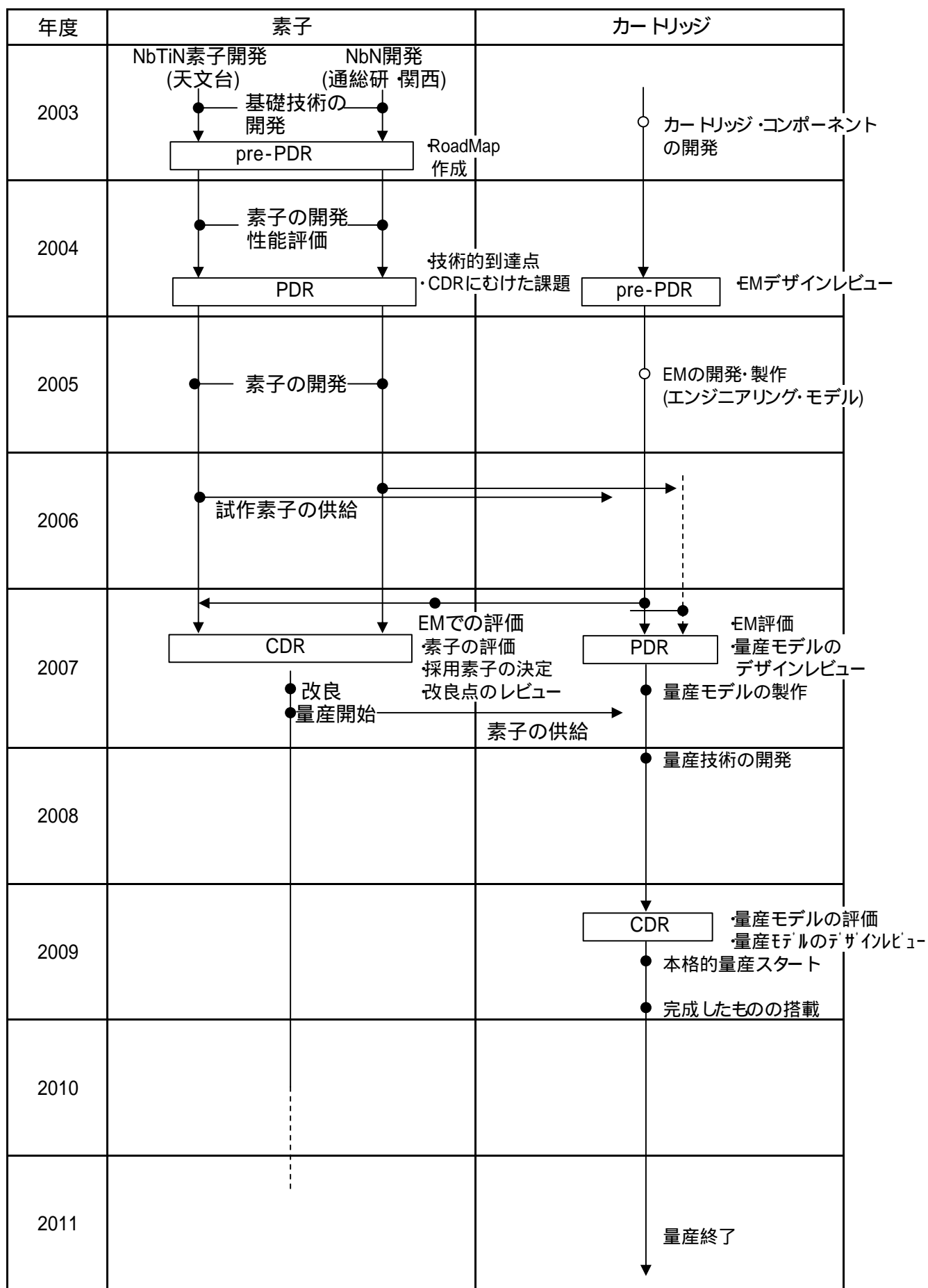
北米の大学・  
研究所等の  
研究者

欧州の大学・  
研究所等の  
研究者

チリの大学・  
研究所等の  
研究者

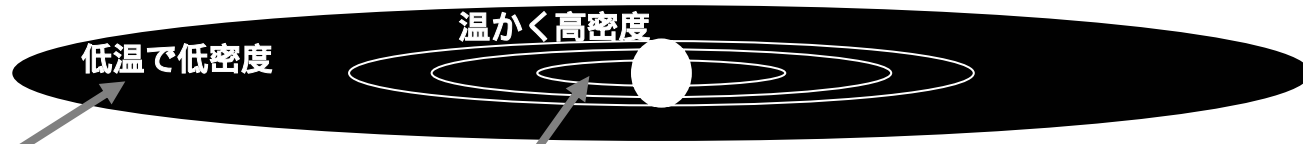
世界の大学・研究所等の研究者

Band-10 カートリッジ量産ロードマップ



# アルマの3大科学目標にサブミリ波観測がもたらすブレイクスルー

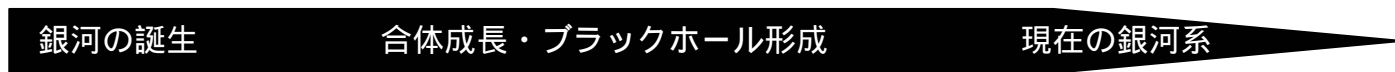
## 太陽系外惑星系の形成



ミリ波  
原始惑星系円盤の外縁部分を観測

サブミリ波  
円盤内側の惑星形成領域を高解像力で観測  
ダストからの惑星形成過程や生命関連物質を探る

## 銀河の形成と進化



サブミリ波  
初期宇宙における銀河の誕生を観測

サブミリ波  
銀河衝突に伴う爆発的星形成や巨大ブラックホール形成現場の温かい高密度ガスを高解像力で観測

ミリ波  
銀河円盤部の進化を観測

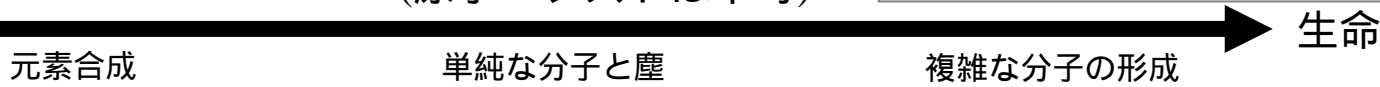
## 宇宙における物質進化



サブミリ波  
若い銀河からのC<sup>0</sup>や、赤方偏移したC<sup>+</sup>やN<sup>+</sup>等の輝線をとらえる

ミリ波  
低温の暗黒星雲中に、独特な化学反応により生成されるさまざまな星間分子を検出する(原子・ダストは不可)

サブミリ波  
原始惑星系円盤など温かい高密度分子雲中に、生命関連分子などの複雑で微量な分子を検出する。



## 「アルマ計画」 追加資料一覧

### 1) 日米欧の単独計画からアルマへ

#### 関連質問項目

#### 1. 計画の枠組み等について

(1) 経緯 頁 2 - 3

### 2) スケジュール(主要なマイルストーン)

#### 関連質問項目

#### 1. 計画の枠組み等について

(2) 不利克服への対応 頁 5 - 6

### 3) 米欧との協議の経緯

#### 関連質問項目

#### 1. 計画の枠組み等について

(2) 不利克服への対応 頁 6

### 4) アルマにおける主要なキーテクノロジーの開発とその実績

#### 関連質問項目

#### 1. 計画の枠組み等について

(3) リーダーシップを発揮する仕組み 頁 7 - 8

(5) 計画の妥当性 頁 9 - 10

### 5) ミリ波サブミリ波での放射

#### 関連質問項目

#### 1. 意義、役割、効果等について

(5) ミリ波とサブミリ波の違い 頁 22 - 23

関連質問項目

1. 計画の枠組み等について  
(1) 経緯 頁2 - 3

## 追加資料 1 . 日米欧の単独計画からALMAへ

計 画 名	ALMA アタカマ大型ミリ波 サブミリ波干渉計	LMSA(日) 大型ミリ波 サブミリ波干渉計	MMA(米) ミリ波干渉計	LSA(欧) 大型南天干渉計
アンテナ 直 径	12m、7m	10m	8m	16m
台 数	80	50	40	50
鏡面精度	20 μm、17 μm	17 μm	25 μm	(詳細不明)
受信機 観測周波数	84-950GHz	80-850GHz	36-366GHz	43-350GHz
バンド構成 (ミリ波)	84-116GHz 125-163GHz  211-275GHz 275-370GHz	80- -150GHz  200-300GHz 300-400GHz	36- 50GHz 67- 95GHz 91-119GHz 125-163GHz 163-211GHz 211-275GHz 275-366GHz	43- : : (詳細不明) : : -350GHz
バンド構成 (サブミリ波)	385-500GHz 602-720GHz 787-950GHz	400-500GHz 600-710GHz 800-850GHz		
相 関 器 帯 域 幅	4GHz+	4GHz+	2GHz+	4GHz+
分 光 点 数	8192	10000+	8192	1000
干 渉 計 最大基線長	14km	10km	3km	10km
最高解像度	0.01"	0.01"	0.1"	0.1"
設置候補地	チリ (標高5000m)	チリ (標高4800m)	ハワイ (標高3700m)	チリ (標高3000m+)
推進母体	日・米・欧	国立天文台	NRAO(米)	ESO(欧)
構 想 年		1983年	1983年	1995年
特 徴	超高空間分解能 サブミリ波重視 大集光力 広視野	超高空間分解能 サブミリ波重視	広視野 ミリ波重視	大集光力 ミリ波重視



## 追加資料 2 .スケジュール (主要なマイルストーン)

関連質問項目

1. 計画の枠組み等について
- (2) 不利克服への対応 頁5-6

日本分担分	米欧分担分
2004 Q2 日本分担分の建設開始	2003 Q4 チリでの第1期工事着工
	2005 Q2 第1期工事完了
	2005 Q2 最初の信号伝送 変換部を現地に搬入
	2005 Q4 最初の量産アンテナ
2006 Q1 最初の評価受信機を現地に搬入	及び 最初の受信機を
2006 Q2 最初のACA 12mアンテナを現地に搬入	現地に搬入
2007 Q1 最初の量産受信機を現地に搬入	
2007 Q3 ACA 12mアンテナ4台を使用した初期運用に参加	2007 Q3 初期運用開始 (12mアンテナ8台程度)
2007 Q4 最初のACA 7mアンテナを現地に搬入	
2009 Q3 ACAシステムの初期運用開始	
2011 Q3 建設完了	2011 Q4 建設完了
2012 Q1 本格運用開始	

関連質問項目

1. 計画の枠組み等について
- (2) 不利克服への対応 頁 6

### 追加資料 3. 米欧との協議の経緯

文部科学省・科学技術学術審議会での日本参加案の評価を受け、米欧との詳細にわたる具体的な協議を 2003 年 2 月より開始。現在までに、6 回にわたる台長レベルの交渉会議、数回にわたるプロジェクトマネージャレベルの協議を行ってきた。日本参加案に関しては、日本の建設予算が概算要求通り認められればという条件で、ほぼ最終合意、貢献度と協定書に関しては、基本的な合意に至っている。今後は、来年 2 月に予定している貢献度と協定書について最終的な合意を行うための細部の詰めを行う。協定書は、来年 6 月に締結予定。

日・場所	位置づけ	日本参加案	貢献度	協定書
03 年 2 月 25 日 (ビデオ会議)	第 1 回交渉会議	日本参加案を提案	貢献度についての考え方を議論	
03 年 3 月 26 日 (米国・ソコロ)	プロジェクトマネージャレベルの協議	技術面での整合性の検討開始		
03 年 4 月 8 日 (電話会議)	第 2 回交渉会議	日本参加案について協議継続		
03 年 5 月 8 日 (アムステルダム)	第 3 回交渉会議	日本参加案についての <b>基本合意</b>	貢献度についての本格交渉開始	今後の検討スケジュールを検討
03 年 6 月 2-6 日 (カナダ)	プロジェクトマネージャレベルの協議	技術面での整合性の詳細検討、運用体制の詳細検討	貢献度の算定についての技術的な協議	
03 年 6 月 30 日 (東京)	第 4 回交渉会議	日本参加案についてほぼ <b>最終合意</b>	貢献度の日本提案と米欧提案について交渉	協定書の考え方についての合意
03 年 8 月 8 日 (テレコン)	第 5 回交渉会議		交渉継続	交渉継続
03 年 9 月 25 日 (ワシントン)	第 6 回交渉会議		貢献度について、 <b>基本的な合意</b>	協定書草案について <b>基本合意</b>
04 年 2 月(予定) (東京)	第 7 回交渉会議		<b>最終合意(予定)</b>	<b>最終合意(予定)</b>
04 年 6 月(予定)				協定締結

関連質問項目

1. 計画の枠組み等について

(3) リーダシップを発揮する仕組み 頁 7 - 8

(5) 計画の妥当性 頁 9 - 10

## 追加資料 4 : アルマにおける主要なキーテクノロジーの開発とその実績

### 1) アンテナ技術

(主に 12m プロトタイプアンテナの研究開発成果)

- ・アルミブロックからの NC 加工により鏡面精度 5 ミクロン rms の超高精度鏡面パネルの開発に成功。特殊な表面処理により太陽光を 98% 散乱させ、太陽方向のみならず太陽そのものの観測が可能とした (2000 年 ~ 2001 年)。
- ・カーボンファイバとインバーを多用した高精度主鏡面構造の採用により、自重変形、熱変形、風変形を抑え、総合鏡面精度仕様 25 ミクロン rms 以下を達成する見通しを得た (2001 年 ~ 2002 年)。
- ・波長 3mm の電波ホログラフィーに鏡面測定を実施中。再現性 10 ミクロン rms を達成 (2003 年)。
- ・世界最高レベルの角度エンコーダを開発、新規開発のアンテナ姿勢測定装置とあわせて、指向精度仕様 0.6 秒角 rms 以下を達成する予定 (2000 年 ~ 2003 年)。

### 2) 受信機技術

- ・野辺山宇宙電波観測所のクリーンルーム内の SIS (超伝導) ミキサー開発施設を使用し、広帯域特性が期待される「ジャンクションアレイ構造」を世界に先駆けて開発 (1997 年)。バンド 4 用およびバンド 8 用 SIS ミキサーで良好な性能を実現した。バンド 4 およびバンド 8 についてはほぼ ALMA 仕様を達成した (2001 年 ~ 2003 年)。
- ・三鷹高度環境試験棟に新たにクリーンルームを作り、バンド 10 用 SIS ミキサー素子として NbTiN 素子を開発中。DC 特性の評価まで進めた (2002 年 ~ 2003 年)。
- ・GM 冷凍機を開発し、受信機評価用冷凍機 4 台を米欧の受信機開発グループ (4ヶ所) に提供、冷凍機性能・操作性について米欧グループの高い評価を得ている (2002 年)。
- ・バンド 4 (大阪府立大学との共同)、バンド 8、バンド 10 受信機システムのプロトタイプが完成し、評価中 (2002 年 ~ 2003 年)。
- ・ALMA 型受信機 (バンド 3 およびバンド 5 用) を製作し、12m プロトタイプアンテナに搭載し、アンテナ評価に使用中 (2003 年)。
- ・2 波長のレーザー光混合によるミリ波・サブミリ波発生技術 (フォトリック LO) の開発を NTT、電気通信大学との協力で行い、世界で初めて天文観測に応用し、その高い性能を確認した (2000 年 ~ 2003 年)。

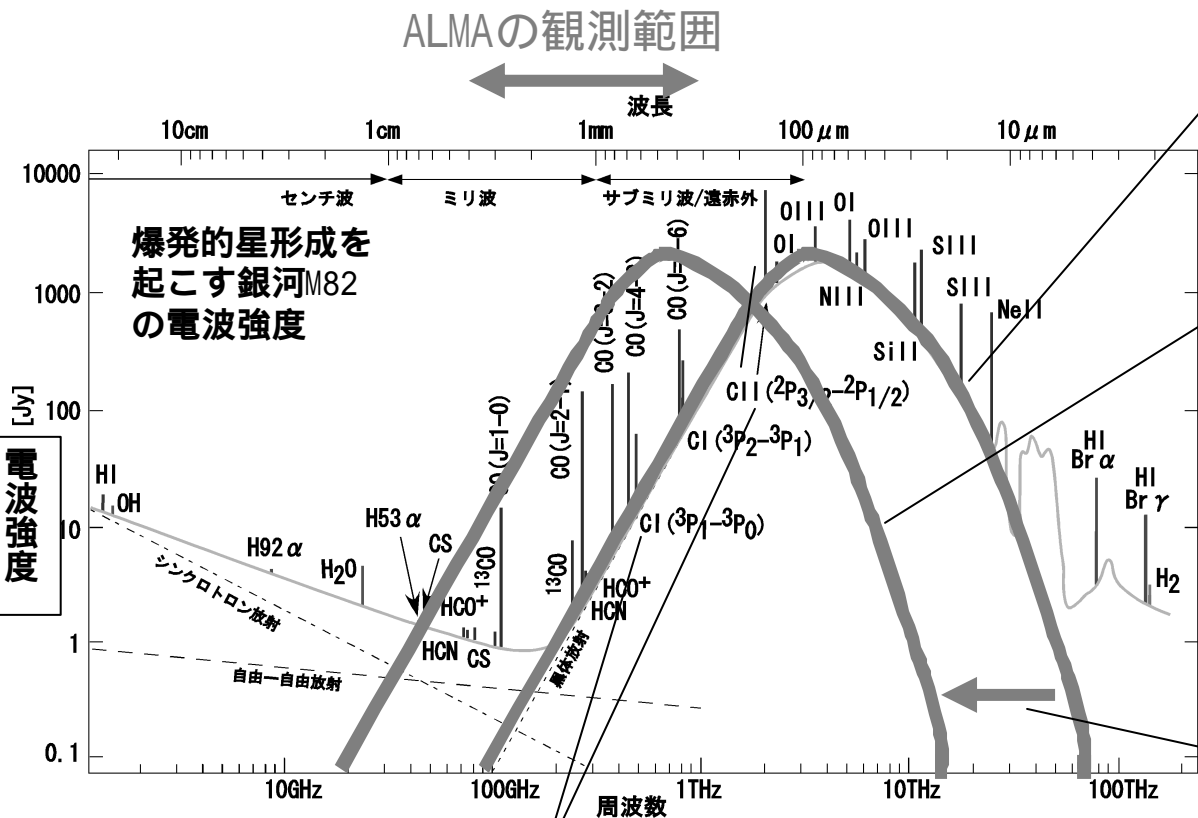
### 3) 関連器技術

- ・野辺山宇宙電波観測所のミリ波干渉計用に世界で初めて「FX 方式」によるデジタル分光相関器を開発 (1987 年)。その技術蓄積をもとに、スペース VLBI はるか用相関器を製作、この分野で世界をリード (1997 年)。
- ・プロトタイプ相関器を試作し、野辺山ミリ波干渉計と接続して、2 GHz 帯域 13 万チャンネルといういまだかつてない高分散分光観測に成功した (2001 年 ~ 2002 年)。

# 追加資料5 . ミリ波サブミリ波での放射

関連質問項目

1. 意義、役割、効果等について
- (5) ミリ波とサブミリ波の違い 頁22-23



## ダストからの放射

近傍銀河や惑星系誕生領域：  
ミリ波からサブミリ波で急激に  
強度が上昇(周波数の3-4乗)。  
100ミクロンでピーク。

誕生過程にある銀河：  
サブミリ波で放射エネルギーの  
ほとんどを放出。サブミリ波で  
効率良く検出・観測可。

宇宙膨張による  
赤方偏移効果(z=5)  
強度は約 $10^7$ 倍してあるが  
ALMAで検出可能なレベル

## 原子・分子からの放射

サブミリ波帯では、有機物の骨格であり、星間空間での物質進化の鍵となる炭素原子(CI)や赤方偏移した炭素イオン(CII)のスペクトル線の観測が可能になる。温かいガスからの微量分子成分が豊富に見える。

電波強度 [Jy]

爆発的星形成を  
起こす銀河M82  
の電波強度

10cm 1cm 1mm 100 $\mu$ m 10 $\mu$ m

ALMAの観測範囲

波長

センチ波 ミリ波 サブミリ波/遠赤外

10000 1000 100 10 0.1

10GHz 100GHz 1THz 10THz 100THz

周波数

HI OH  
H92 $\alpha$  H<sub>2</sub>O  
H53 $\alpha$  CS  
HCO<sup>+</sup> 13CO  
HCN CS  
自由-自由放射  
シンクロトロン放射

CO (J=1-0)  
CO (J=2-1)  
CO (J=3-2)  
CO (J=4-3)  
CO (J=5-4)  
CO (J=6-5)  
13CO  
HCO<sup>+</sup>  
HCN  
CI (3p<sub>2</sub>-3p<sub>1</sub>)  
CI (3p<sub>1</sub>-3p<sub>0</sub>)  
CI (2p<sub>3/2</sub>-2p<sub>1/2</sub>)

OIII OI  
NIII  
SiIII  
NeII

HI Br  $\alpha$   
HI Br  $\gamma$   
H<sub>2</sub>