

# 宇宙科学II（電波天文学） 第1回

国立天文台  
本間 希樹

## 今日の内容

- 自己紹介
- この授業について(内容、方法、評価など)
- 自分の研究紹介  
VERA、サブミリ波VLBI  
(電波天文学の入門をかねて)

## 自己紹介など

氏名： 本間 希樹(ほんま まれき)

所属： 国立天文台水沢VLBI観測所

連絡先： 〒181-8588

三鷹市大沢2-21-1

メール: mareki.honma@nao.ac.jp

電話:0422-34-3640

HP: <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/VERA/honma/index.htm>

(googleに“本間 希樹”で検索)

※約20年前(1990年)に東大駒場に入学

## 研究テーマ

現在の主要な研究テーマ

- 超長基線電波干渉計(VLBI)の手法を用いた銀河系構造の研究
- サブミリ波VLBIを用いたブラックホールの直接撮像

VLBI : Very Long Baseline Interferometer

## 国立天文台について

- もともとは東京大学東京天文台(1888年～)
- 1988年に国立天文台に改組
- 大学共同利用機関として、大型の望遠鏡を建設・運営する天文学研究の一大拠点



野辺山宇宙電波  
観測所(長野県)



すばる望遠鏡  
(ハワイ)



VERA



ALMA  
(チリ アタカマ高地)

他にも多数の望遠鏡有り

## 主な仕事場

- 国立天文台三鷹  
オフィスがある(滞在半分くらい)
- 国立天文台水沢 (岩手県奥州市)  
VERAの運用センターがある(年間1ヶ月程度滞在)
- チリ アタカマ高地  
ALMAや国立天文台のASTE望遠鏡などを用いた  
サブミリ波VLBIという新しいプロジェクトを推進中  
(年間1ヶ月?)

研究室見学など歓迎です

## 国立天文台三鷹＝隠れた桜の名所(昨日の様子)



## この授業の進め方

- 内容:電波天文学入門
- 方法:パワーポイントをベース  
重要な事項はときどき板書
- 評価:期末試験を実施

## 防災に関する諸連絡

### 教養部から来た連絡の抜粋

- 駒場キャンパスは耐震改修済。昨年3月11日の地震(ここでは震度5強)でも問題なし
- 講義中に地震が起きたら、まずは机の下に隠れ、教室に待機する (いきなり外に逃げない)  
最終避難場所: ラグビー場、陸上競技場
- 緊急地震速報を受信した場合は、皆に知らせる

## 過去の授業評価

- 2010年、11年はレポート4回で評価
- 10年は履修者200名程度、割とやさしめに問題設定
- 11年は「仏」との噂が広まって履修者が500名を超えてしまった
- 問題を少し難しくして、導入を授業で解説
  - 1) 提出枚数を減らすため
  - 2) 授業参加者・不参加者の差別化のため
- が、結果的には、少なくとも1)は達成できなかった

11年は合計2000枚以上のレポートを採点  
一枚1分でも~30時間 (講義時間より長い!)

## 授業および評価に関する見解

- 私は講義をしにきている(=天文学から雑多なことまで、将来を担う若者に伝えたいメッセージがある)
- 成績評価にはあまり興味がない。そもそもほとんどの人は天文学者を志すわけではないので、その理解度を厳密に測る必要性も感じていない。
- 単位生産工場に勤めているわけではない。
- 学生にはあまり負担をかけたくない(猛勉強や講義に絶対出席などの束縛はしたくない)
- こちらもあまり負担がない方がよい(e.g., 2000枚のレポート)

## 今年の授業評価

- 出席はとらない。  
(とるのが大変、集計も大変)
- レポート課題は出さない。  
(去年と同じ規模の採点は避けたい)
- 期末試験を行う。  
(講義内容を理解していれば解けるレベル)

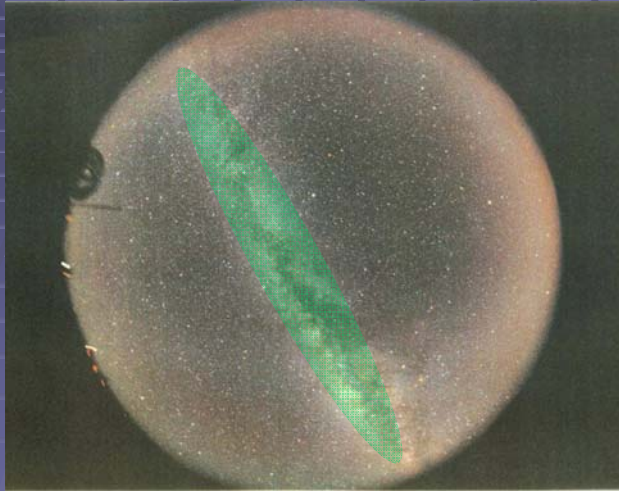
## 私の研究紹介

### 主な研究対象：銀河系

- VERA  
銀河系の真の姿を描き出す
- サブミリ波VLBI  
銀河系中心のブラックホールを直接撮像する



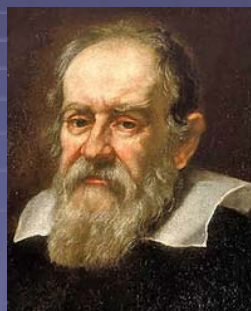
## 銀河系 = 天の川



天の川が星の集まりであることを発見したのはガリレオ

## 2009年：世界天文年

- ガリレオが初めて望遠鏡で宇宙を観測（1609年）してから400年目



ガリレオ・ガリレイ  
1564-1642



ガリレオの望遠鏡



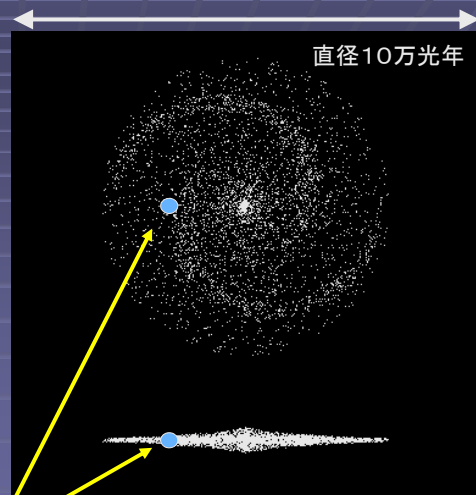
## 銀河系の想像図

### ■ 特徴

- 円盤状、渦巻きがある
- 星の数: 約2000億
- 中心にはブラックホール?



M63 銀河  
(銀河系もこんな形?)



太陽系

## 光の速さ と 光年

光の速さ : 毎秒 30万 キロメートル  
地球1週 0. 13秒  
月まで 1. 3秒 (月まで38万km)

光年 : 光が一年に進む距離

キロメートルで表すと:

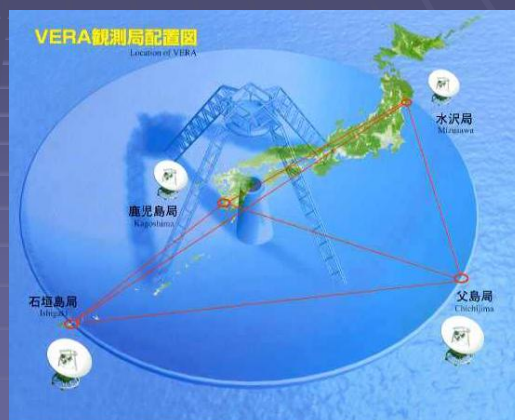
$$\begin{aligned} \text{毎秒 } 30 \text{ 万 km} \times 365 \times 24 \times 3600 &= \\ 9460800000000 \text{ km} \end{aligned}$$

# VERA

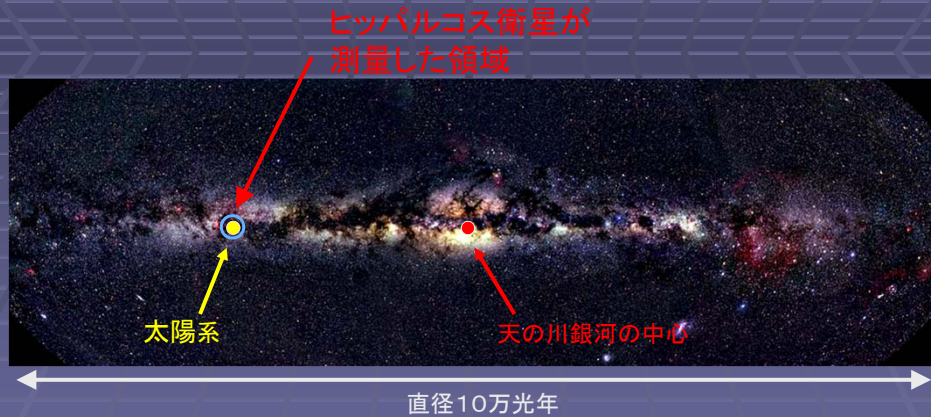
— 銀河系の3次元測量 —

## VERAについて

- VERA: VLBI Exploration of Radio Astrometry
- 4台の望遠鏡からなる電波干渉計
- 銀河系内の天体の距離を精密に測り最新の銀河系像を描く



## 銀河系全域の測量は未知の世界



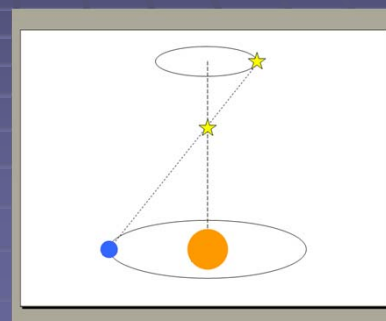
銀河系全域の測量は、まだ手付かすの未開の領域！  
これまでの100倍の精度を持つ新しい望遠鏡が必要！

## 星の距離を測る

- 年周視差法  
三角測量の原理で、仮定なしに天体の距離を測る方法。

地球の公転を利用し、  
星の位置の年周変動を  
測定

基準：地球—太陽間の距離  
1天文単位=1億5000万 km



年周視差の模式図

## 年周視差は小さい

太陽に最も近い星： ケンタウルス座 $\alpha$ 星

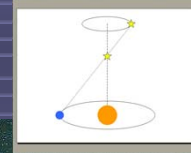
距離 4.3 光年  
(=27万天文単位)

視差 0.7 秒角  
(1/5000 度)

距離が遠い

→ 視差が小さい

→ 観測が難しい



八重山諸島からみた南天の星

## 角度の単位について

### ■ 角度の単位

1回転 = 360度

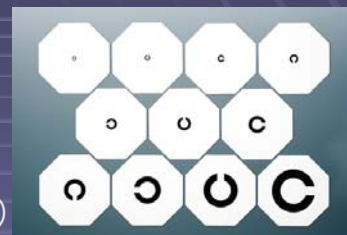
1分角 = 60分の1度

1秒角 = 60分の1分角

= 3600分の1度

(1ミリ秒角=1000分の1秒角)

(1 $\mu$ 秒角=100万分の1秒角)



ランドルト環

### ■ 人間の視力

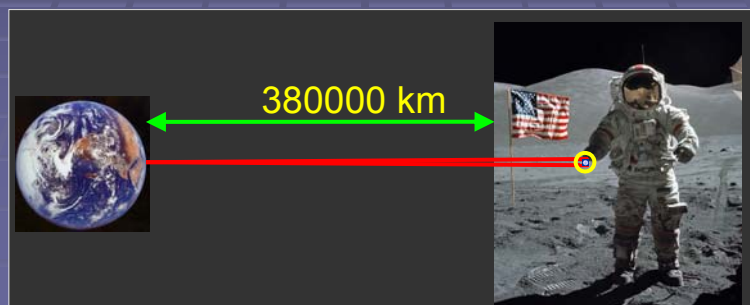
視力 1.0 : 1分角を見分けることができる  
(3m先にある大きさ1mmのものに相当。)

## 距離の単位について

- 年周視差1秒角に相当する距離を  
1 pc (パーセク) と呼ぶ
- 1000 pc = 1 kpc (キロパーセク)
- 1000 kpc = 1 Mpc (メガパーセク)
  
- $1 \text{ pc} \sim 3.09 \times 10^{13} \text{ km} \sim 3.26 \text{ 光年}$
  
- 太陽近傍の星まで                    ~数 pc
- 銀河系の中心まで                    ~8 kpc
- 隣の銀河まで                    ~1 Mpc

## 銀河系測量の要求精度

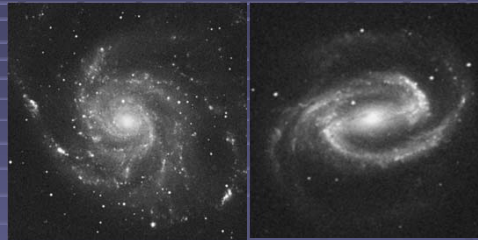
- 銀河系中心 8 kpc  
→ 年周視差 125  $\mu$ 秒角  
これを見分けるには 10 $\mu$ 秒角 (約4億分の1度)  
レベルの測定精度が必要  
(月面上の1円玉を地球から見たときの角度)



## 銀河系の測量からわかること

- 銀河系の大きさ、構造

- 天体の距離、明るさ、大きさ 等々  
(銀河系内の天体を対象としたすべての天文学研究の基礎)



渦巻き銀河(左)と棒渦巻き銀河(右)

天の川はどっちだろう?

- 暗黒物質(光らない物質)の量と分布

## VERA: VLBI Expolration of Radio Astrometry

4台の電波干渉計で  
銀河系の測量を行う

入来



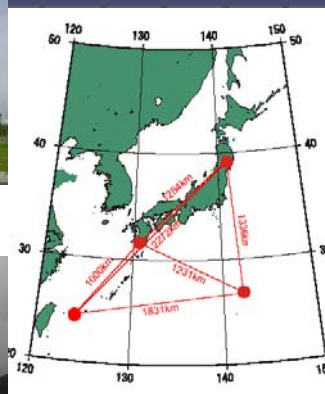
石垣島



水沢



小笠原



最長基線 : 2300 km  
完成 : 2002年春  
観測 : 2004年～

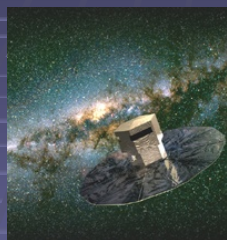


## 南の楽園 石垣島



## 銀河系測量をめぐる状況

- 国際衛星プロジェクトが複数予定されている



GAIA (ヨーロッパ)  
2013年打ち上げ



JASMINE (日本)  
2020年打ち上げ?

目標はいずれも、銀河系の測量

VERAの利点: 早くから観測開始、電波  
VERAの難点: 天体数が少ない。



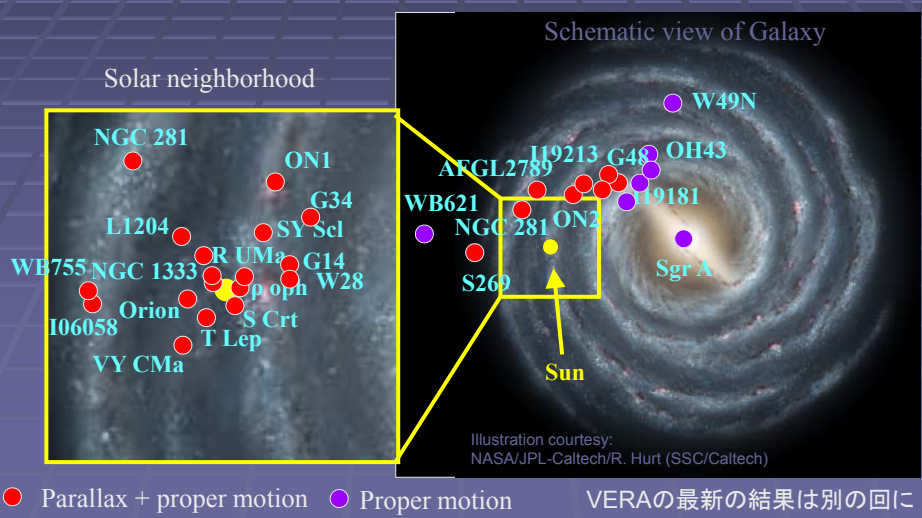
# 高精度位置天文ミッション

10 マイクロ秒角以下を目指した計画が複数存在

name	type	band	start year	accuracy	# of stars
<b>GAIA</b>	space	opt	2013?	10 $\mu$ as	10 <sup>9</sup>
<b>JASMINE</b>	space	IR	2020?	10 $\mu$ as	10 <sup>8</sup>
<b>VERA</b>	VLBI	radio	2004	10 $\mu$ as	10 <sup>3</sup>

## 2012年現在のVERAの測量

- 120天体程度の観測が終了
- 28天体についてすでに論文が出版(他は解析中)

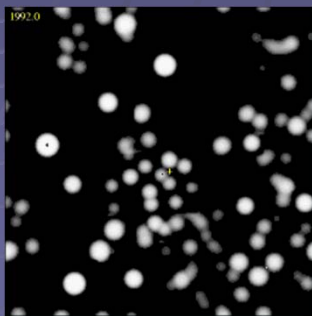


# サブミリ波VLBI

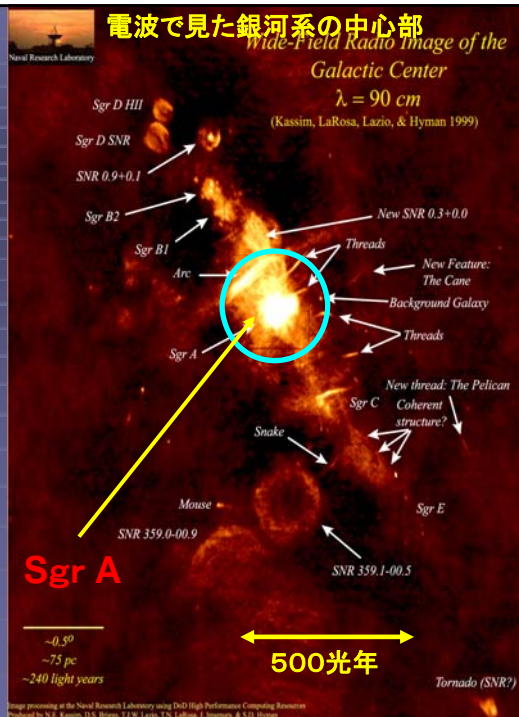
— 銀河系中心の巨大ブラックホールを見る —

## Sgr A\* : 銀河系中心の巨大ブラックホール

- Sgr A\* (射手座Aスター)
- ・ 銀河系中心にある巨大ブラックホール
- ・ 太陽の4百万倍の質量



赤外線で見えたSgr A\*周囲の星の運動



## ブラックホールは見える？

- ブラックホール自身は暗い(はず)  
(ブラックホールとは、強い重力により光さえ吸収)
- しかし、ブラックホールに落ち込むガスが回転しながら高温で明るく輝くので、それを背景に「黒い穴」が見えると期待される。でも、まだ誰も見ていない...



Fukue et al. (1988)

銀河系中心のブラックホールは「黒い穴」の見た目サイズが最も大きい

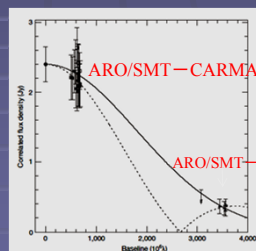
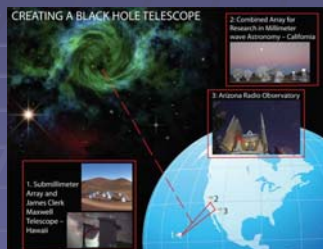
直径~30マイクロ秒角  
(波長の短い電波干渉計なら分解可能)

## ブラックホールを見る

望遠鏡の分解能 $\theta$ は口径 $D$ と波長 $\lambda$ で次のように書ける。

$$\theta \sim \lambda / D$$

波長 $\lambda$ が短いほど有利。 $\lambda \sim 1\text{mm}$ ,  $D \sim 8000\text{ km}$  なら $\theta \sim 25\mu\text{秒角}$

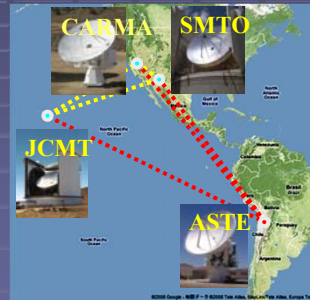
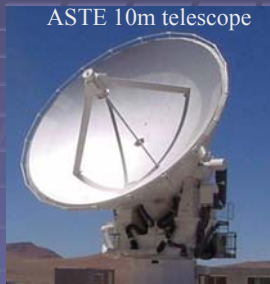


Doeleman et al.  
2008 in Nature

2008年にMITを中心とするグループが1.3mmでSgr A\*の構造を~40  $\mu$ 秒まで分解。シャドウ分解まであと一歩？

## ASTEを用いたサブミリ波VLBI

- 国立天文台のASTE望遠鏡  
サブミリ波観測に適したチリ・アタカマ砂漠(標高4860m)にある。これを米国の望遠鏡と組み合わせて銀河系中心ブラックホールの国際観測を推進中。



## 研究者の仕事は泥臭い？

- 2010年4月に、ASTEを用いた初のサブミリ波VLBI観測を実行

観測までの道のり



2010年1月の作業: 観測用コンテナを設置し、ケーブルを敷設

## ASTE VLBI観測まで

- VLBI観測用の装置を入れるコンテナを設置
- 受信機をアンテナに搭載



数ヶ月の立上げの苦労の後、2晩の観測を実行。が有意な信号は観測されず...

今後再挑戦およびアップグレードが必要。

## 近未来の展望

- ASTEによる観測の継続
- LMT : 50m 望遠鏡 (メキシコ、標高4000m)



- グリーンランド望遠鏡(米国 & 台湾) :  
ALMAの試作機(12m)をグリーンランドへ移設する計画  
北緯 72 deg, 標高3200 m

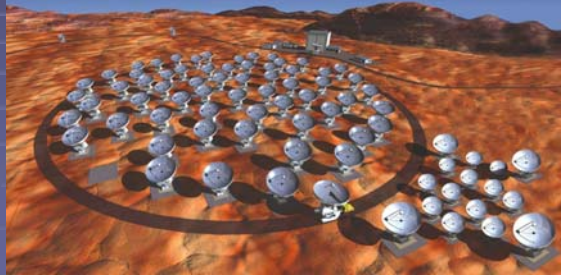




# ALMA

- Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array (スペイン語で「魂」という意味)
- 日米欧の国際協力で66台以上のミリ波サブミリ波干渉計を建設(現在建設中)

ALMAの想像図 (チリアタカマ砂漠 標高5200m)



ALMAをサブミリ波VLBIに使う計画も国際協力で進行中

HOW TO See May's Western US Solar Eclipse p.66  
THE ESSENTIAL MAGAZINE OF ASTRONOMY

**SKY & TELESCOPE**  
FEBRUARY 2012

The Discovery Channel's Big Eye on the Sky p.28

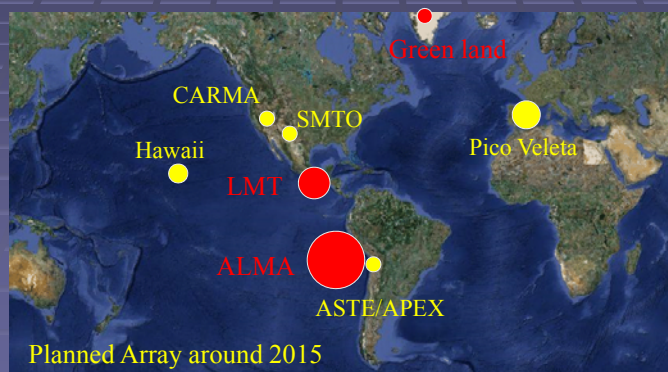
**Einstein's Shadow**  
The quest for the first black hole image p.30  
Illustration by Leah Tibboone

SKY & TELESCOPE, Feb 2012

## 2015年頃のサブミリ波VLBI(予定)

新しい観測局

ALMA(チリ)、LMT(メキシコ)、GLT(グリーンランド)



ALMA VLBI : 2015年ごろに実現を予定  
ブラックホール撮像が現実的に！

## アタカマ高地の話

- アタカマ高地(アタカマ砂漠)  
チリのアンデス山脈中に広がる  
標高5000mの砂漠地帯
- 空気が乾燥して水蒸気量が  
少ないために、天文観測に  
適している
- 最近、多数の望遠鏡が  
建設されている





## ALMAへの道



## ALMA OSF (Operation Support Facilities)



ベースキャンプ (標高2900m、ここでアンテナを組み立て調整)

## ALMA OSF



ベースキャンプの全景(手前のコンテナハウスで生活)

## ALMA OSF



アンテナのパネル調整をしているところ

## ALMA OSF



コントロールルーム（ここから標高5000mにある望遠鏡を運用）

## ALMA OSF



トランスポーターに乗ったアンテナ（この車で山頂までアンテナを運ぶ）

## ALMAへの道



## ALMAへの道



## ALMAへの道



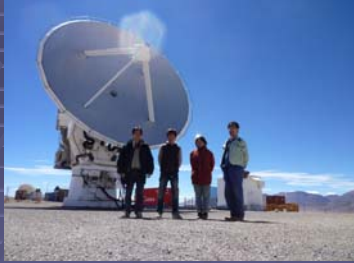
## ALMAの現状



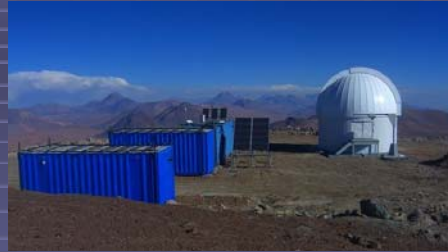
サイト（標高5200m、現在~30台のアンテナが設置され試験観測中）



## アタカマの望遠鏡たち



ASTE (国立天文台、電波、直径10m)



TAO (東大、赤外、口径1m)



APEX (欧州、電波、直径12m)



QUIET (国際共同、電波)