

<http://ngvla.nrao.edu/>

次世代ミリ波センチ波干渉計 ngVLA

長谷川哲夫、伊王野大介(国立天文台)
坂井南美(理研) 大西利和(大阪府立大学)
河野孝太郎(東京大学)

次世代ミリ波センチ波干渉計 ngVLA 概要

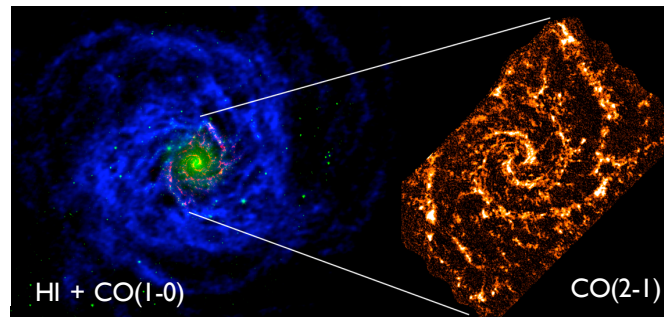
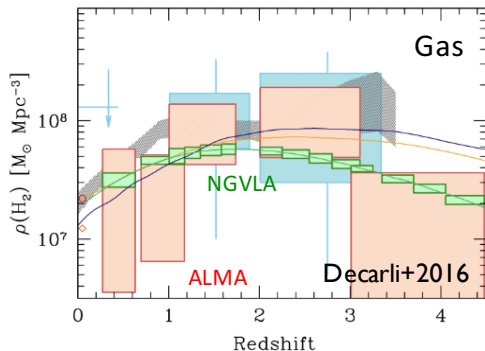
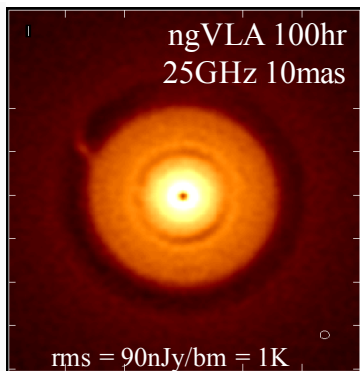
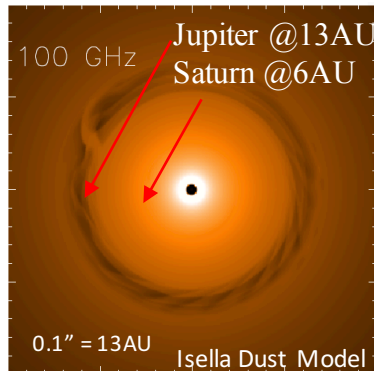
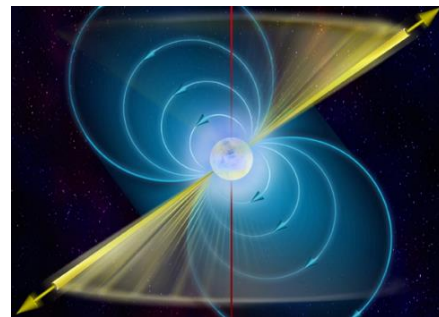
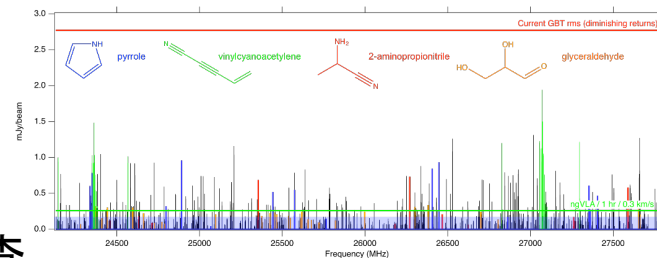
- JVLAやALMAと比較して10倍の集光面積
 - 214 18m dishes (160 μ m surface)
- 観測周波数範囲 1.2 – 116 GHz → SKAとALMAをつなぐ
- JVLAやALMAと比較して10倍以上の空間分解能
 - JVLAの最大基線長は30 km、ALMAは16 km → 300 – 1,000 km ベースライン
 - 面輝度の低い広がった天体もイメージング → dense antenna core on km-scales
- 建設費 \$1.5B (cost cap) + 運用費 \$75M/年 (cost cap) (ALMA 25%貢献)
 - 総額の少なくとも50% (\$750M) を米国負担、日本は10%前後の貢献を目指す
 - 技術的リスク小 (reasonable step beyond current state of the art)
- Astro2020 Decadal Surveyへ向けた準備を加速中
 - 建設開始2025年、初期科学運用2028年、完成 2034年

VLBIのため、アンテナ
30基追加で10,000 km
ベースラインも検討中



5大科学目標

1. 太陽系に類似した惑星系の形成過程の解明
2. 星間化学を活用した惑星系と生命誕生の初期条件の調査
3. 宇宙開闢後10億年から137億年に至る銀河の形成と進化の解明
4. 銀河系中心領域のパルサーを使った重力理論の検証
5. マルチメッセンジャー天文学の時代における星と超大質量ブラックホールの形成と進化の理解

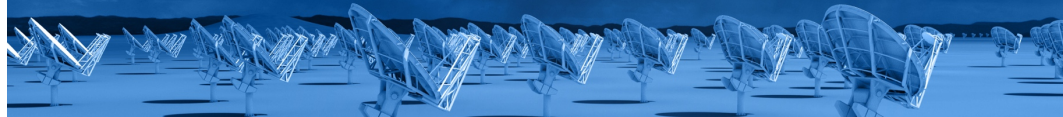
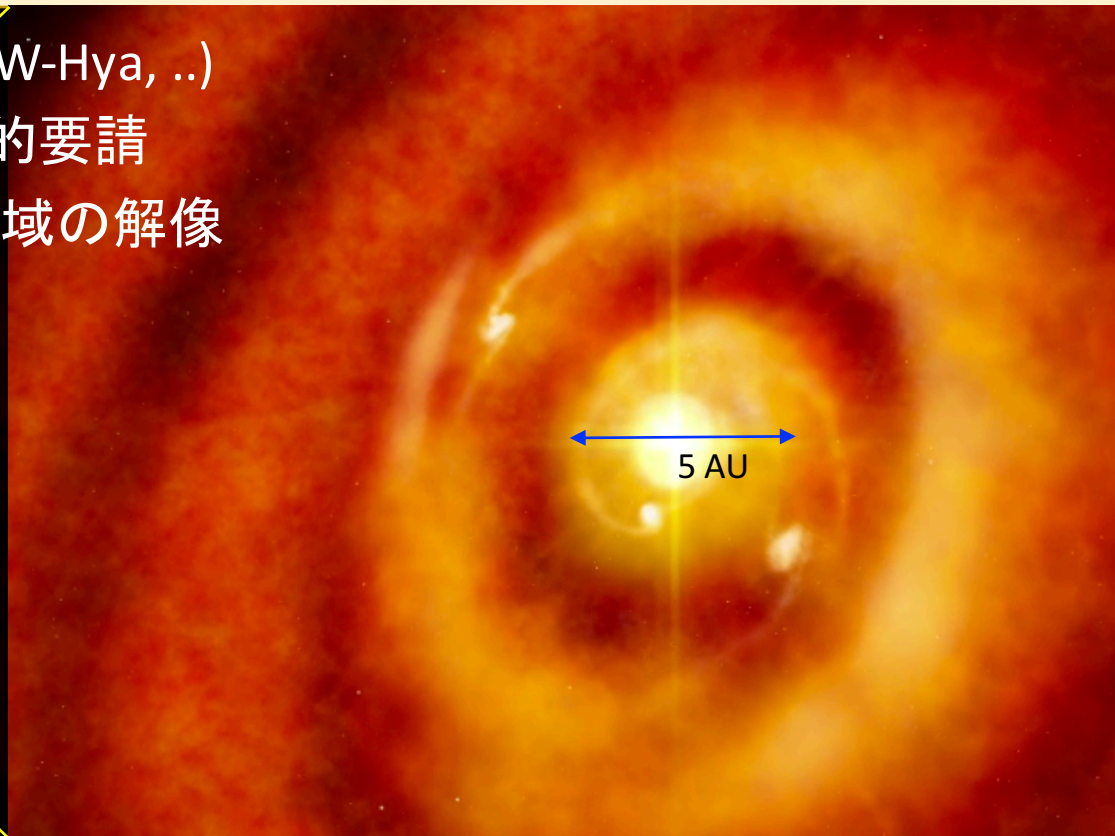
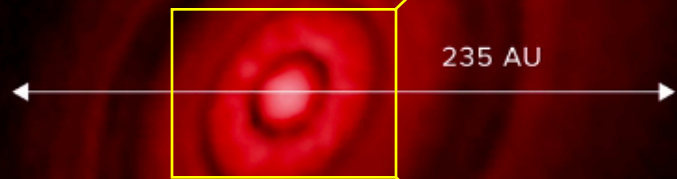


1. 太陽系に類似した惑星系の形成過程の解明

ALMAでの劇的な進展 (HL-Tau, TW-Hya, ..)

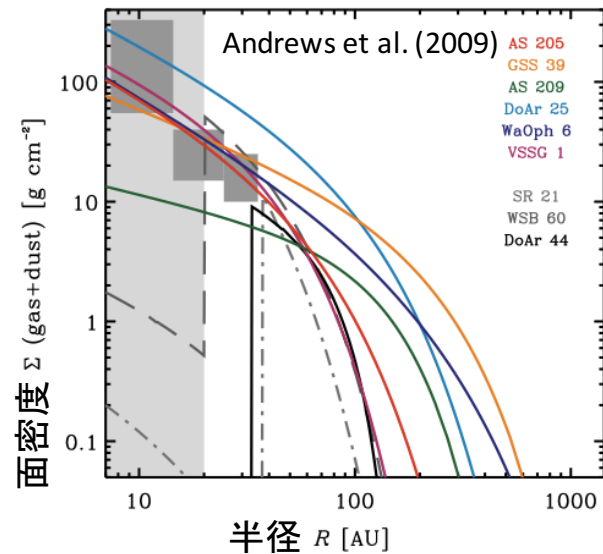
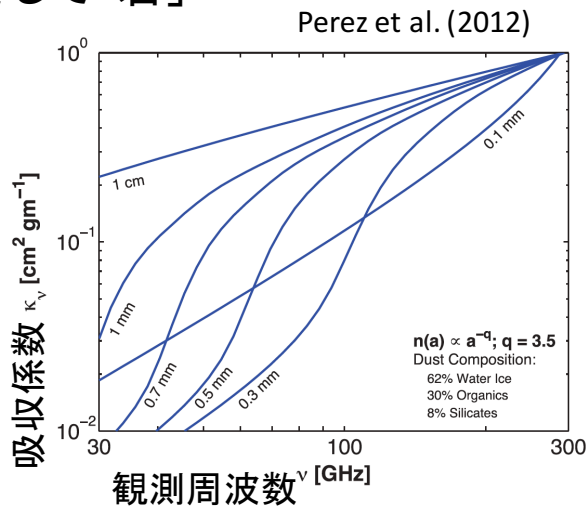
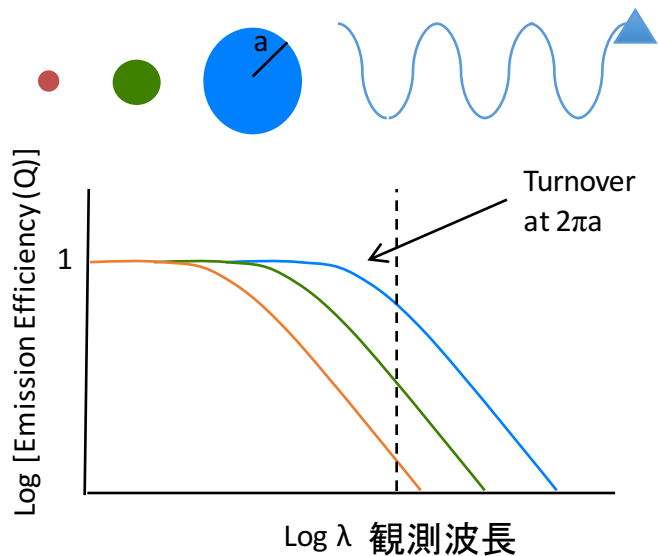
そこから生まれる次段階の学問的要請

= 光学的に厚い円盤中心領域の解像



1. 太陽系に類似した惑星系の形成過程の解明

円盤中のダスト成長 → 「小石」そして「岩」へ



円盤の面密度分布 $\Sigma \propto R^{-1}$

波長 1mm → $R=10 \text{ AU}$ で $\tau = 1$

Grain の大きさ \approx 観測波長
→ 成長過程を追い「小石」を見るにはより長い波長

$\tau=1$ になる半径は観測波長に逆比例
→ 内側に迫るにはより長い波長



1. 太陽系に類似した惑星系の形成過程の解明

1 AUスケールに迫り、解像したい

→ サブミリ波では光学的に厚くなり見通せない

→ 30GHz – 100GHz帯が鍵

- ALMAと比較してdust emissionが光学的に薄い
- ALMAと組合せてSED → 自由自由放射を切り分け

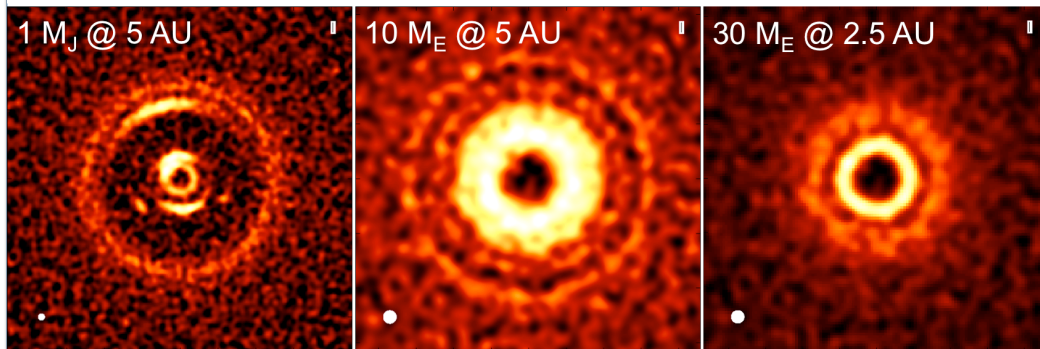
「惑星初期質量関数」を5 - 10地球質量まで測定

30 – 50 GHz帯により、ALMA(サブミリ波)
よりも大きいサイズのdust grainsを観測

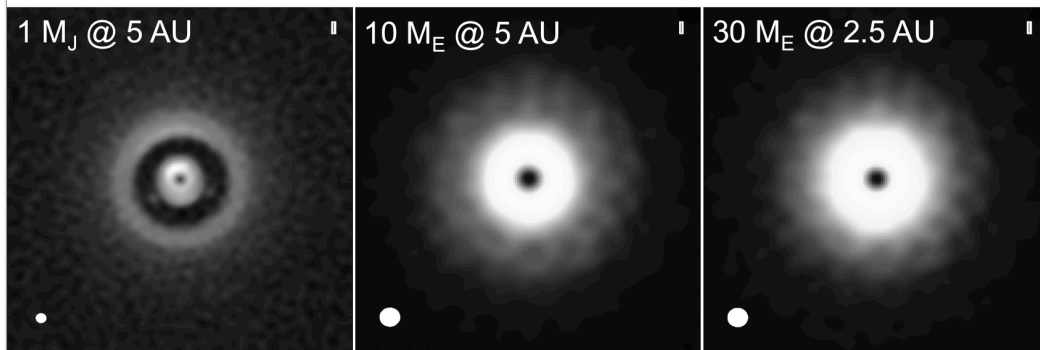
→ Grain growth processを捉える

軌道運動の測定(～monthスケール)

Simulated ngVLA observations at 100 GHz – resolution 0.005"



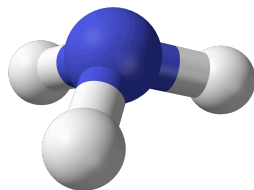
Simulated ALMA observations at 345 GHz – resolution 0.01"



円盤中の”アンモニア・スノーライン”直接撮像

アンモニア分子

- ・星間塵上の氷の主要な分子の一つ
- ・窒素を含む分子生成の鍵
- ・ガスの「温度計」



星間塵上での主要な分子形成



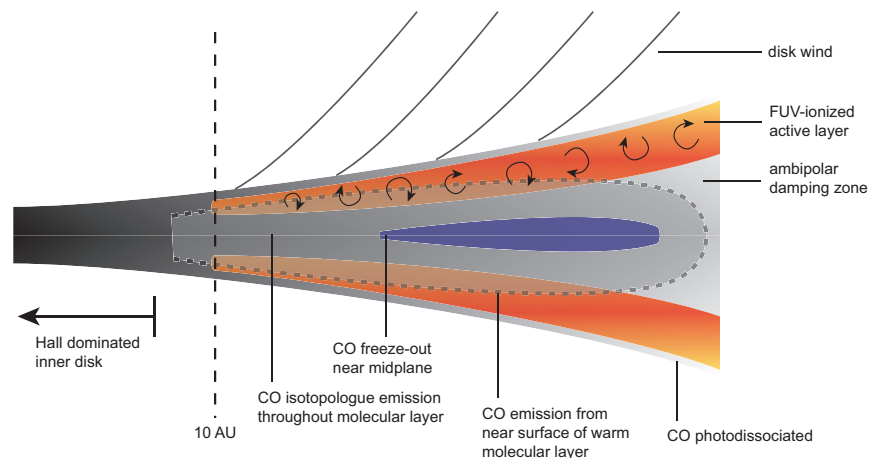
観測が難しい

23 GHz帯
→ ngVLA

観測が難しい

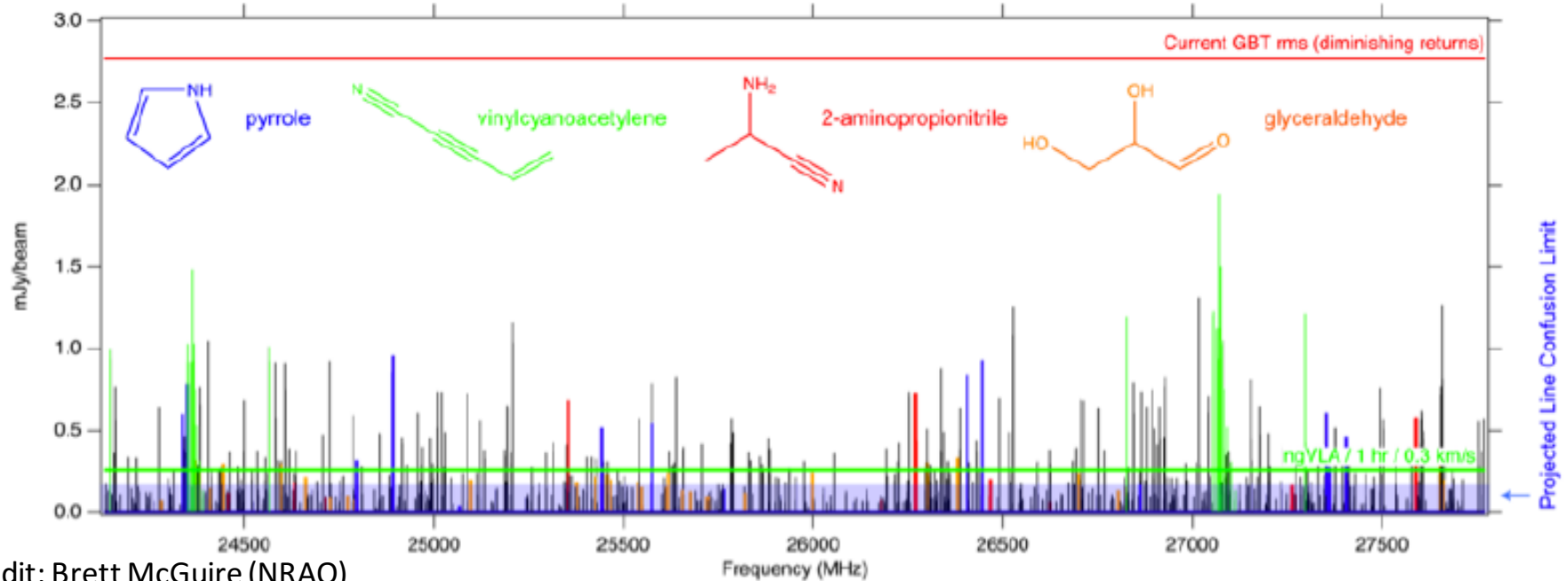
気相NH₃の直接イメージング
”アンモニア・スノーライン”

One example: turbulence in protoplanetary disks
Degeneracy between temperature and turbulence

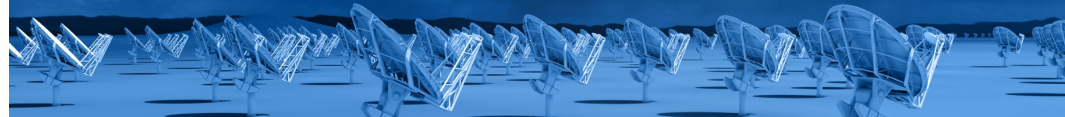


2. 星間化学を活用した惑星系と生命誕生の初期条件の調査

The ngVLA can detect **complex pre-biotic molecules** and provide **the chemical initial conditions** in forming solar systems and individual planets

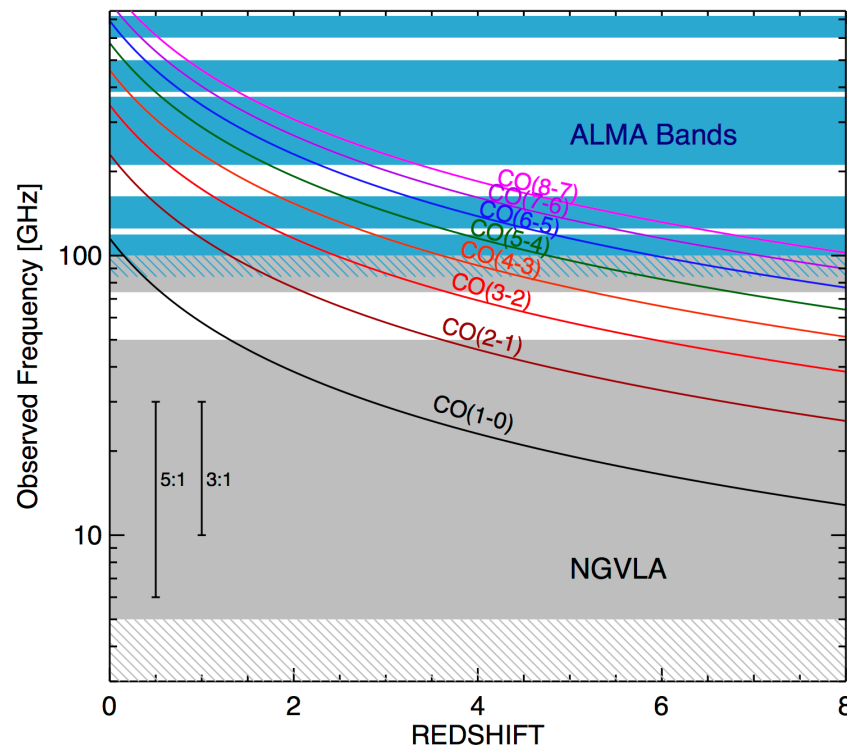
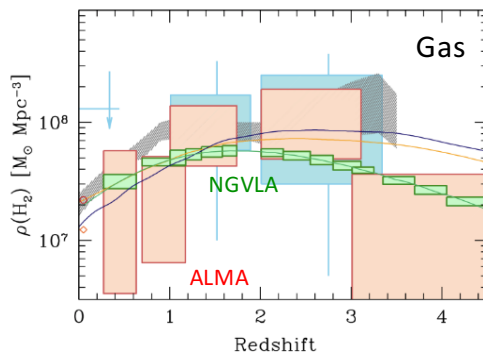


Credit: Brett McGuire (NRAO)



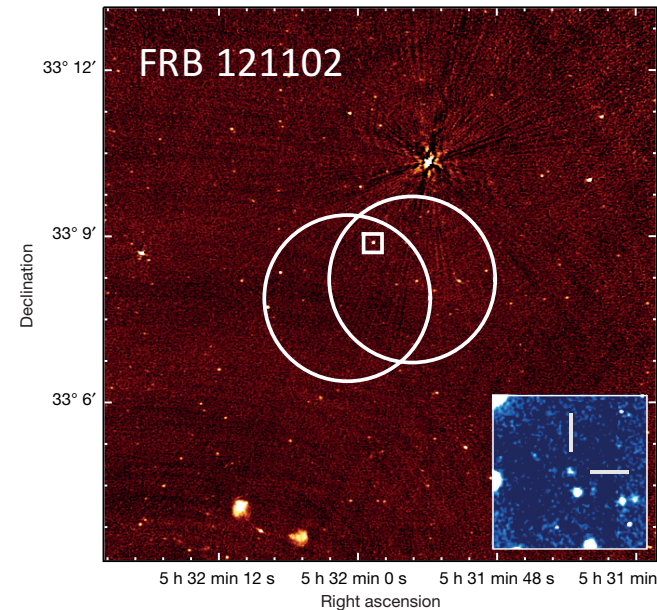
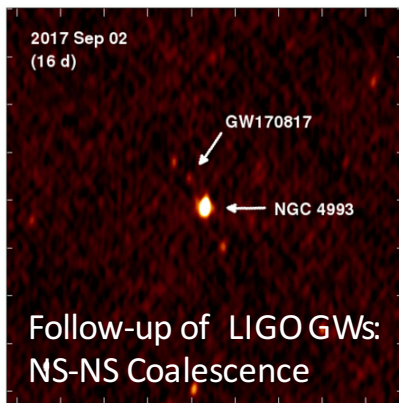
3. 宇宙開闢後10億年から137億年に至る銀河の形成と進化の解明

- CO: 分子ガスの最も基本的トレーサー
- 高赤方偏移 → ALMAでは高励起の輝線しかみえなくなる
- 分子ガスの定量の「基準」となる CO(J=1-0)輝線が高赤方偏移銀河まで
- 分子輝線の探査能力が桁で向上 → 宇宙における「分子ガス密度」の変遷を描き出す



5. マルチメッセンジャー天文学の時代における 星と超大質量ブラックホールの形成と進化の理解

- ダスト減光の影響を受けない波長+高い解像度でのイメージング(固有運動測定による背景電波源の分離)
- 銀河系全域での質量降着中ブラックホールの探査



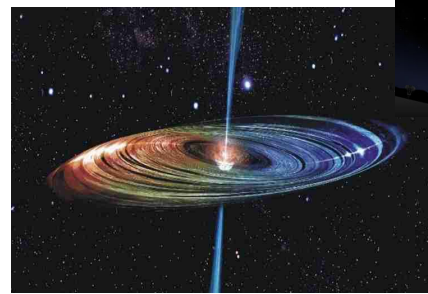
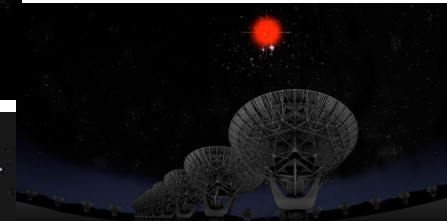
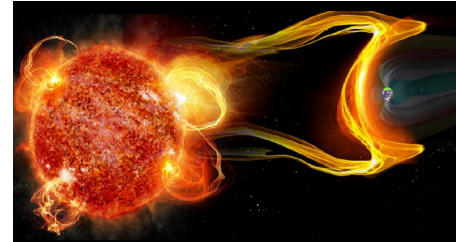
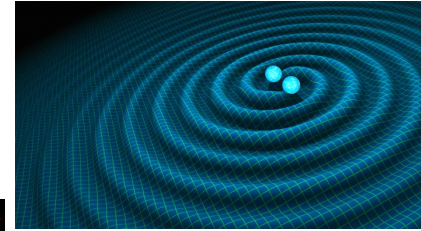
高い感度・サーベイ能力
重力波源の即時電波対応天体同定
→ $\sim 10 \text{ deg}^2$, $10 \mu\text{Jy}(1\sigma)$ @28GHz, 10 hours

LISA-BH
mergers



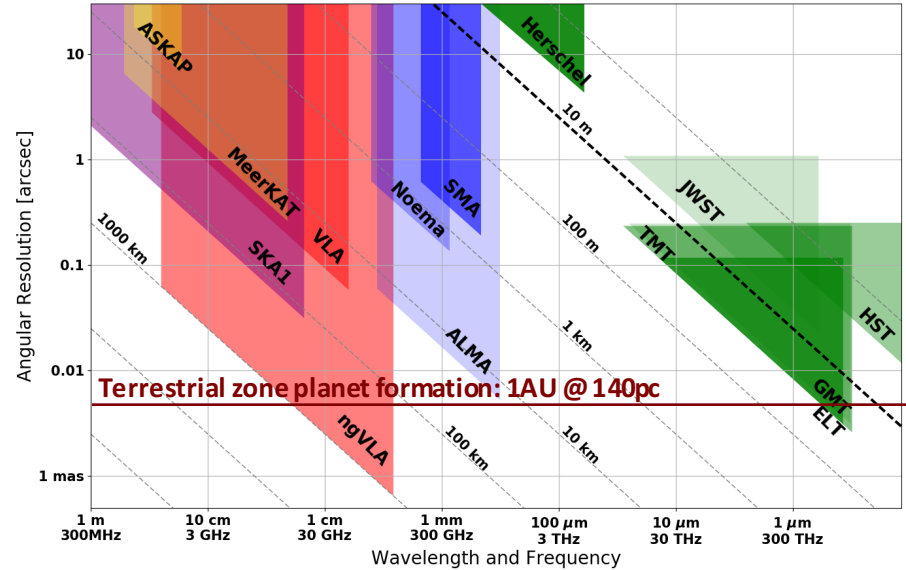
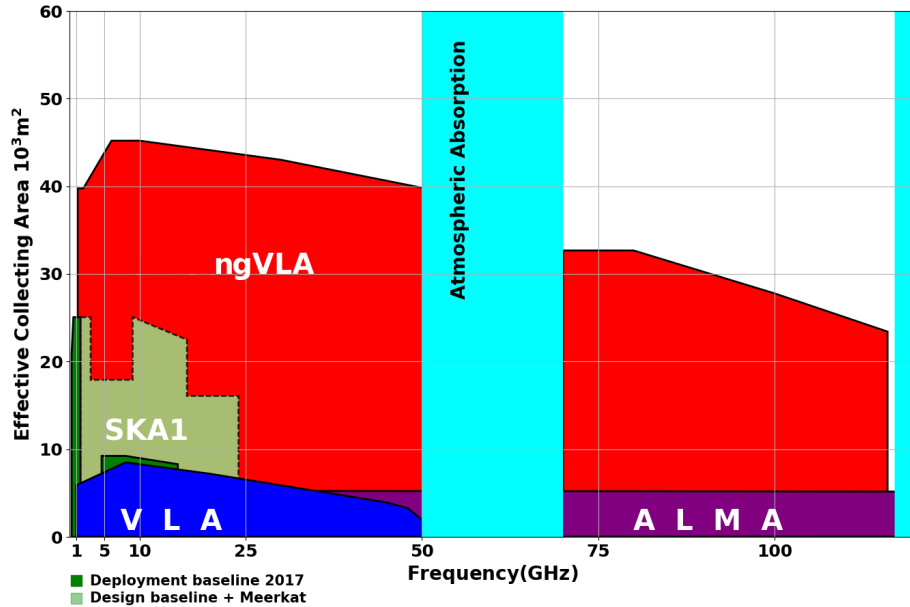
Versatility: Remarkable breadth of Science Enabled by the ngVLA

- Galactic Center pulsars: *testing GR*
- Gravitational Wave EM Follow-up
- Extrasolar Space Weather
- Bursting universe (FRB, GRB, TDE...)
- Low surface brightness HI, CO
- Obscured Black Hole Growth and AGN Physics
- Quasar-Mode Feedback and the SZ Effect
- Black hole masses and H_0 with Mega-Masers
- μas Astrometry: ICRF, Galactic structure...
- Solar system remote sensing: passive and active radar
- Spacecraft telemetry, tracking: *movies from Mars*



SKAおよびALMAとの関係

Thermal Imaging on mas Scales at $\lambda \sim 0.3\text{cm}$ to 3cm

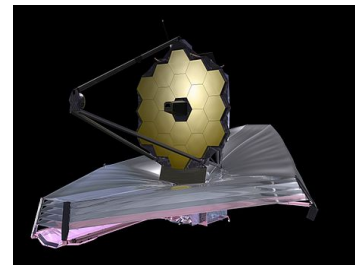
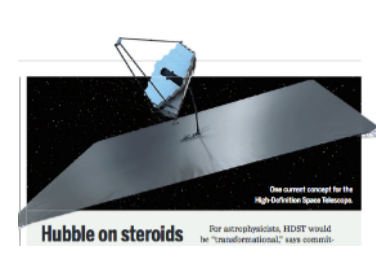
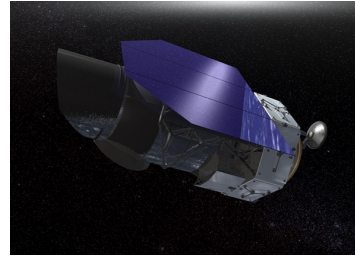
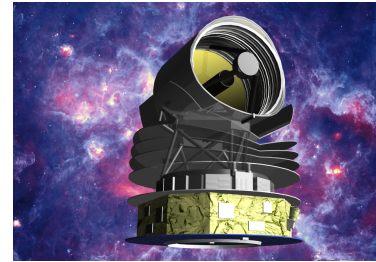
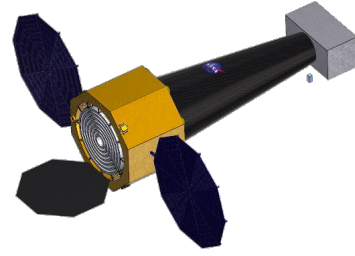


Complementary suite from cm to submm arrays for the mid-21st century

- **< 0.3cm:** ALMA 2030 superb for chemistry, dust, fine structure lines
- **0.3 to 3cm:** ngVLA superb for terrestrial planet formation, dense gas history, baryon cycling
- **> 3cm:** SKA superb for pulsars, reionization, HI + continuum surveys

同時代に稼働する大型観測施設との連携

- SKA, Athena, Lynx
 - Atomic/non-thermal
 - *Molecular/thermal*
- ALMA
 - Warm/star-forming
 - *Cold/dense fuel for SF*
- LUVOIR/HabEx
 - Image earth-like planets
 - *Image terrestrial-zone planets forming*
- SPICA, OST (FIR surveyor)
 - C/WNM & WIM
 - *Cold Molecular Medium*
- TMT, GMT, E-ELT
 - *Stellar Mass and Unobscured SF*
 - *Dense Gas and Obscured SF*
- JWST, WFIRST
 - *Continuing its legacy in many areas of astrophysics*



日本の具体的役割、優位性

- ALMA建設・運用における我が国の強い実績を踏まえた役割分担
 - 受信機バンド、増幅器開発、冷却光学系、機械式冷凍機開発
 - 基準信号系開発(信号伝送、水素メーザーに替わる周波数標準?)
 - アンテナ(18mアレイ・短基線アレイ・VLBIアレイ)
 - ソフトウェア(アーカイブ、データ可視化)
 - 日本発のデータ解析手法開発(スパース・モデリング)でも貢献してきた
 - コミッショニングでも実績
- NRAOとの連携の実績: ALMAほどの巨大科学プロジェクトを、わずか一度のre-baseline で成功に導いている



コミュニティでの検討状況

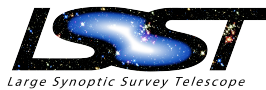
- 2015年の本格検討開始以降、科学検討を行う国際会議等を9回、技術検討を推進する国際会議を3回実施。→ 5大科学目標の設定とサイエンス・ブックの編集、その実現のための技術仕様策定。
- 我が国からは、tennet/ryunetでの公募を経て、[Science Advisory Council](#) および [Technical Advisory Council](#) へ合計3名が参画中
- 宇宙電波懇談会シンポジウム等の機会を活用した情報共有
 - 2018年3月にはNRAO台長 Tony Beasley氏を招いて詳しい話を聞く機会
- 今後、大規模なワークショップの開催(2019年7月頃を予定)
→ さらに議論を深めていく



Community Participation



Cornell University



人材育成について

- (ALMAより少ない貢献分だとしても) 鍵となるコンポーネント(受信機バンド、アンテナ等)に貢献できる見込み → 国際的な舞台でリーダーシップを発揮できる人材育成につながる
- 技術開発(さらなる改善・性能向上) → 世界水準の若手研究者の育成
 - ALMA Band 10開発で学位 → デルフト工科大学でtenure、他
- 最先端のデータを使った大学院生の活躍
 - A-rankでのプロポーザル採択、東京大学総長賞、シュプリンガー論文賞



人材育成

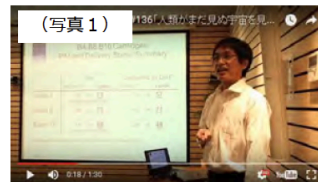
29

(5) 国際的な舞台でリーダーシップを発揮できる人材及び若手研究者の育成は図られたか。

国際的な舞台でリーダーシップを発揮できる人材の育成

・ 建設期

アルマの建設に主体的に関わることによって、**大型科学計画における米欧との厳しい折衝に対応できるプロジェクトマネージャ**(写真1)や**世界に通用するシステムエンジニア**を育成することができた。アルマという世界で唯一無二のプロジェクトを通して、**世界一流の技術を有するとともに、海外スタッフを統率できるエンジニアリング研究者**(写真2)を育てることもできた。



建設当初から計画に従事。アルマ評議会にて報告を行う井口教授。現在、東アジア アルマ プロジェクトマネージャを務める。



現地にてアンテナ試験を牽引する水野准教授。現在、合同アルマ観測所で、チリ人スタッフ100名を擁する最大規模のグループのマネージャを務める。

・ 運用期

アルマ望遠鏡は世界的な国際共同研究のもと運営されており、合同アルマ観測所には日米欧から約40名の国際職員が参画し、その内10名が日本からの派遣。平成29(2017)年4月予定で6名が40歳以下の若手研究者となる。

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

総合科学技術・イノベーション会議・アルマ計画評価資料から

<http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/hyouka/kentou/arumajigo01/siryos5.pdf>



次世代ミリ波センチ波干渉計：まとめ

- VLAは幅広い天文学分野において光学赤外線望遠鏡と並ぶ最も基本的な電磁波観測装置の1つ → 次の半世紀を見越した後継機 → 共同建設・運用のパートナーとしてしっかり参加し日本のコミュニティの研究をさらに発展させる
- 波長約20cmから3mm帯において、現在稼働中のJVLAおよびALMAの約10倍の感度・10倍以上の高い解像度を実現。→ 地球型惑星形成現場における熱的放射の直接撮像観測から高赤方偏移宇宙における銀河探査まで、幅広い階層の天体形成過程の研究を格段に発展させるとともに、新たなディスカバリー・スペースを広く開拓。
- SKA1およびALMAとの波長のギャップをつなぐ。2020-30年代に稼働する他波長の望遠鏡と強い相乗効果(解像度、サーベイ能力ほか)。
- ALMA建設・運用における我が国の強い実績を踏まえ、信頼性の高い実施計画の策定が可能。

