

「第5回可視赤外線観測装置技術ワークショップ」「第35回天文学に関する技術シンポジウム」合同セッション

# 「次世代望遠鏡セッション」 「ALMA受信機開発・製造・その次」

藤井 泰範

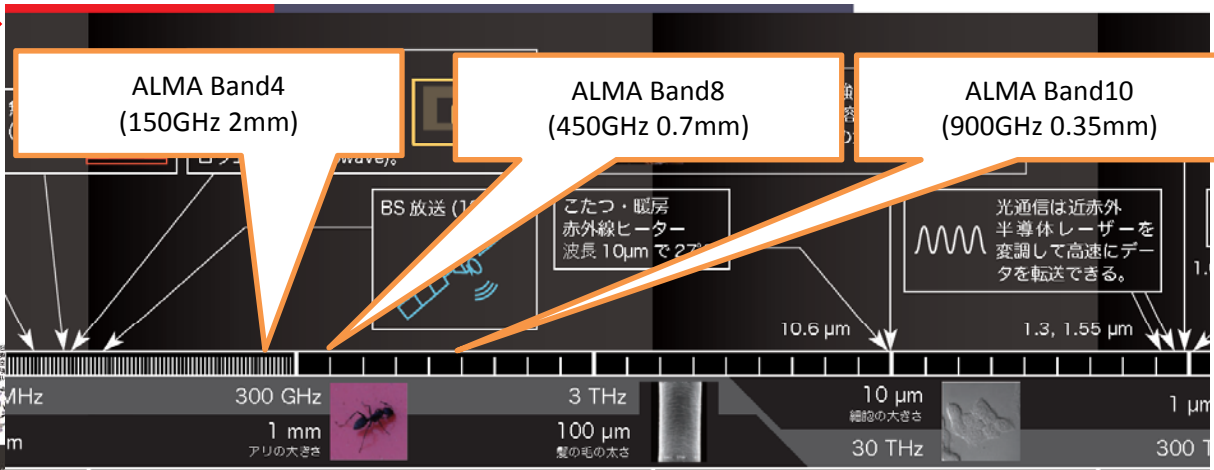
国立天文台 先端技術センター研究技師

and

ATC受信機チーム

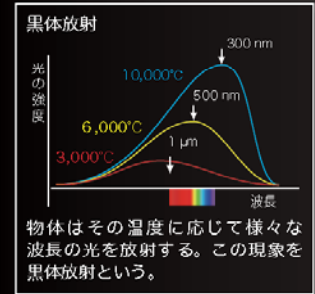
# 概要

- インTRODクシヨN
  - 電波と光
  - アルマ望遠鏡
- バンド4, バンド8, バンド10受信機
- その次



### 遠赤外光 低温の黒体放射

**電波望遠鏡**  
波長約1mmから1cmの電波を検出する望遠鏡。日本では野辺山宇宙電波観測所にある。温度が非常に低い星間ガスなどからの黒体放射を観測する。



**自由電子レーザー (FEL)**  
紫外から赤外までの広範囲で波長を自由に選択して強力な光をつくる。高速の自由電子を磁場によって蛇行させて発生したシンクロトロン放射からレーザー光線をつくる。国内では大阪大学、東京理科大学などにある。

ハッブル宇宙望遠鏡は、近赤外光検出で 63 光年離れた惑星でメタンと水を見つけ、太陽系外で有機物が確認された。宇宙の他の星にも生物がいるかも！？

### 中赤外光 分子振動・格子振動、有機分子が見える領域

**有機分子の指紋領域**  
中赤外は分子の振動準位が豊富。有機分子の“指紋領域”と呼ばれる。

二酸化炭素 (C=O 基) : 4.3 μm  
水・アルコール (O-H 基) : 2.9 μm  
メタン (C-H 伸縮) : 3.3 μm  
トルエン (ベンゼン環) : 6.7 μm

二酸化炭素の吸収スペクトル

**すばる望遠鏡**  
ハワイ島にある日本の大型天体望遠鏡。可視光から中赤外光の光を使って宇宙を探る。直径 8.2m の反射鏡は世界最大級。

**血糖値測定、果実糖度計**  
糖の分子の振動エネルギーが相当する。果実を傷つけないで簡単に測ることができる。

**赤外線温度計 / 体温計**  
赤外線の黒体放射から、非接触で温度を測定します。人の体温で波長約 10μm。

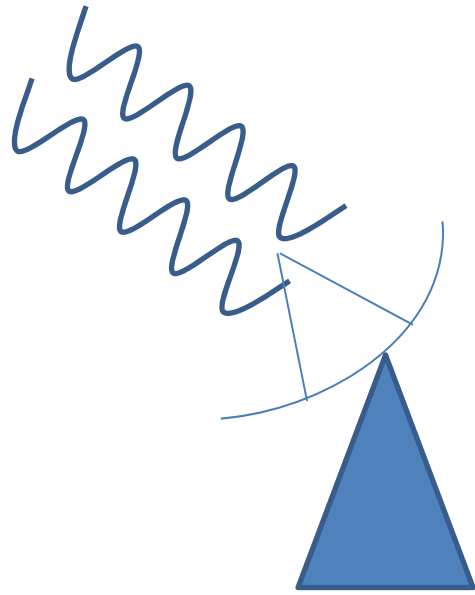
**気象衛星ひまわり**  
10 μm 付近 (大気窓) : 黒体放射から雲や地表温度を観測する。  
6~7 μm (水の吸収) : 水蒸気の分布を観測する。

**監視カメラ**  
**センサー**

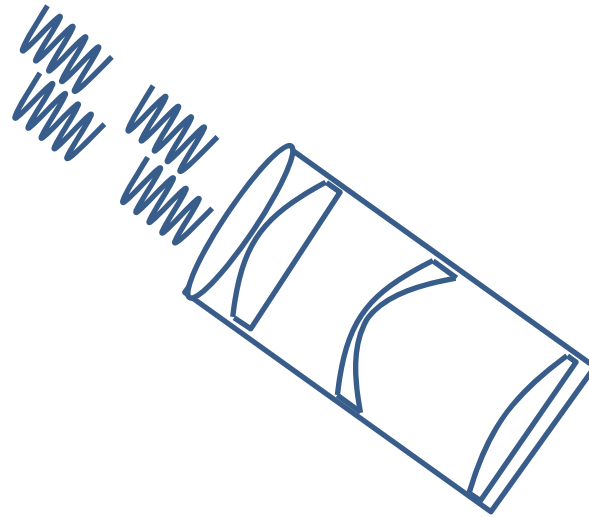
**サーモグラフィ**  
赤外光の強度を測定する。体温計、車専用にも使える。

文部科学省  
「一家に1枚光マップ」より  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/20/04/08040301.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/20/04/08040301.htm)

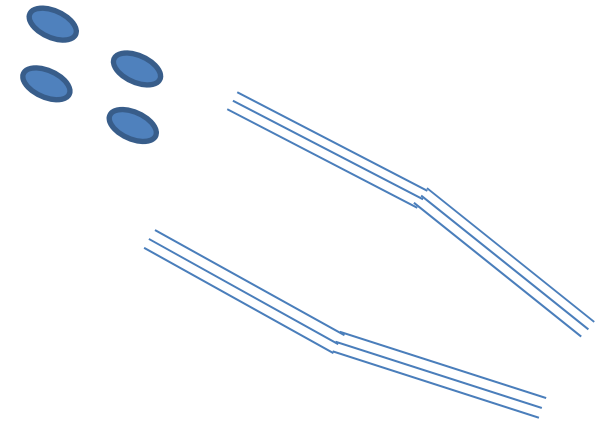
# 波と粒子



電波

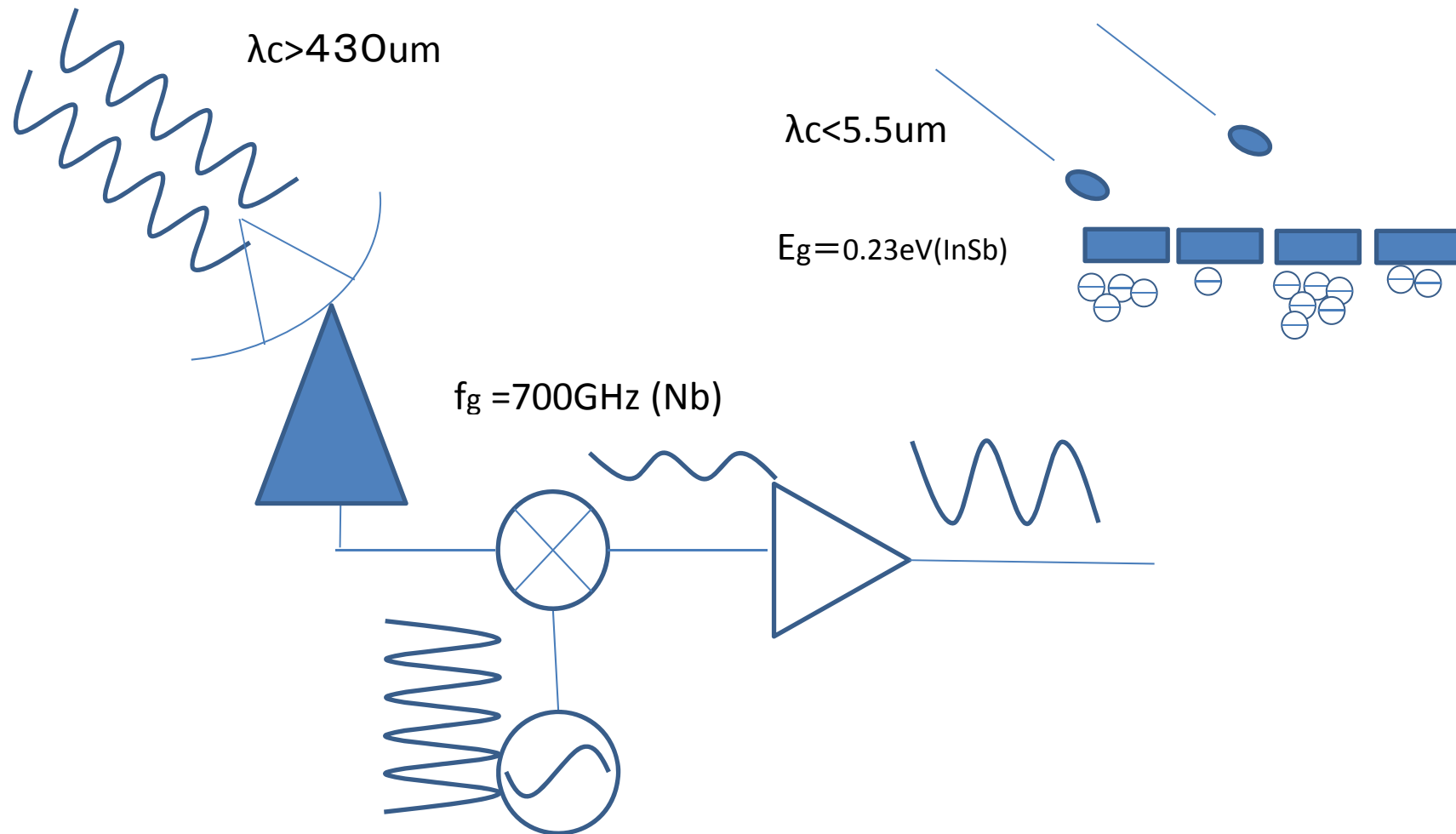


光

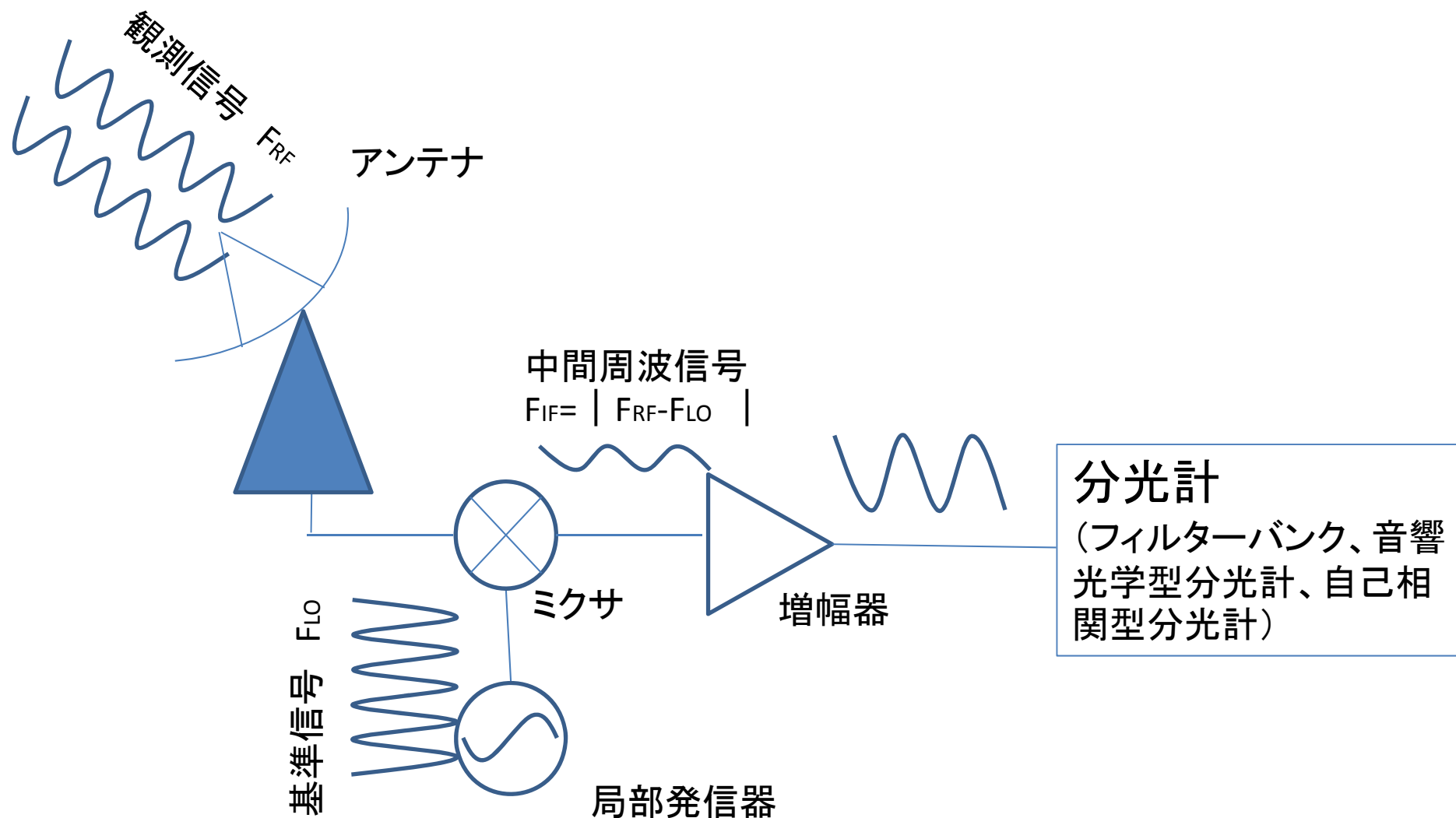


X線

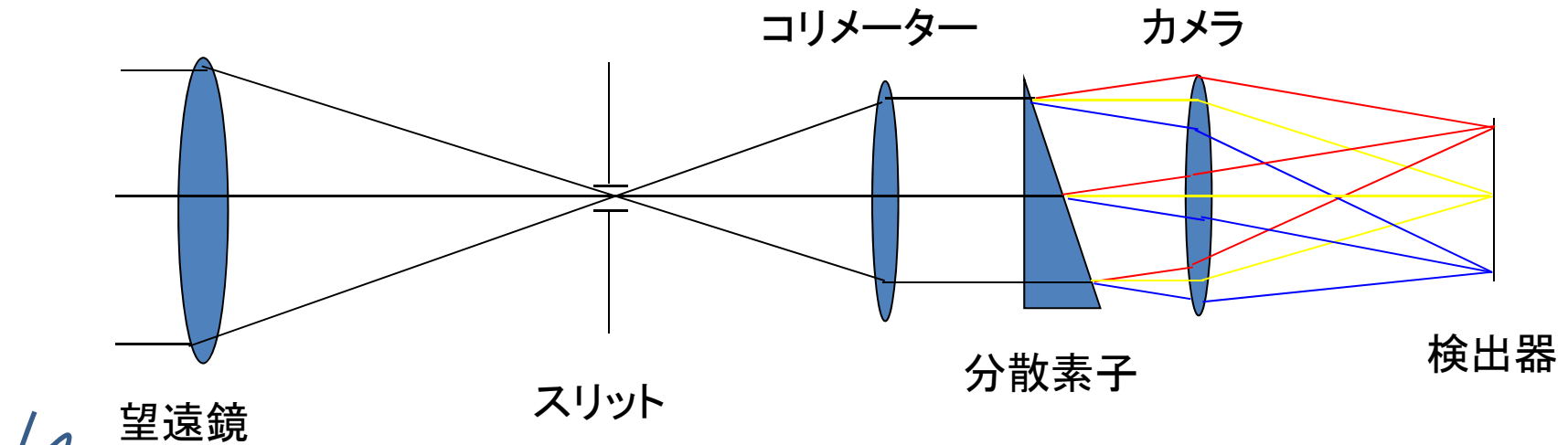
# 受信機と検出器



# ヘテロダイン受信機



# 分光



望遠鏡

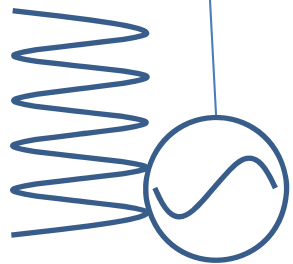
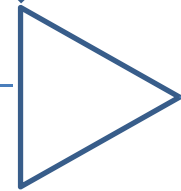
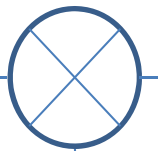
スリット

コリメーター

カメラ

分散素子

検出器



分光計

(フィルターバンク、音響  
光学型分光計、自己相  
関型分光計)

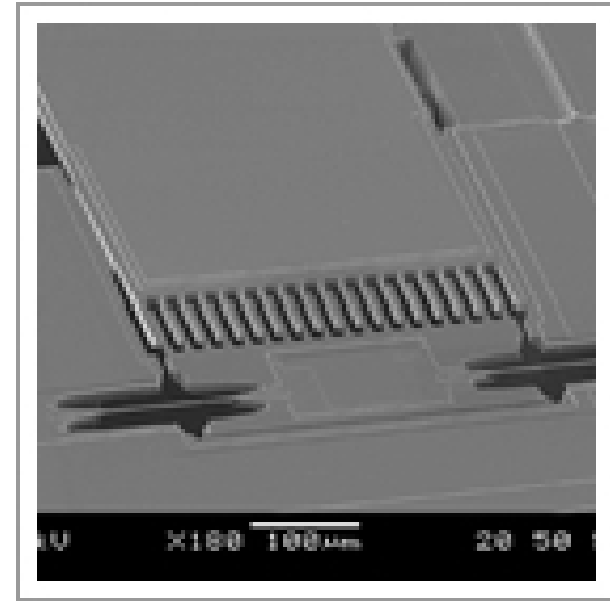
# 部品

- MEMSミラー
- モスアイ反射防止構造
- メタルメッシュフィルタ

ミクロンオーダーの  
構造

半導体加工技術を応用して微  
細加工を行う

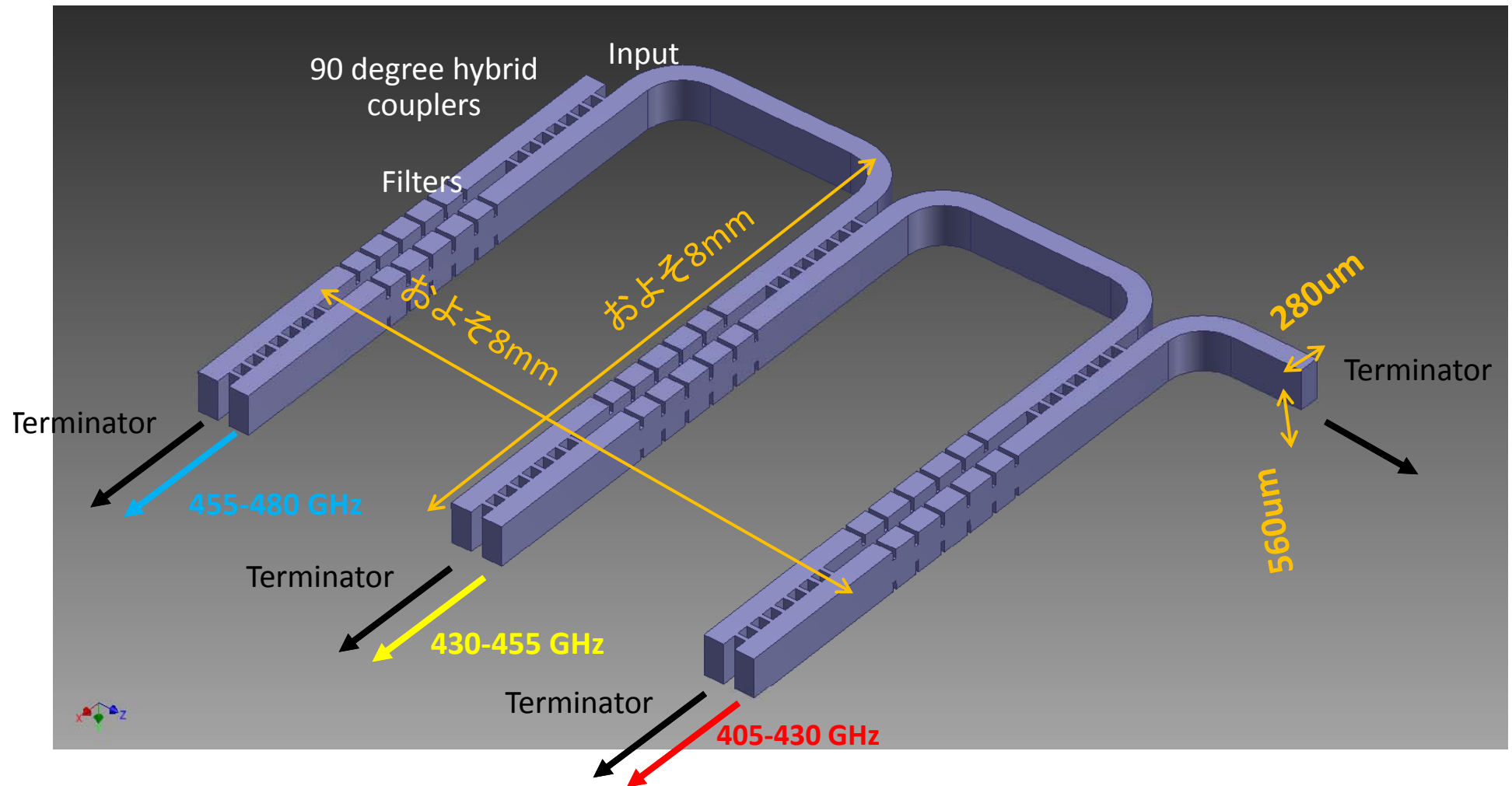
マイクロマシニング



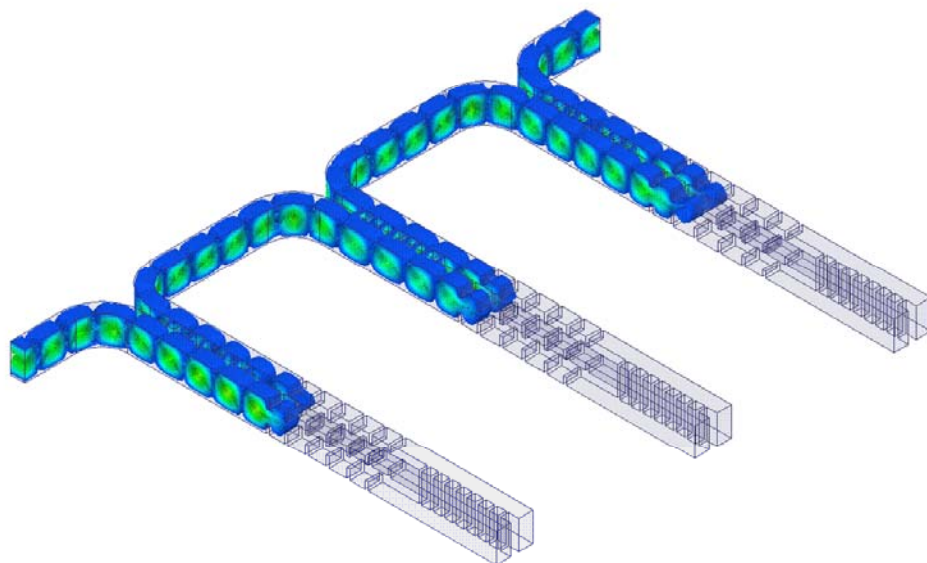
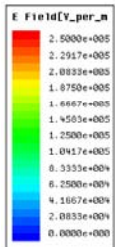
東北大 光マイクロシステムグループHPより



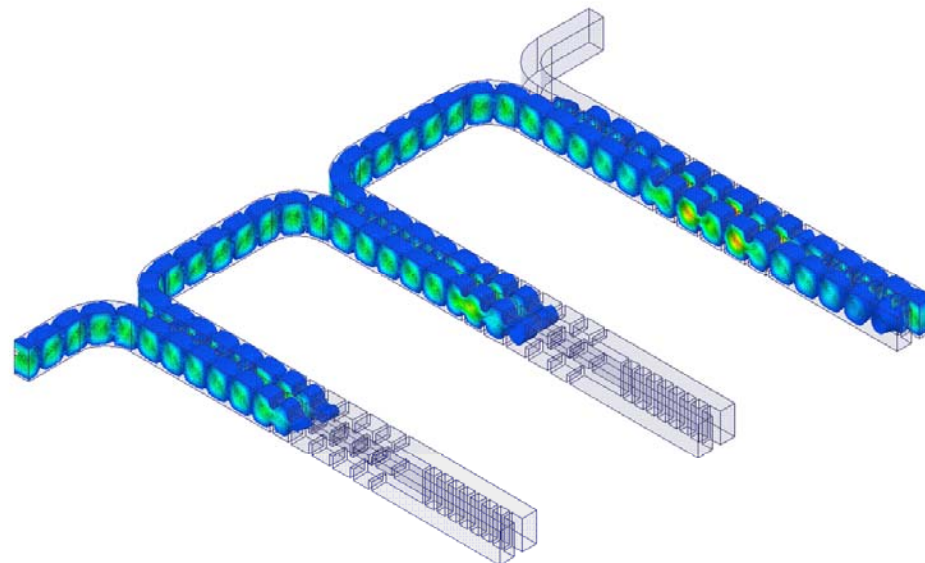
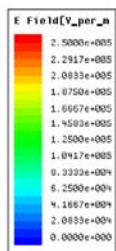
# 電波受信機の特徴 金属加工可能なサイズ



380GHz



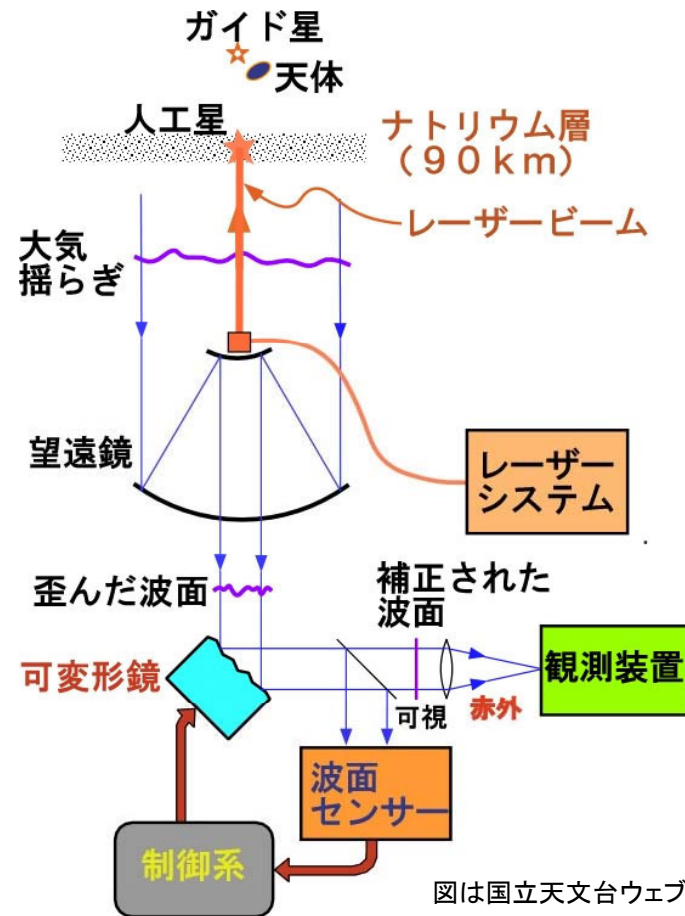
420GHz



# -補償光学の基本-

## 成り立ちと基本構成

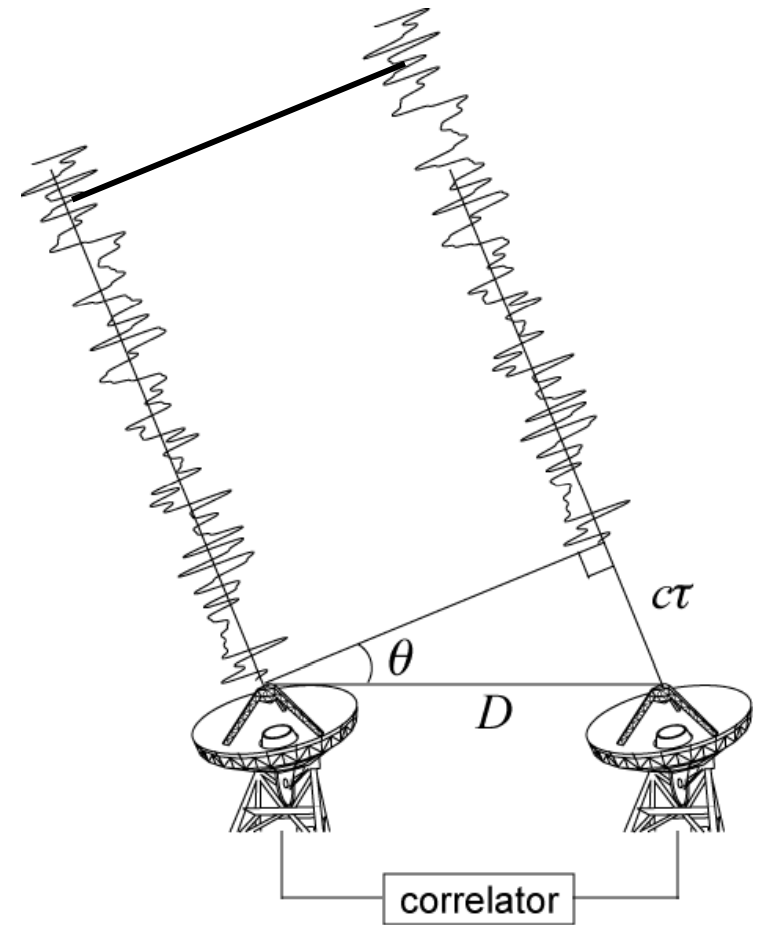
- バブコックが1953年に提唱
- 天体望遠鏡では、大気による像劣化の改善
- フィードバック制御(負帰還補償) : 左図参照
  - 波面センサーで誤差測定
  - 可変形鏡で誤差補正



図は国立天文台ウェブサイトより

# 干渉計の原理

- 天体からの信号
- 電磁波の経路の差:  $c\tau$
- 相関器は二つの電波が合致する  $\tau$  を探す。これがわかれば、角度  $\theta$ 、天体位置がわかる。
- 別の天体は異なる  $c\tau$  をもつ。
- $D$  が大きいと、小さな  $\Delta c\tau$  も測れる。  
→ 角度分解能が良くなる。



# アルマ望遠鏡：人類の新しい目

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計

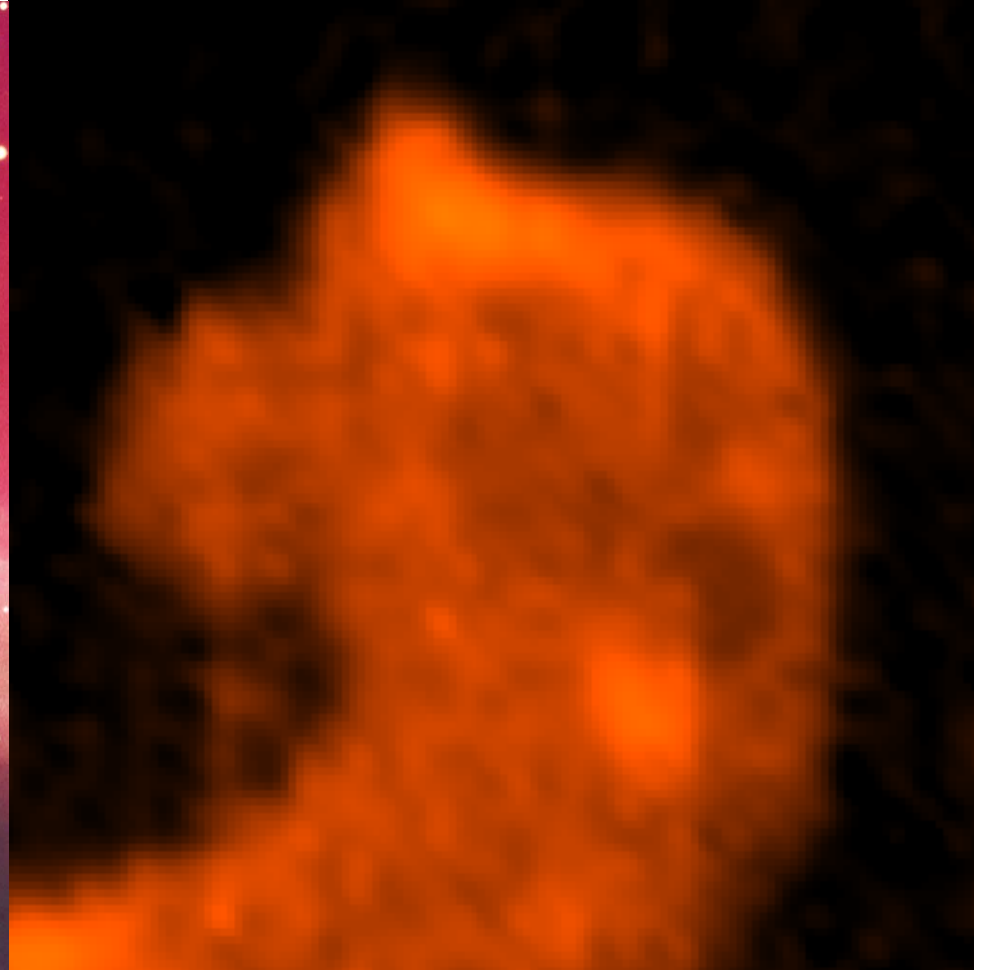
南米・チリに建設。日本+台湾+韓国、北米、欧州の国際協力。  
66台のアンテナを最大16.5kmの範囲に展開し、巨大な望遠鏡を実現。  
これまでの電波望遠鏡に比べて、感度・分解能ともに100倍！

*Credit: Clem & Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com)/ESO*





光で見た馬頭星雲  
(欧州南天天文台)



電波で見た馬頭星雲  
(カリフォルニア工科大学サブミリ波天文台)

# 銀河の誕生と進化

138億年前のビッグバン以降、いつごろ  
どんな規模で銀河が生まれたのか？



# 惑星系の誕生

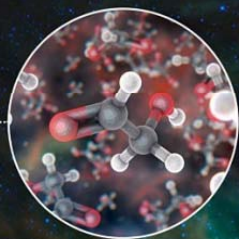
多様な惑星系の起源は？



*Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/Nienke van der Marel*

# 宇宙における物質進化

生命起源関連物質はどれくらいあるか？



*Credit: ESO/L. Calçada  
NASA/JPL-Caltech/WISE Team*



*Credit: ESO/C. Malin*



# 「視力2000」で見る惑星の誕生現場



おうし座HL星を取り巻く塵の円盤

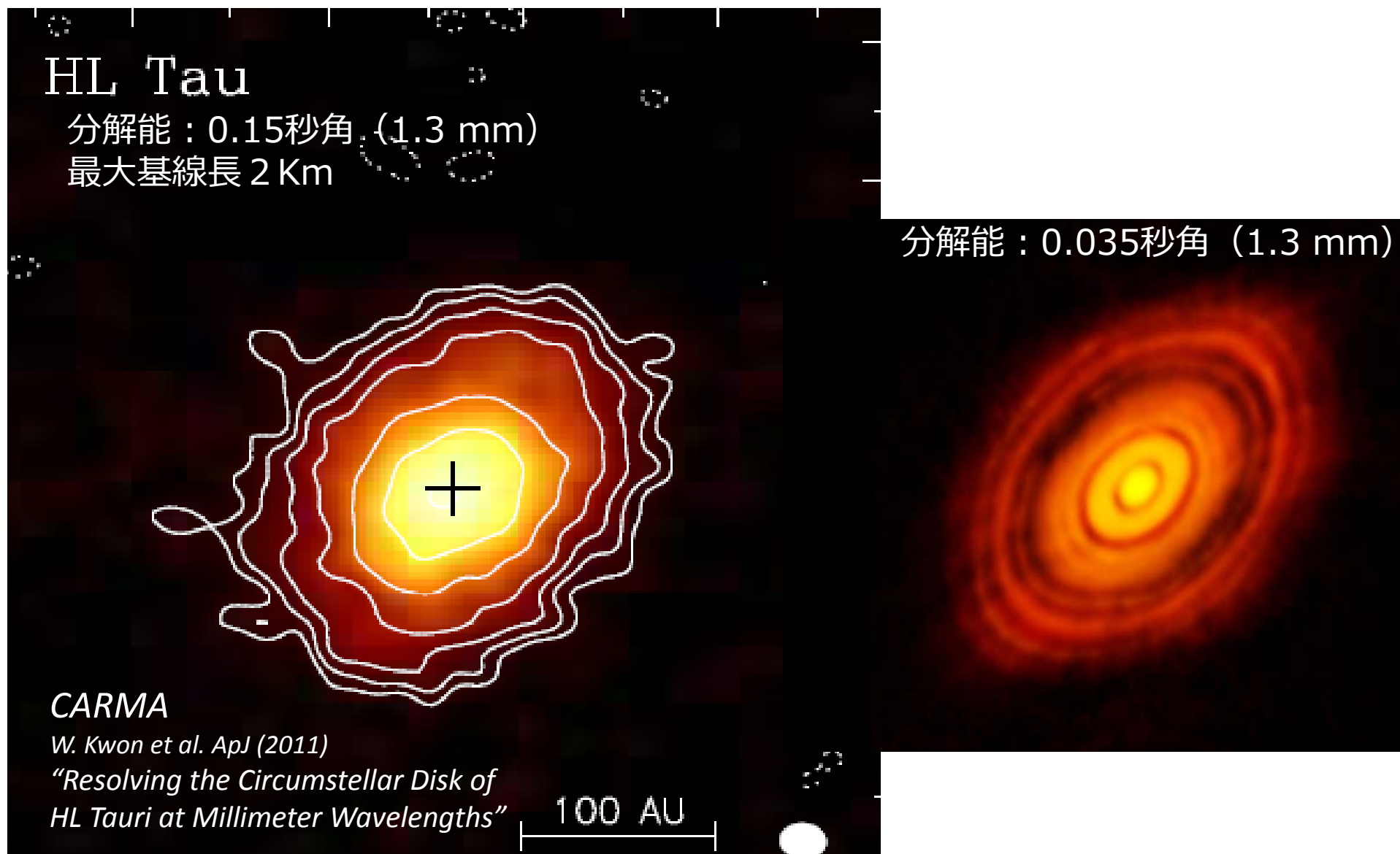
円盤にいくつもの隙間が見える。

惑星が成長している証拠？

*Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)*



# これまでの観測との比較



# アルマシステム

## 1. 電波を集める

宇宙からの電波を、アンテナの主反射鏡(パラボラの皿)で反射し、副反射鏡(皿の突起部分)で収束して、アンテナ下部へ送る。

## 3. 受信信号を光で送る

増幅された電波信号をデジタル信号に変換し、光ファイバーを用いて超高速(6テラビット毎秒)で信号を伝送する。

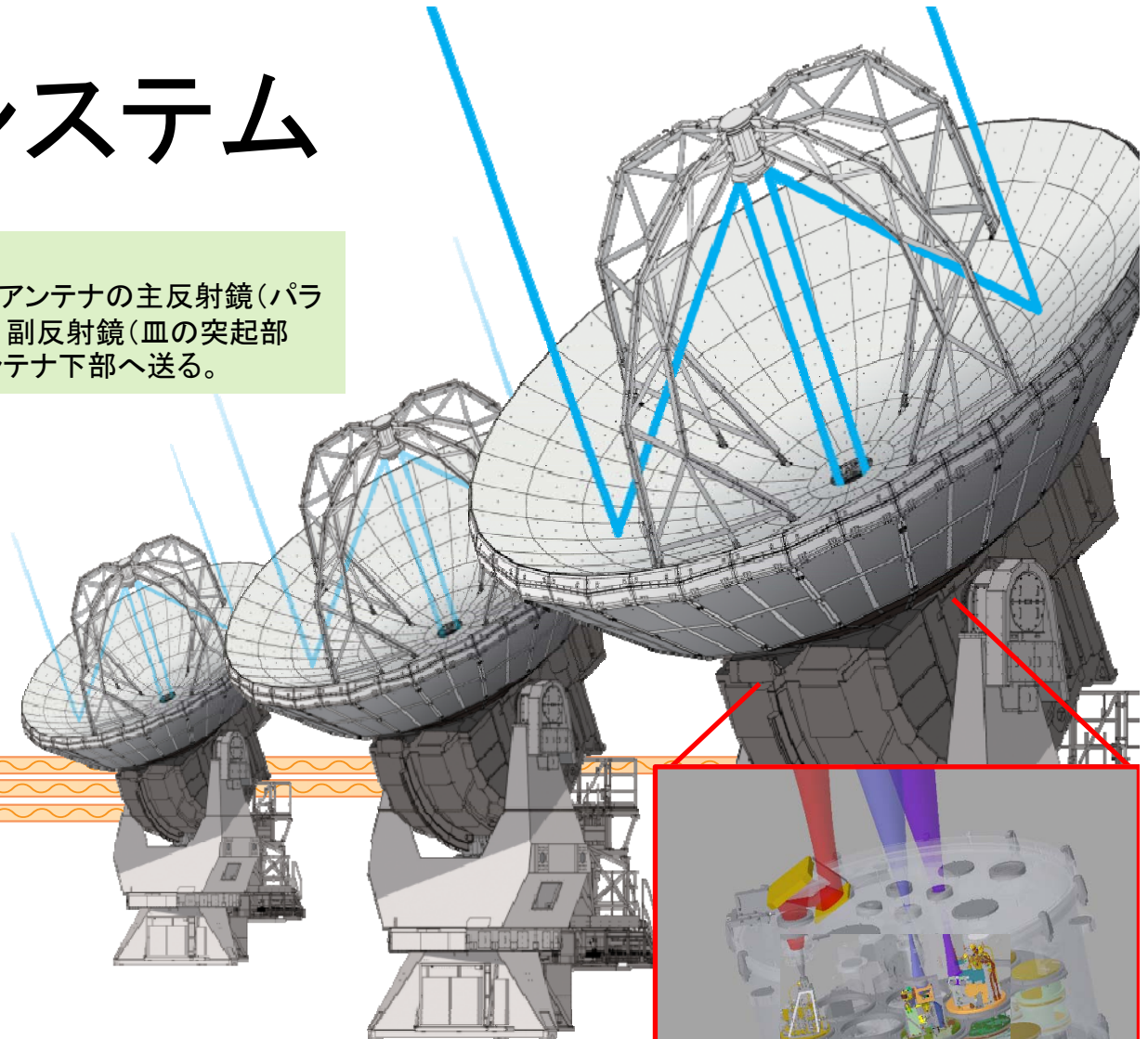


## 4. 信号を干渉させる

各アンテナから光ファイバーで送られてきたデジタル信号を超高速で相関処理し、天体の明るさ、位置、速度などの情報を引き出す。

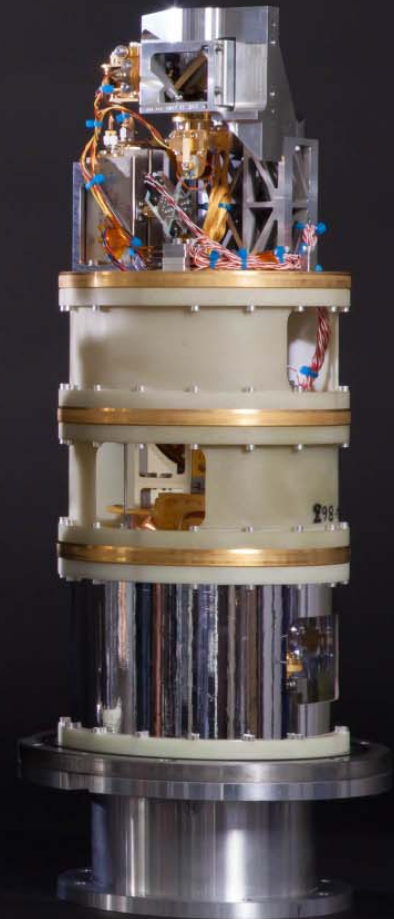
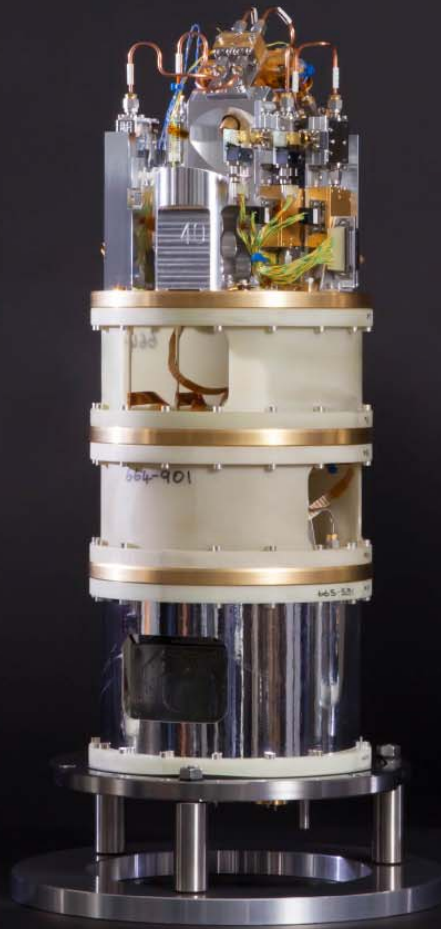
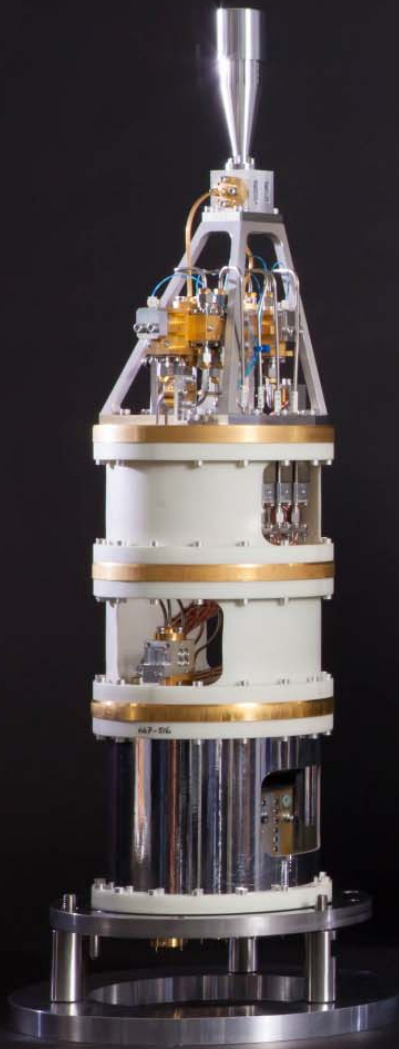
## 2. 電波を受信する

収束した超高周波の電波を、超伝導素子を用いた受信機で受け、扱いやすい低周波数(4-12GHz)に変換して増幅する。



Credit: マブチデザインオフィス

# バンド4    バンド8    バンド10受信機



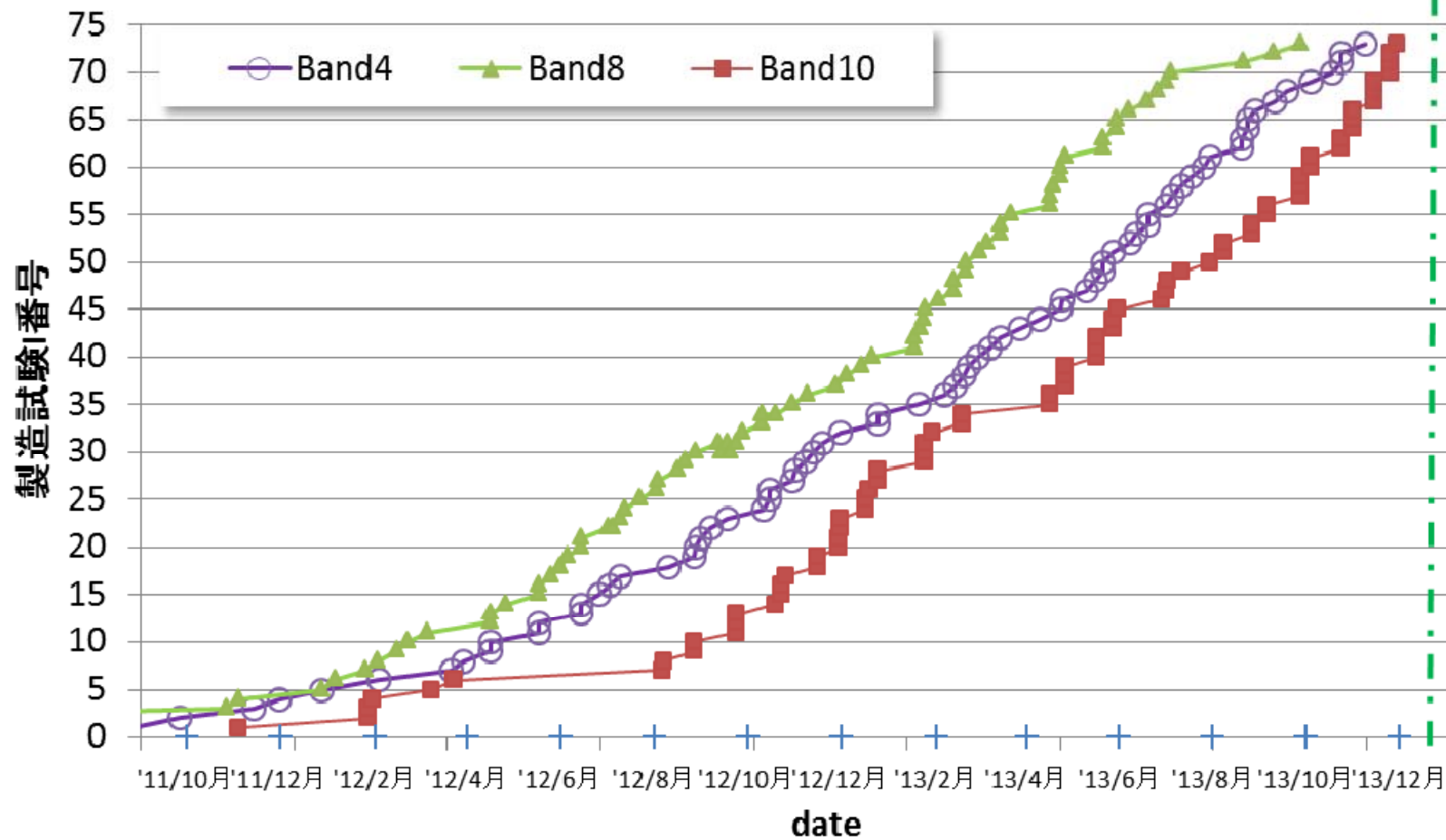
|                               | バンド4受信機   | バンド8受信機                                 | バンド10受信機                                  |
|-------------------------------|---|---|---|
| 観測(RF)<br>周波数・波長              | 125-163GHz<br>2.0mm                             | 385-500GHz<br>0.7mm                     | 787-950GHz<br>0.35mm                      |
| 受信方式                          | ヘテロダイン SSB                                      |   | ヘテロダイン DSB                                |
| 雑音温度仕様<br>・帯域の80%<br>・帯域の100% | SSB雑音温度<br>51K (量子雑音の3倍) 以下<br>82K (量子雑音の5倍) 以下 | SSB雑音温度<br>196K (4倍) 以下<br>292K (6倍) 以下 | DSB雑音温度<br>230K (5倍) 以下<br>344K (7.5倍) 以下 |
|                               |   |   |   |
| カートリッジの直径                     | Φ140  | Φ170                                    | Φ170                                      |
| 外観                            |   |   |   |



|                         | バンド4受信機                                       | バンド8受信機                  | バンド10受信機                       |
|-------------------------|---|--------------------------|--------------------------------|
| 観測(RF)<br>周波数・波長        | 125-163GHz<br>2.0mm                           | 385-500GHz<br>0.7mm      | 787-950GHz<br>0.35mm           |
| 各ステージ温度                 | 110K / 15K / 4K<br>(-163°C / -258°C / -269°C) |                          |                                |
| 超伝導素子材料                 | Nb/AlOx-Al/Nb                                 |                          | Nb/AlOx-Al/Nb<br>NbTiN/SiO2/Al |
| SISチップの大きさ<br>幅x長さ x 厚み | 0.4mm x 4mm<br>厚み200um                        | 0.13mm x 2.5mm<br>厚み60um | 0.09mm x 1.5mm<br>厚み40um       |
| 光学系の場所                  | 常温  | 冷却                       |                                |
| 鏡の枚数                    | 平面鏡1枚<br>楕円鏡1枚                                | 楕円鏡1枚                    | RF用楕円鏡2枚<br>LO用楕円鏡2枚           |
| コルゲートホーン                | 0.34mm x 440um                                | 0.09mm x 182um           | 0.054mm x 83um                 |
| 偏波分離方式                  | OMT (Ortho-Mode Transducer)                   |                          | ワイヤグリッド                        |
| 中間(IF) 周波数<br>x 出力数     | 4-8GHz<br>x 4本                                |                          | 4-12GHz<br>x 2本                |

# 受信機 生産台数

全台製作完了 2013年12月



# ALMA受信機開発

## 先端技術センター 組織図

2012年11月

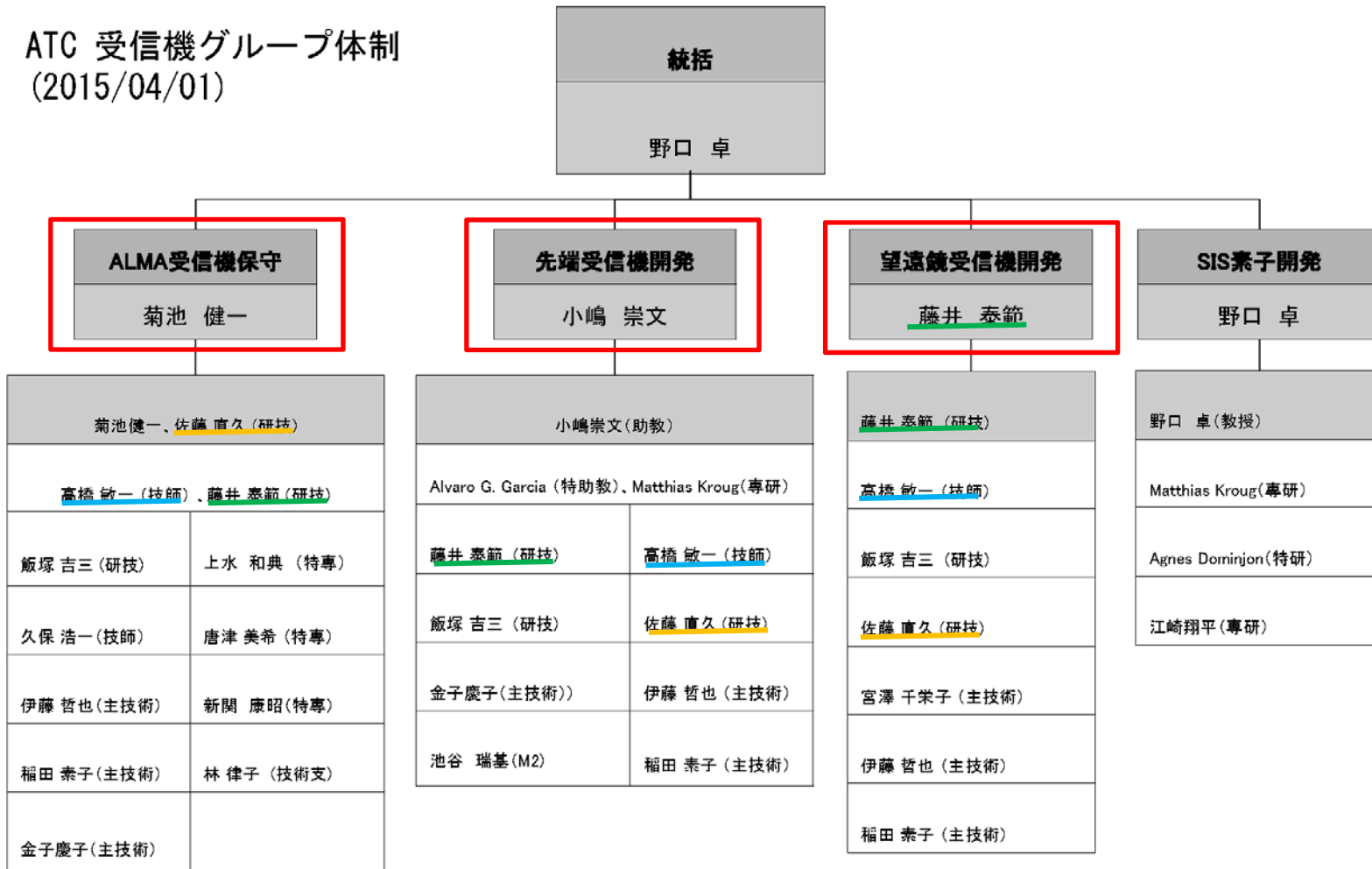
### ATC-ALMA

### 重点領域開発



# ALMA受信機開発 その次

ATC 受信機グループ体制  
(2015/04/01)



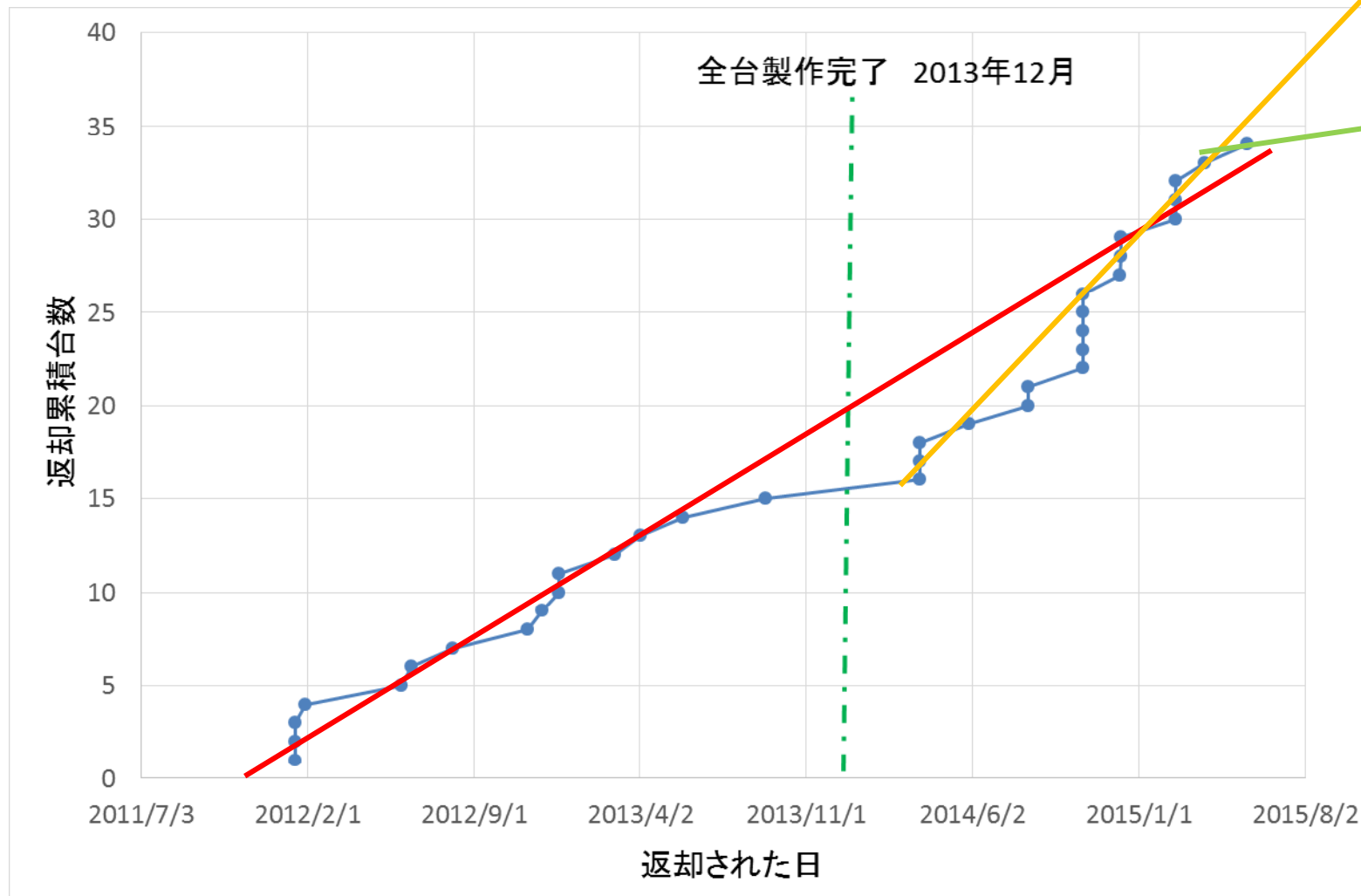


# ALMA受信機保守

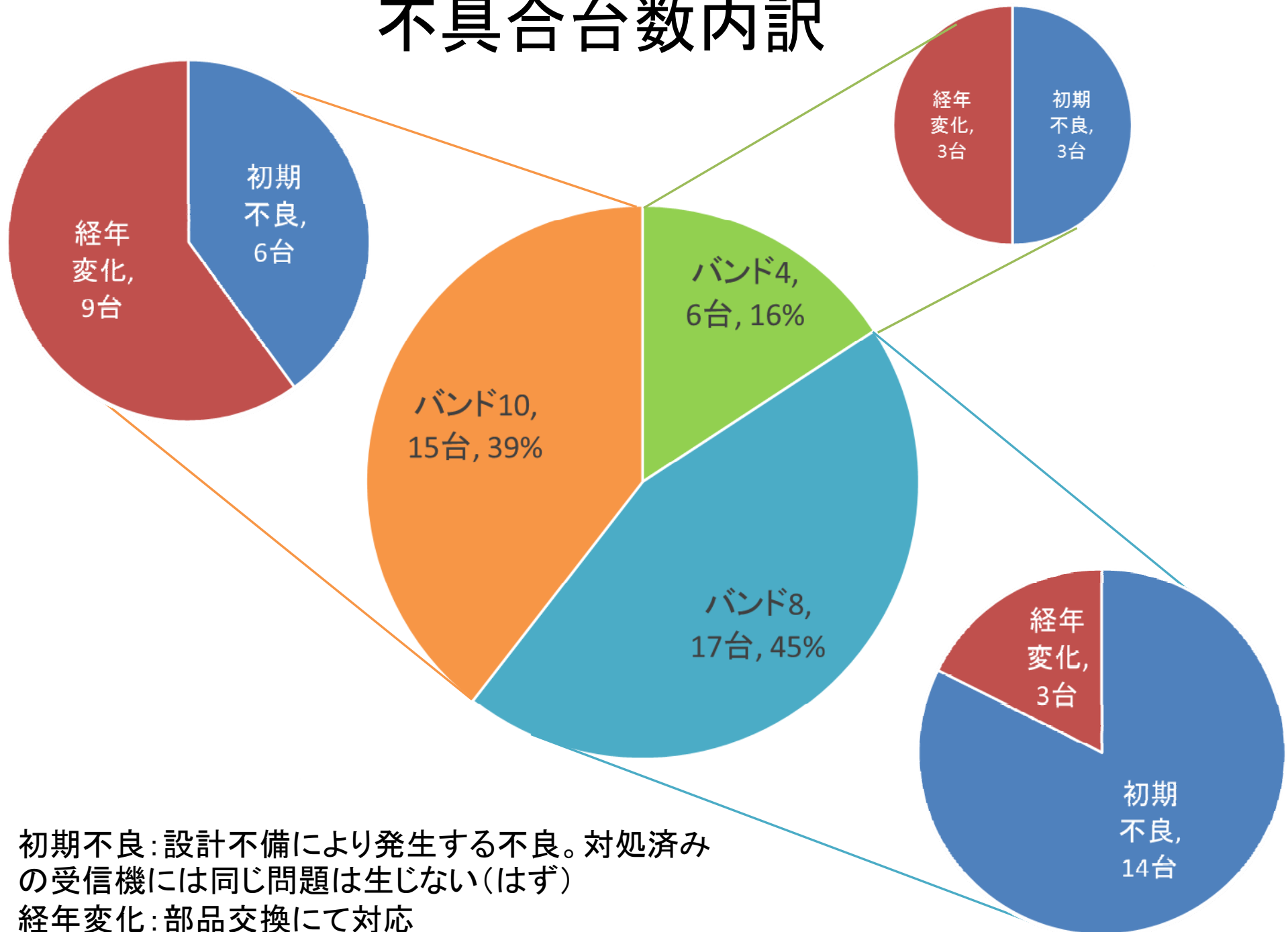
保守と言っても定期的なメンテナンスが必要な機器では無いので、不具合対応がメインになります

# BAND4, 8, 10 修理実績

| No. | BAN | CCA N | 主な故障内容               | 主な修理内容                 | 故障原因 | 初期PAI日     | 問題発覚日    | 問題JIRA番号        | 帰国日        | 修理後PAI日    | 帰国日  | 修理後 |
|-----|-----|-------|----------------------|------------------------|------|------------|----------|-----------------|------------|------------|------|-----|
| 1   | 8   | #03   | IF (Pol1 LSB) にdip発生 | CISO,CLNA交換            | 経年故障 | 2011/11/10 |          | AIVP-38         | 2012/1/17  | 2012/4/11  | 68   | 85  |
| 2   | 8   | #09   | リコール(フィルタコネクタ)       | フィルタコネクタポッティング改修(ハーネス) | 初期不良 | 2011/11/10 |          | AIVP-10         | 2012/1/17  | 2012/4/11  | 68   | 85  |
| 3   | 8   | #08   | CLNA バイアス異常          | フィルタコネクタポッティング改修(ハーネス) | 初期不良 | 2011/11/17 |          | AIVP-77         | 2012/1/17  | 2012/7/11  | 61   | 176 |
| 4   | 8   | #07   | CLNA バイアス異常          | フィルタコネクタ(ハーネス)交換       | 初期不良 | 2011/11/8  |          | FERFW-398,FERF  | 2012/1/30  | 2012/6/14  | 83   | 136 |
| 5   | 8   | #10   | リコール(フィルタコネクタ)       | フィルタコネクタポッティング改修(ハーネス) | 初期不良 | 2011/12/13 |          | FERFW-414,FERF  | 2012/5/31  | 2012/7/5   | 170  | 35  |
| 6   | 4   | #12   | Lo.Std.に不具合あり        | ミクサー交換                 | 経年故障 | 2012/3/2   |          | AIVPNCR-10      | 2012/6/13  | 2012/11/20 | 103  | 160 |
| 7   | 8   | #05   | 開発初期仕様(性能満たさず)       | 改修(部品交換)               | 初期不良 | 2010/8/12  |          | FENCR-305       | 2012/8/6   | 2012/12/14 | 725  | 130 |
| 8   | 8   | #03   | IF (Pol1 LSB) にdip発生 | IF Hybrid交換            | 経年故障 | 2012/4/11  | 2012年9月  | FENCR-551       | 2012/11/9  | 2013/10/24 | 212  | 349 |
| 9   | 8   | #07   | 真空漏れ                 | ハーメチックコネクタ交換           | 初期不良 | 2012/6/14  | 2012年8月  | FENCR-557       | 2012/11/28 | 2013/1/11  | 167  | 44  |
| 10  | 8   | #02   | 開発初期仕様(性能満たさず)       | 改修(部品交換)               | 初期不良 | 2011/2/14  |          | FENCR-305       | 2012/12/20 | 2013/3/21  | 675  | 91  |
| 11  | 8   | #16   | CLNA バイアス異常          | フィルタコネクタ(ハーネス)交換       | 初期不良 | 2012/4/11  |          | AIVP-429        | 2012/12/20 | 2013/5/29  | 253  | 160 |
| 12  | 4   | #01   | 開発初期仕様(部品交換リコー)      | 改修(部品交換)               | 初期不良 | 2010/8/10  |          | AIVPNCR-69      | 2013/3/1   | 2013/9/27  | 934  | 210 |
| 13  | 8   | #01   | 開発初期仕様(性能満たさず)       | 改修(部品交換)               | 初期不良 | 2011/1/27  |          | AIVP-26         | 2013/4/3   | 2013/7/29  | 797  | 117 |
| 14  | 4   | #02   | SISミクサー用ヒータ故障        | ヒータ修理                  | 経年故障 | 2012/4/12  | 2013年2月  | AIVNCR-320      | 2013/5/28  | 2014/4/30  | 411  | 337 |
| 15  | 8   | #08   | CLNA バイアス異常          | フィルタコネクタ(ハーネス)交換       | 初期不良 | 2012/7/11  | 2013年7月  | AIVNCR-355      | 2013/9/10  | 2014/5/27  | 426  | 259 |
| 16  | 8   | #04   | 開発初期仕様(性能満たさず)       | 改修(部品交換)               | 初期不良 | 2010/8/12  |          | FENCR-305       | 2014/3/27  | 2014/5/31  | 1323 | 65  |
| 17  | 8   | #68   | 冷却アンブ不具合             | 冷却アンブ交換                | 経年故障 | 2013/7/23  | 2013年12月 | AIVP-596, AIVPN | 2014/3/27  | 2014/7/23  | 247  | 118 |
| 18  | 8   | #14   | 真空漏れ                 | ハーメチックコネクタ交換           | 初期不良 | 2012/1/17  |          | FERFW-439       | 2014/3/27  | 2014/7/23  | 800  | 118 |
| 19  | 10  | #41   | SISミクサーのI-V特性劣化      | SISミクサー交換              | 経年故障 | 2013/6/25  |          | FENCR-612       | 2014/5/29  | 2014/10/22 | 338  | 146 |
| 20  | 10  | #34   | SISミクサーのI-V特性劣化      | SISミクサー交換              | 経年故障 | 2013/5/1   |          | FENCR-614       | 2014/8/13  | 2014/10/22 | 469  | 70  |
| 21  | 4   | #36   | 冷却アンブ不具合             | 冷却アンブ交換                | 初期不良 | 2013/3/7   |          | AIVPNCR-46      | 2014/8/13  | 2014/12/17 | 524  | 126 |
| 22  | 8   | #61   | SISミクサー動作不具合         | ケーブルハーネス交換             | 初期不良 | 2013/6/5   | 2014年5月  | AIVP-710, AIVPN | 2014/10/22 | 2014/12/5  | 504  | 44  |
| 23  | 4   | #30   | LO通倍器不具合             | LO通倍器交換                | 経年故障 | 2012/11/20 |          | AIVPNCR-26      | 2014/10/22 | 2014/12/17 | 701  | 56  |
| 24  | 10  | #53   | SISミクサーのI-V特性劣化      | SISミクサー交換              | 経年故障 | 2013/9/5   |          | AIVP-1717       | 2014/10/22 | 2015/2/3   | 412  | 104 |
| 25  | 10  | #33   | SISミクサーのI-V特性劣化      | SISミクサー交換              | 経年故障 | 2013/5/1   |          | FENCR-614       | 2014/10/22 | 2015/2/3   | 539  | 104 |
| 26  | 10  | #31   | SISミクサーのI-V特性劣化      | SISミクサー交換              | 経年故障 | 2013/2/7   |          | FENCR-614       | 2014/10/22 | 2015/2/3   | 622  | 104 |
| 27  | 4   | #54   | 冷却アンブ不具合             | ケーブル、コネクタ交換            | 初期不良 | 2013/8/8   | 2015年5月  | AIVP-1211       | 2014/12/8  | 2015/1/23  | 487  | 46  |
| 28  | 10  | #51   | SISミクサーのI-V特性劣化      | SISミクサー交換              | 経年故障 | 2014/1/14  |          | AIVP-1795       | 2014/12/9  | 2015/6/5   | 329  | 178 |
| 29  | 10  | #42   | SISミクサーのI-V特性劣化      | SISミクサー交換              | 経年故障 | 2013/6/25  |          | AIVP-1793       | 2014/12/9  | 2015/6/5   | 532  | 178 |
| 30  | 10  | #35   | 冷却アンブ バイアス問題         | 冷却アンブ交換                | 初期不良 | 2013/5/28  |          | FENCR-619       | 2015/2/18  | 2015/6/1   | 631  | 103 |
| 31  | 10  | #38   | SISミクサーのI-V特性劣化      | SISミクサー交換              | 経年故障 | 2013/5/31  |          | AIVP-1724       | 2015/2/18  | 2015/6/4   | 628  | 106 |
| 32  | 10  | #36   | 冷却アンブ バイアス問題         | 冷却アンブ交換                | 初期不良 | 2013/5/28  |          | FENCR-619       | 2015/2/18  | 2015/6/4   | 631  | 106 |
| 33  | 8   | #06   | 真空漏れ                 | ハーメチックコネクタ交換(未発送)      | 初期不良 | 2012/4/11  |          | FERFW-367,FERF  | 2015/3/26  | 2015/8/2   | 1079 | 129 |
| 34  | 10  | #15   | 冷却アンブ バイアス問題         | 冷却アンブ交換                | 初期不良 | 2012/12/7  |          | NCR-619 =>      | 2015/5/20  | 2015/8/2   | 894  | 74  |
| 35  | 10  | #71   | 冷却アンブ バイアス問題         | (未対応)                  | 初期不良 | 2014/1/28  |          | AIV16533        | 2015/12/8  | 未修理        |      | 679 |
| 36  | 10  | #43   | 冷却アンブ バイアス問題         | (未対応)                  | 初期不良 | 2013/7/4   |          | FENCR-619       | 未返却        |            |      |     |
| 37  | 10  | #39   | 冷却アンブ バイアス問題         | (未対応)                  | 初期不良 | 2013/9/5   |          | AIV-15585       | 未返却        |            |      |     |
| 38  | 10  | #69   | SISミクサーのI-V特性劣化      | (未対応)                  | 経年故障 | 2014/1/29  |          | AIVPNCR-88      | 未返却        |            |      |     |



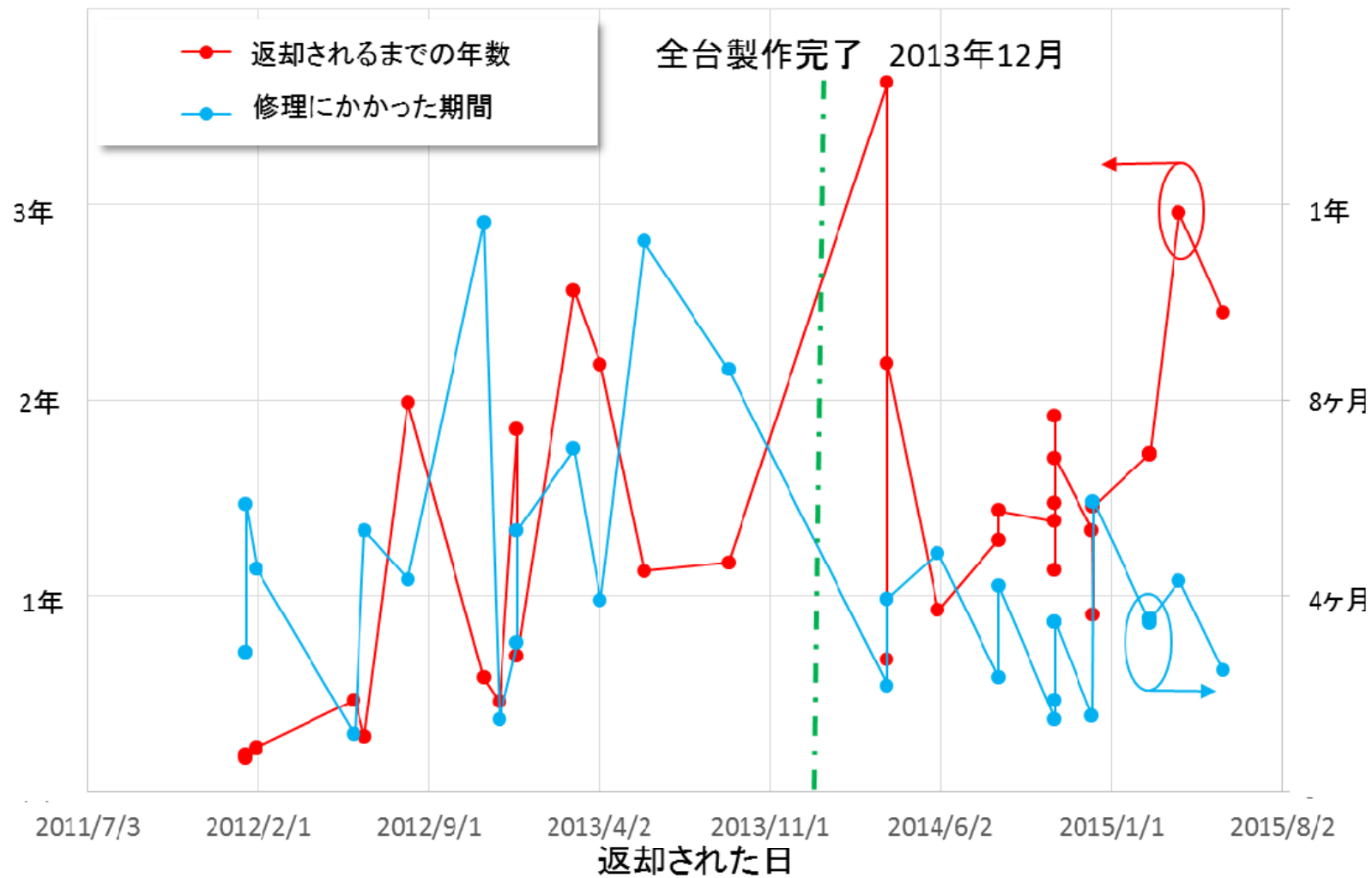
# 不具合台数内訳



初期不良: 設計不備により発生する不良。対処済みの受信機には同じ問題は生じない(はず)

経年変化: 部品交換にて対応

完成から修理で返却されるまでの年数



修理にかかった期間

# ALMA受信機保守の今後

- ・アルマに納品した受信機の内3年半で34台の受信機を修理した(年10台平均)
- ・内訳として初期不良の内、製作中に判明した「初期不良」に関しては設計を見直すことにより対処が済んでいて、今後初期不良として改修を行わなければいけない受信機は減少していく
- ・偶発故障の多いBand10においては故障を起こしやすいロットの特定が済んでいるため、故障しにくい方に順次交換が進んでおり、こちらも残り台数が少ない
- ・よって今後の修理台数は減少して落ち着いていくことになるが、保守の技術・要員を確保するためにも他の受信機開発・協力を行いつつ技術の継承を行っていく

# 望遠鏡受信機開発

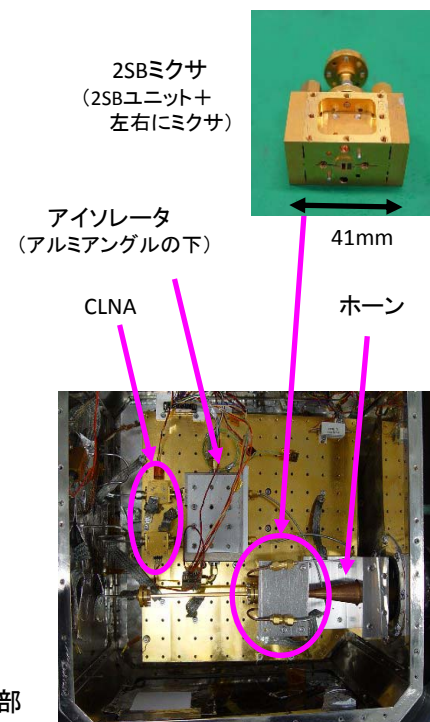
- NRO FOREST
  - SISミクサ評価
  - CLNA電源開発
- ASTE
  - DASH345改修
  - ASTE Band8 (Band8 QM) 改修
  - 3カートリッジデュア開発
- 他望遠鏡対応
  - 名古屋大学 NANTEN2 開発支援

「野辺山45m電波望遠鏡に搭載のFOREST受信機  
用超伝導(SIS)ミクサの性能測定」



測定装置 (中央の四角の部分デュア)

デュア内部

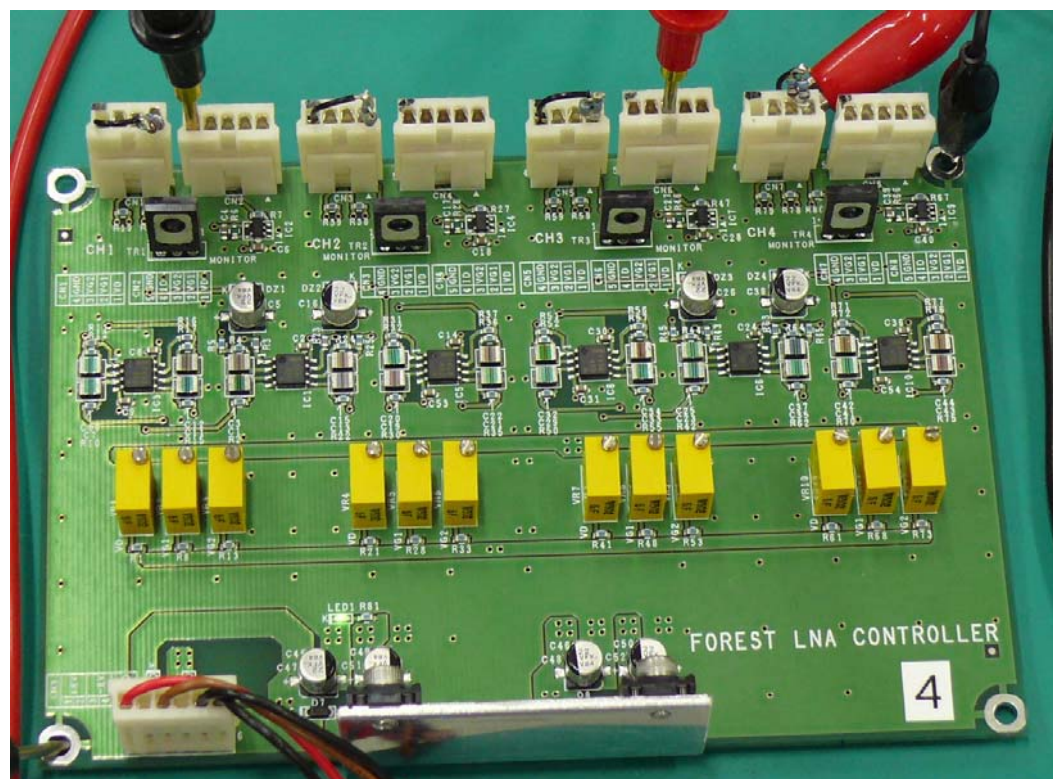


「天文学における技術シンポジウム」  
2015/12/10 9:20より飯塚さんが報告します



# 望遠鏡受信機開発

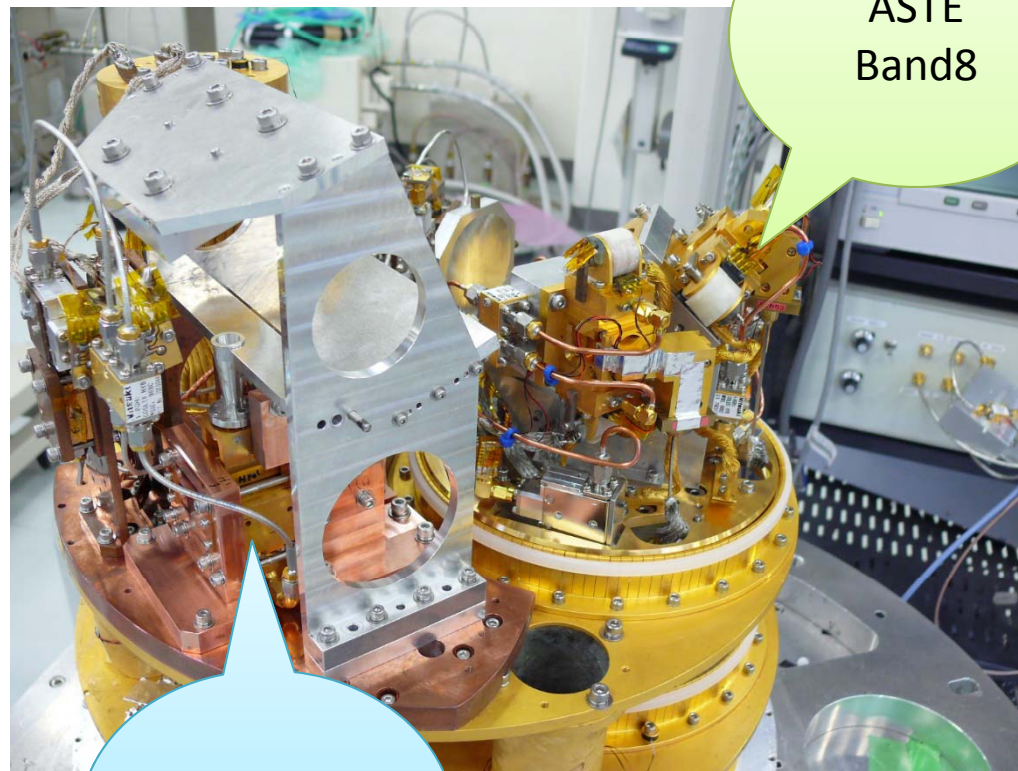
- NRO FOREST
  - SISミクサ評価
  - CLNA電源開発
- ASTE
  - DASH345改修
  - ASTE Band8 (Band8 QM) 改修
  - 3カートリッジデュア開発
- 他望遠鏡対応
  - 名古屋大学 NANTEN2 開発支援





# 望遠鏡受信機開発

- NRO FOREST
  - SISミキサ評価
  - CLNA電源開発
- ASTE
  - DASH345改修
  - ASTE Band8 (Band8 QM) 改修
  - 3カートリッジデュア開発
- 他望遠鏡対応
  - 名古屋大学 NANTEN2 開発支援

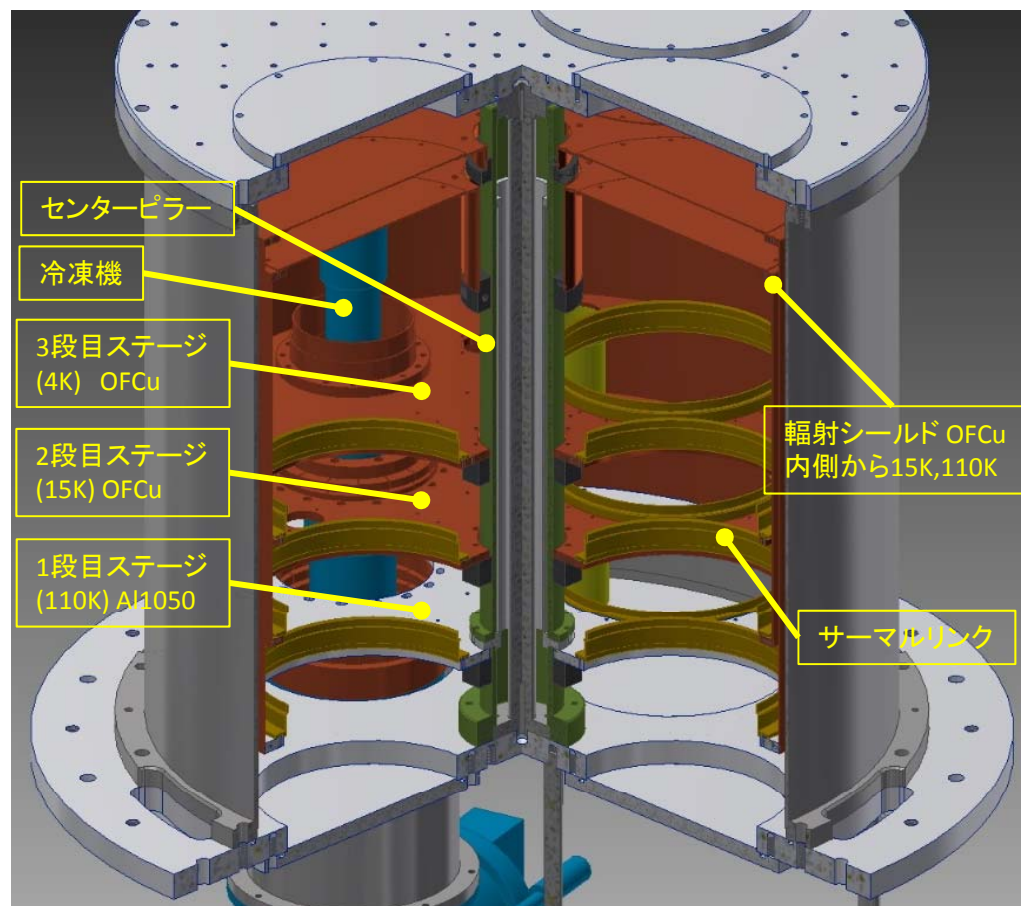


ASTE  
Band8

DASH345

# 望遠鏡受信機開発

- NRO FOREST
  - SISミクサ評価
  - CLNA電源開発
- ASTE
  - DASH345改修
  - ASTE Band8 (Band8 QM) 改修
  - **3カートリッジデュア開発**
- 他望遠鏡対応
  - 名古屋大学 NANTEN2 開発支援



「ASTE新3カートリッジデュアの冷却性能試験」

「天文学における技術シンポジウム」

ポスター発表でより佐藤さんが報告します

# 先端受信機開発

## 開発の概要

アルマ望遠鏡に未搭載のバンド1と2受信機の開発が国際共同で推進されています。

### ・バンド1

周波数帯:35-50 (52) GHz

参加国:台湾, アメリカ, カナダ, チリ, 日本

### ・バンド2

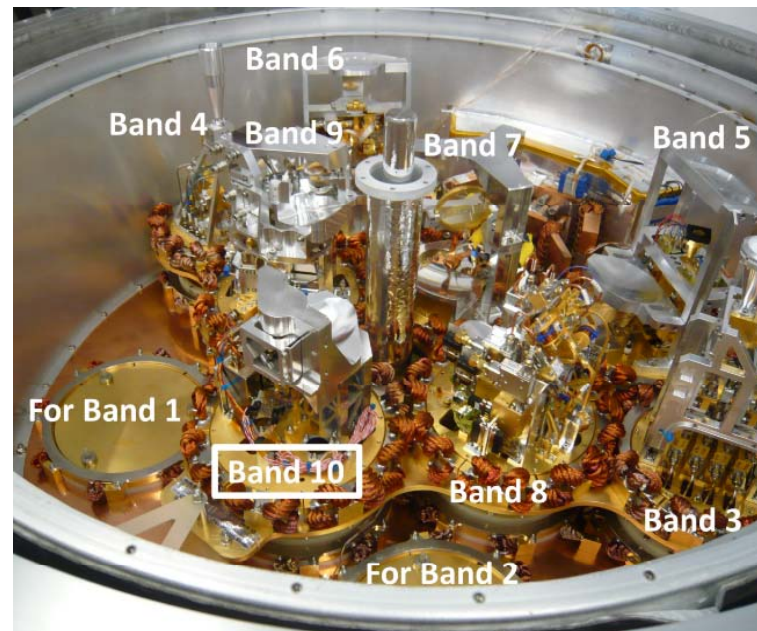
周波数帯:67-90 GHz

参加国:アメリカ, 日本

## どんな研究・技術が必要?

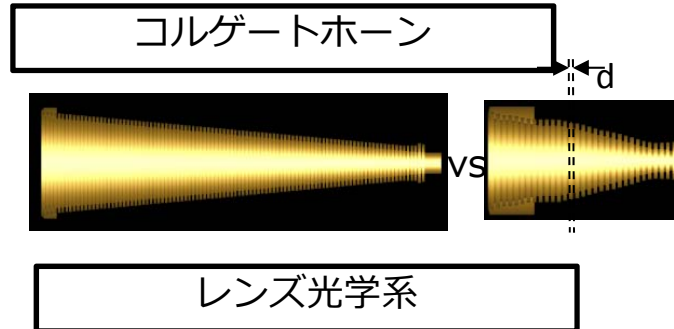
コンパクトな光学系設計、半導体技術

- **Band1 Band2**
  - 光学系設計
  - 40GHz帯コルゲートホーン試作
- Band 11
  - デバイス
- WideBand
  - RF wide band
  - IF wide band
- Multi Beam
  - 概念検討

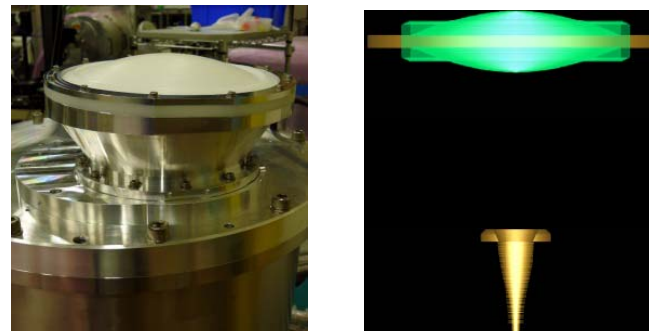


# 先端受信機開発

- Band1 Band2
  - 光学系設計
  - 40GHz帯コルゲートホーン試作
- Band 11
  - デバイス
- WideBand
  - RF wide band
  - IF wide band
- Multi Beam
  - 概念検討

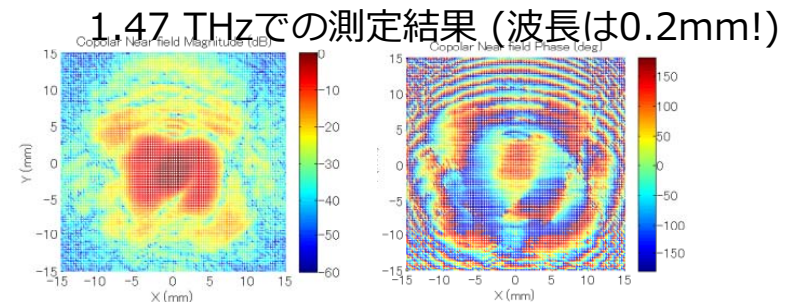


| ALMA バンド              | d (mm)    |
|-----------------------|-----------|
| バンド1 (35-50 GHz)      | 0.900     |
| バンド2 (67-90 GHz)      | 0.432     |
| バンド10 (787-950 GHz)   | 0.054     |
| バンド11 (1250-1550 GHz) | 0.034 (!) |



バンド1と2：  
波長が長いため、  
一般には部品が  
大きくなる。  
新技術が必要！

テラヘルツビームの測定(世界初！)





# 先端受信機開発

- Band1 Band2
  - 光学系設計
  - 40GHz帯コルゲートホーン試作
- Band 11
  - デバイス
- WideBand
  - RF wide band
  - IF wide band
- Multi Beam
  - 概念検討

「40GHz帯コルゲートホーンの試作」

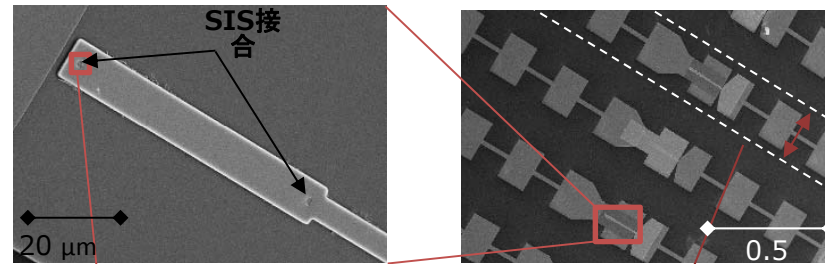
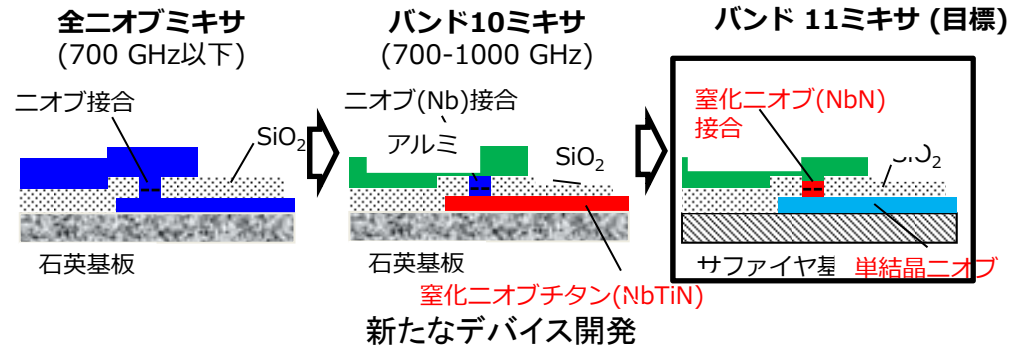


「天文学における技術シンポジウム」

2015/12/10 15:10より 金子さんが報告します

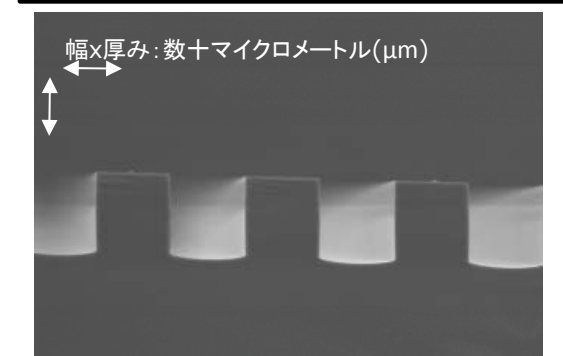
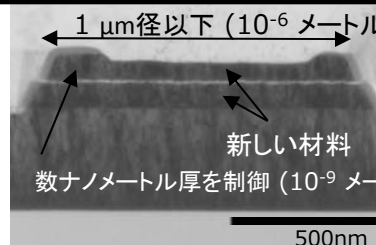
# 先端受信機開発

- Band1 Band2
  - 光学系設計
  - 40GHz帯コルゲートホーン試作
- Band 11
  - デバイス
- WideBand
  - RF wide band
  - IF wide band
- Multi Beam
  - 概念検討



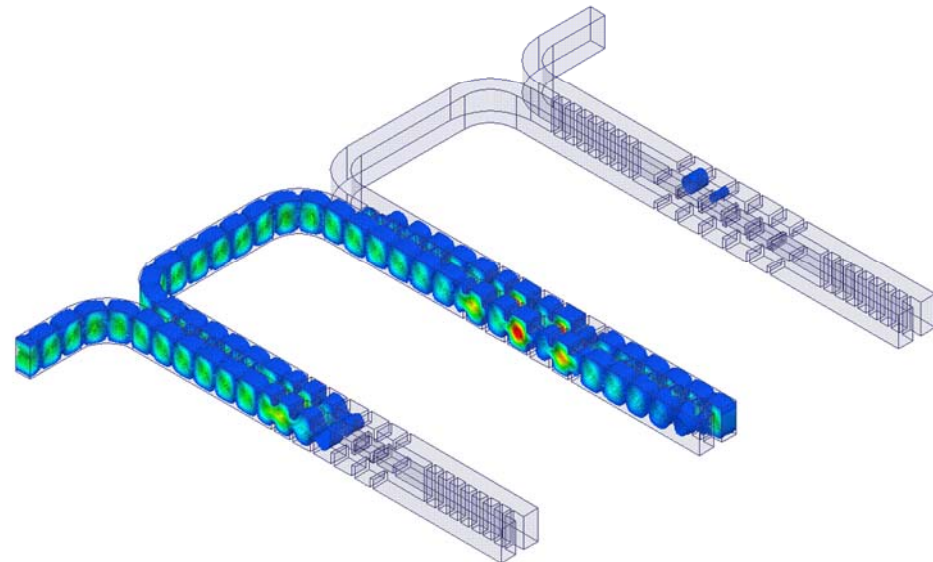
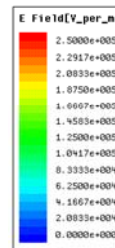
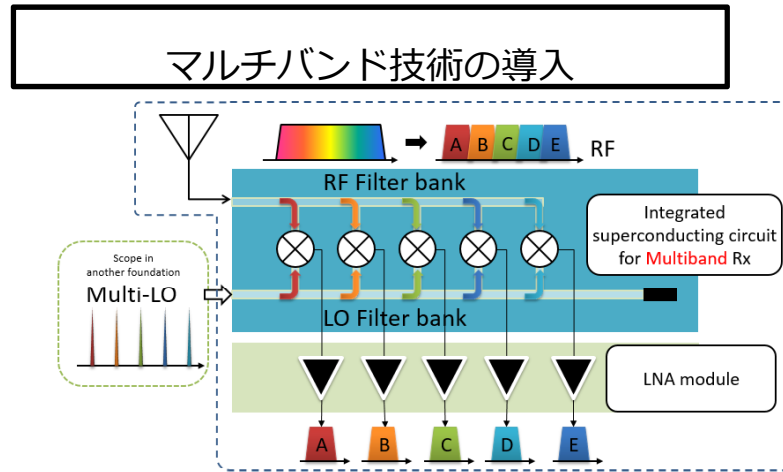
新しいSIS接合の開発

新しい高精度加工方法の導入  
深堀ドライエッチング



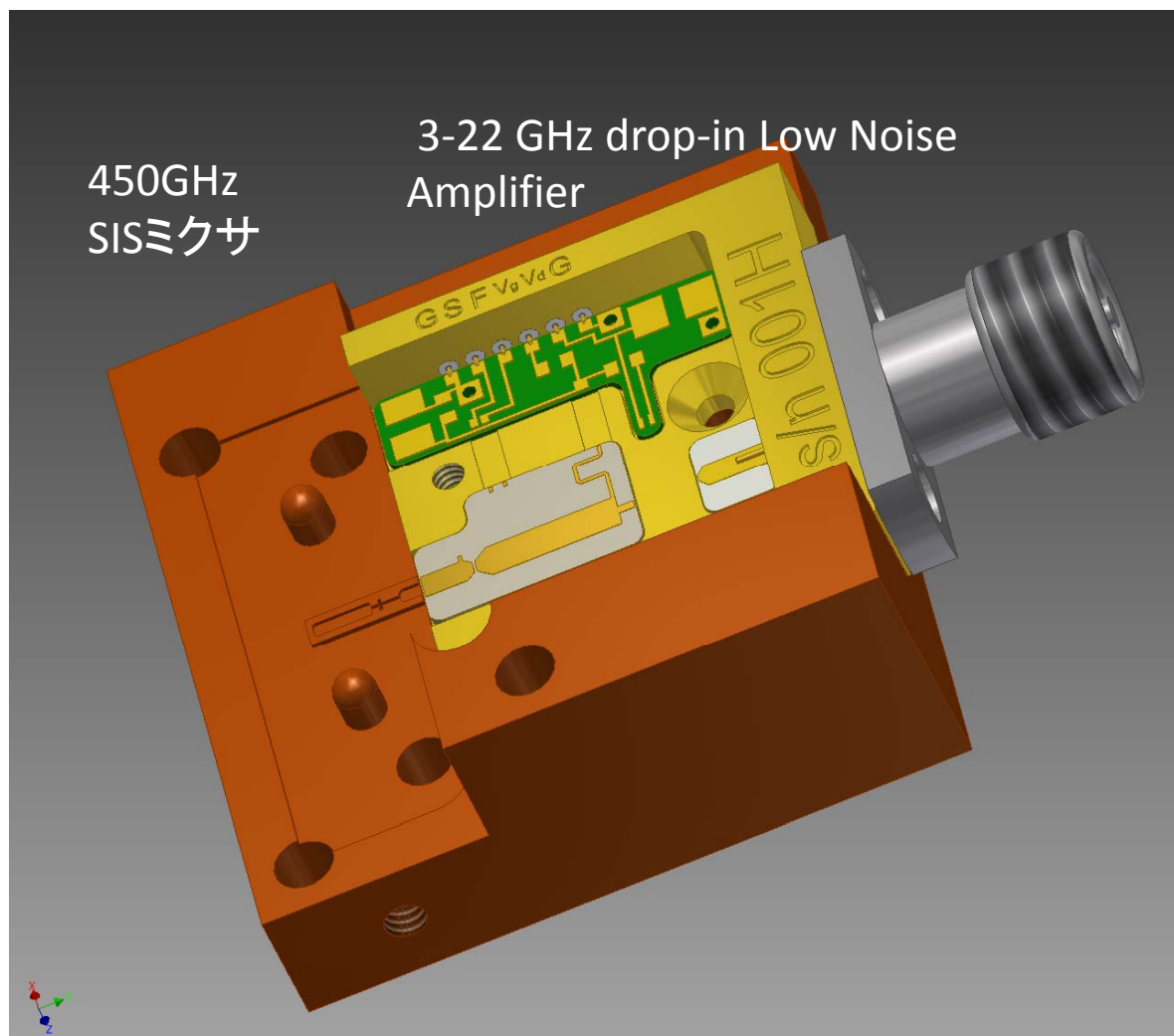
# 先端受信機開発

- Band1 Band2
  - 光学系設計
  - 40GHz帯コルゲートホーン試作
- Band 11
  - デバイス
- WideBand
  - RF wide band
  - IF wide band
- Multi Beam
  - 概念検討



# 先端受信機開発

- Band1 Band2
  - 光学系設計
  - 40GHz帯コルゲートホーン試作
- Band 11
  - デバイス
- WideBand
  - RF wide band
  - IF wide band
- Multi Beam
  - 概念検討

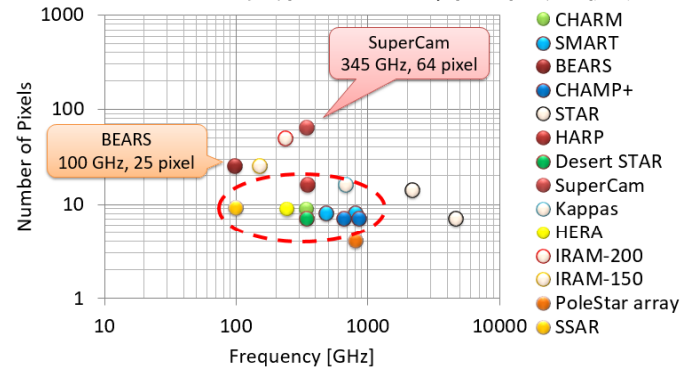




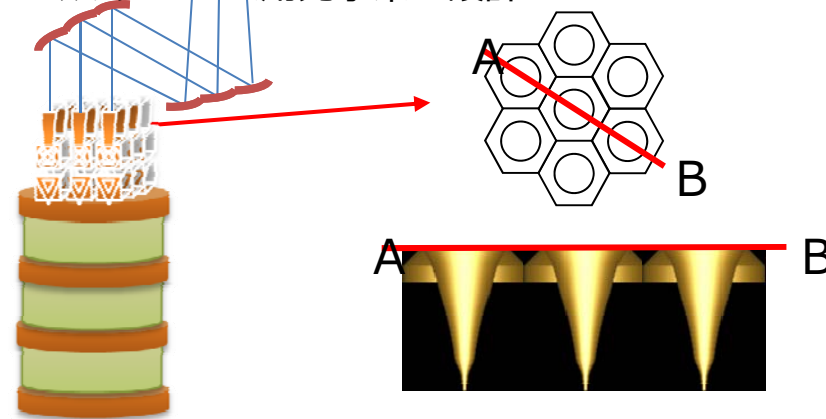
# 先端受信機開発

- Band1 Band2
  - 光学系設計
  - 40GHz帯コルゲートホーン試作
- Band 11
  - デバイス
- WideBand
  - RF wide band
  - IF wide band
- Multi Beam
  - 概念検討

マルチビーム受信機の世界的開発状況



マルチビーム用光学系の設計



# まとめ

- 国立天文台 先端技術センターではアルマ望遠鏡にバンド4、バンド8、バンド10受信機を計219台製造した。
- 各受信機開発チームは一つの受信機チームとして改組され、アルマ受信機の保守を行うとともに、他の望遠鏡開発や、先端受信機開発を行っている。