

「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

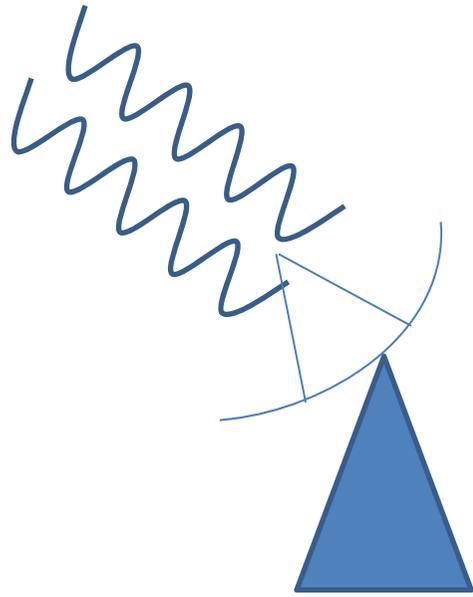
and

ATC受信機チーム

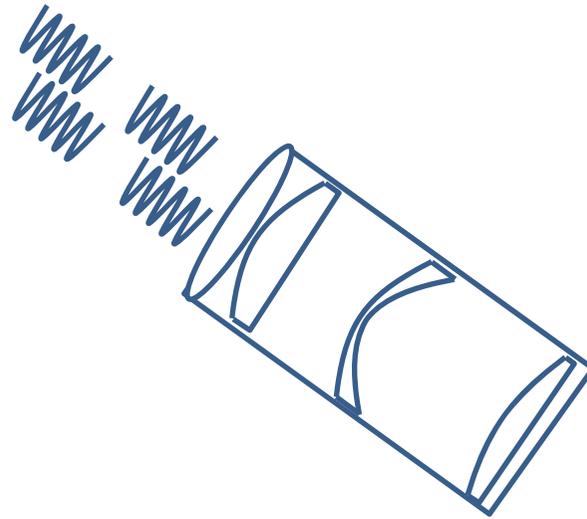
概要

- 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

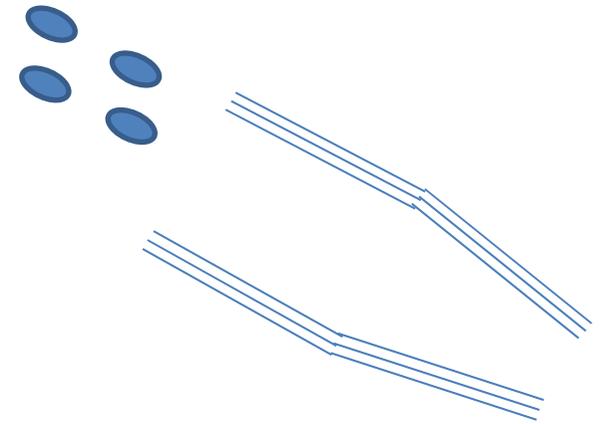
波と粒子



電波

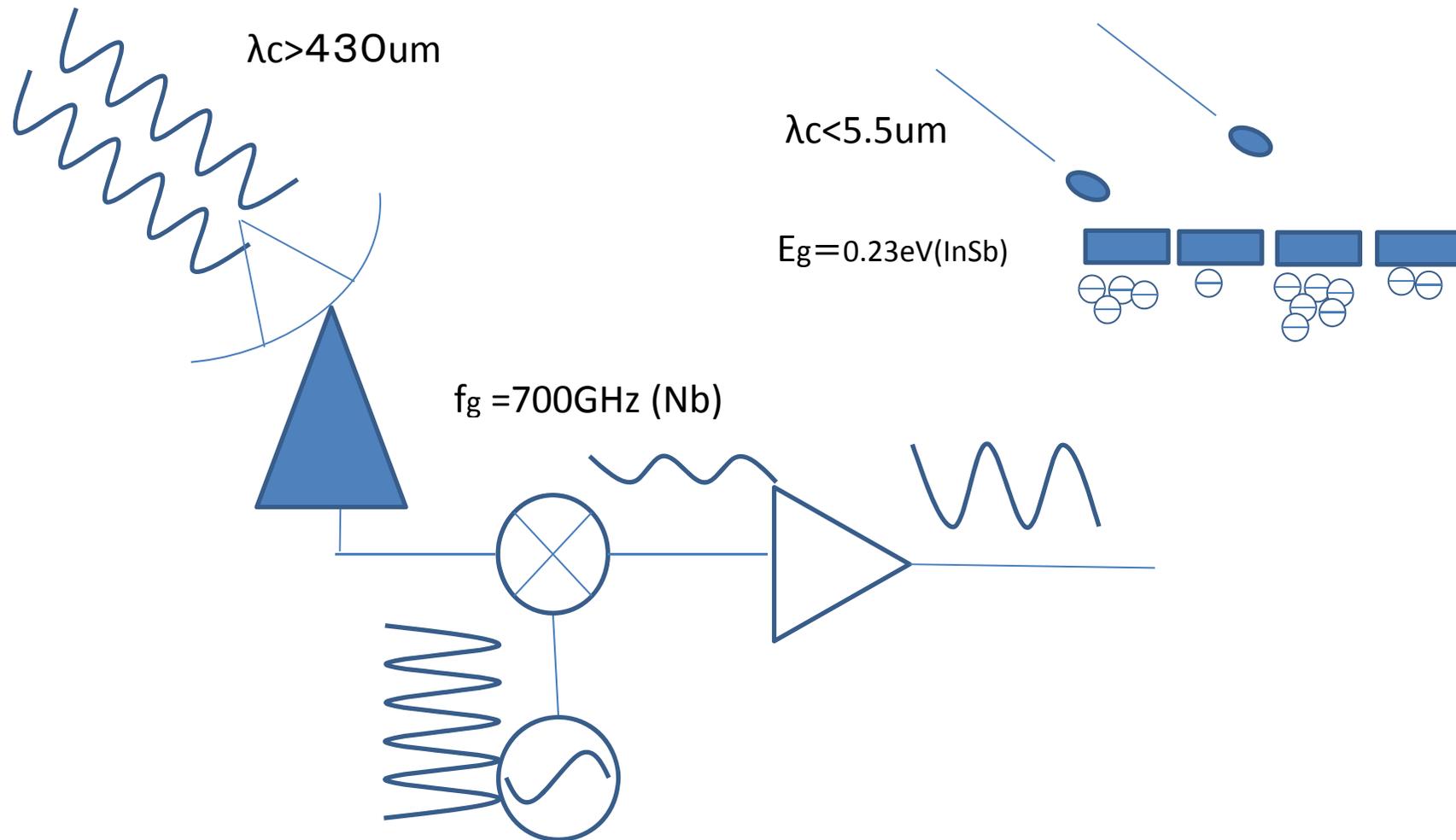


光

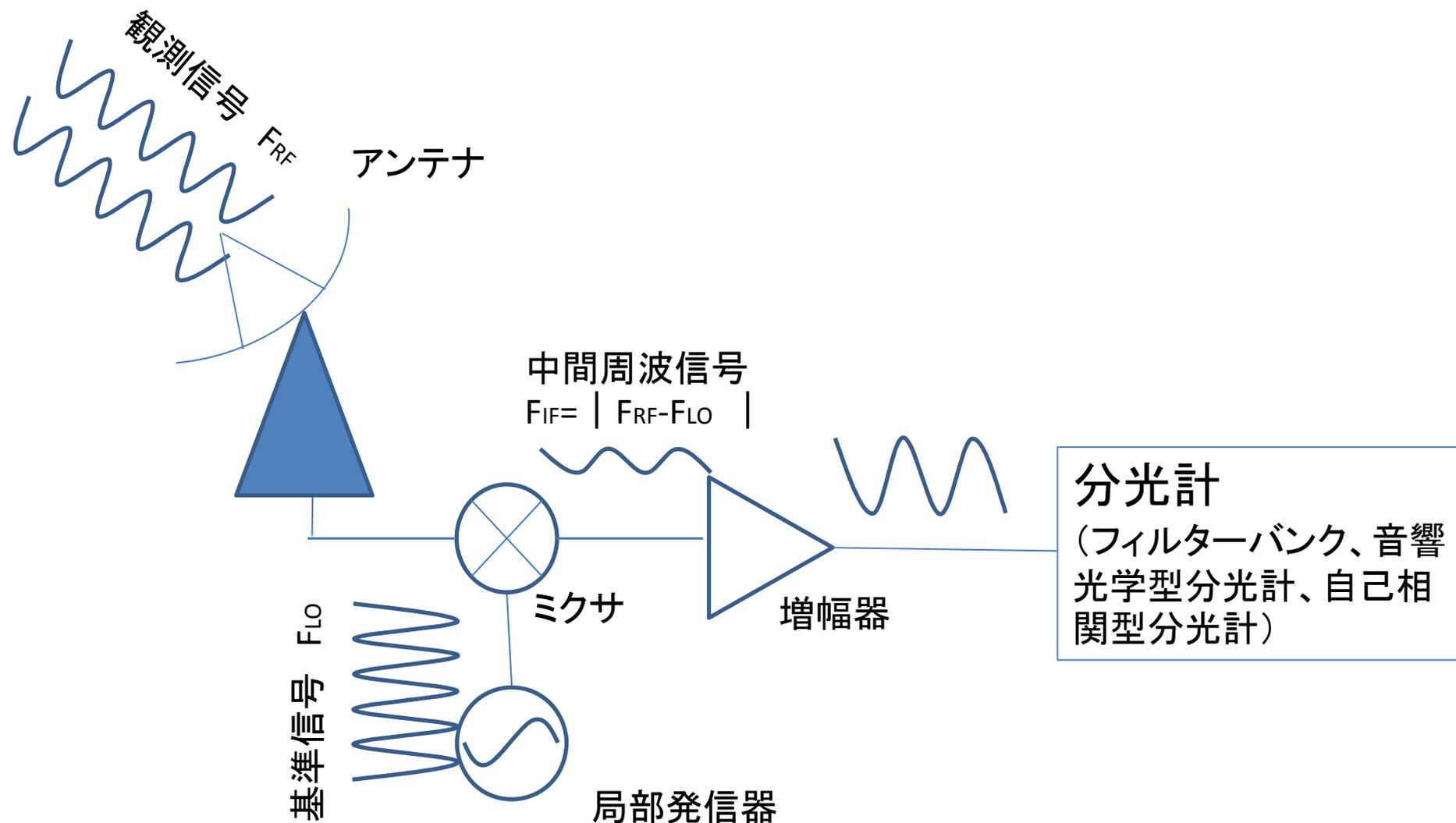


X線

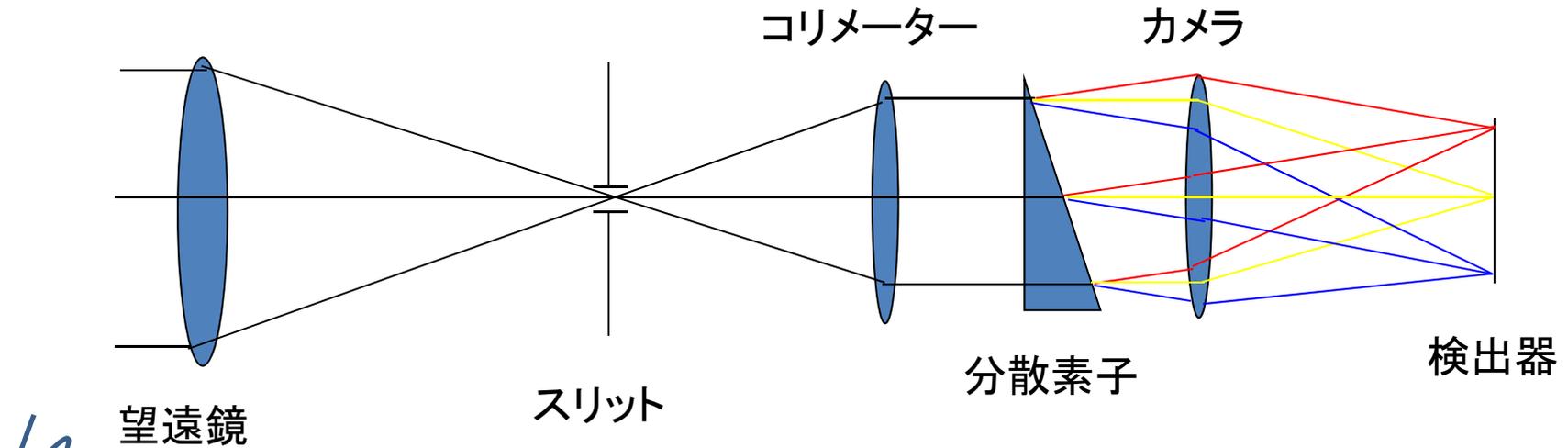
受信機と検出器



ヘテロダイン受信機



分光



望遠鏡

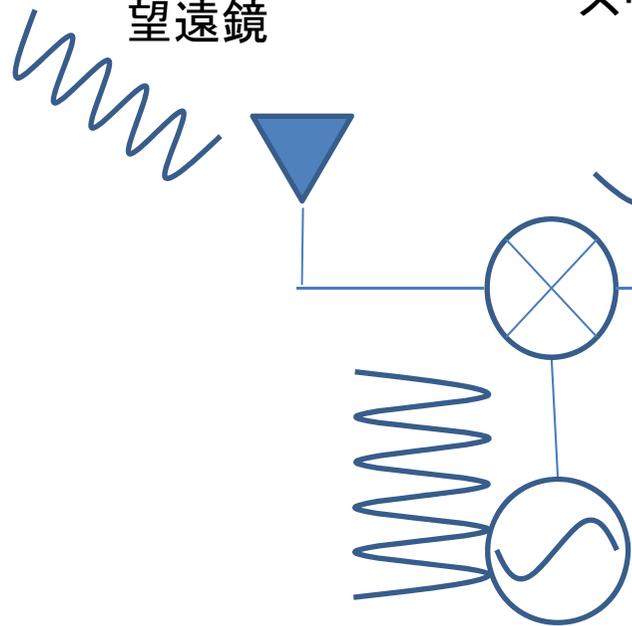
スリット

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)

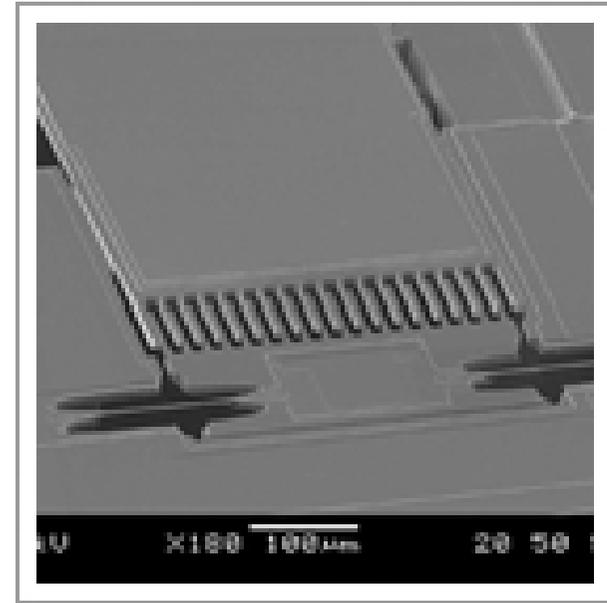
部品

- 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

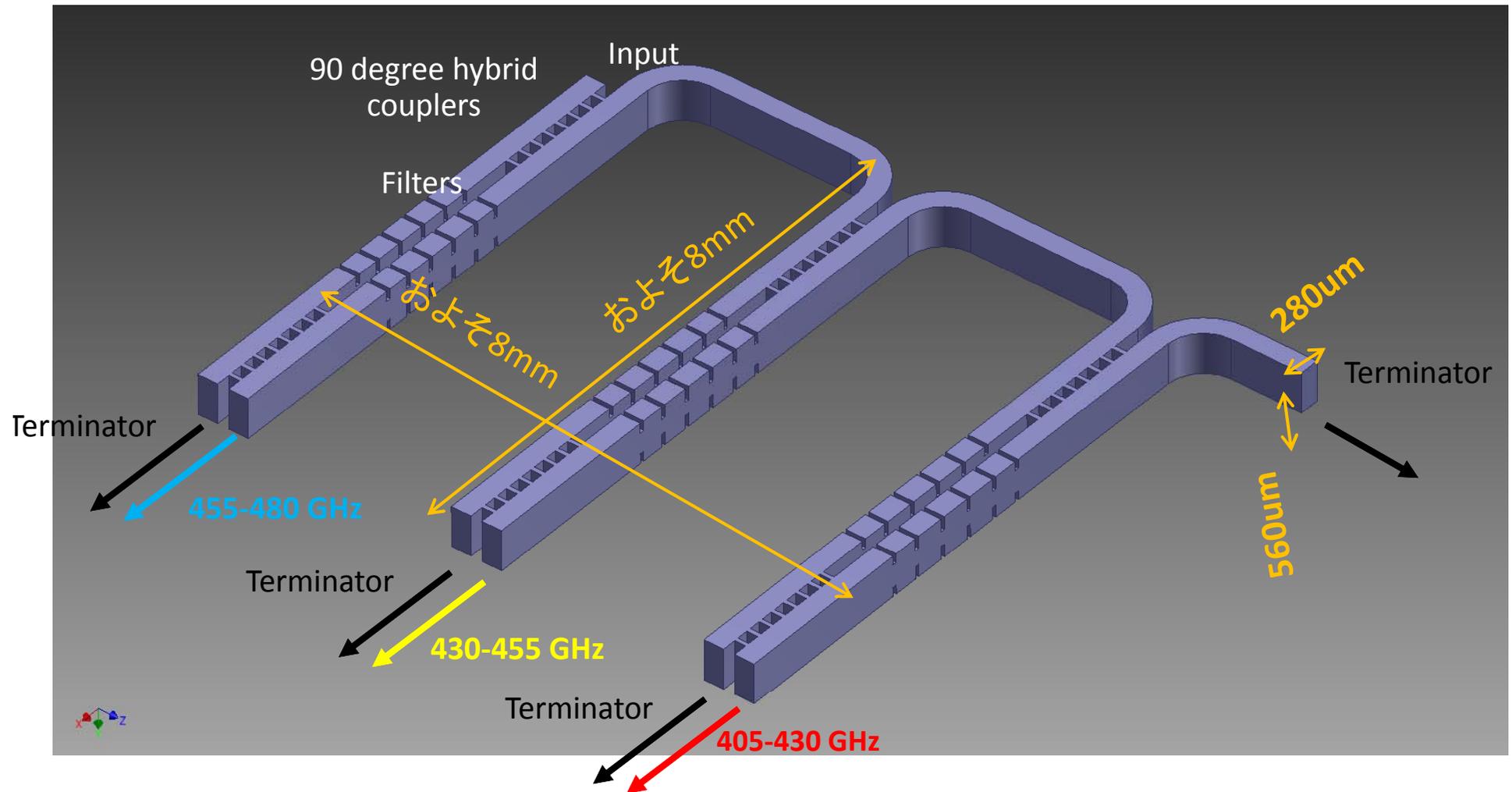
半導体加工技術を応用して微
細加工を行う

マイクロマシニング

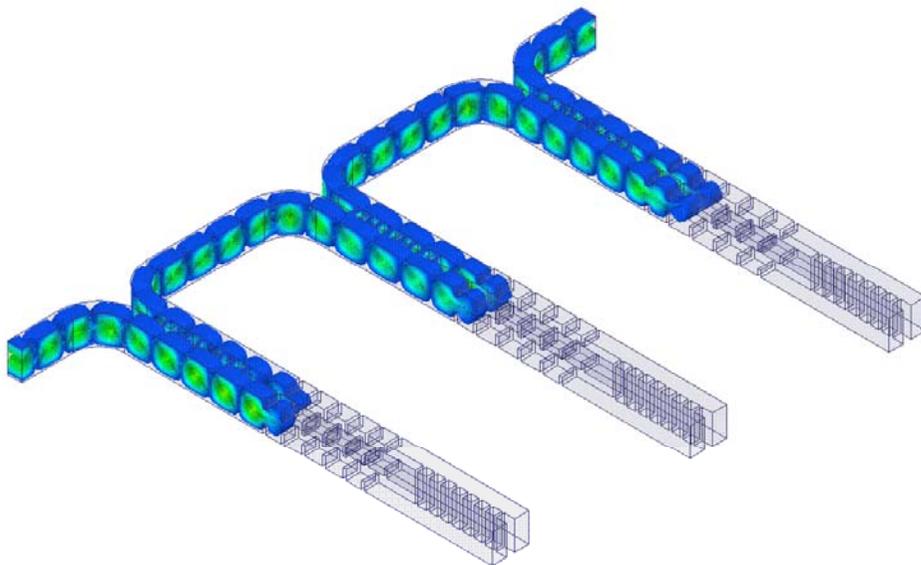
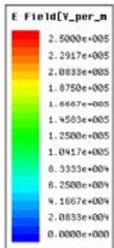


東北大 光マイクロシステムグループHPより

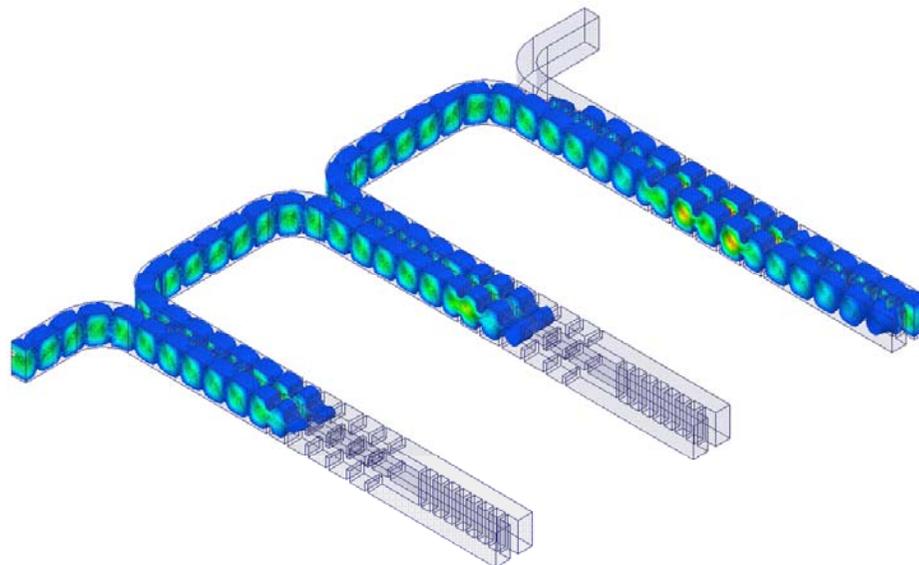
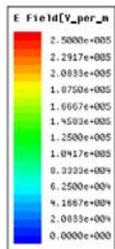
電波受信機の特徴 金属加工可能なサイズ



380GHz

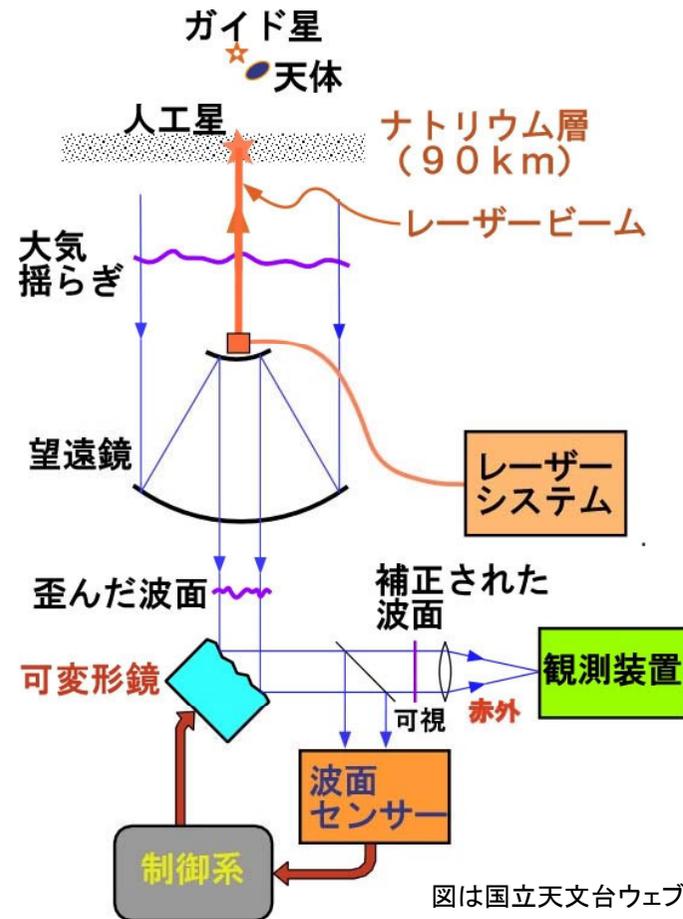


420GHz



-補償光学の基本- 成り立ちと基本構成

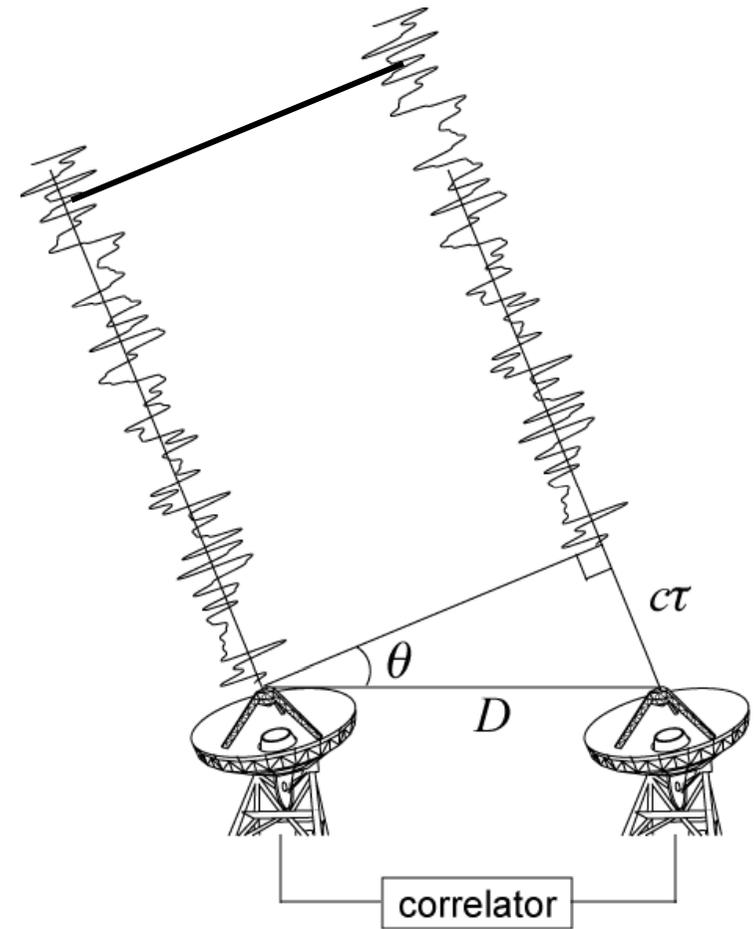
- バブコックが1953年に提唱
- 天体望遠鏡では、大気による像劣化の改善
- フィードバック制御(負帰還補償) : 左図参照
 - 波面センサーで誤差測定
 - 可変形鏡で誤差補正



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 τ を探す。これがわかれば、角度 θ 、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

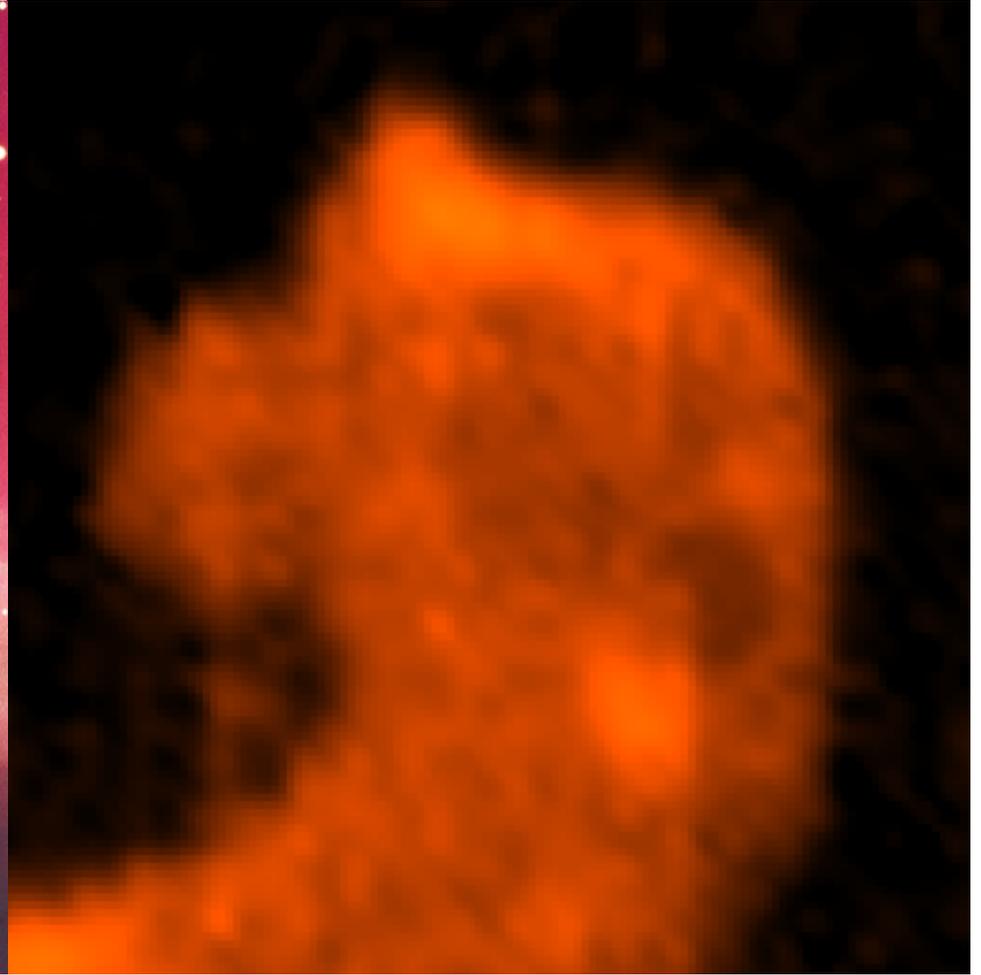
Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計

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

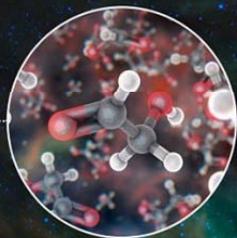
多様な惑星系の起源は？



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



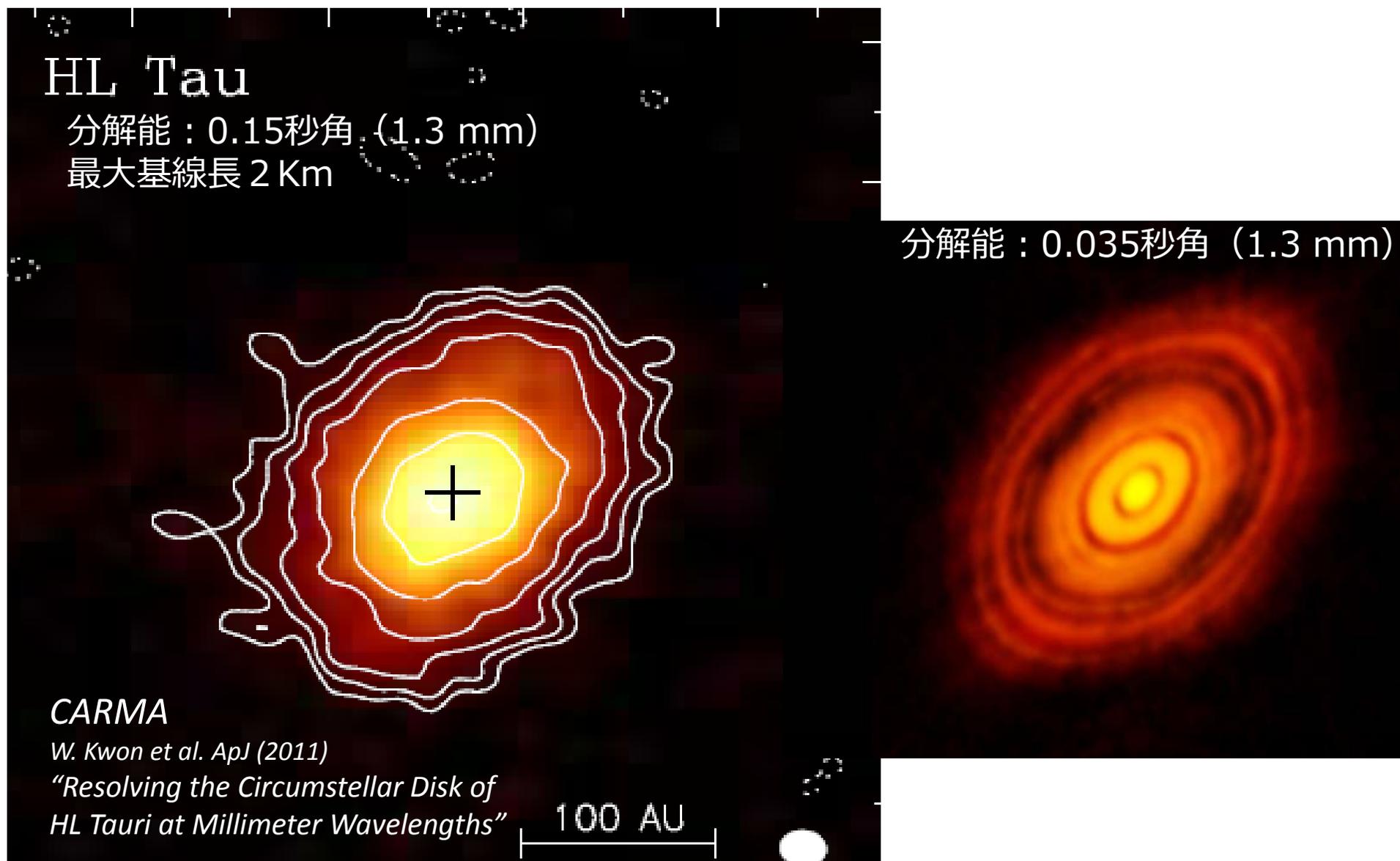
おうし座HL星を取り巻く塵の円盤

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。

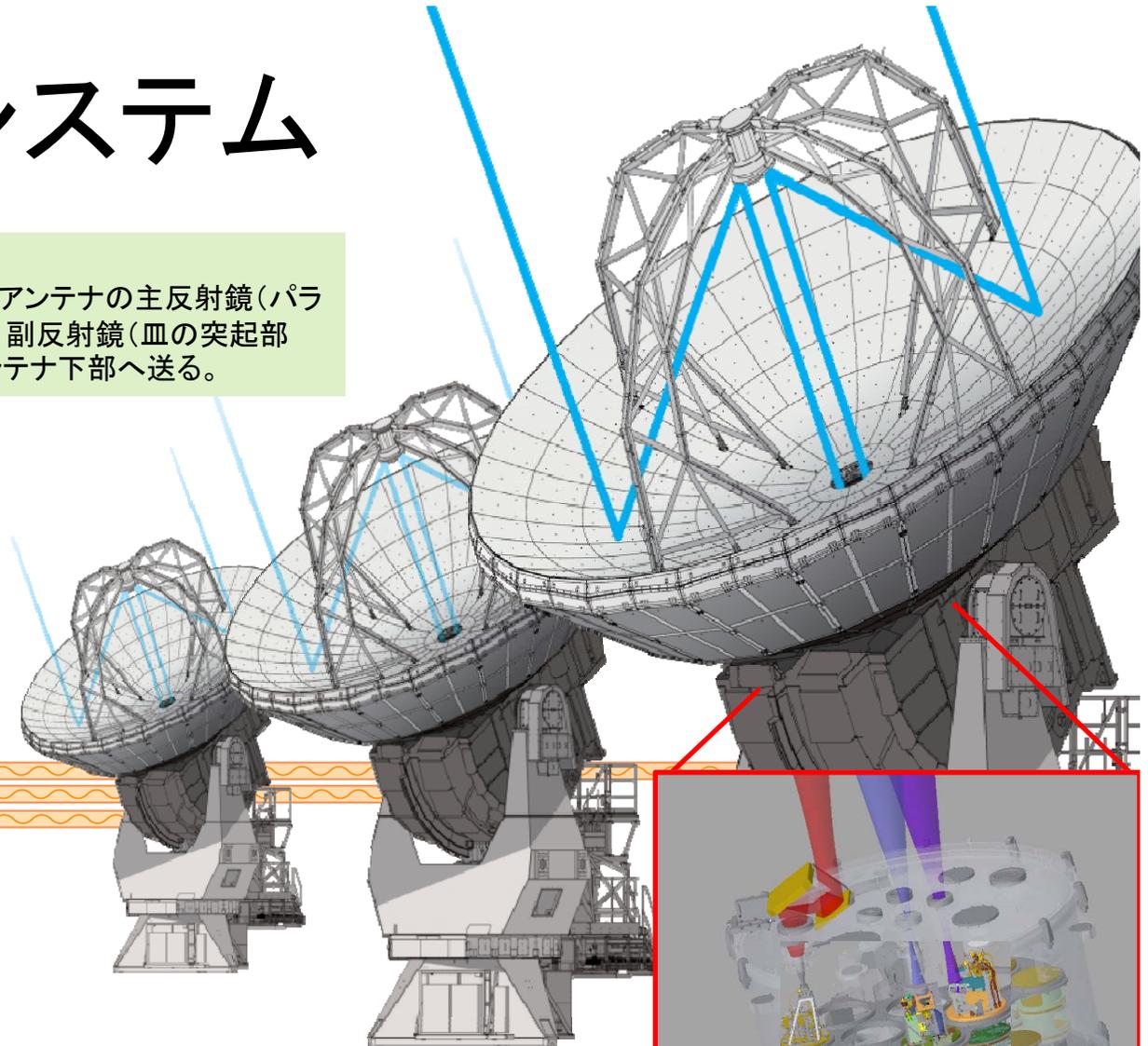


4. 信号を干渉させる

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。

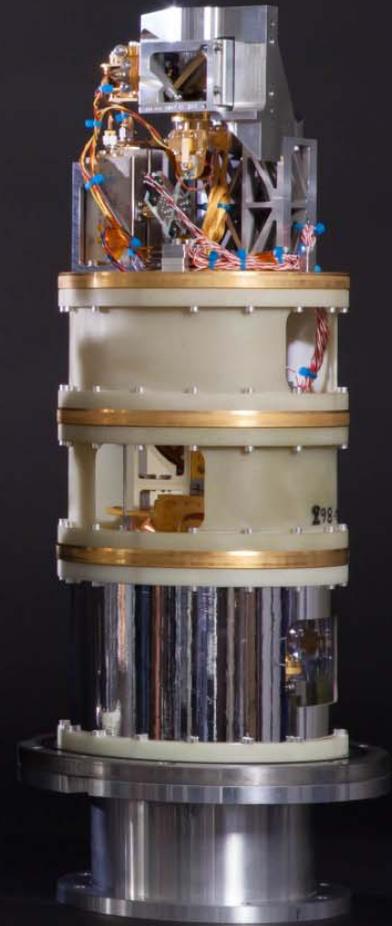
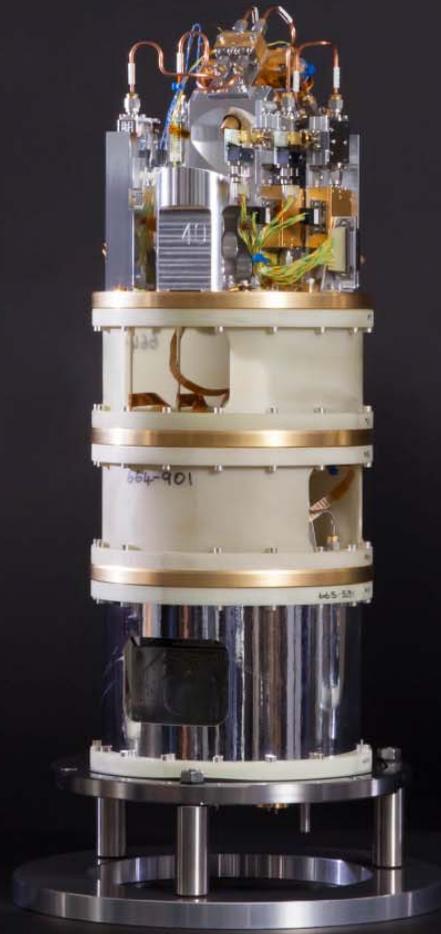
2. 電波を受信する

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

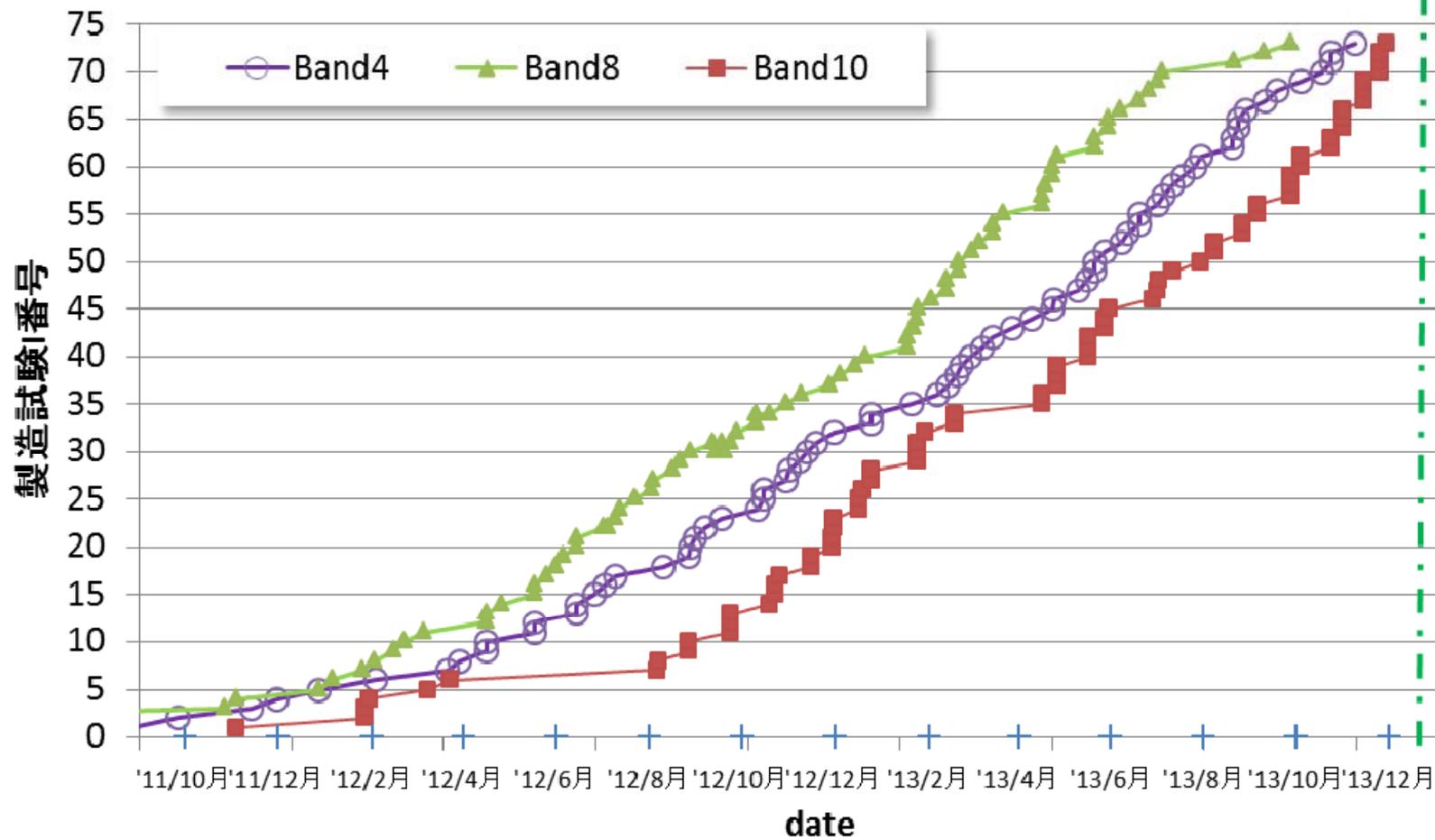


	バンド4受信機	バンド8受信機	バンド10受信機
観測(RF) 周波数・波長	125-163GHz 2.0mm	385-500GHz 0.7mm	787-950GHz 0.35mm
受信方式	ヘテロダイン SSB		ヘテロダイン DSB
雑音温度仕様 ・帯域の80% ・帯域の100%	SSB雑音温度 51K (量子雑音の3倍) 以下 82K (量子雑音の5倍) 以下	SSB雑音温度 196K (4倍) 以下 292K (6倍) 以下	DSB雑音温度 230K (5倍) 以下 344K (7.5倍) 以下
カートリッジの直径	Φ140	Φ170	Φ170
外観			

	バンド4受信機	バンド8受信機	バンド10受信機
観測(RF) 周波数・波長	125-163GHz 2.0mm	385-500GHz 0.7mm	787-950GHz 0.35mm
各ステージ温度	110K / 15K / 4K (-163°C / -258°C / -269°C)		
超伝導素子材料	Nb/AlOx-Al/Nb		Nb/AlOx-Al/Nb NbTiN/SiO2/Al
SISチップの大きさ 幅x長さ x厚み	0.4mm x 4mm 厚み200um	0.13mm x 2.5mm 厚み60um	0.09mm x 1.5mm 厚み40um
光学系の場所	常温	冷却	
鏡の枚数	平面鏡1枚 楕円鏡1枚	楕円鏡1枚	RF用楕円鏡2枚 LO用楕円鏡2枚
コルゲートホーン	0.34mm x440um	0.09mm x182um	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 x 出力数	4-8GHz x 4本		4-12GHz 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

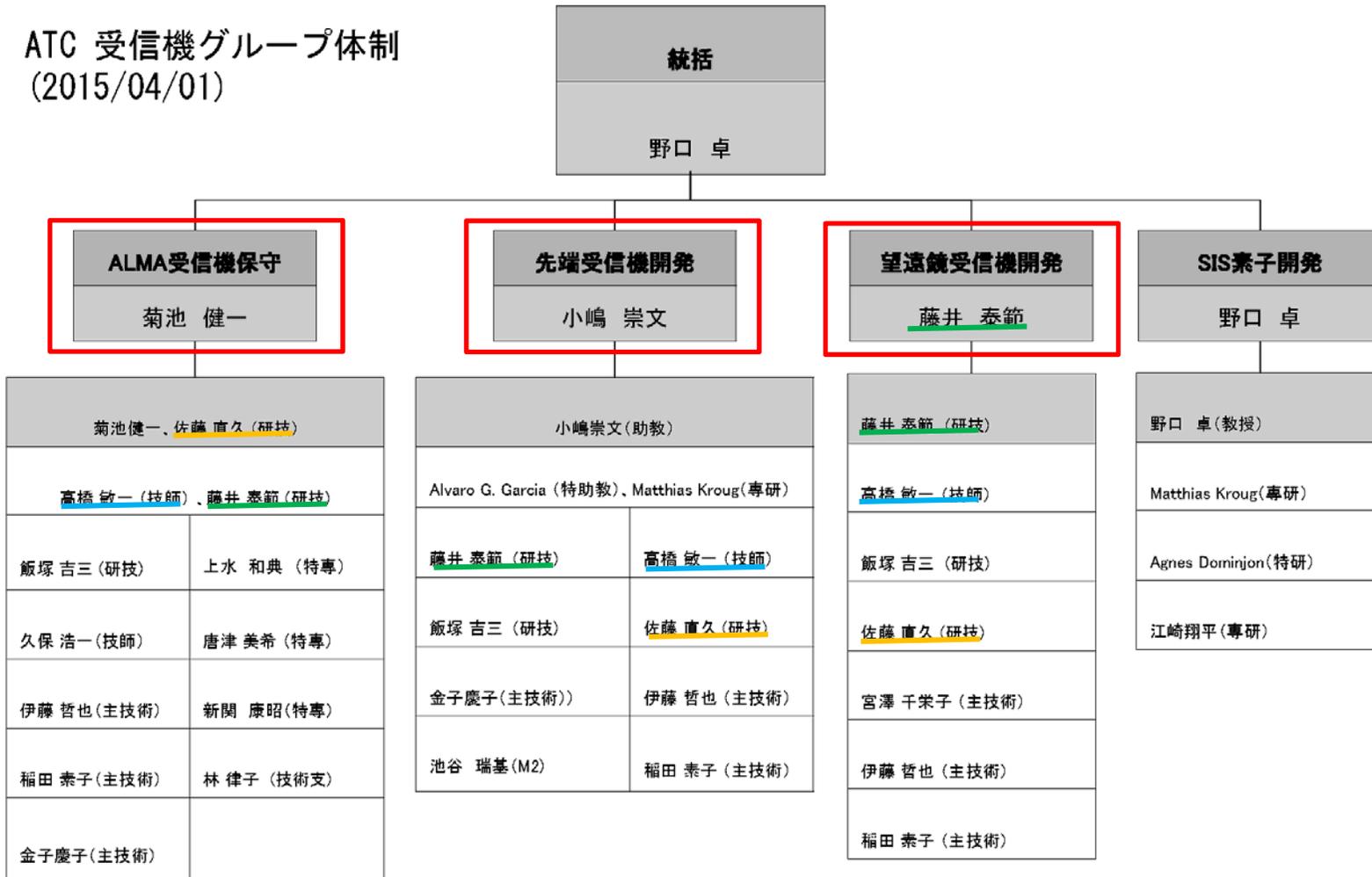
ATC-ALMA

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)

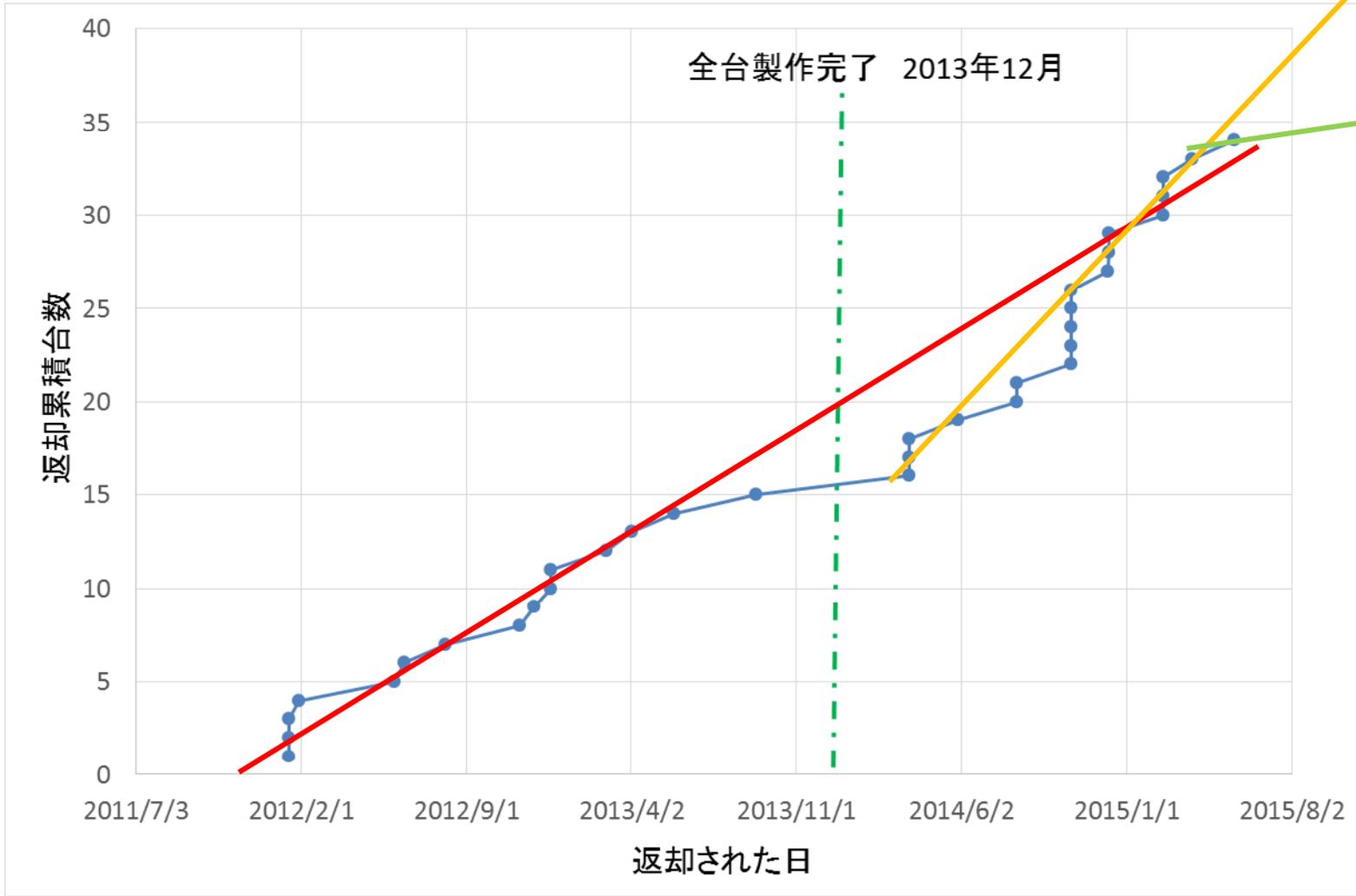


ALMA受信機保守

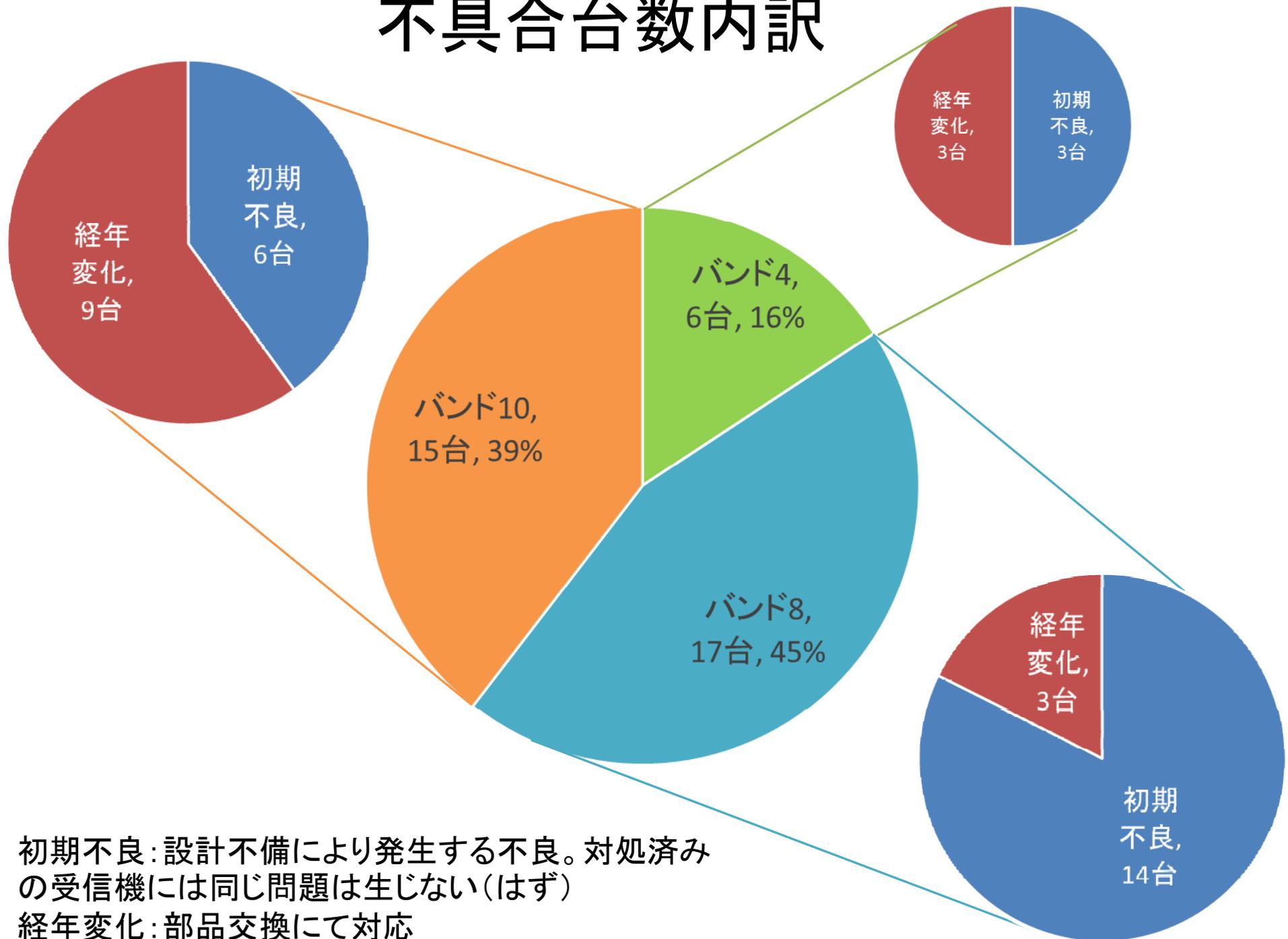
保守と言っても定期的なメンテナンスが必要な機器では無いので、不具合対応がメインになります

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ミクサのI-V特性劣化	SISミクサ交換	経年故障	2013/6/25		FENCR-612	2014/5/29	2014/10/22	338	146
20	10	#34	SISミクサのI-V特性劣化	SISミクサ交換	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ミクサのI-V特性劣化	SISミクサ交換	経年故障	2013/9/5		AIVP-1717	2014/10/22	2015/2/3	412	104
25	10	#33	SISミクサのI-V特性劣化	SISミクサ交換	経年故障	2013/5/1		FENCR-614	2014/10/22	2015/2/3	539	104
26	10	#31	SISミクサのI-V特性劣化	SISミクサ交換	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ミクサのI-V特性劣化	SISミクサ交換	経年故障	2014/1/14		AIVP-1795	2014/12/9	2015/6/5	329	178
29	10	#42	SISミクサのI-V特性劣化	SISミクサ交換	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ミクサのI-V特性劣化	SISミクサ交換	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			



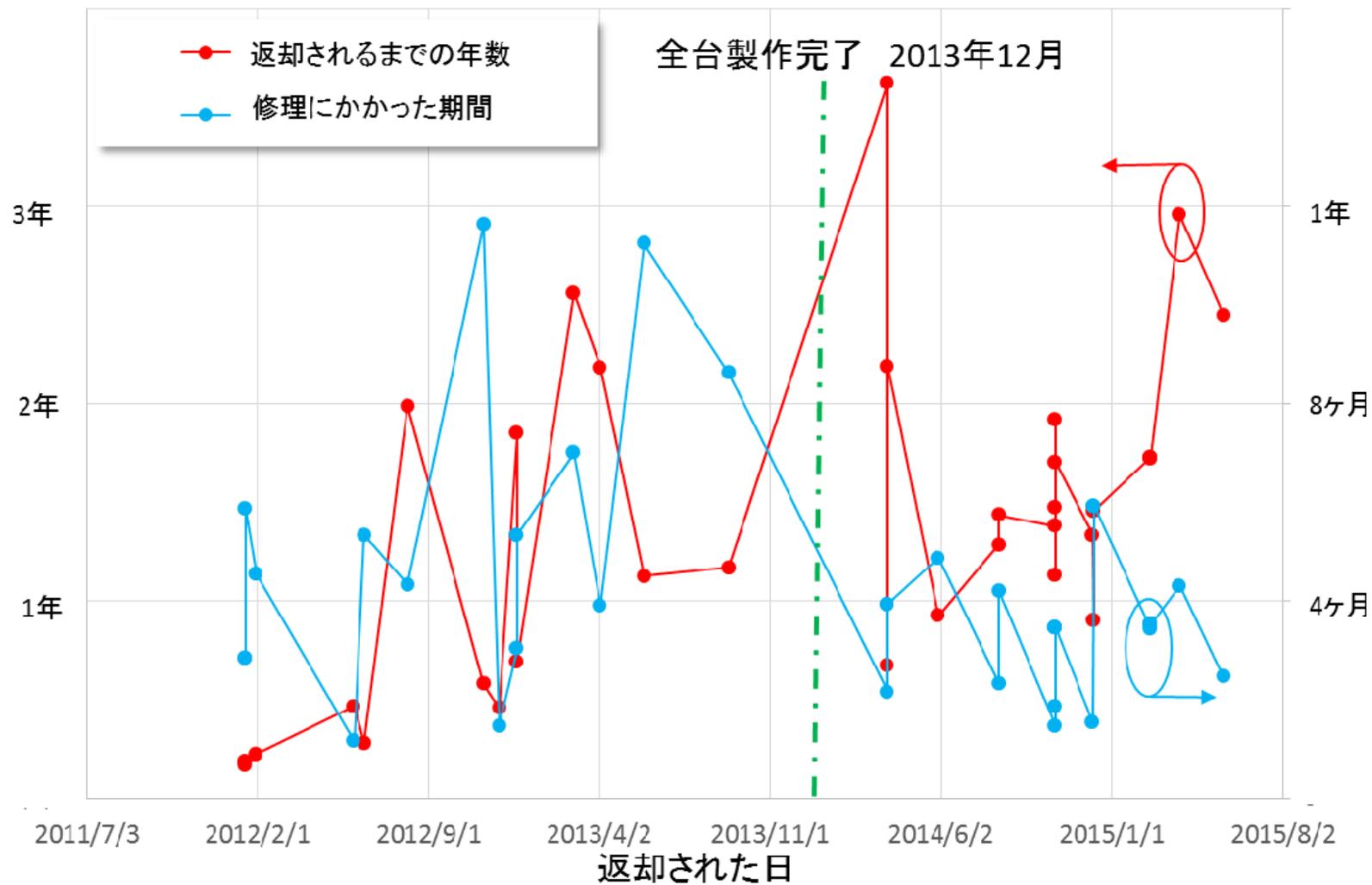
不具合台数内訳



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

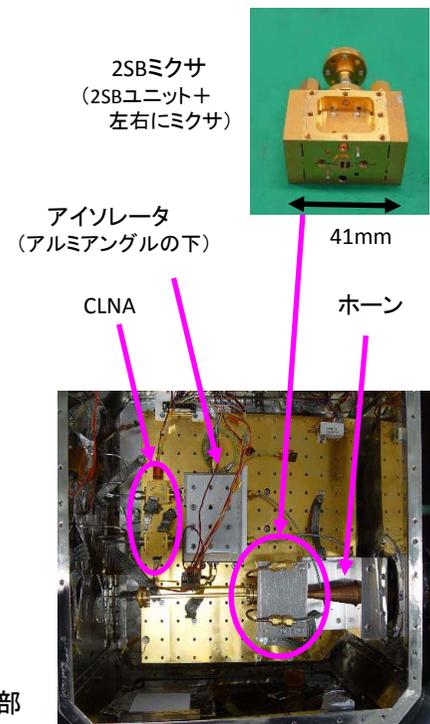
- NRO FOREST
 - SISミキサ評価
 - CLNA電源開発
- ASTE
 - DASH345改修
 - ASTE Band8 (Band8 QM) 改修
 - 3カートリッジデュア開発
- 他望遠鏡対応
 - 名古屋大学 NANTEN2 開発支援

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



測定装置 (中央の四角の部分デュア)

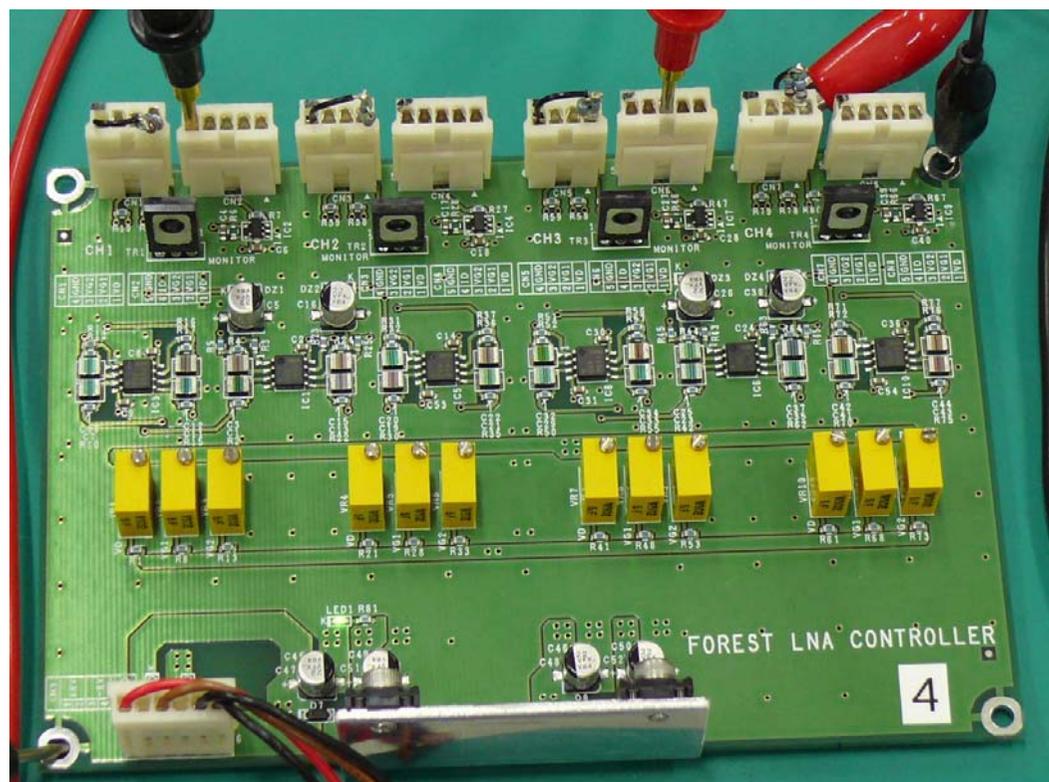
デュア内部



「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

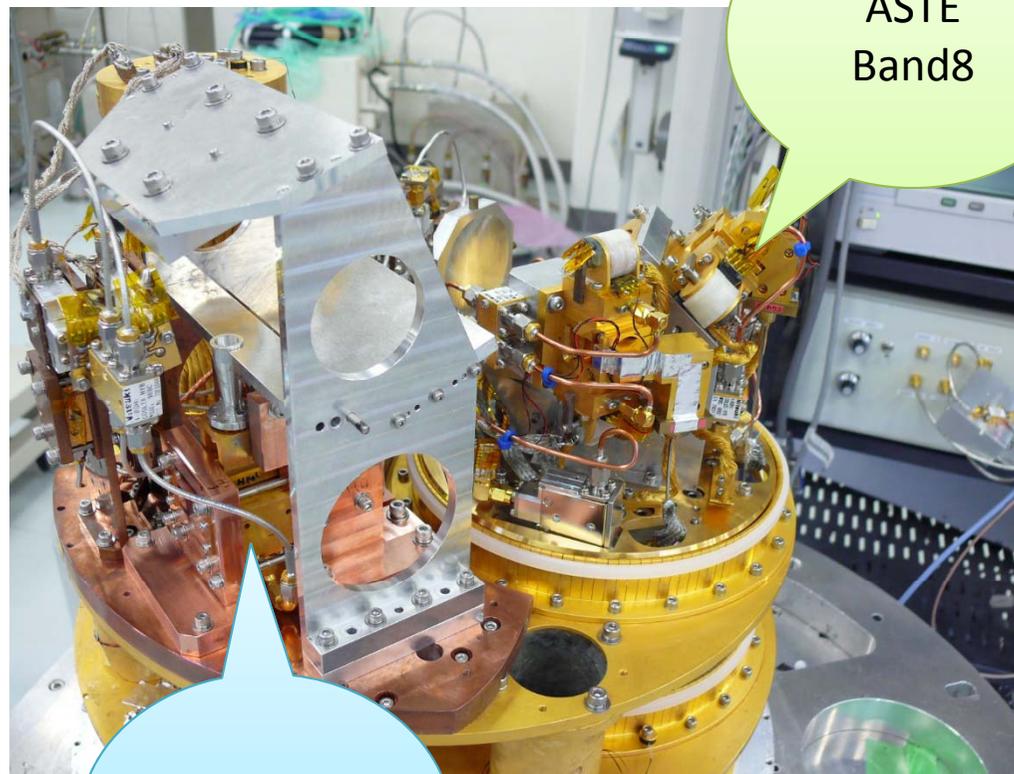
望遠鏡受信機開発

- 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

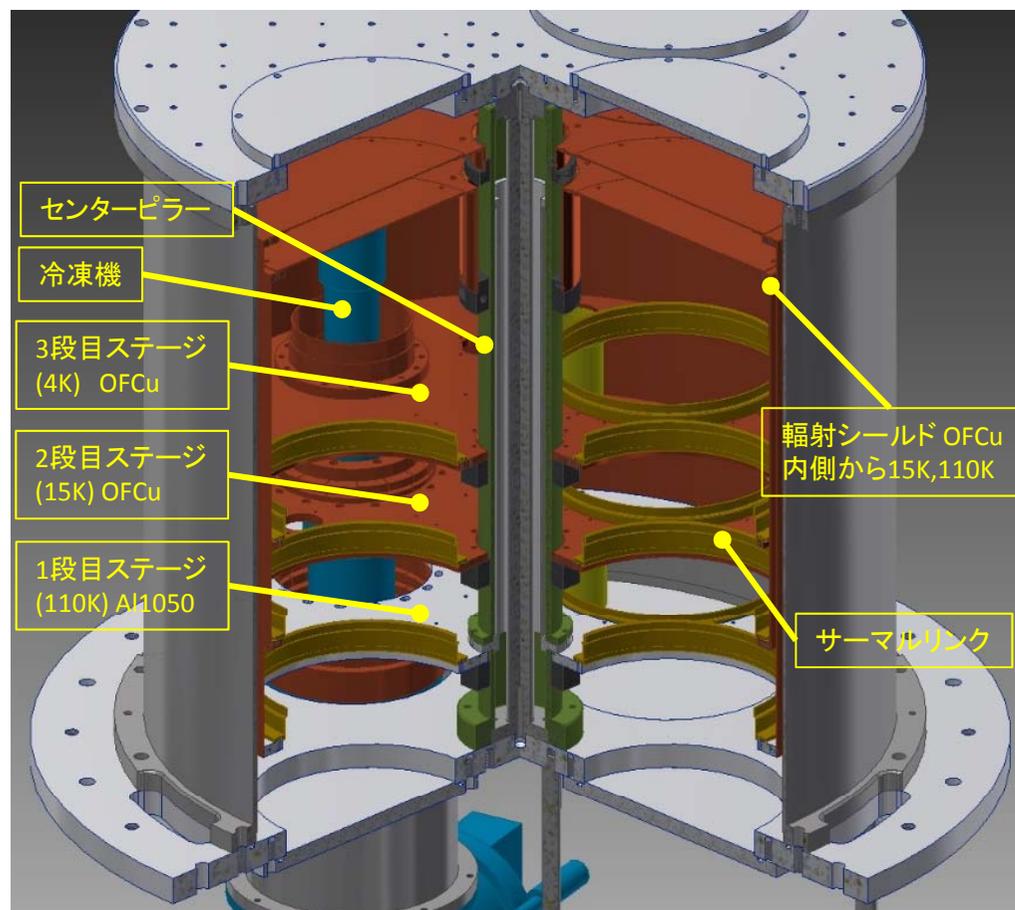


ASTE
Band8

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

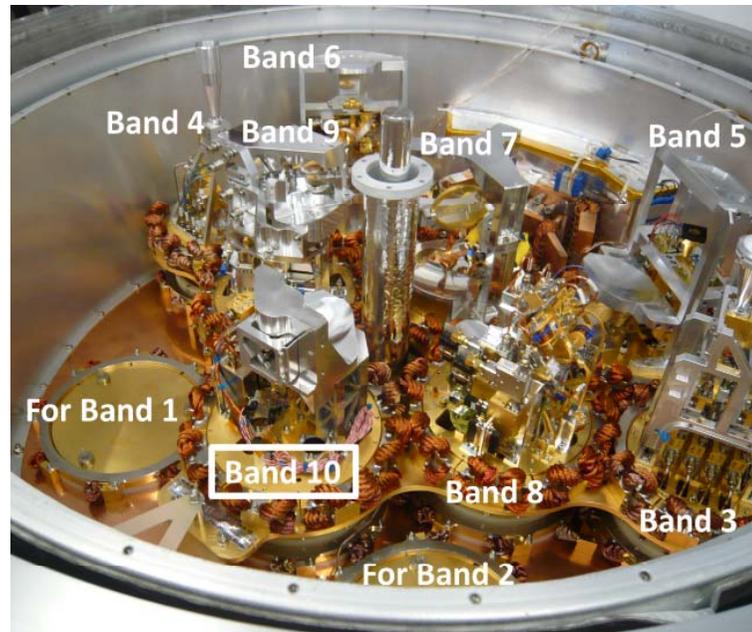
周波数帯:67-90 GHz

参加国:アメリカ, 日本

どんな研究・技術が必要?

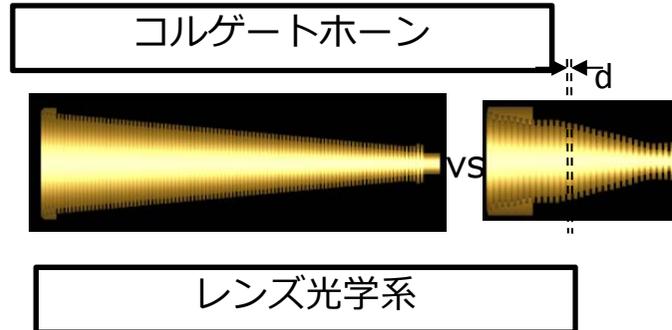
コンパクトな光学系設計、半導体技術

- **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

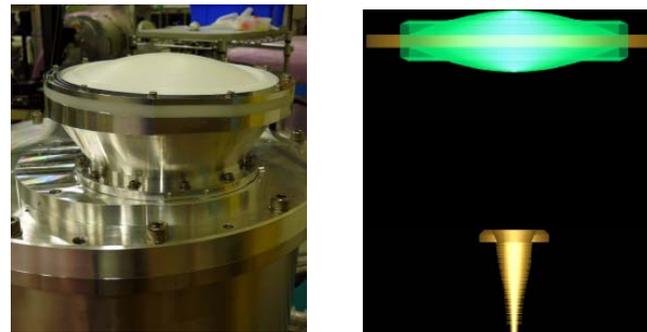


先端受信機開発

- 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

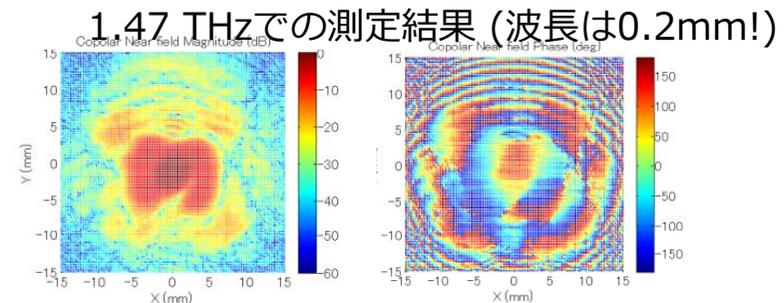


ALMA バンド	d (mm)
バンド1 (35-50 GHz)	0.900
バンド2 (67-90 GHz)	0.432
バンド10 (787-950 GHz)	0.054
バンド11 (1250-1550 GHz)	0.034 (!)



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

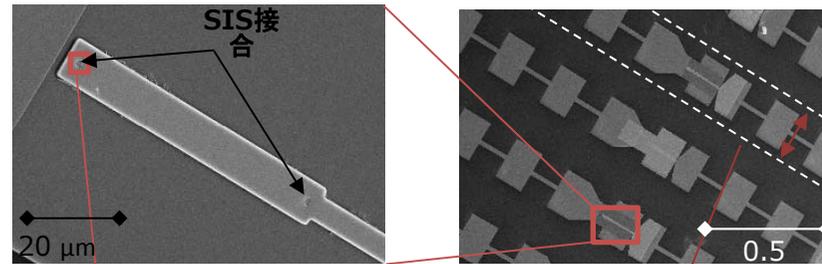
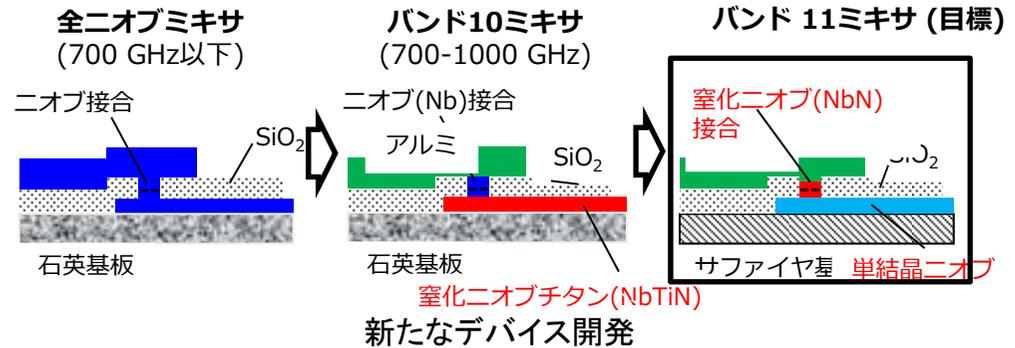
「40GHz帯コルゲートホーンの試作」



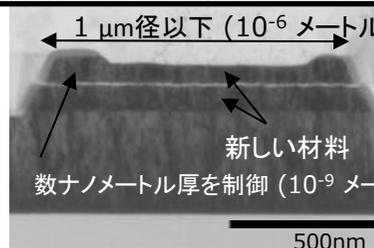
「天文学における技術シンポジウム」
2015/12/10 15:10より 金子さんが報告します

先端受信機開発

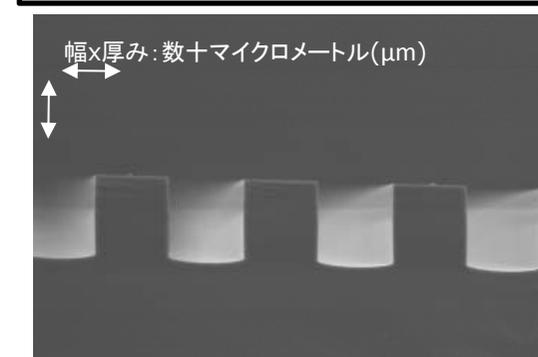
- Band1 Band2
 - 光学系設計
 - 40GHz帯コルゲートホーン試作
- Band 11
 - デバイス
- WideBand
 - RF wide band
 - IF wide band
- Multi Beam
 - 概念検討



新しいSIS接合の開発

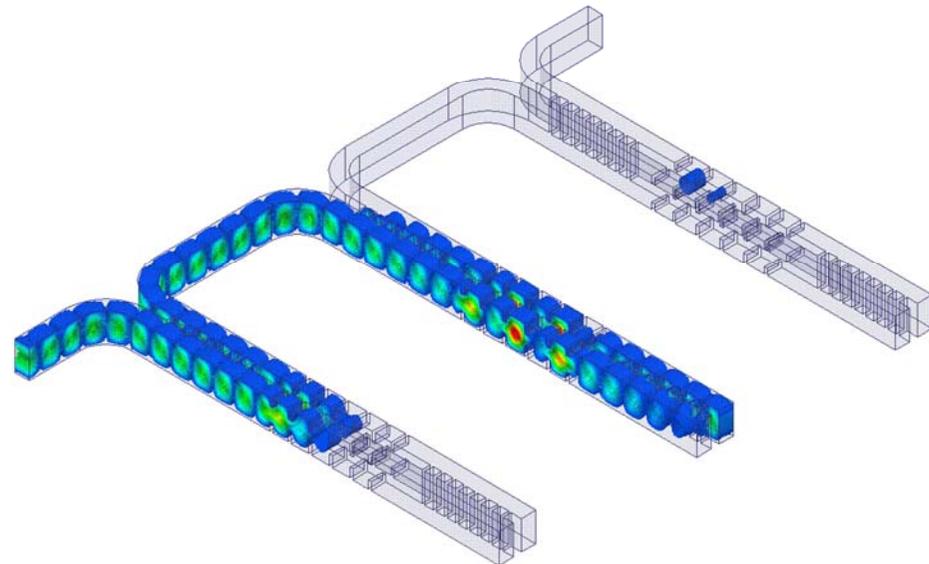
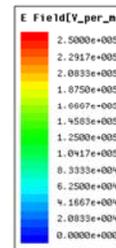
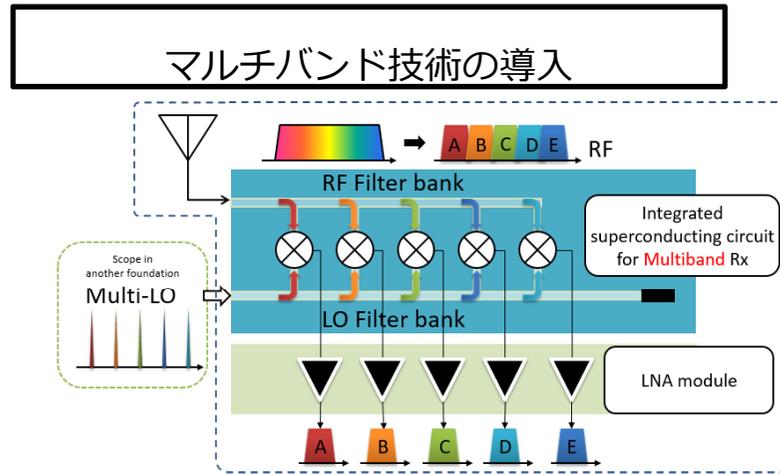


新しい高精度加工方法の導入
深堀ドライエッチング



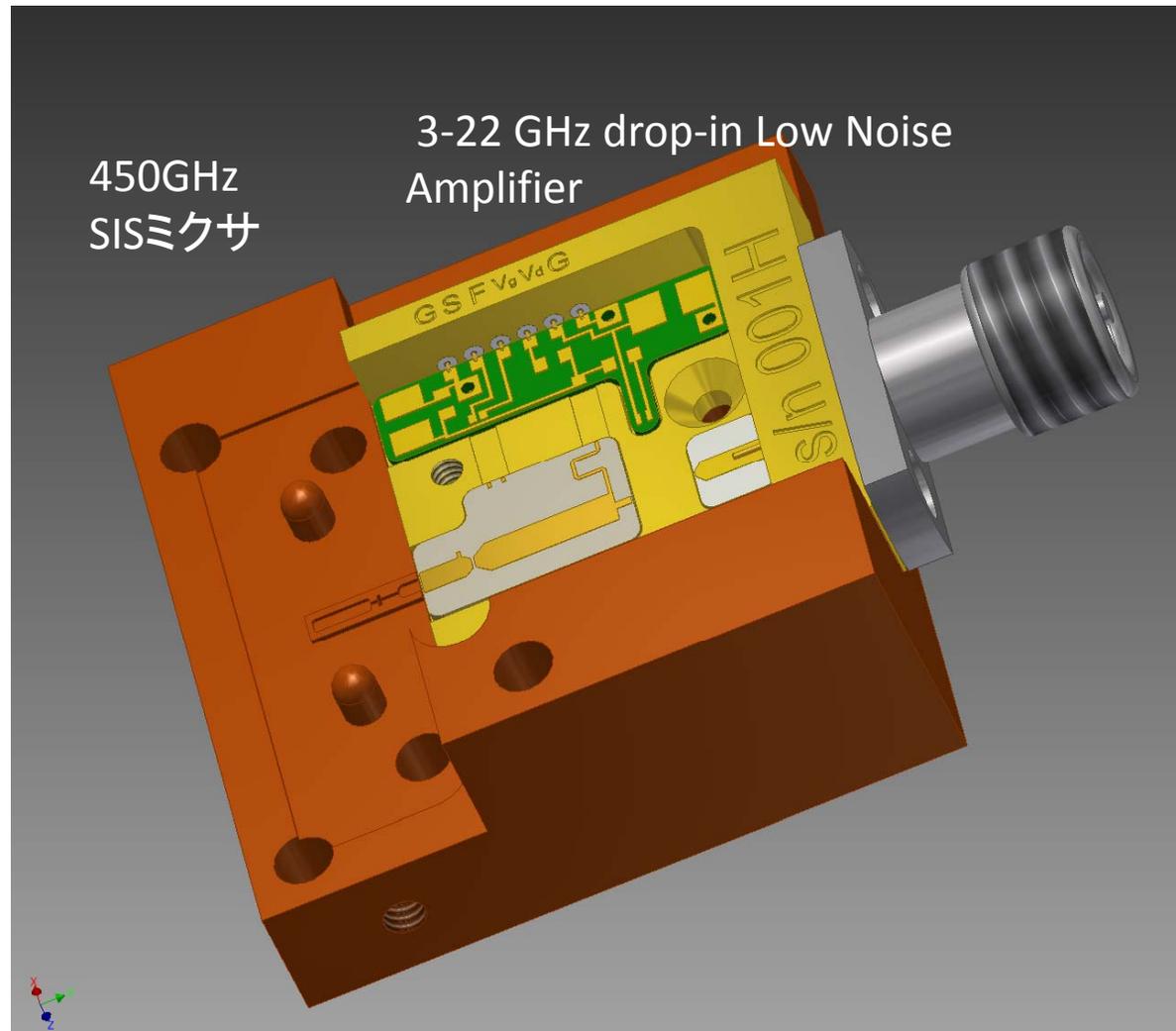
先端受信機開発

- 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

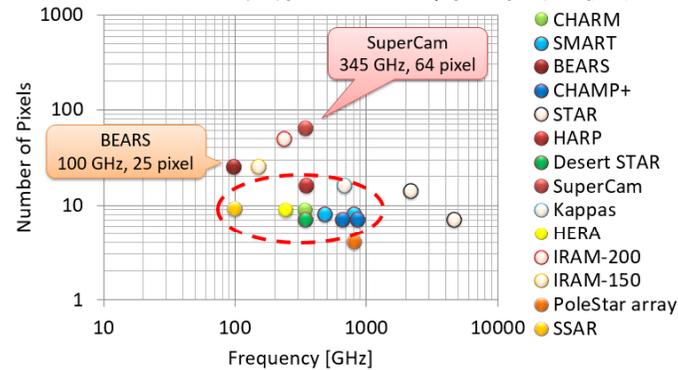
- Band1 Band2
 - 光学系設計
 - 40GHz帯コルゲートホーン試作
- Band 11
 - デバイス
- WideBand
 - RF wide band
 - IF wide band
- Multi Beam
 - 概念検討



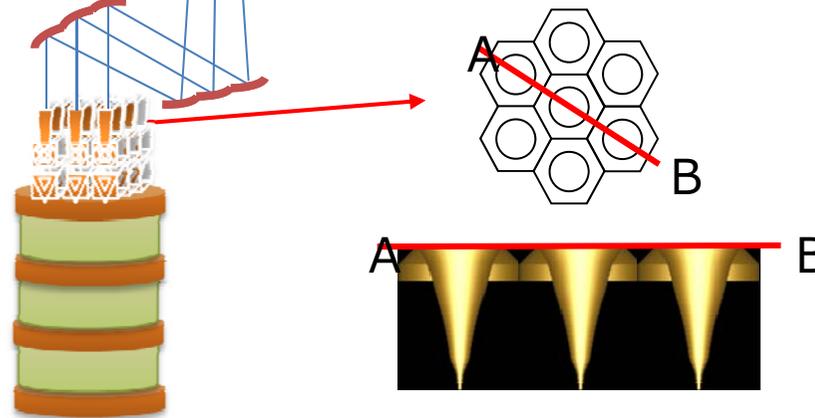
先端受信機開発

- 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。