

電波天文分野におけるテラヘルツ波帯の利用及び 受動デバイスの動向

大阪府立大学 理学系研究科 宇宙物理学研究室
小川 英夫

目次

0. 電波天文学およびALMA
1. 開発項目
2. 電波望遠鏡のシステム
3. 開発
 - 3-1. 光学系(コルゲートホーン)
 - 3-2. 偏波分離器
 - 3-3. 円偏波分離器
 - 3-4. サイドバンド分離受信機
 - 3-5. 冷却増幅器
 - 3-6. 受信機システム全体
4. まとめ

日本国内外の電波望遠鏡(>100GHz)

- 国内

- 45m(国立天文台)(天文) 100~150GHz
- 10m×5 (国立天文台)(天文) 100~230GHz
- 1.85m (大阪府大)(天文) 115、230、345GHz
- 0.6m(東大)(天文) 230GHz
- 0.01m(国立環境研究所(つくば、陸別))(大気) 100GHz

- 南米(チリ)

- ASTE(国立天文台)(天文) 100~800GHz
- ALMA(国立天文台ほか)(天文) 12m×54台
2012年稼働予定 7m×12台 12m×4台 100~800GHz
- NANTEN2(名大)(天文) 100~800GHz
- 0.01m(名大)(大気) 100~250GHz

- 南極

- 1.2m(筑波)(天文)(大気)・・・予定 230~800GHz
- 0.01 (名大)(大気)・・・予定 200~300GHz

国立天文台野辺山45m電波望遠鏡



©国立天文台

国立天文台野辺山干涉計(NMA) 10m × 6台



©国立天文台

大阪府立大学1.85m電波望遠鏡



長野県国立天文台野辺山宇宙電波観測所内に設置

大阪府立大学1.85m電波望遠鏡



東大60cm電波望遠鏡



国立天文台 野辺山(長野県)にある60cm望遠鏡

国立天文台ASTE



チリ、アタカマ砂漠(標高5000m)
ミリ波～テラヘルツ波高性能望遠鏡
主鏡口径 10m

建設中の国立天文台ALMA



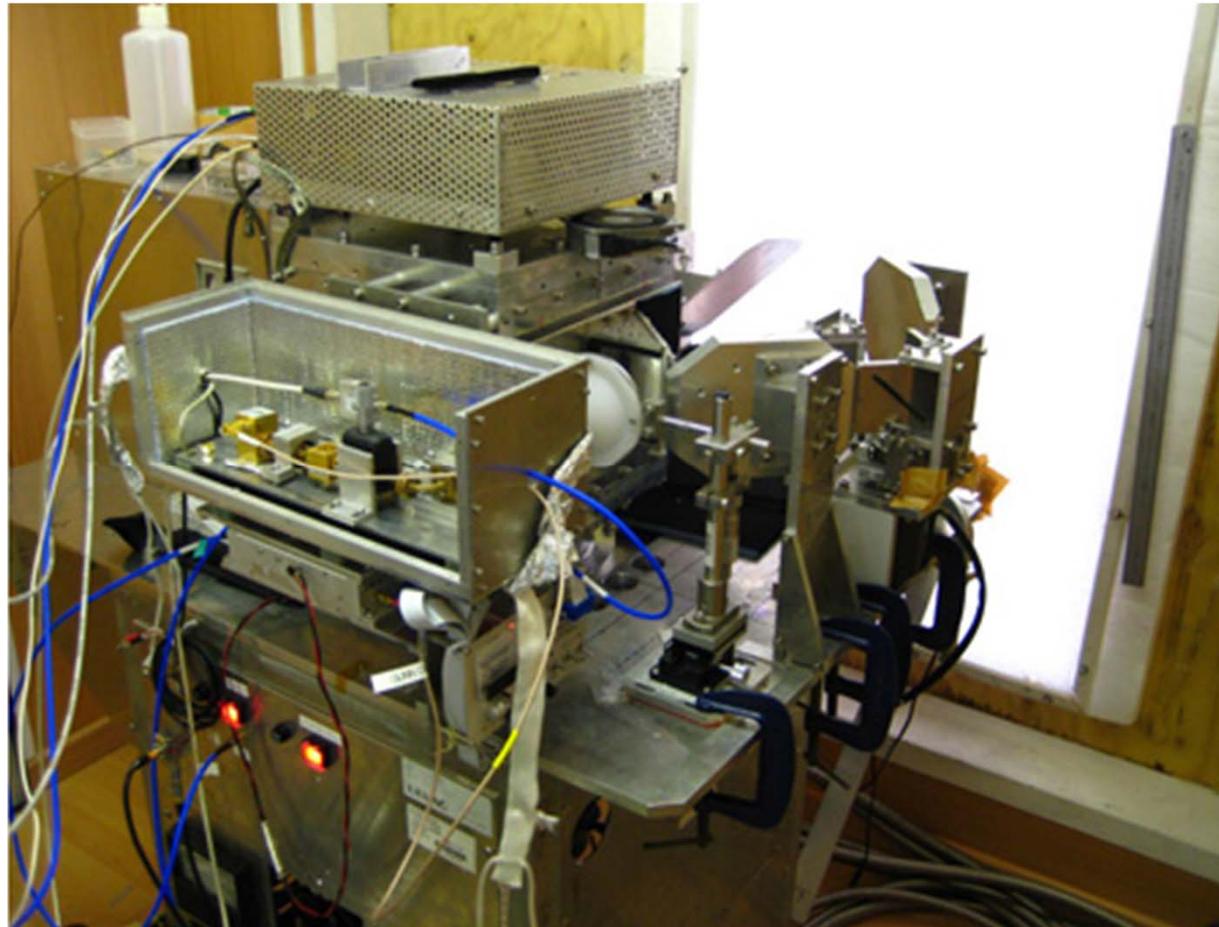
©国立天文台

名古屋大学NANTEN2望遠鏡



Atacama Desert, Chile
Alt. 4860mm

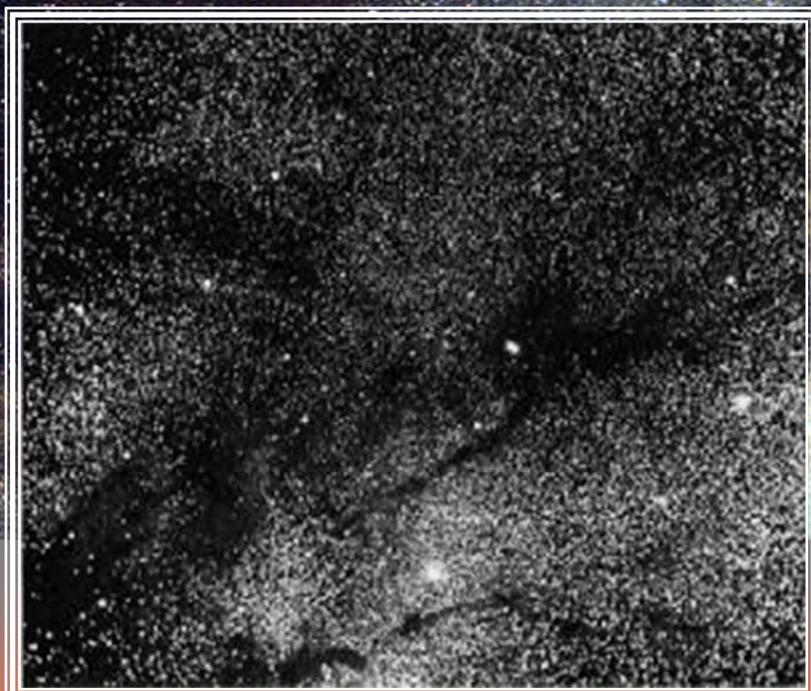
名古屋大学大気オゾン観測装置 @アルゼンチン予定



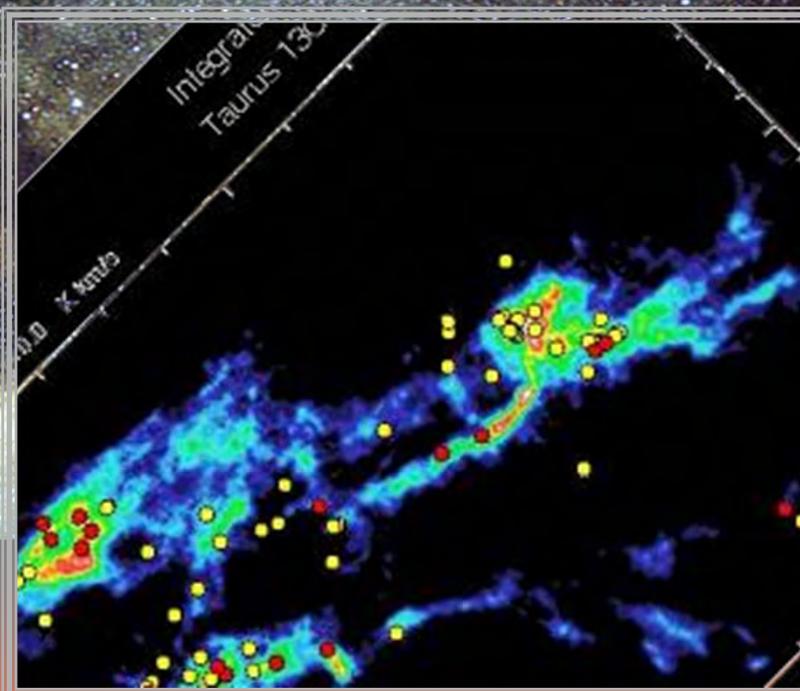
©名古屋大学

～分子雲の電波観測～

「電波観測の特長」



おうし座にある暗黒星雲の可視光写真

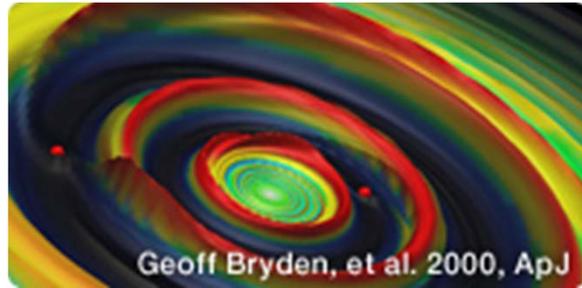


おうし座にある分子雲(名古屋大学のグループによる観測)

可視光では見えない高密度の領域調査

電波天文学

0.1~1THz帯の持つ意味



惑星誕生の謎

暗黒宇宙に宿る原始惑星系をハントし、「第2の地球」の誕生を見る。

生命誕生の謎

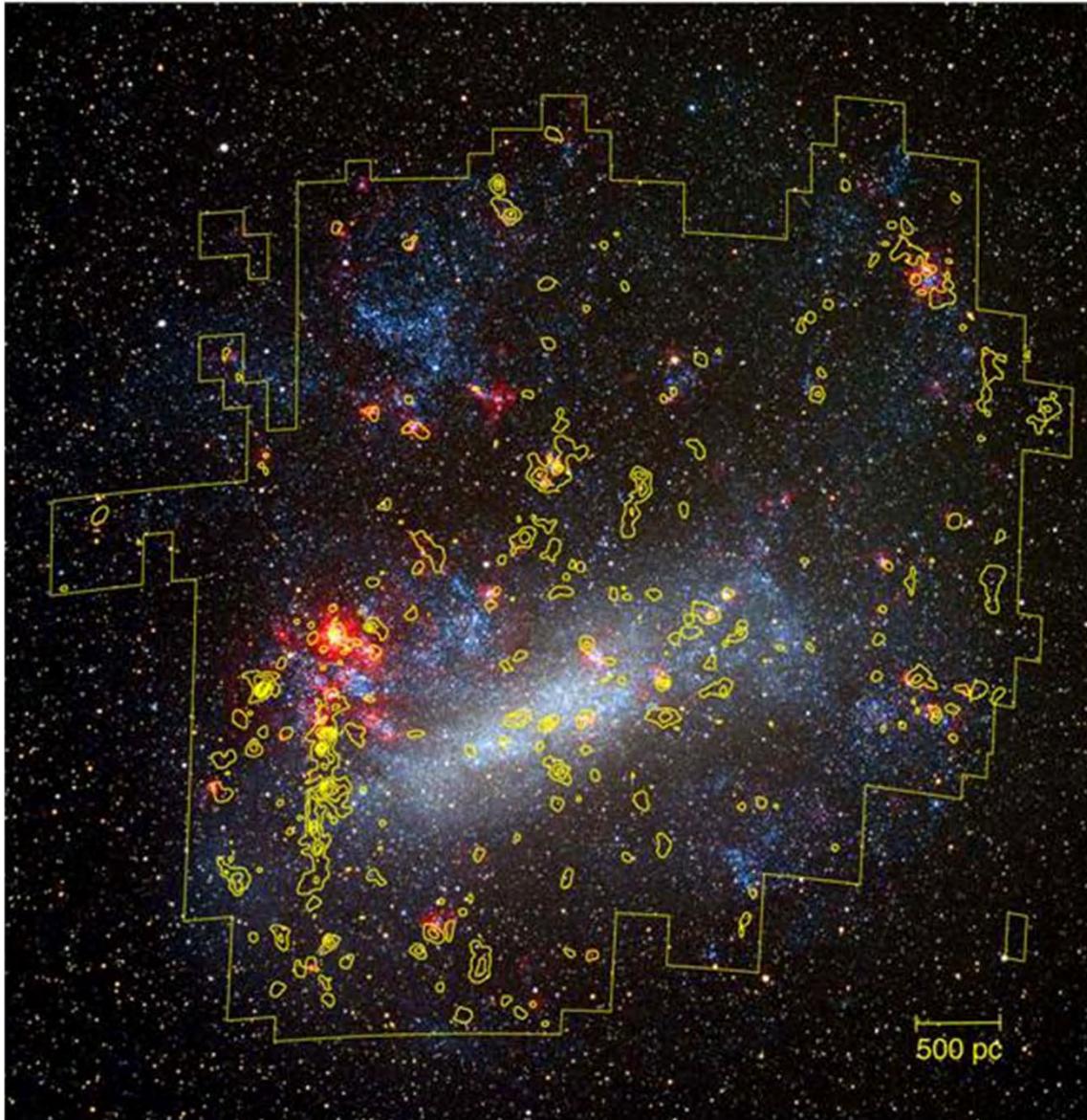
惑星の材料中の有機物を調べ、「地球生命の宇宙起源説」を検証する。

銀河誕生の謎

膨張宇宙の果てに、暗黒宇宙を追い求め、「銀河系宇宙の誕生」をとらえる。



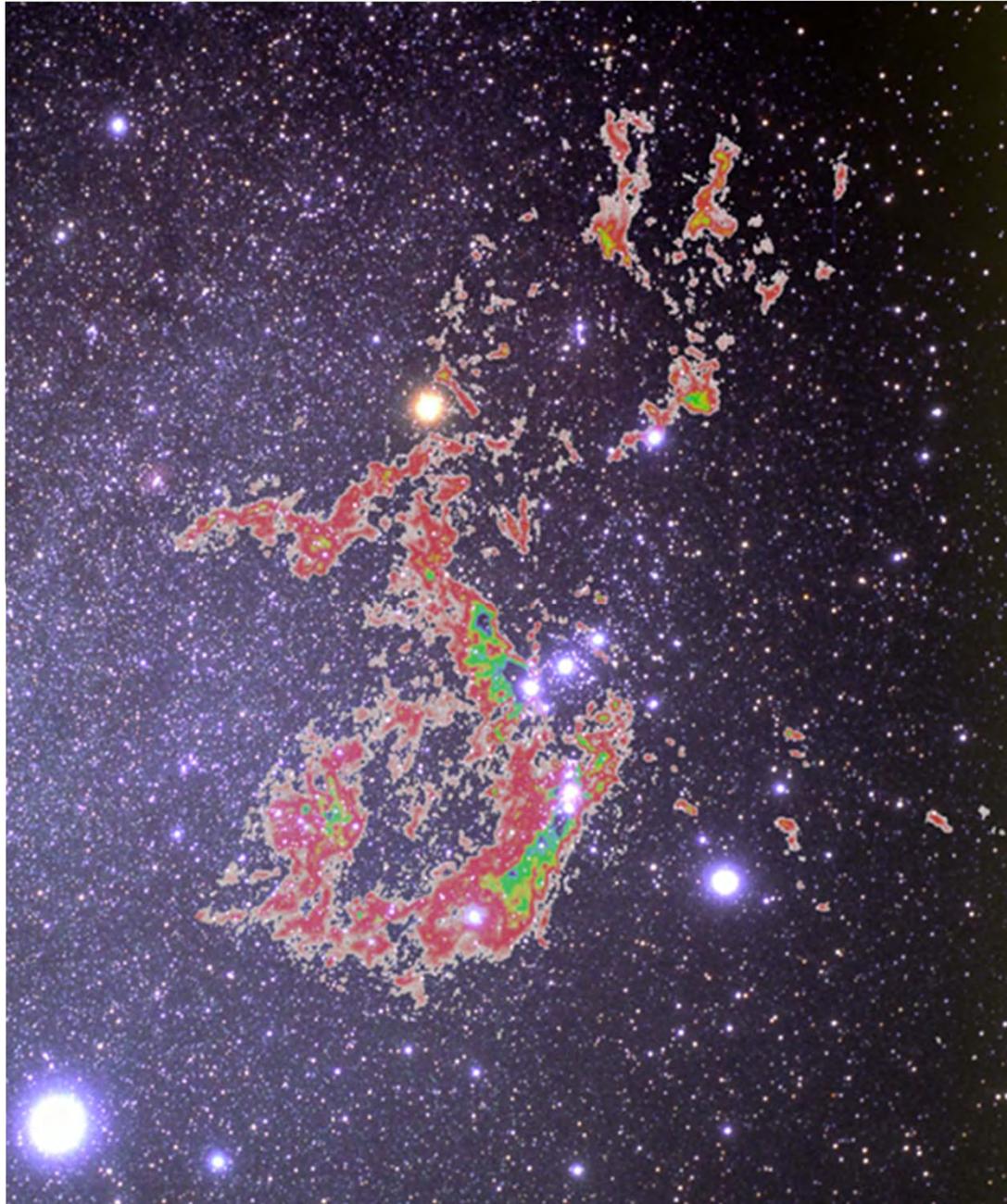
星形成 -大マゼラン雲-



写真：可視光
黄色の等高線：
ミリ波 (CO[J=1-0])

©名古屋大学

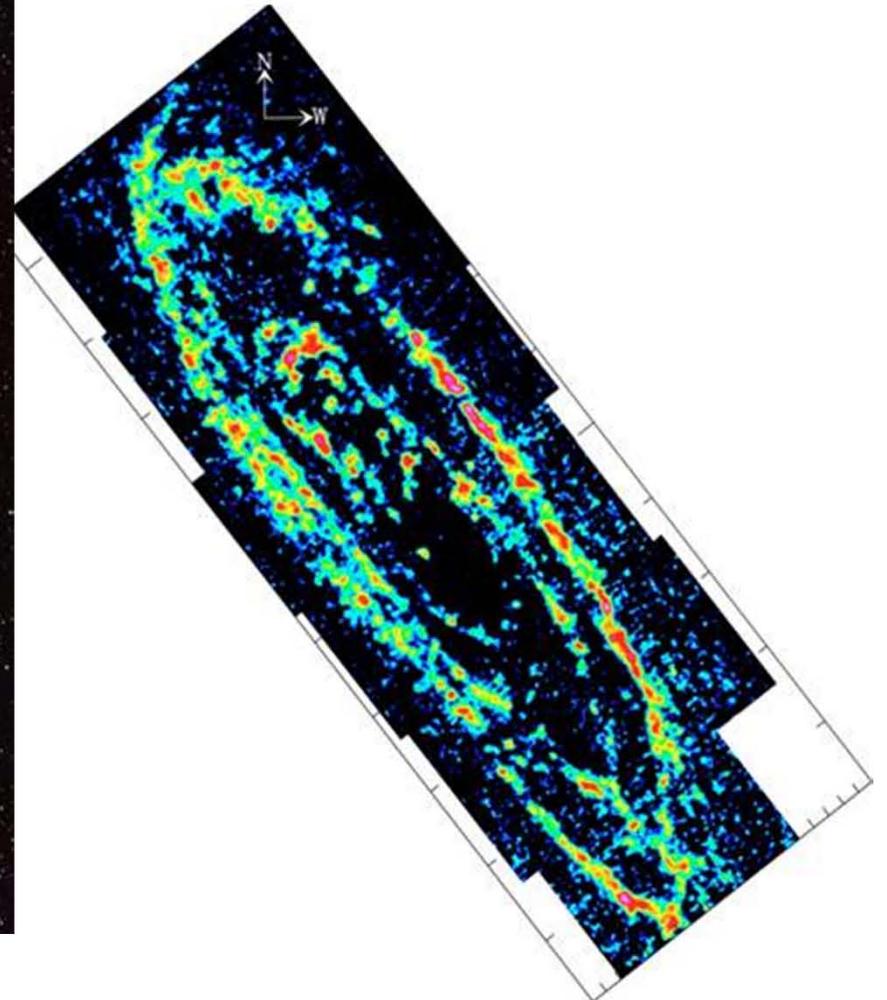
星形成 オリオン座



写真：可視光
カラー：ミリ波 (CO[J=1-0])

©名古屋大学

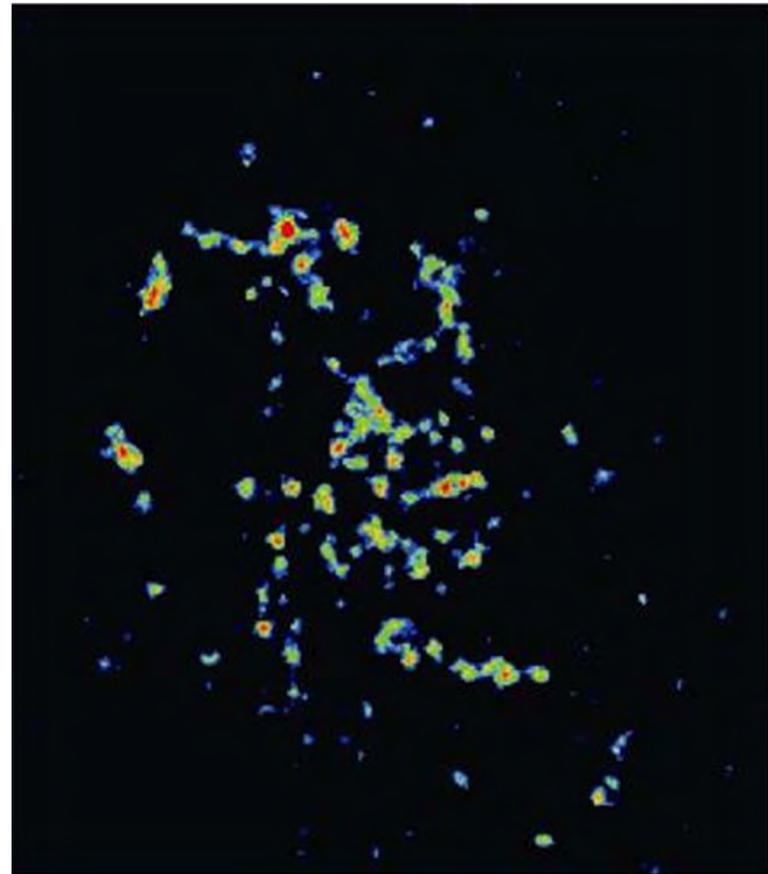
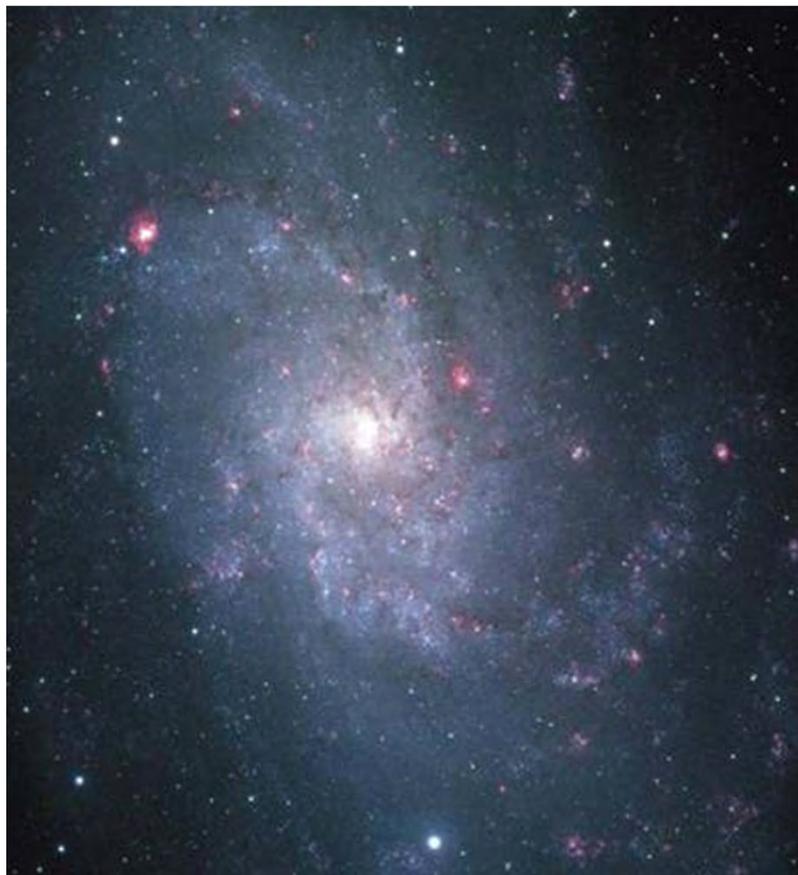
銀河 M31



可視: by NOAO image

電波: by Nieten et al.(2006), *Astronomy & Astrophysics*, 453, p459 -- p475

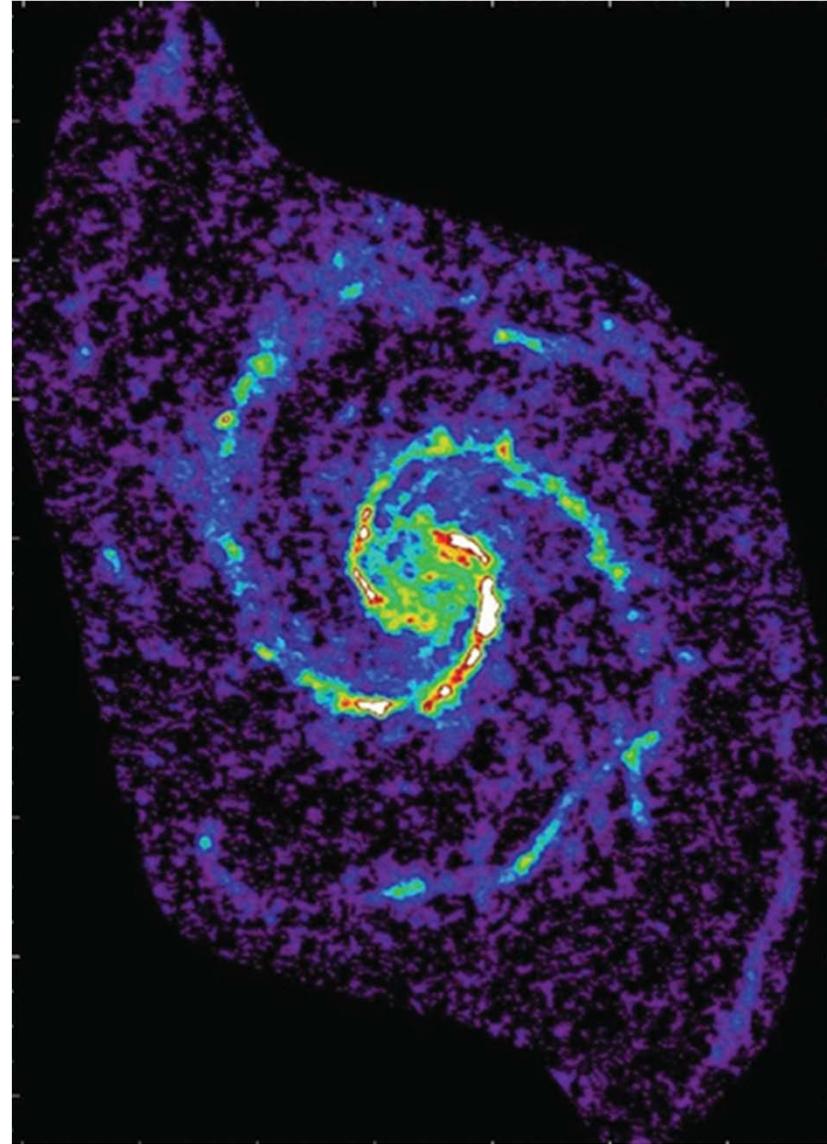
銀河 -M33-



可視: 国立天文台 提供

電波: by Nobeyama Radio Observatory (NRO), NAOJ

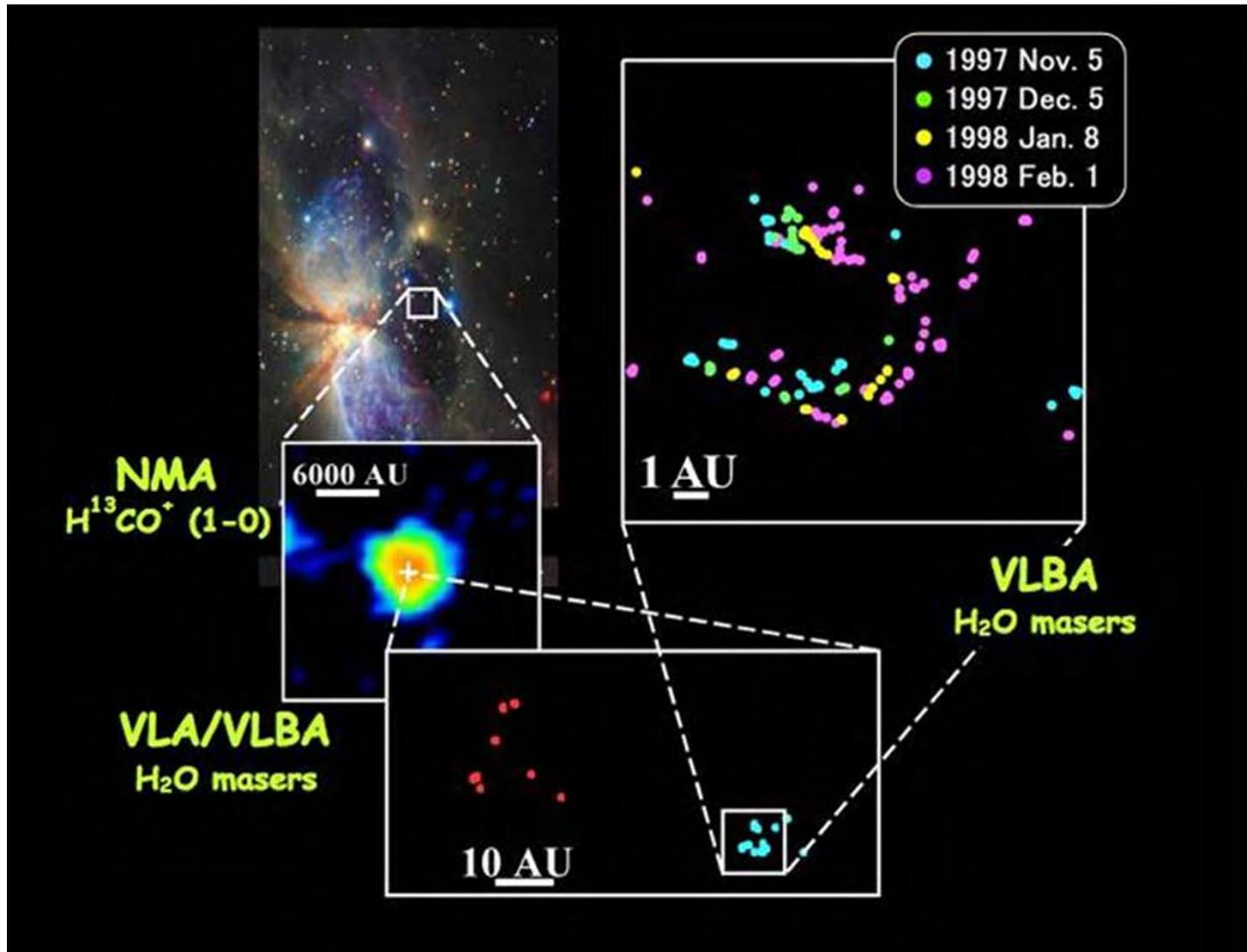
銀河 -M51-



可視: by NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

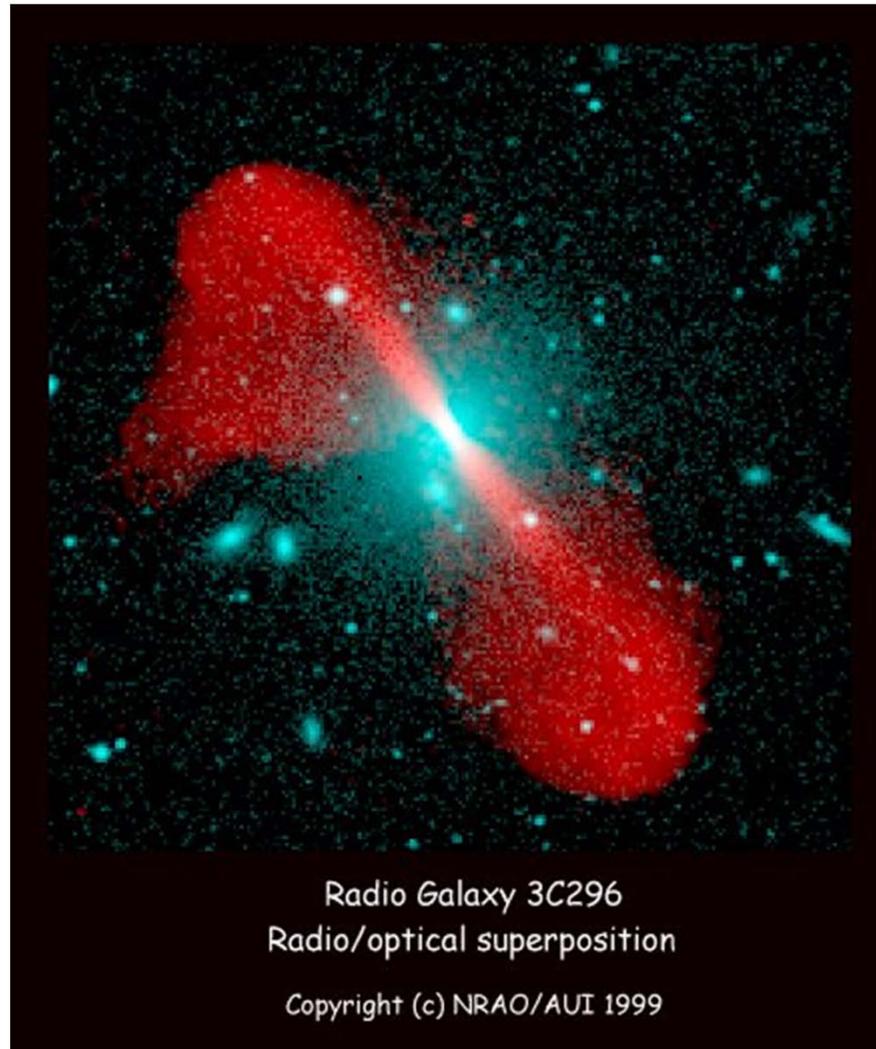
電波: by Koda et al.(2009), Astrophysical Journal, 700, L132 -- L136

メーザー



Imaging of Masers

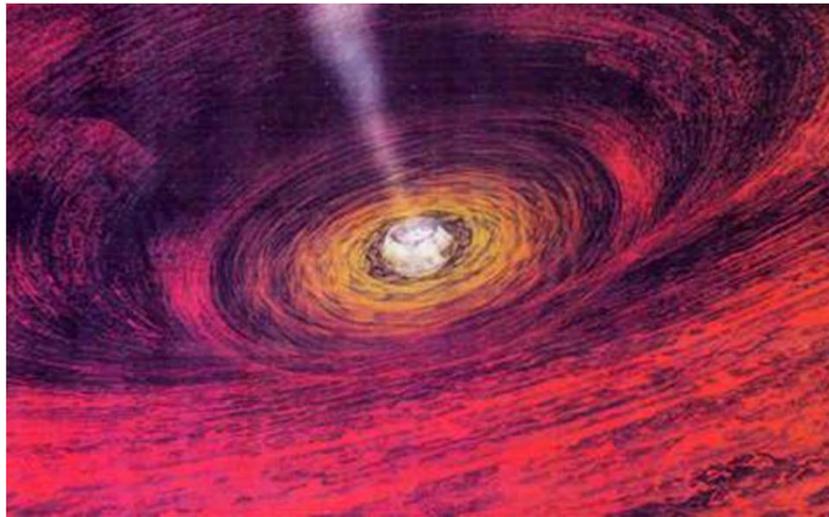
ブラックホール



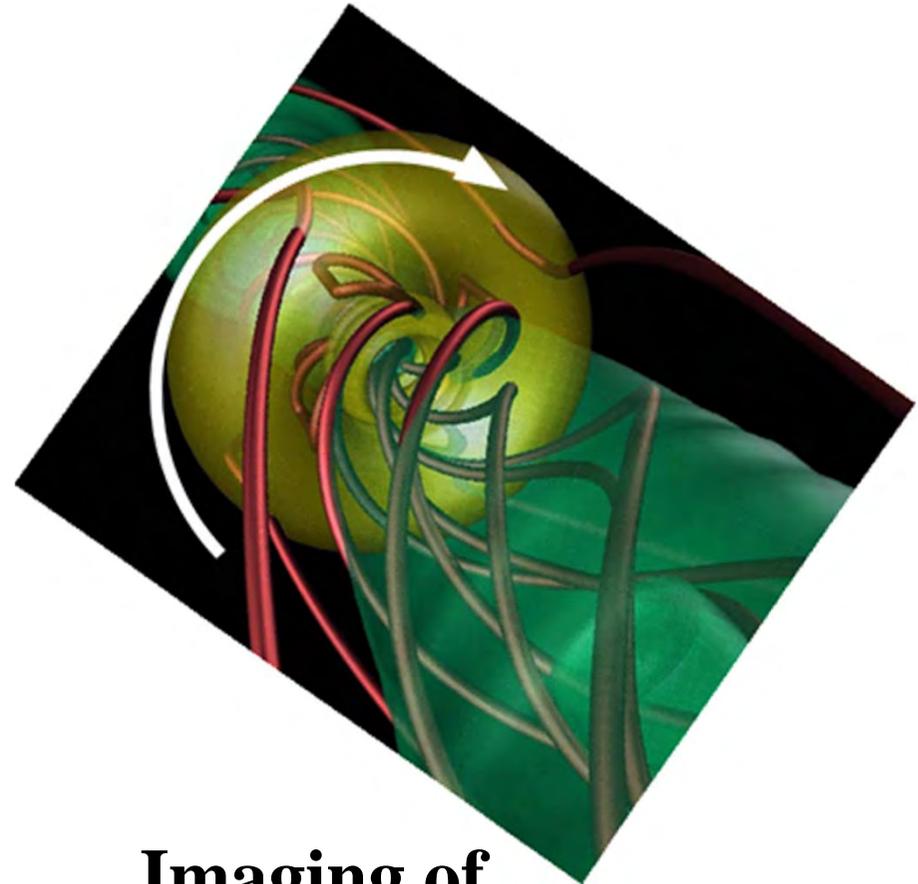
© JAXA

Imaging of Jets from the accretion disks

ブラックホール



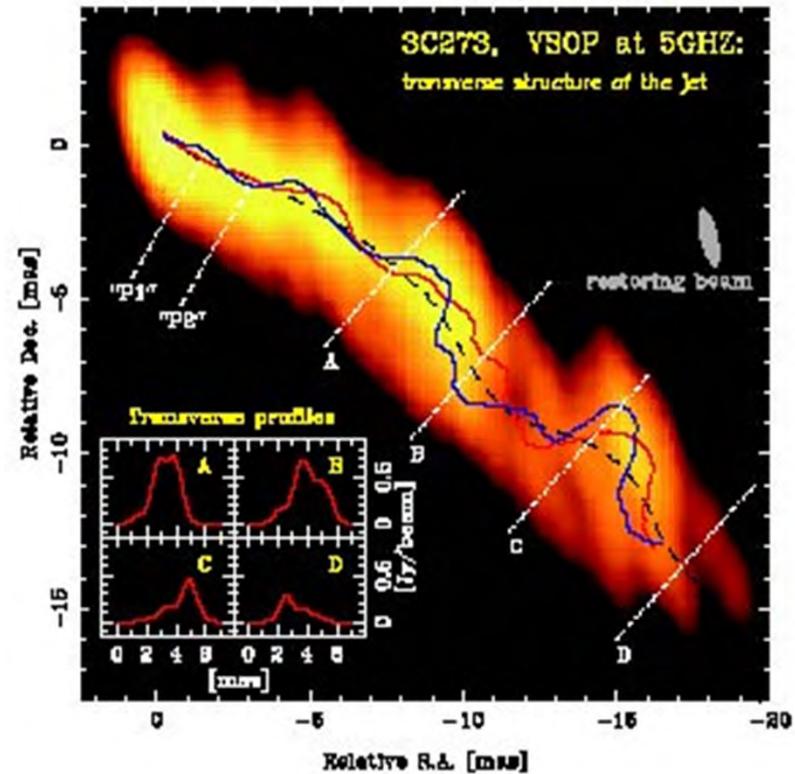
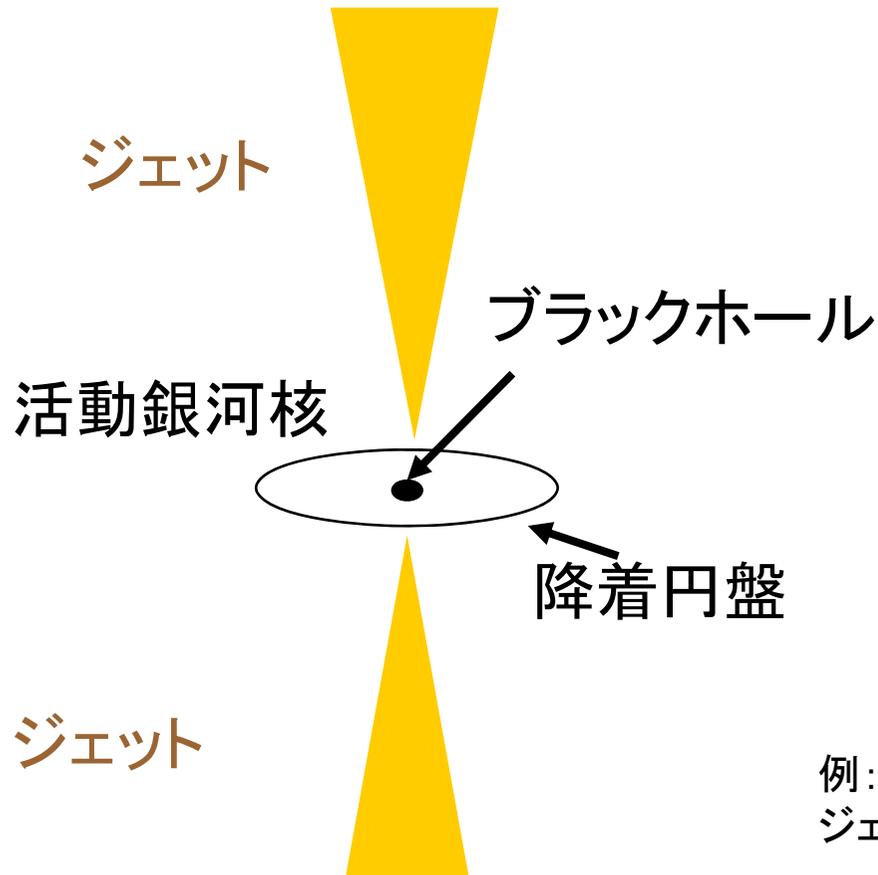
**Imaging of Accretion
disks around black holes**



**Imaging of
Magnetic fields of Jets**

© JAXA

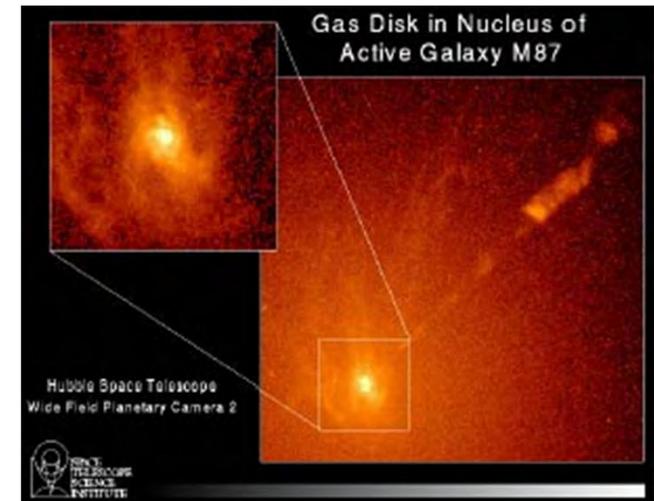
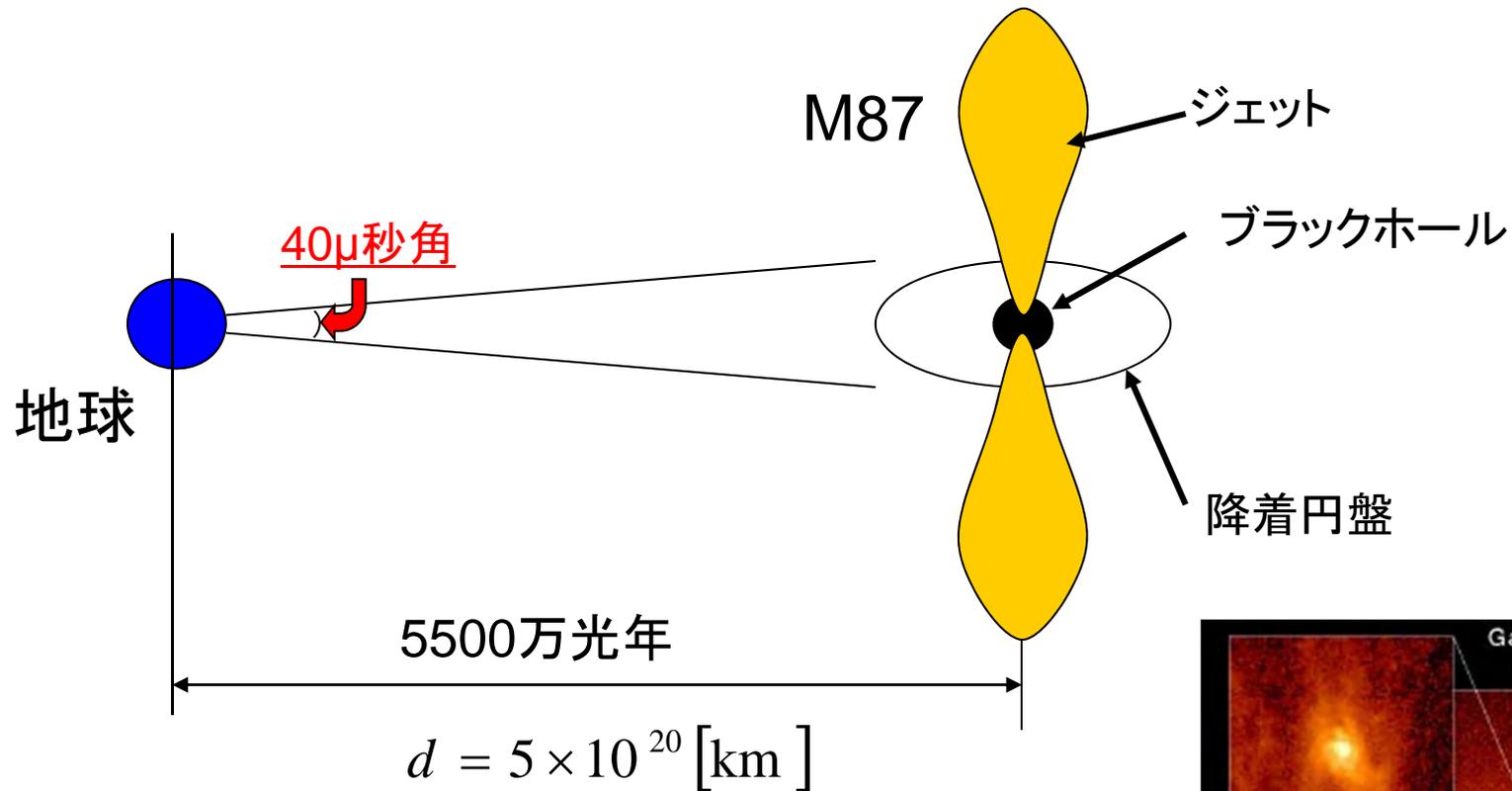
ジェットの観測



例: VSOP観測によるクェーサー3C 273 のジェット構造
ジェットの輝度が二重螺旋構造を示している(赤と青の線)
(宇宙航空研究開発機構提供)

偏波を観測することによりジェット内の三次元磁場
について調べることができます

降着円盤とブラックホール



(宇宙航空研究開発機構提供)

ALMA

日米欧が中心となって、チリに建設している巨大電波干涉計群
口径12m電波望遠鏡54台+7m電波望遠鏡12台
観測周波数 30~950GHz



©国立天文台

ALMA の観測周波数

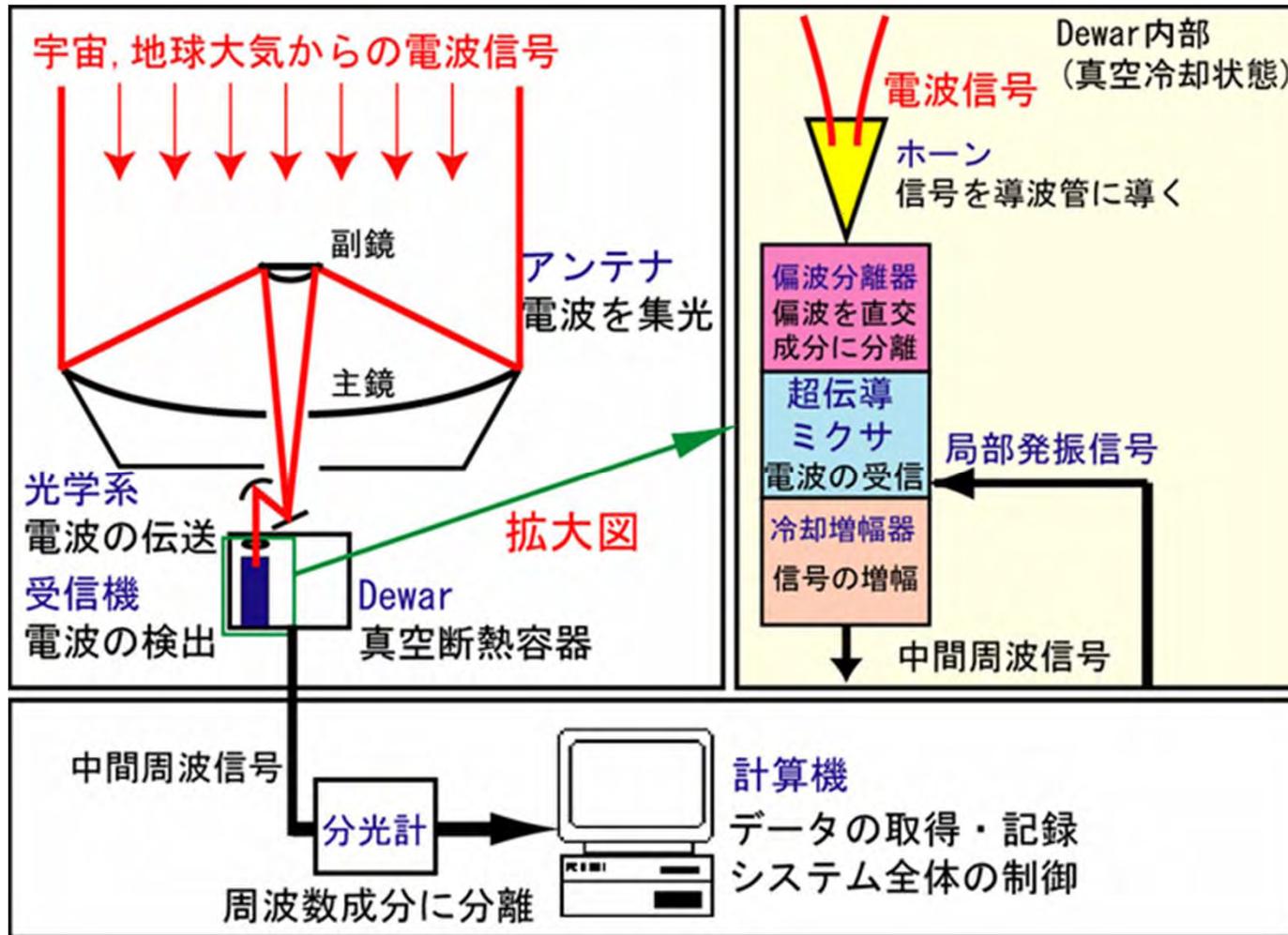
受信バンド	周波数帯域(GHz)	雑音温度	担当機関
バンド1	31.3-45.0	17 K	---
バンド2	67-90	30 K	---
バンド3	84-116	37 K	北米(カナダ)
バンド4	125-163	51 K	国立天文台
バンド5	163-211	65 K	---
バンド6	211-275	83 K	北米(米国)
バンド7	275-373	147 K	欧州(フランス)
バンド8	385-500	196 K	国立天文台
バンド9	602-720	175 K	欧州(オランダ)
バンド10	787-950	230 K	国立天文台

1.開発項目

大阪府立大学における、天文機器開発項目

- | | |
|---------------|------------------|
| 1)光学系 | 設計手法、測定手法 |
| 2)偏波測定 | 直線偏波(OMT)
円偏波 |
| 3)超低雑音測定 | 超伝導素子を用いた2SB測定 |
| 4)低雑音クライオスタット | |

2.電波望遠鏡のシステム



1) 光学系(コルゲートホーン)

2) 偏波分離器

3) サイドバンド分離ミクサ(超伝導ミクサ)

4) 冷却増幅器

3-1. 光学系等における開発

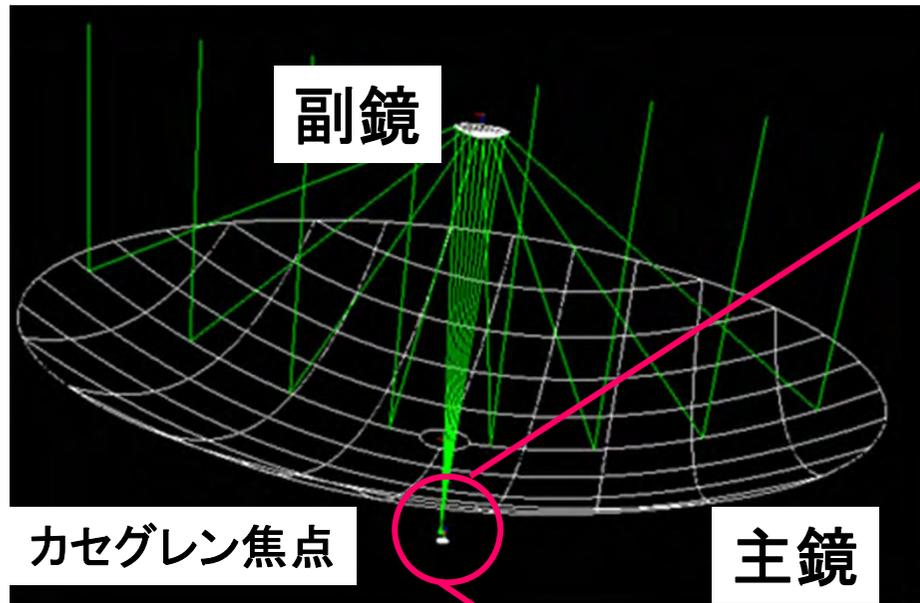
ガウスモードによる光学系の設計

周波数に依存しない光学系の設計

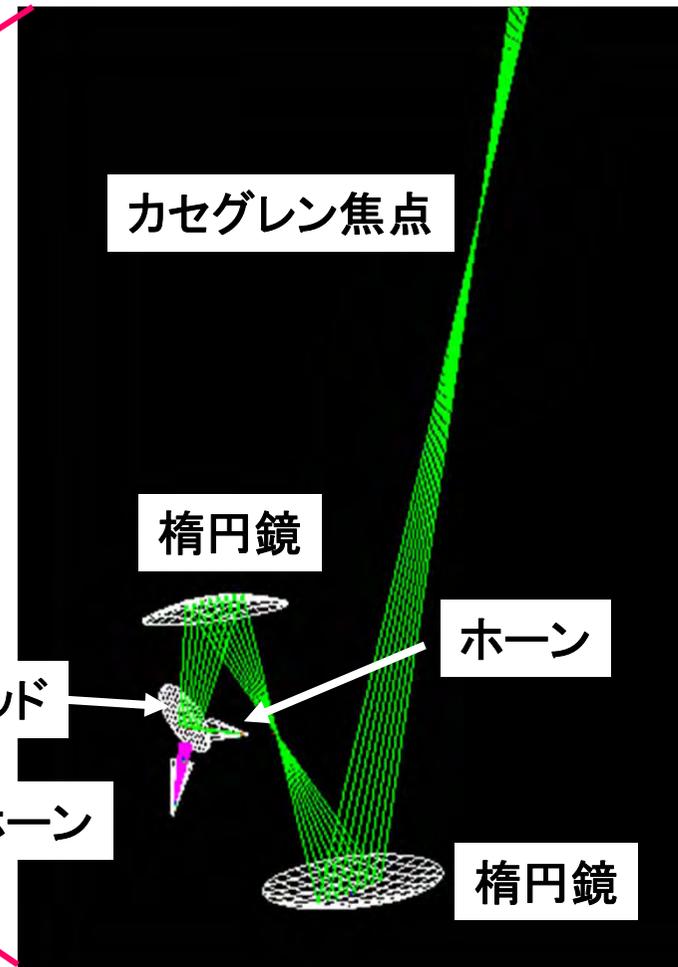
物理光学による設計

物理光学評価

アンテナ(カセグレン)



受信機光学系



EX)ALMA Band10

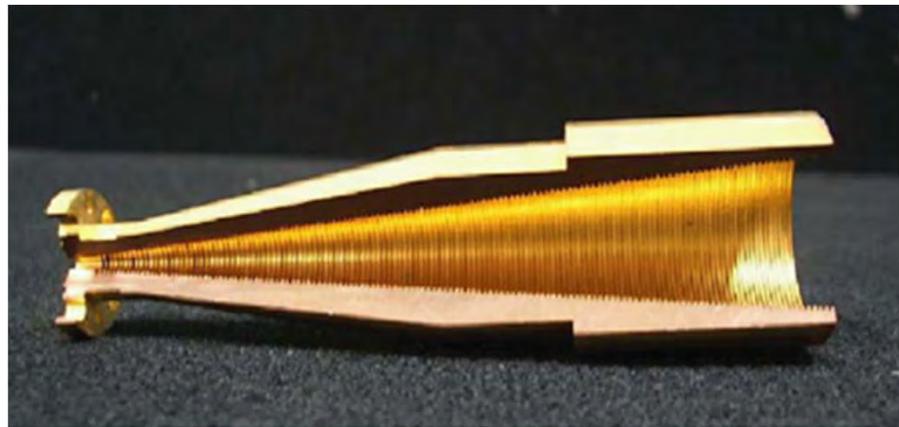
鏡面での電界分布を求めて評価する。

コルゲートホーン

コルゲートホーンとは、電磁波の空間伝搬モードと導波管回路をつなぐ整合回路である。

コルゲートホーンの特徴

- 広帯域(~30%)
- 低サイドローブ(<-20dB)、
- E面H面の対称性の良さ
- 低い交差偏波特性



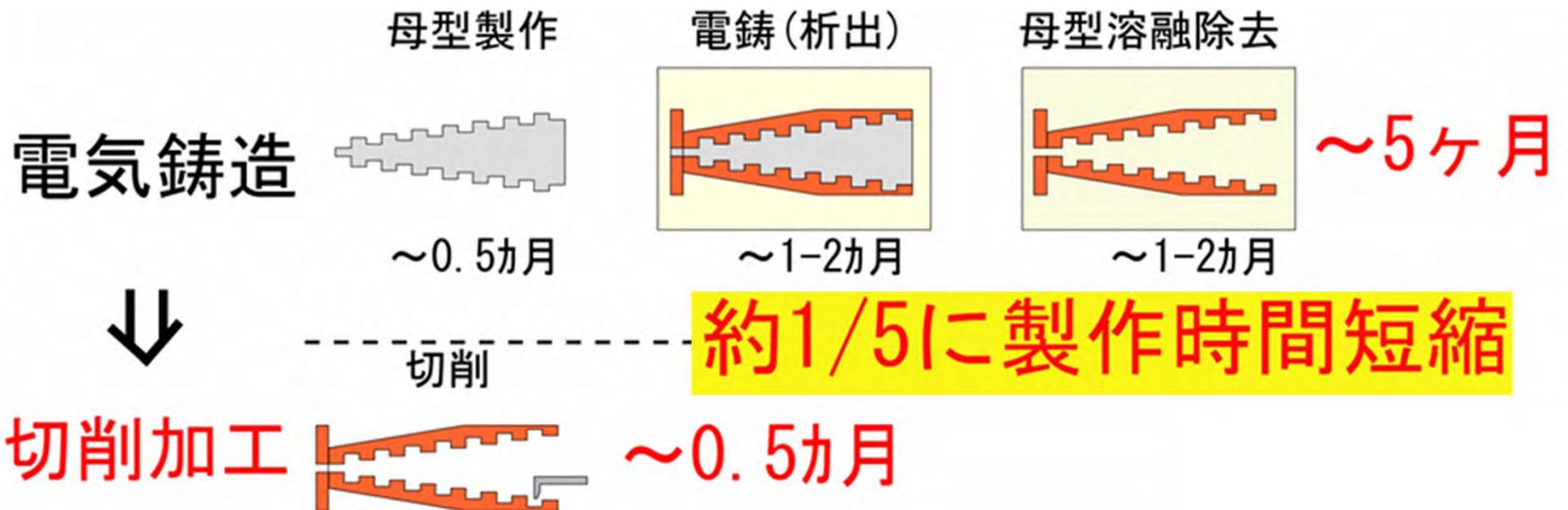
150GHz帯コルゲートホーン(カットモデル)全長95mm 外径28mm

全切削型のコルゲートホーン

従来のコルゲートホーン製造・・・電気鋳造方法

母型製作→電鋳→母型溶融…………製作時間、コスト高

全切削方式

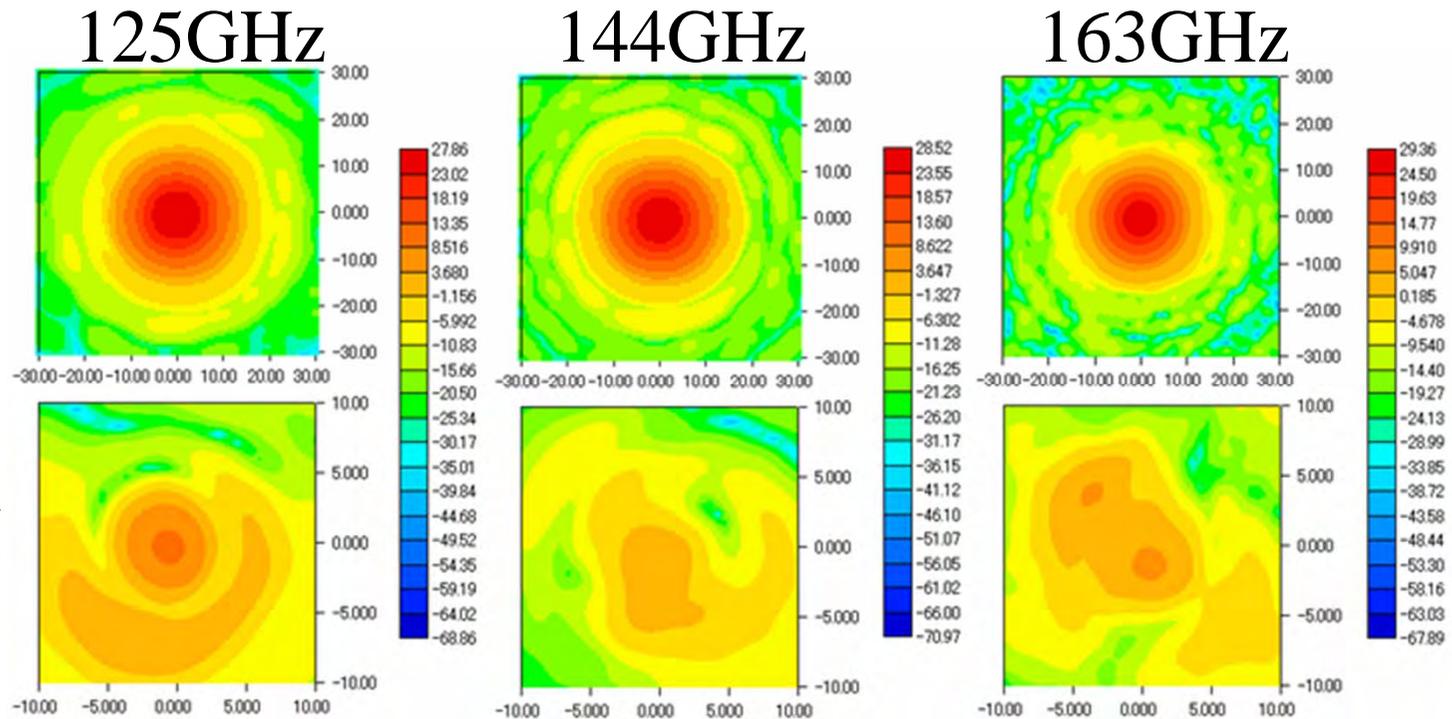


切削ホーンの実績 : 150GHz 350GHz 800GHz(製作中)

切削型コルゲートホーンのパターン測定

広帯域において { E面H面の好対称性
低サイドローブレベル
低交差偏波レベル } を達成している

主偏波
パターン

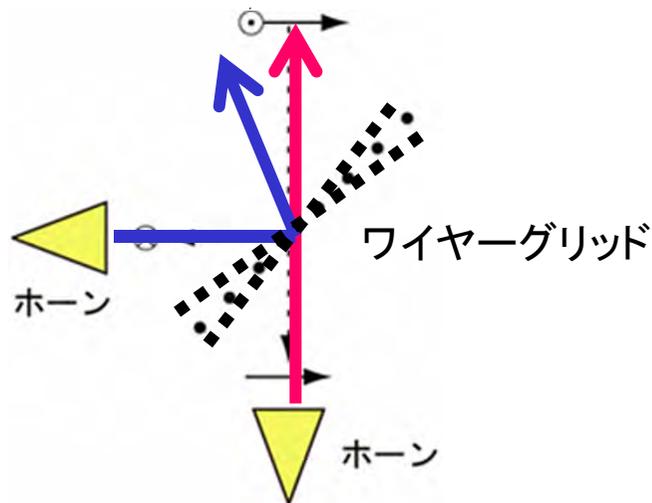


交差偏波
パターン

測定値

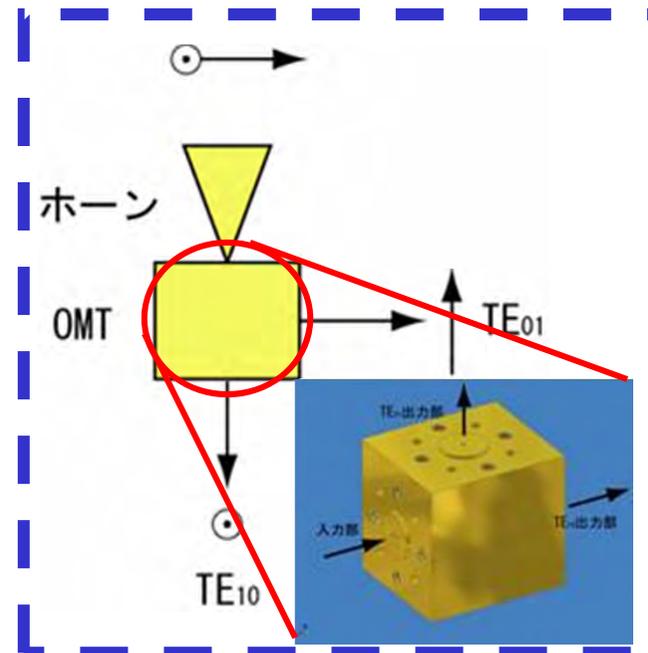
3-2.直線偏波分離器(OMT)

従来



グリッド型偏波分離方式

本発表

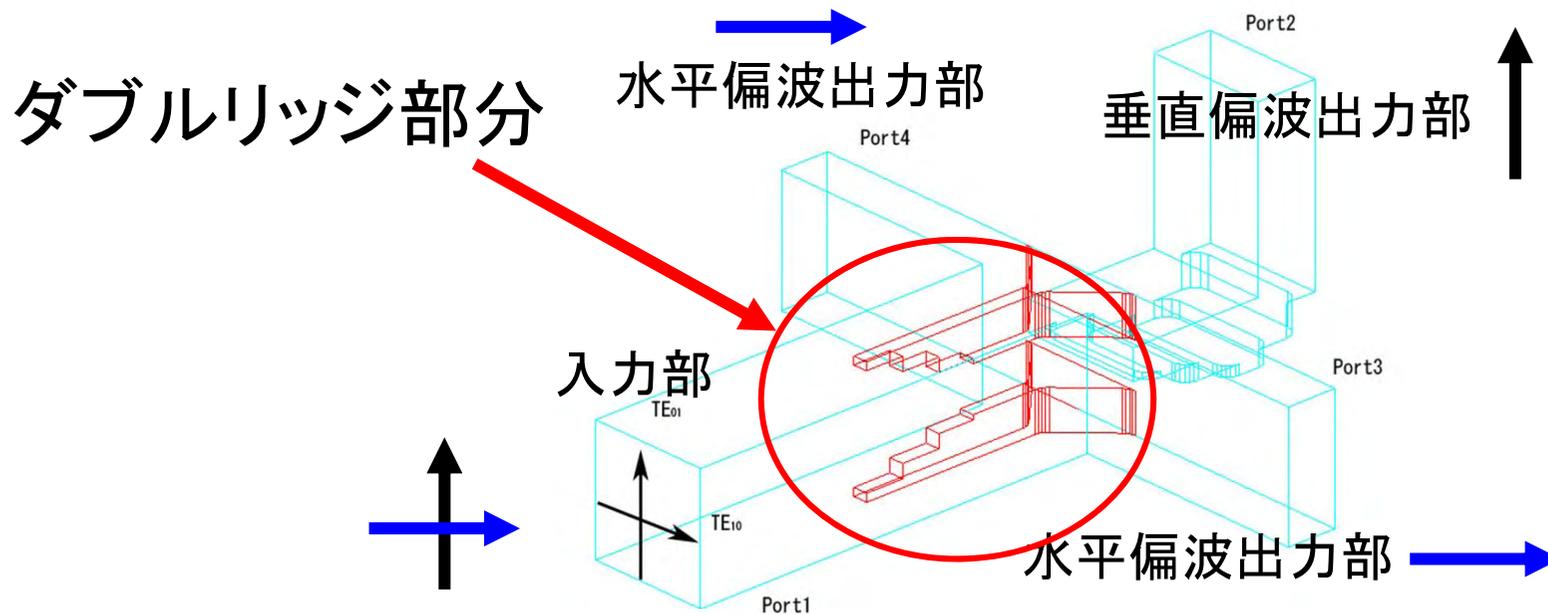


導波管型偏波分離方式

サイズ20mm×20mm×22mm

コンパクト化 かつ 指向性の器差がない

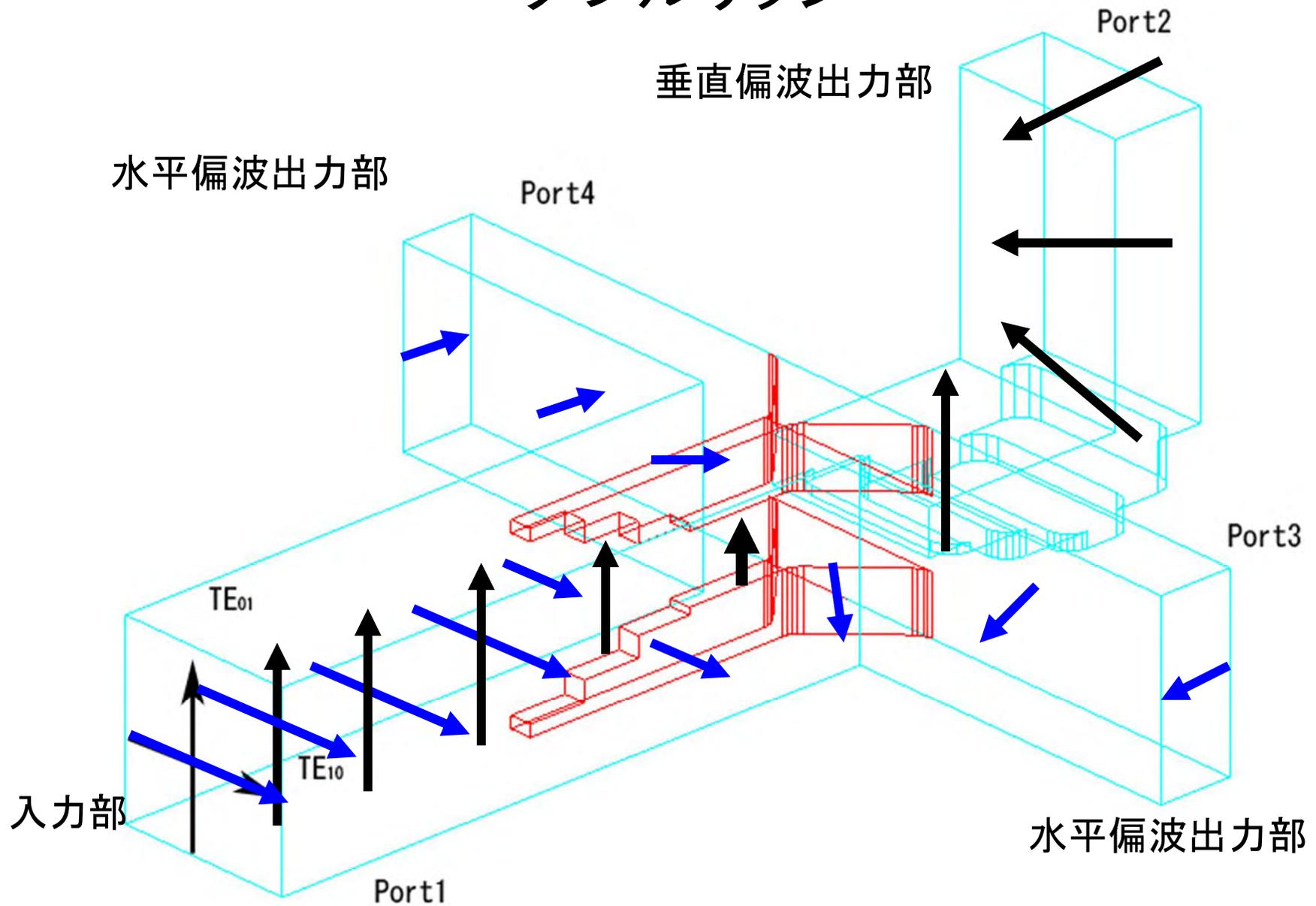
導波管型偏波分離器(ダブルリッジ型)



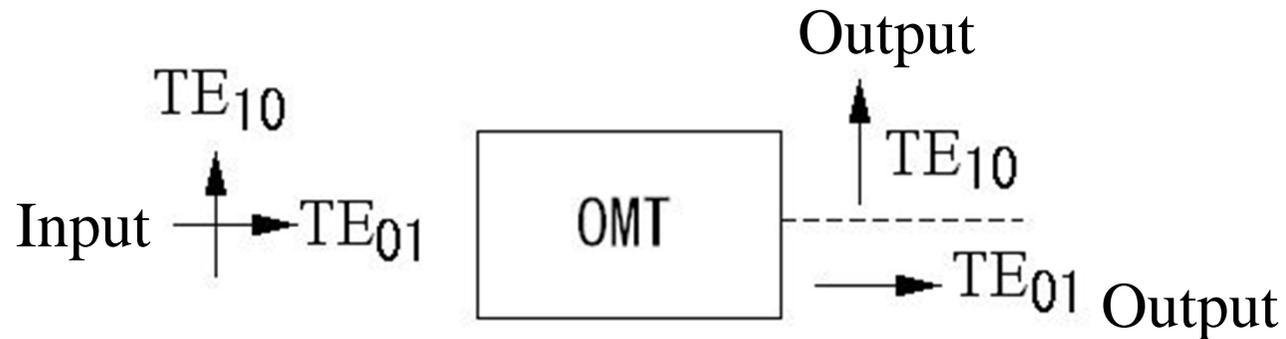
導波管型偏波分離器(Ortho Mode Transducer)はダブルリッジ型と呼ばれる方式を採用した。

加工誤差が性能にあまり影響しないデザインの検討を行い、100GHz帯において実用化した。

ダブルリッジ



Performance of OMT



Higher mode TE_{11}, TM_{11} excitation \longrightarrow "0"

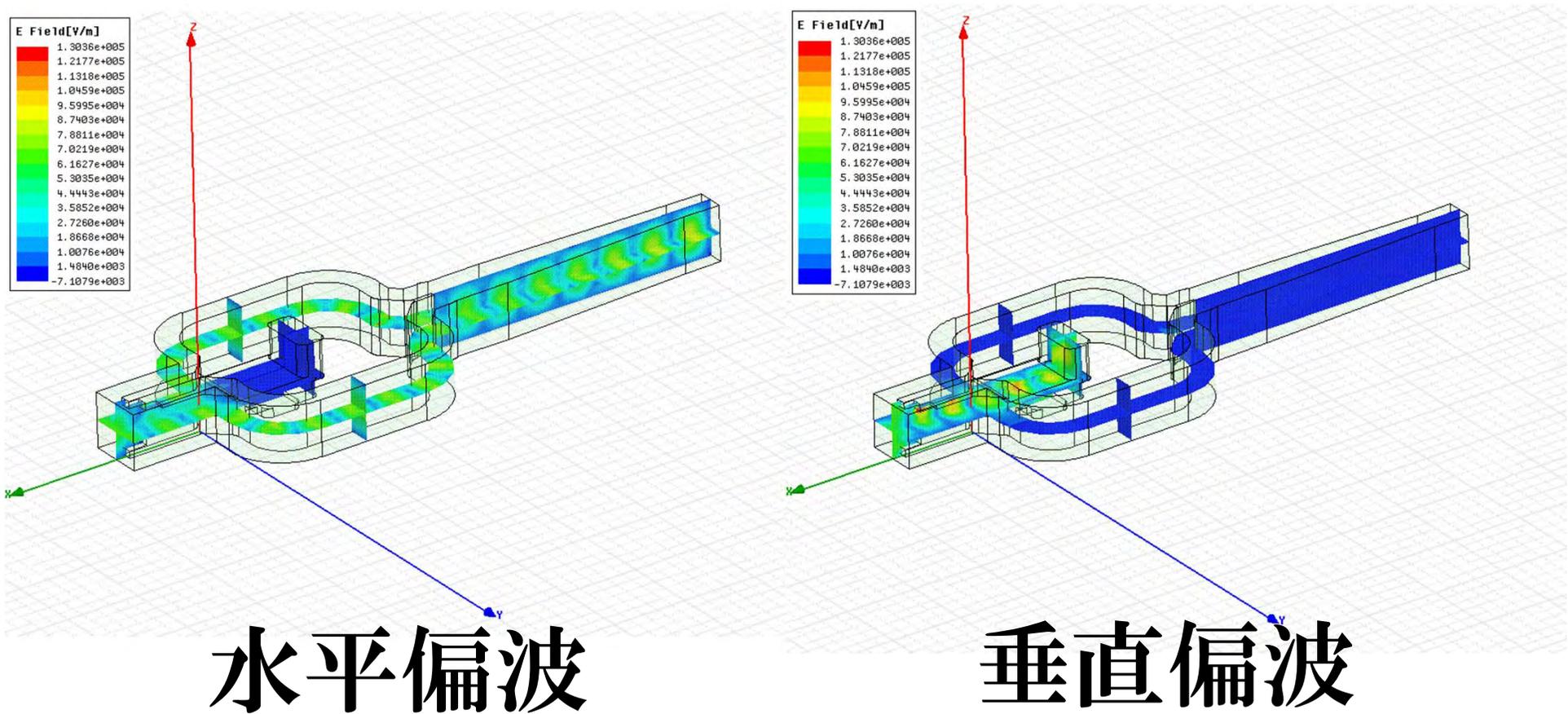
Goals of performance

Insertion loss $< 0.2\text{dB}$

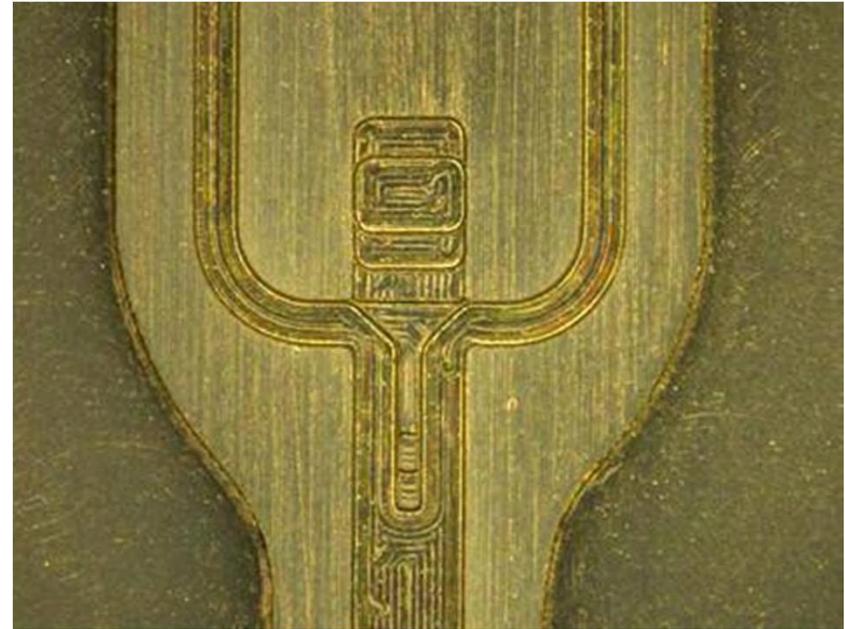
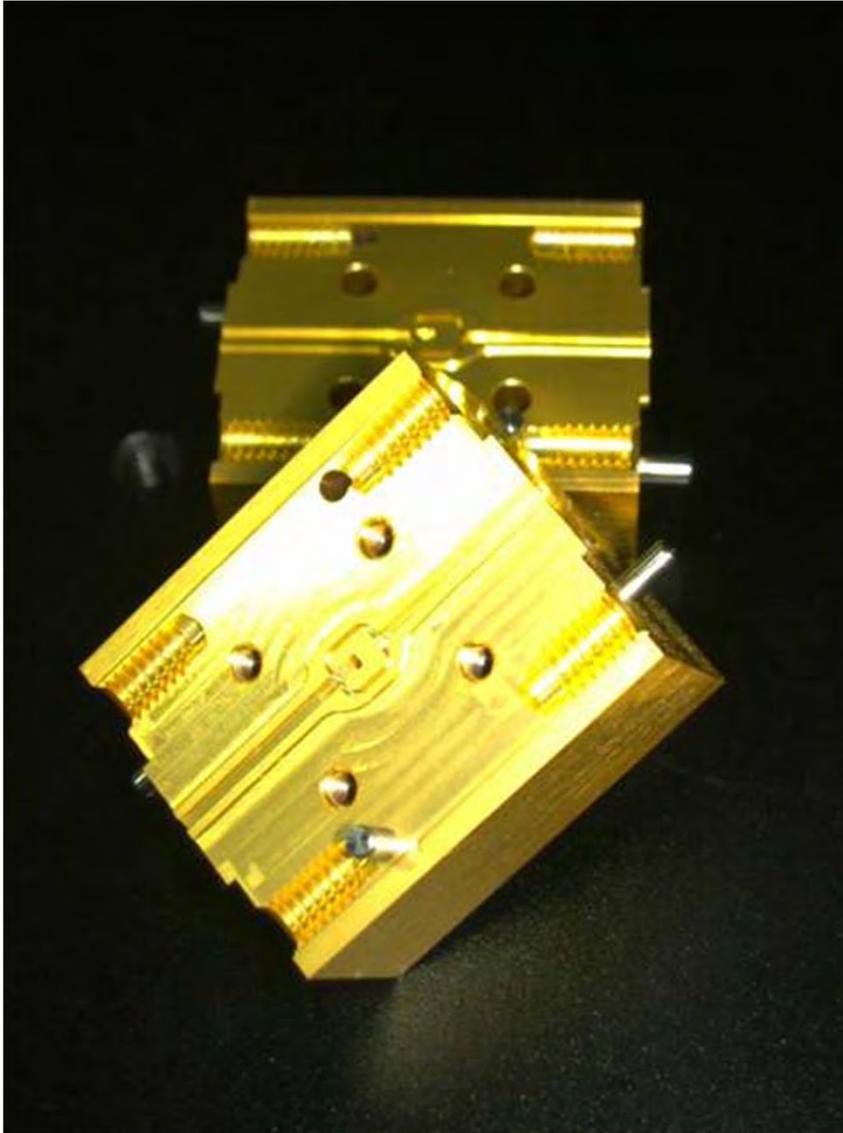
Return loss $> 20\text{dB}$

Isolation $> 30\text{dB}$

350GHz帯OMTシミュレーション



Photograph of 345GHz OMT

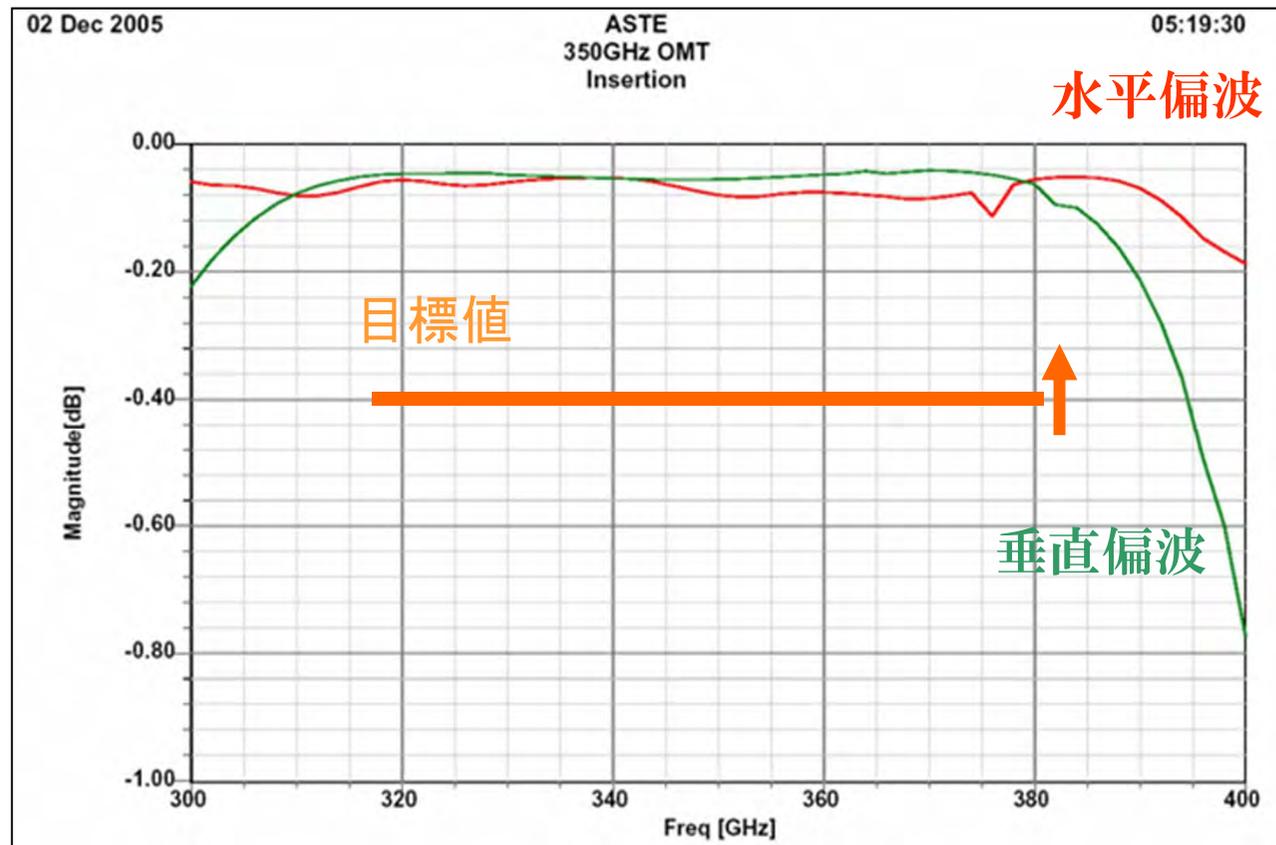


上図:リッジ導波管下部

左図:(手前)OMT上部
(奥)OMT下部

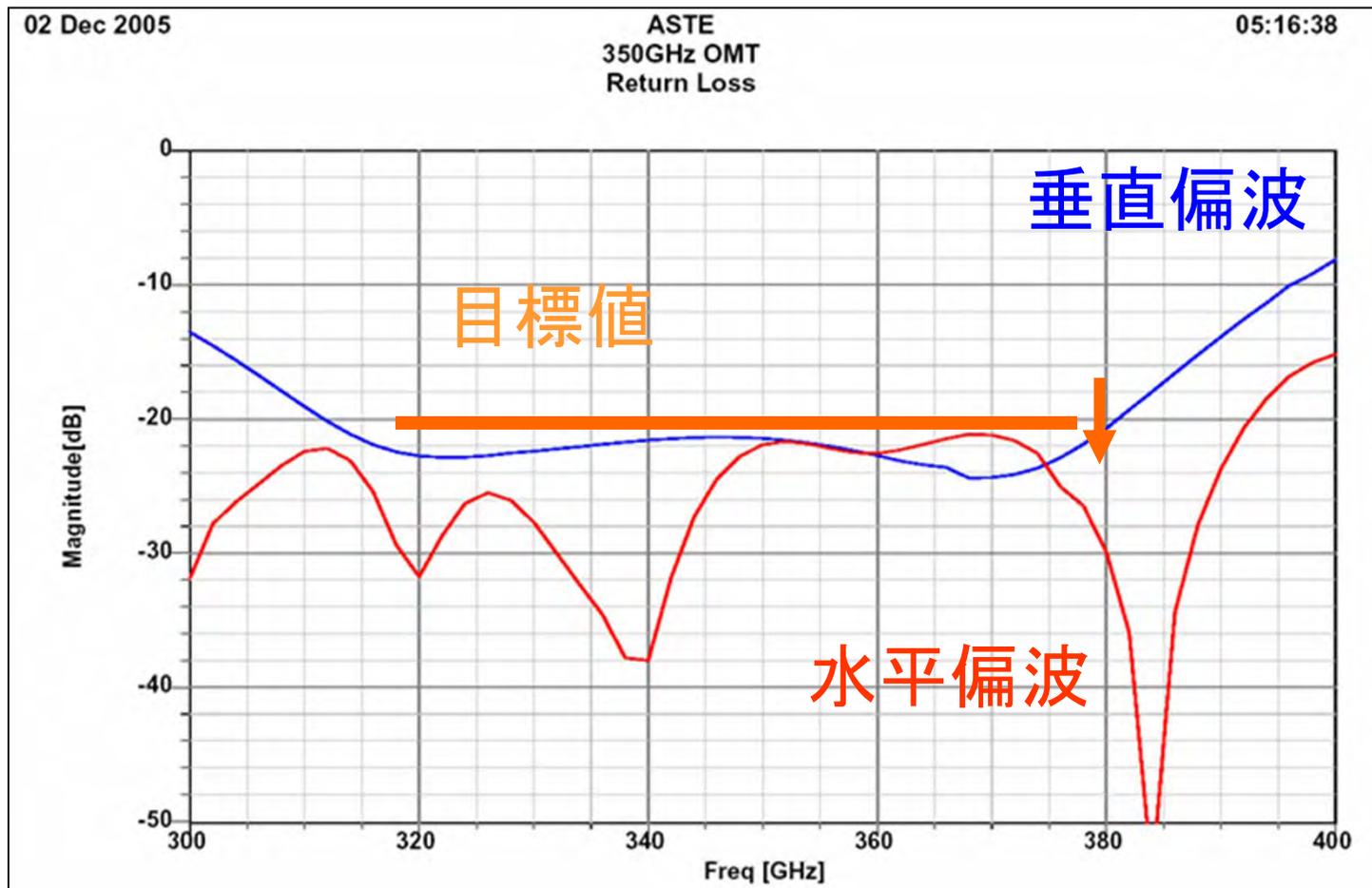
350GHz帯OMTの挿入損失

目標の-0.4dB以下(電力損失は10%以下)を達成している。
この性能はワイヤグリッドと同様である。



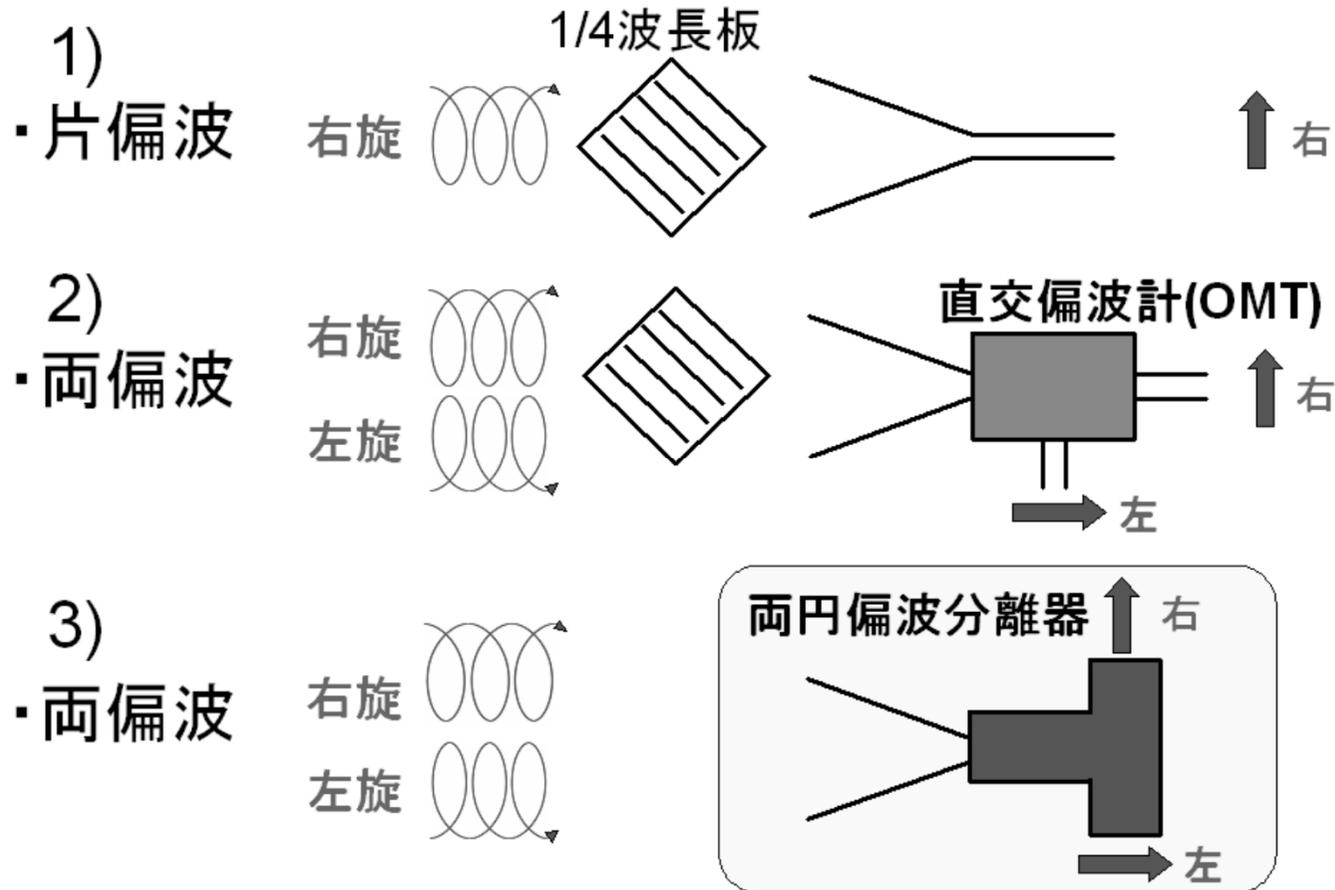
350GHz帯OMTの反射特性

垂直、水平偏波共にスペック値である-20dB(1%以内)を達成している。

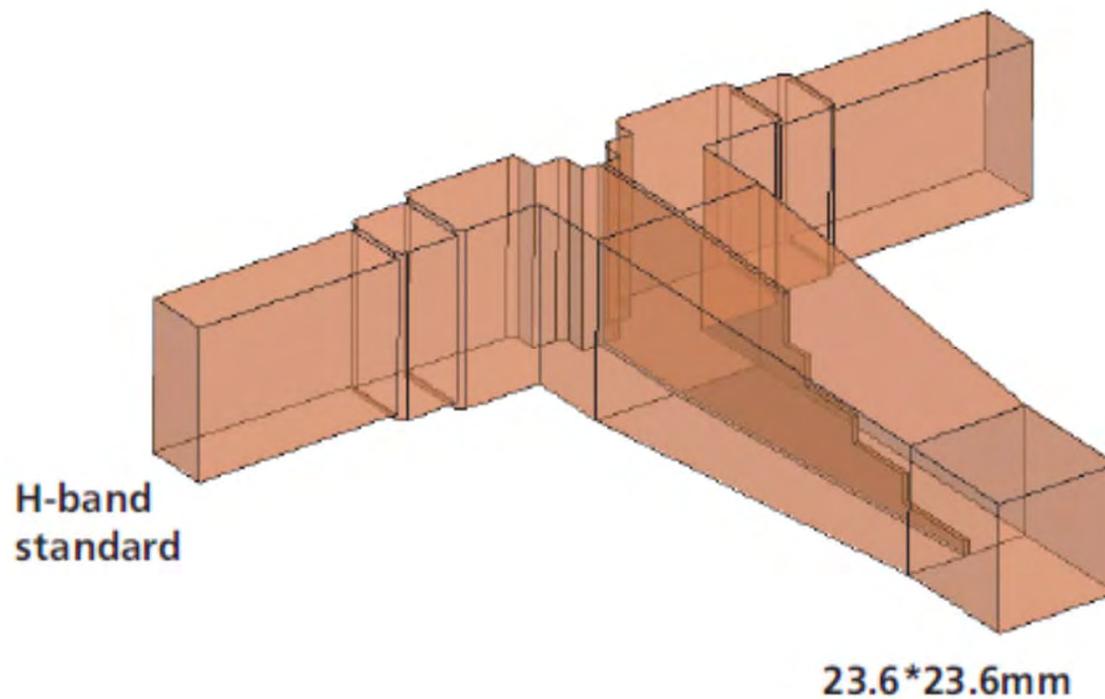


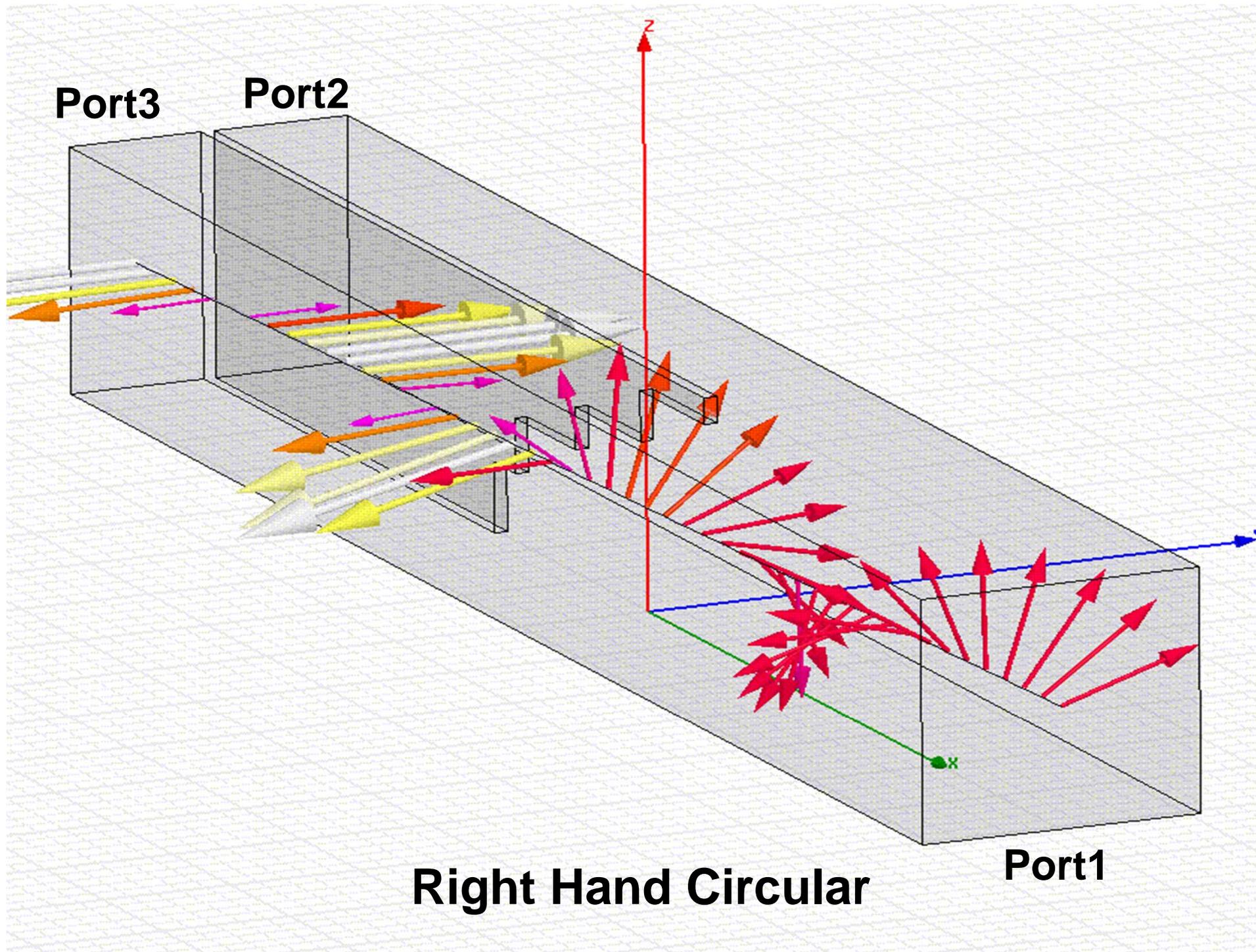
3-2.円偏波分離器

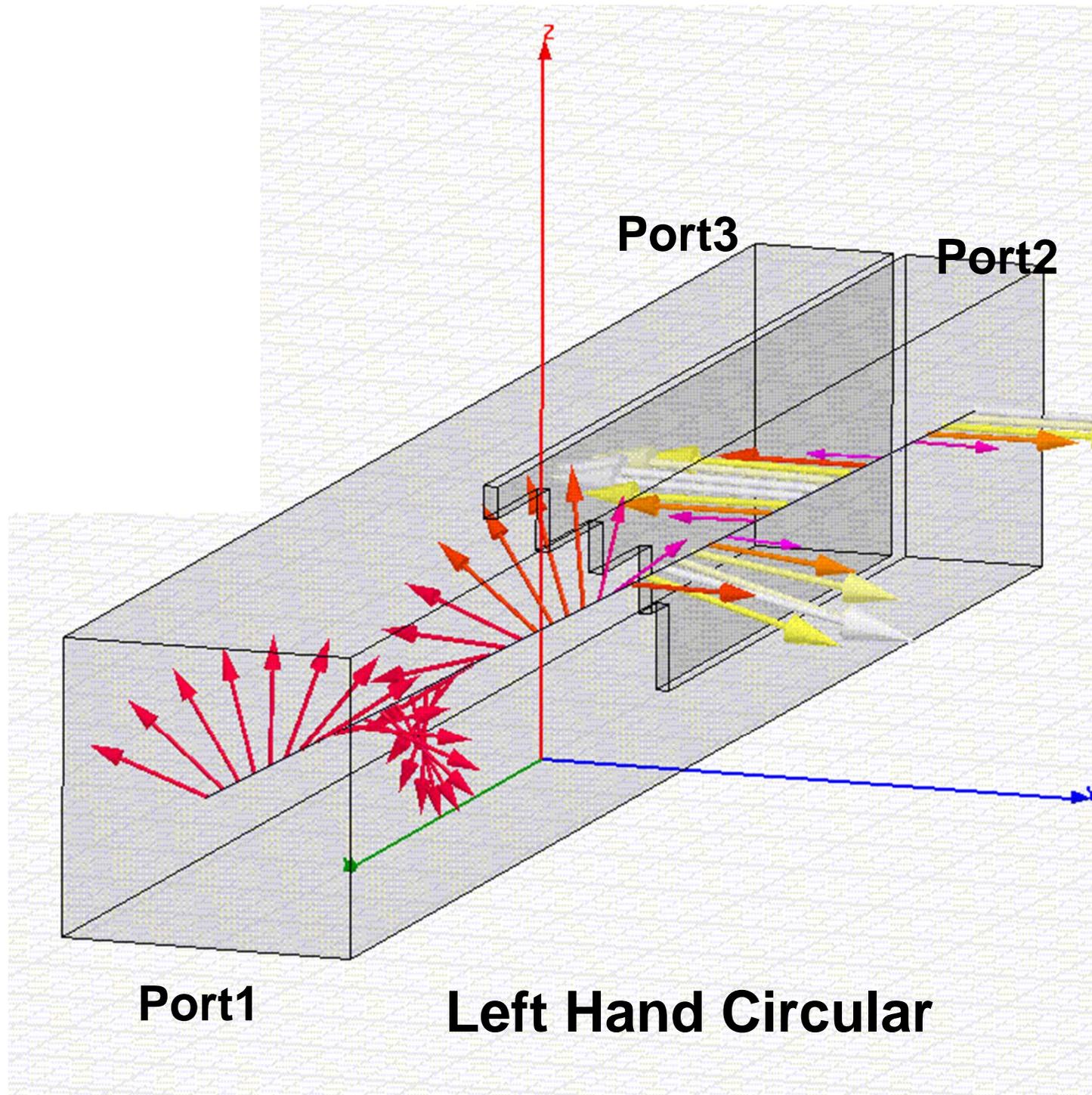
VLBI観測等では、偏波面合成の容易さから、円偏波観測が用いられる。そこで円偏波発生には、下記の方法が主に用いられる。



導波管セプタム型円偏波分離器







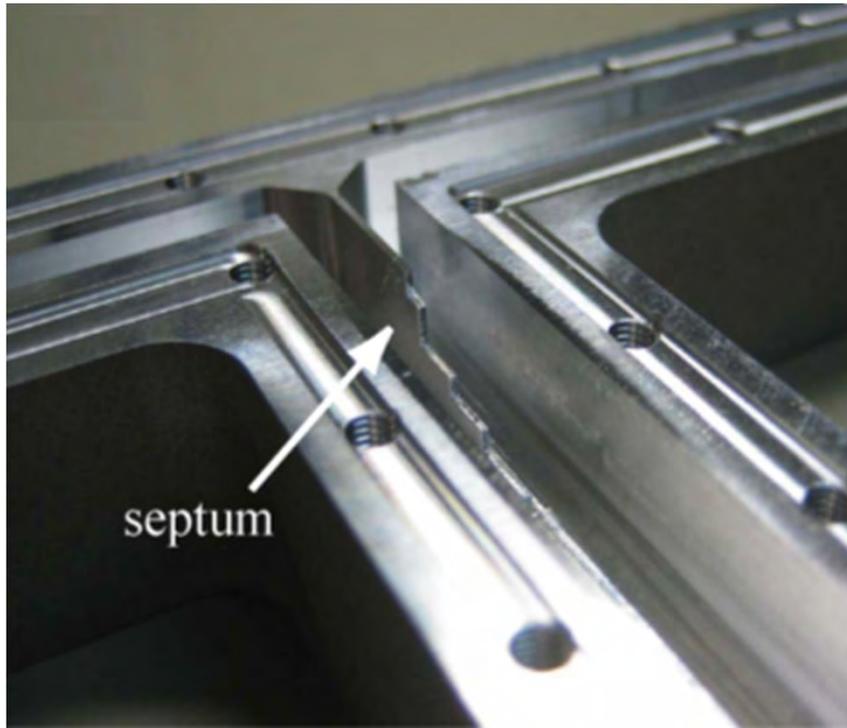
Port1

Port3

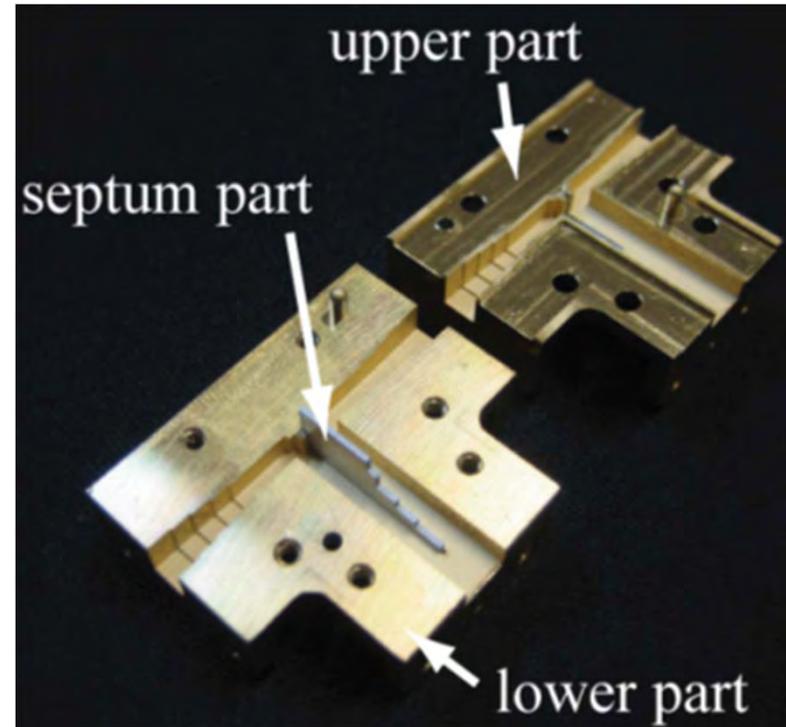
Port2

Left Hand Circular

セプタムの一例

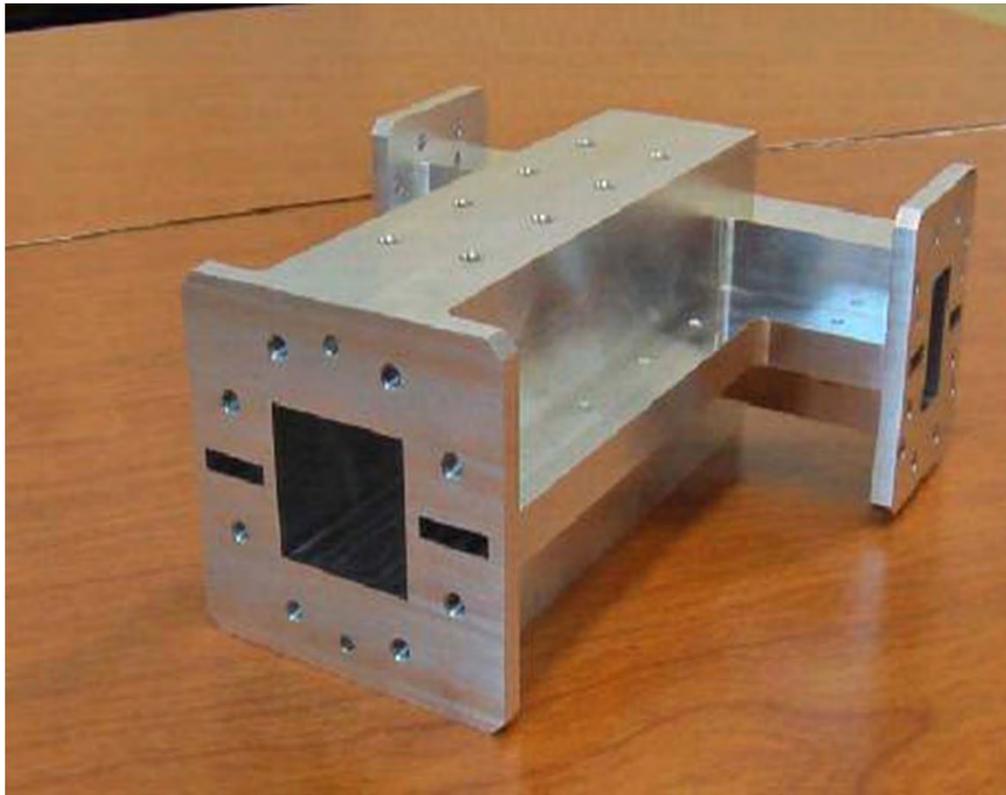


22GHz帯

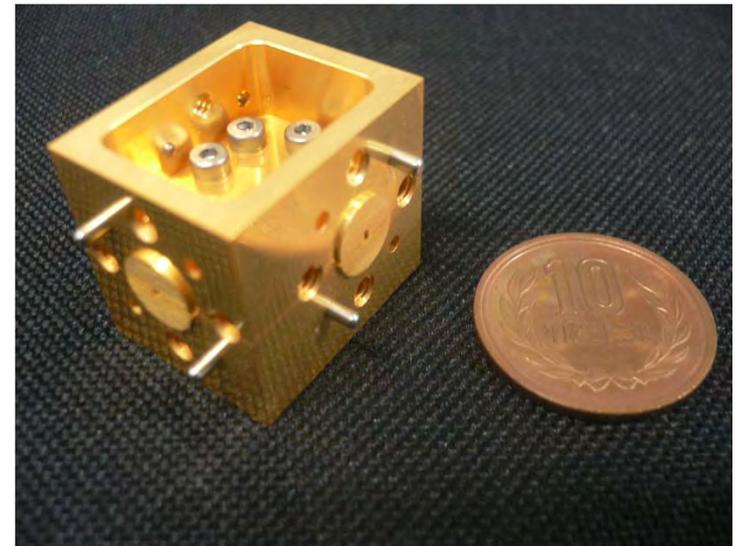


40GHz帯

製作した円偏波分離器

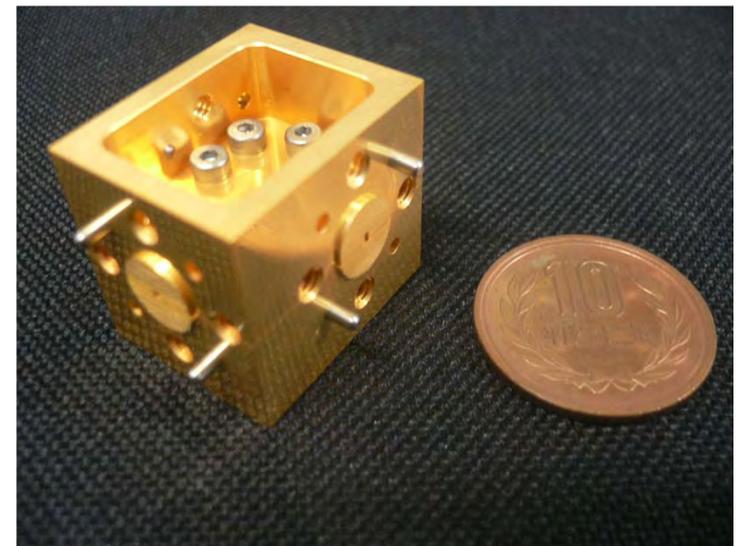
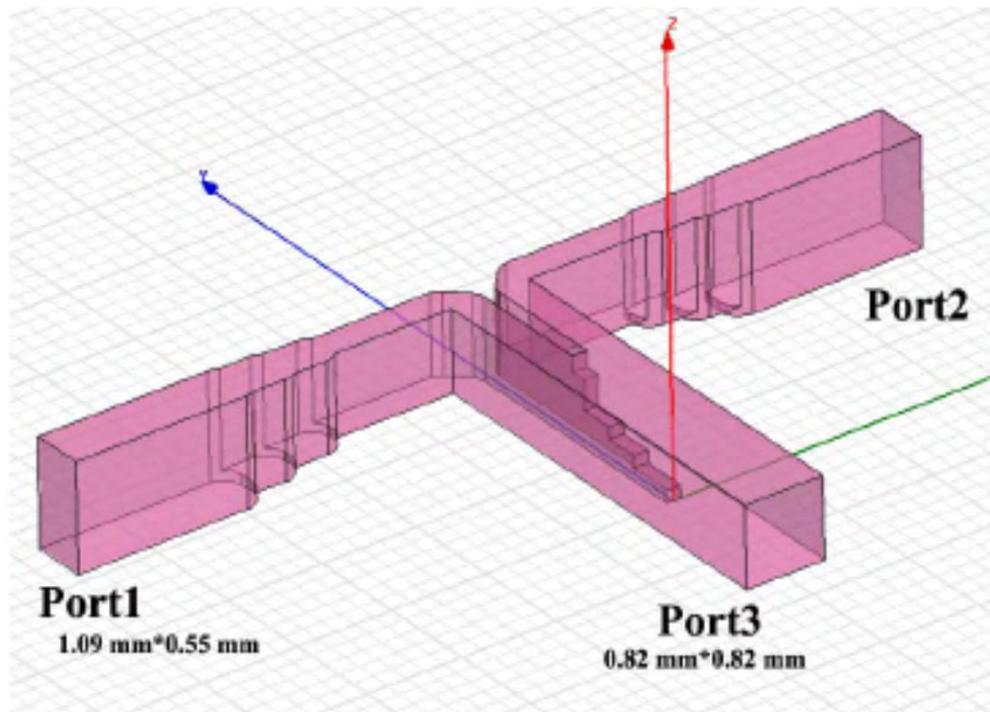


6.7GHz帯

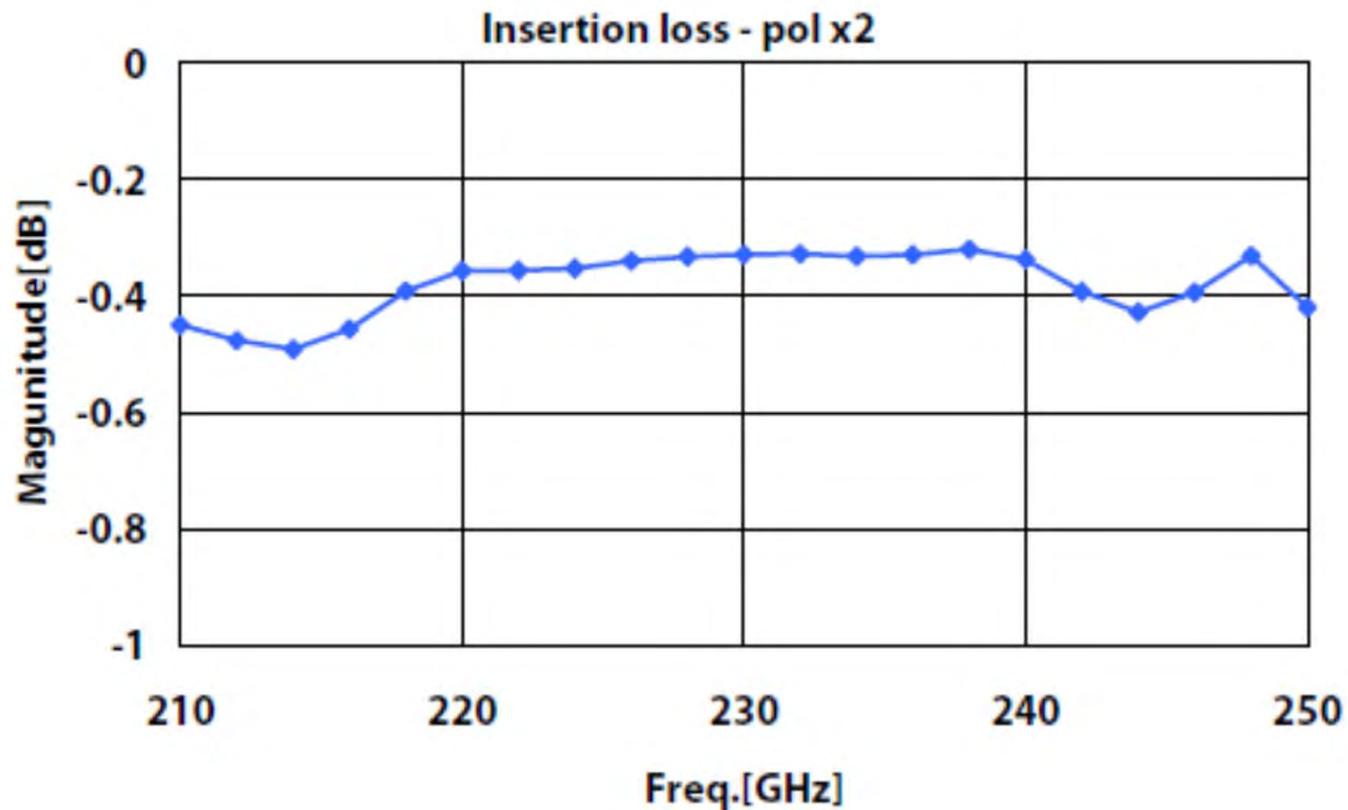


230GHz帯

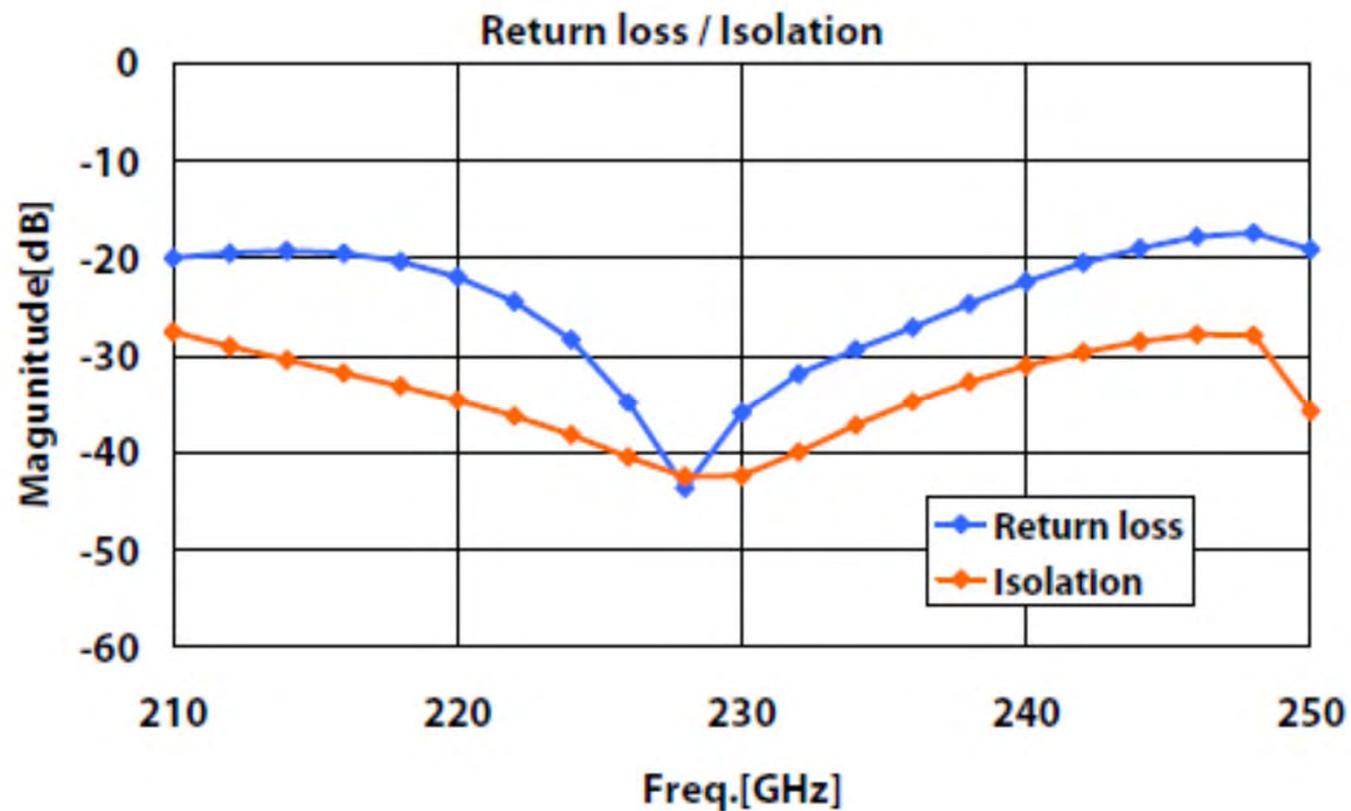
230GHz帶円偏波分離器



230GHz帯円偏波分離器の特性 -通過損失計算-

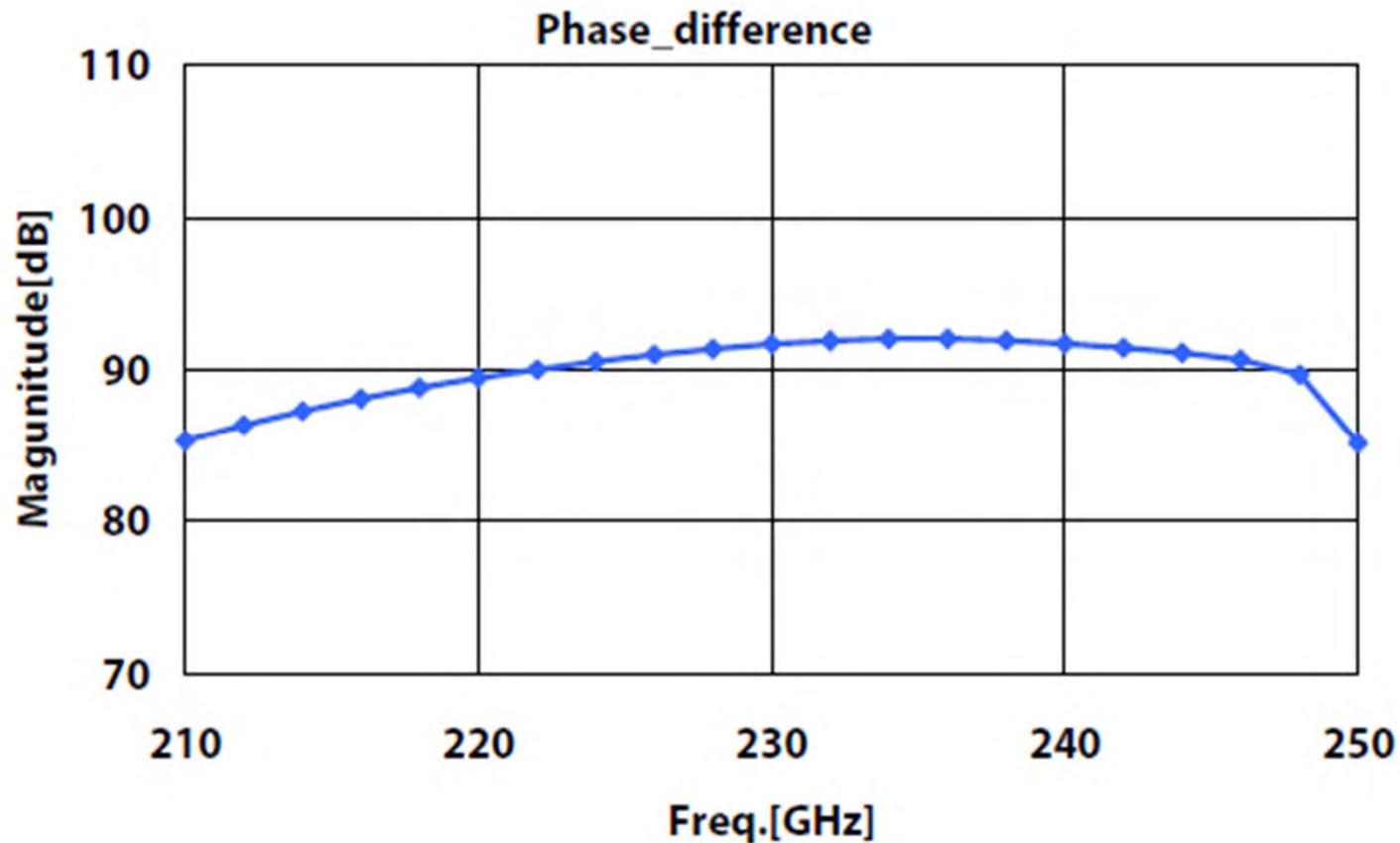


230GHz帯円偏波分離器の特性 -反射およびアイソレーション計算-



230GHz帯円偏波分離器の特性

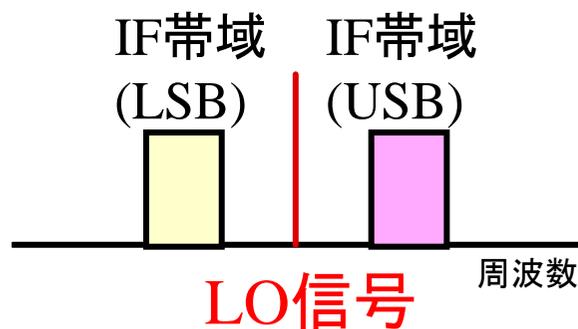
-位相特性-



3-3. サイドバンド分離受信機

ミリ波～テラヘルツ波領域において、ヘテロダイン方式という受信方法が主流である。

この方式は受信する信号(RF信号)と局部発振信号(LO信号)を混合し、その差分である中間周波数信号(IF信号)を受信する方法である。



ヘテロダイン方式は以下の関係式が成立

$$\text{IF信号} = | \text{RF信号} - \text{LO信号} |$$

導波管2SB方式の利点

構成要素 : 導波管90° ハイブリット, デバイダー
超伝導ミクサ×2, IFハイブリッド



従来の光学的手法の2SBに比して、可動部分存在しないため

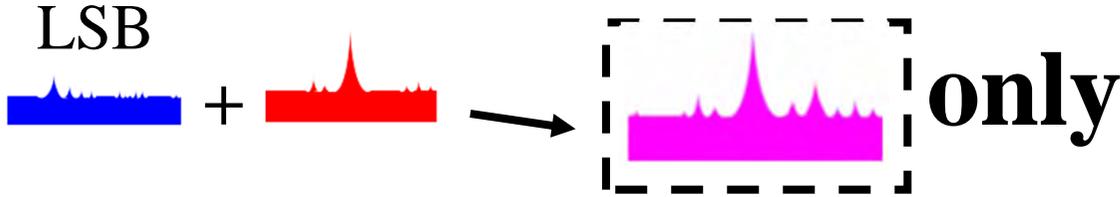
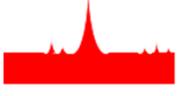
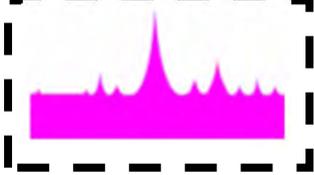
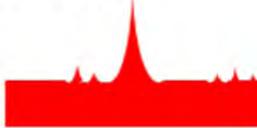


再現性、経年変化の心配は全くない



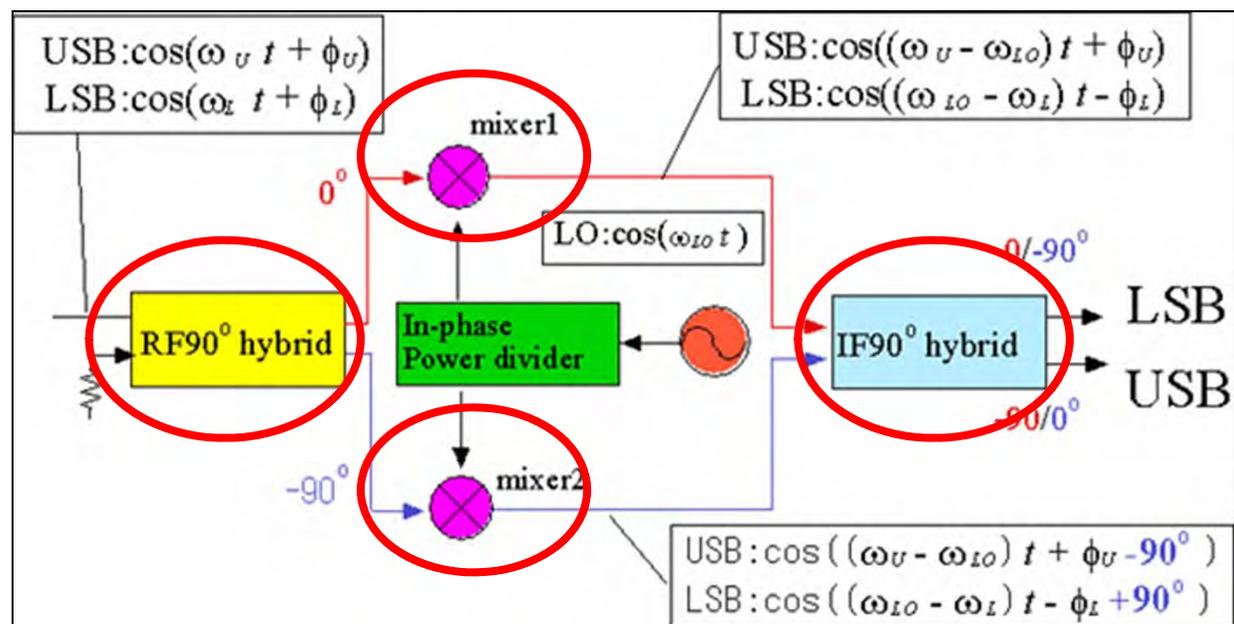
現在 500GHz帯まで開発

ヘテロダイナミックサの受信モード

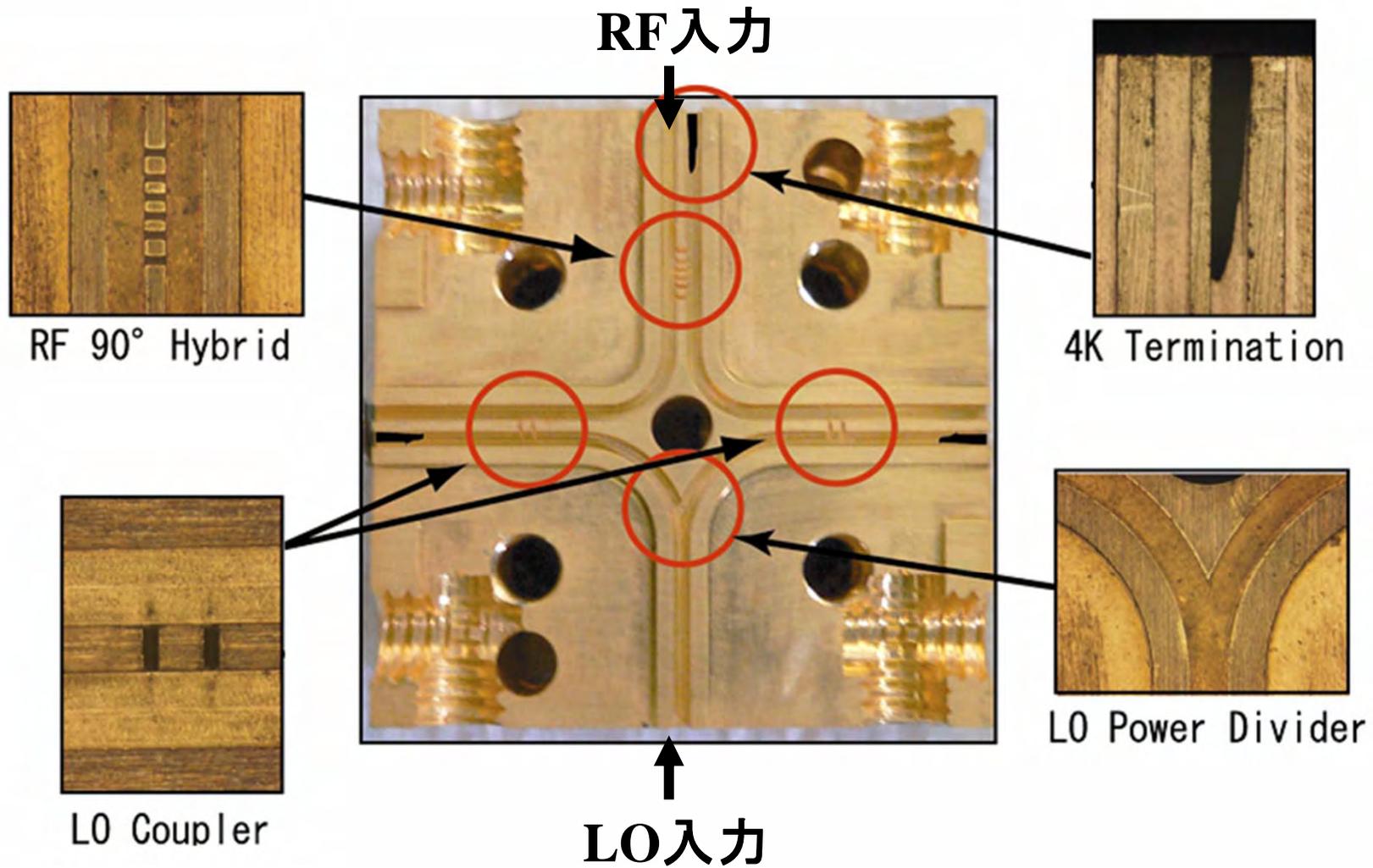
モード	IF出力信号
DSB	 LSB +  →  only
SSB	 LSB or  USB
2SB	 LSB and  USB

サイドバンド分離受信の概要

1. RF信号は、 90° の位相差を持った二つの信号に分岐
2. それぞれのRF信号はDSBミクサでIF信号に変換
3. IF信号は位相情報を保持している為、IF 90° ハイブリッドを用いUpper side band (USB)とLower side band(LSB)に分離



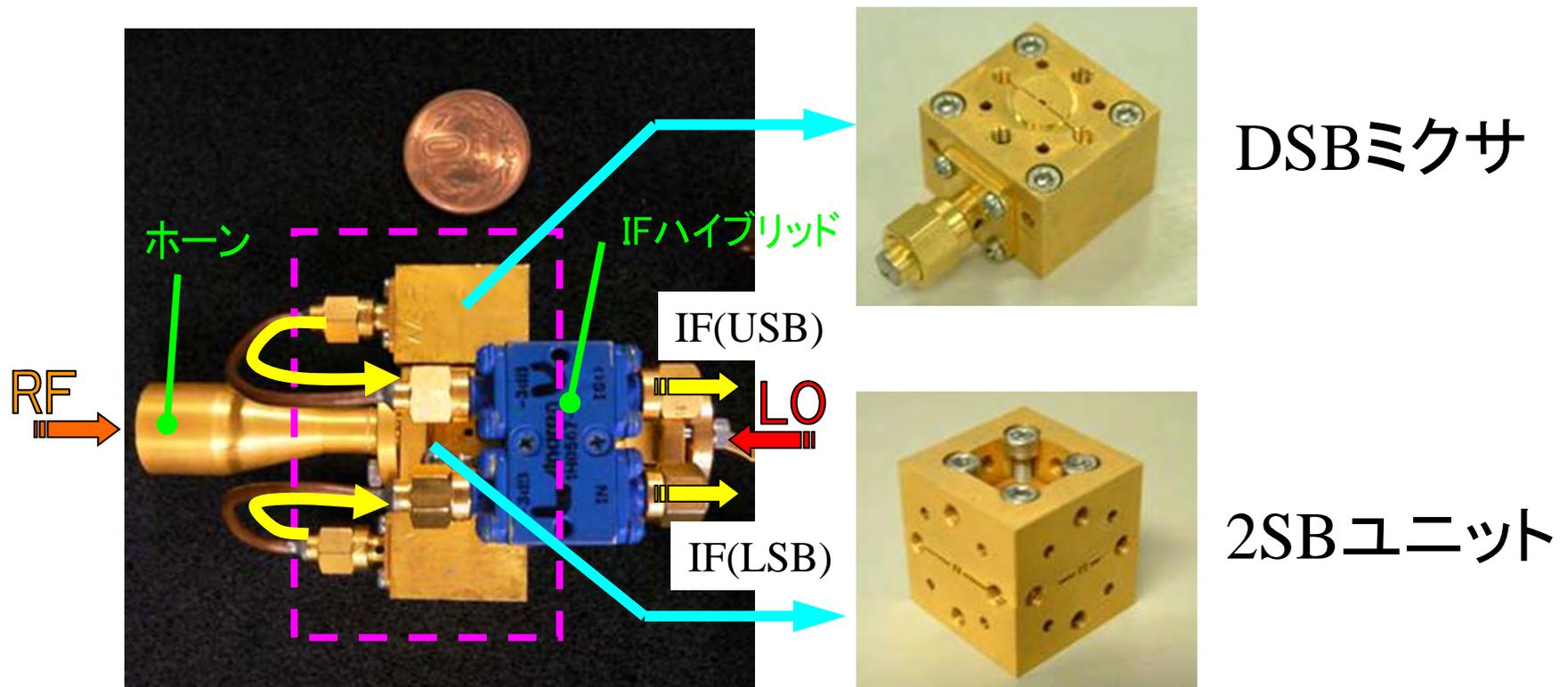
230GHz帯2SBユニット



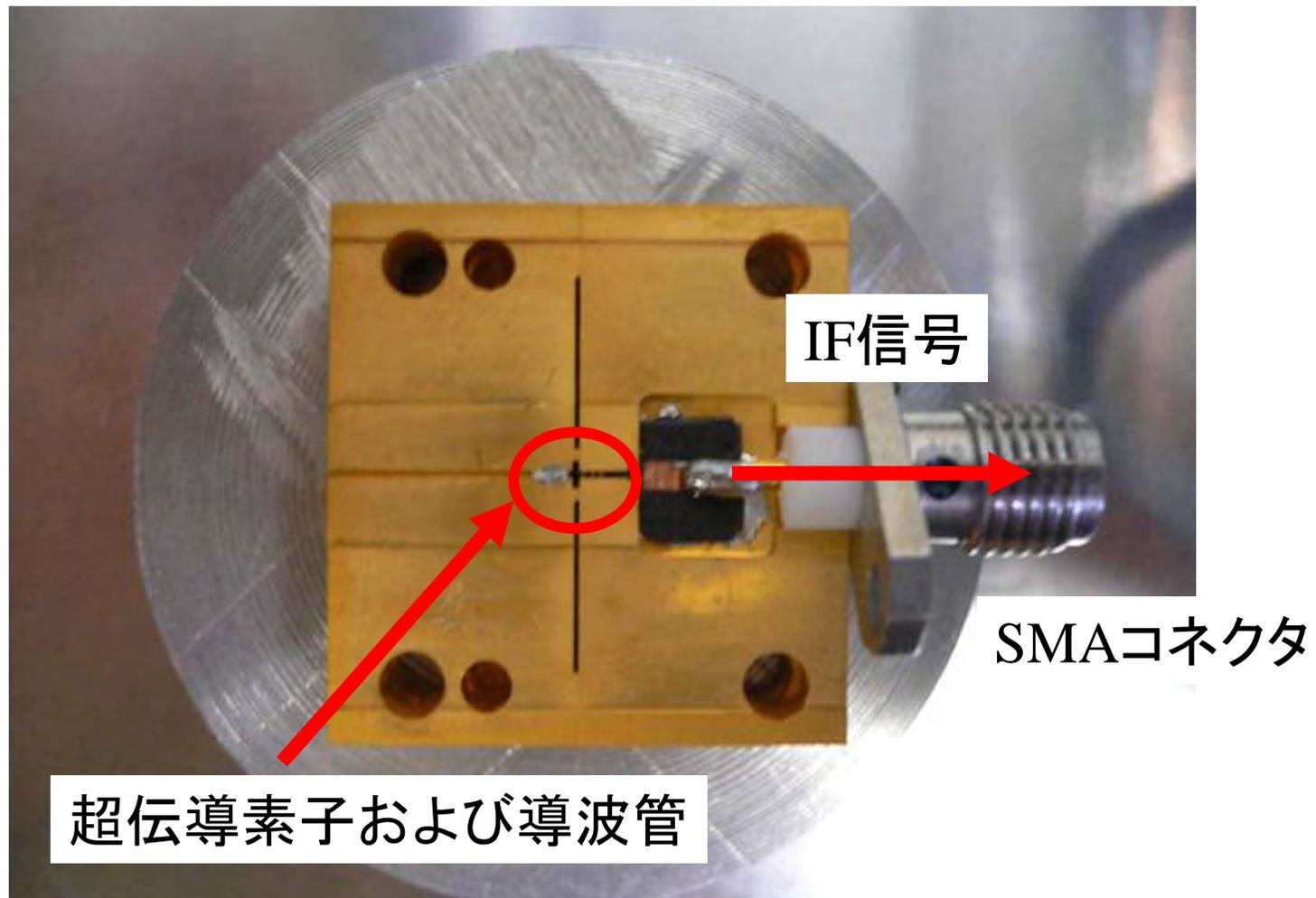
230GHz帯サイドバンド分離受信機

電波望遠鏡に搭載を行い天文観測に実用されている。

ホーンも開発を行ったコルゲートホーンが使用されている。



DSBミキサの内部

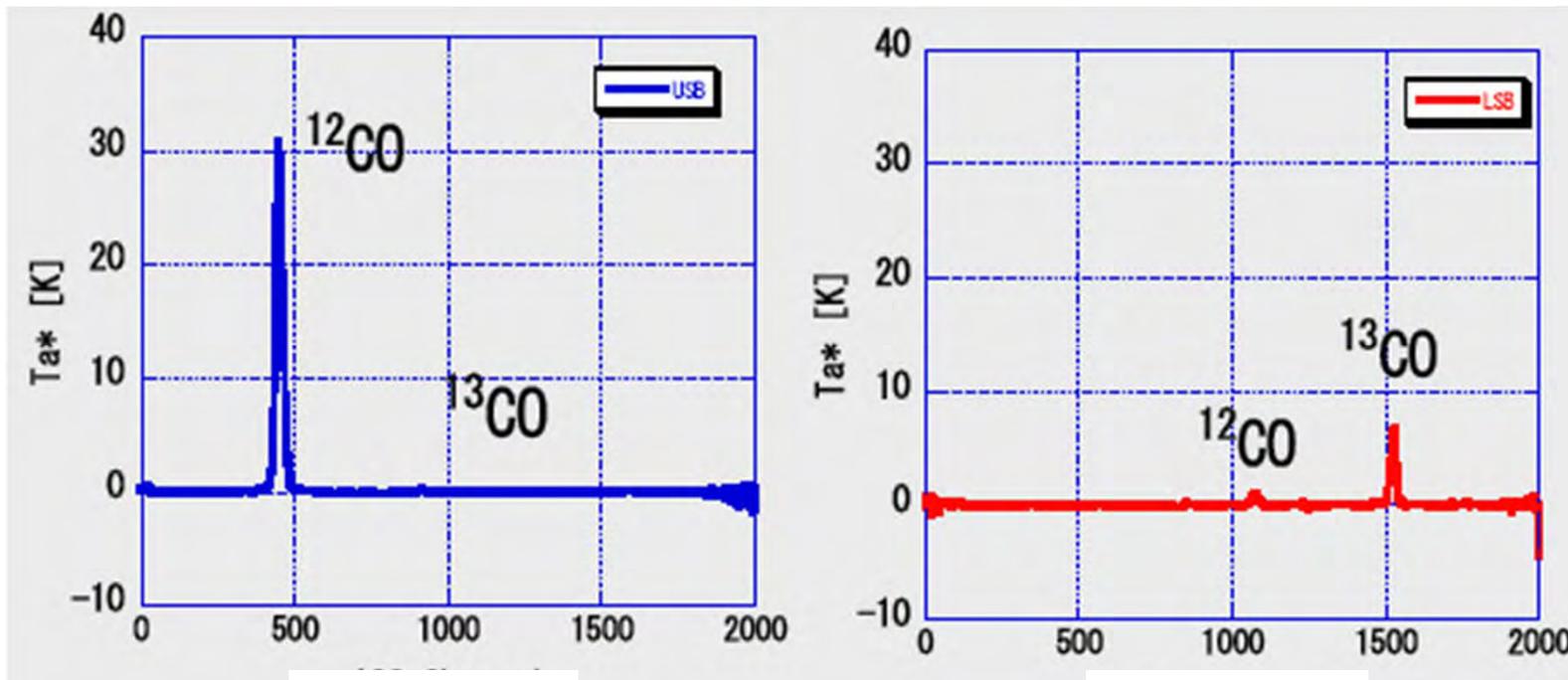


実用化されたサイドバンド分離受信機

オリオン座 (Orion-KL) において

^{12}CO (230GHz)、 ^{13}CO (220GHz) 同時観測に成功した。

サイドバンド受信機を用いた同時観測は世界初



USB観測

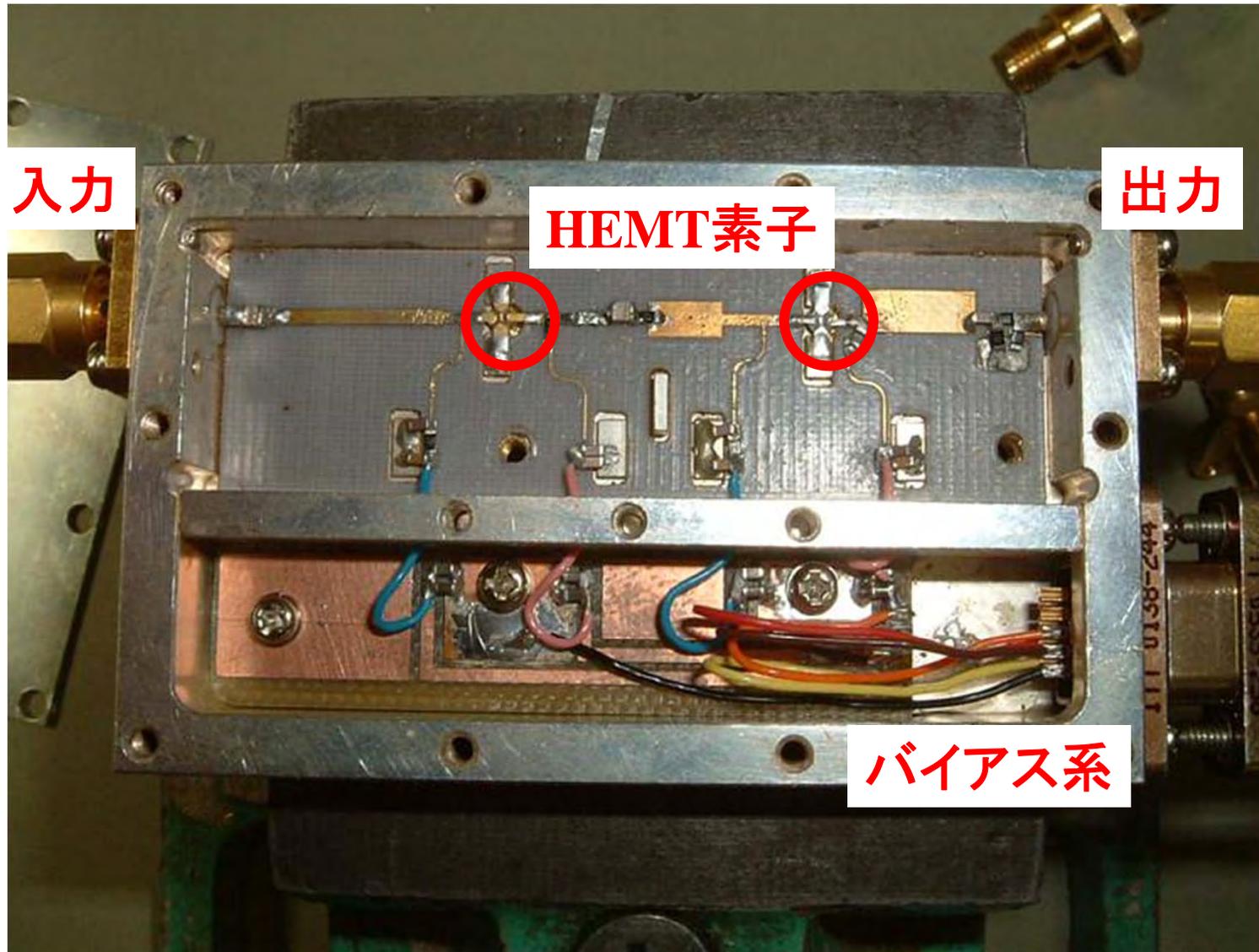
LSB観測

3-4.HEMT増幅器

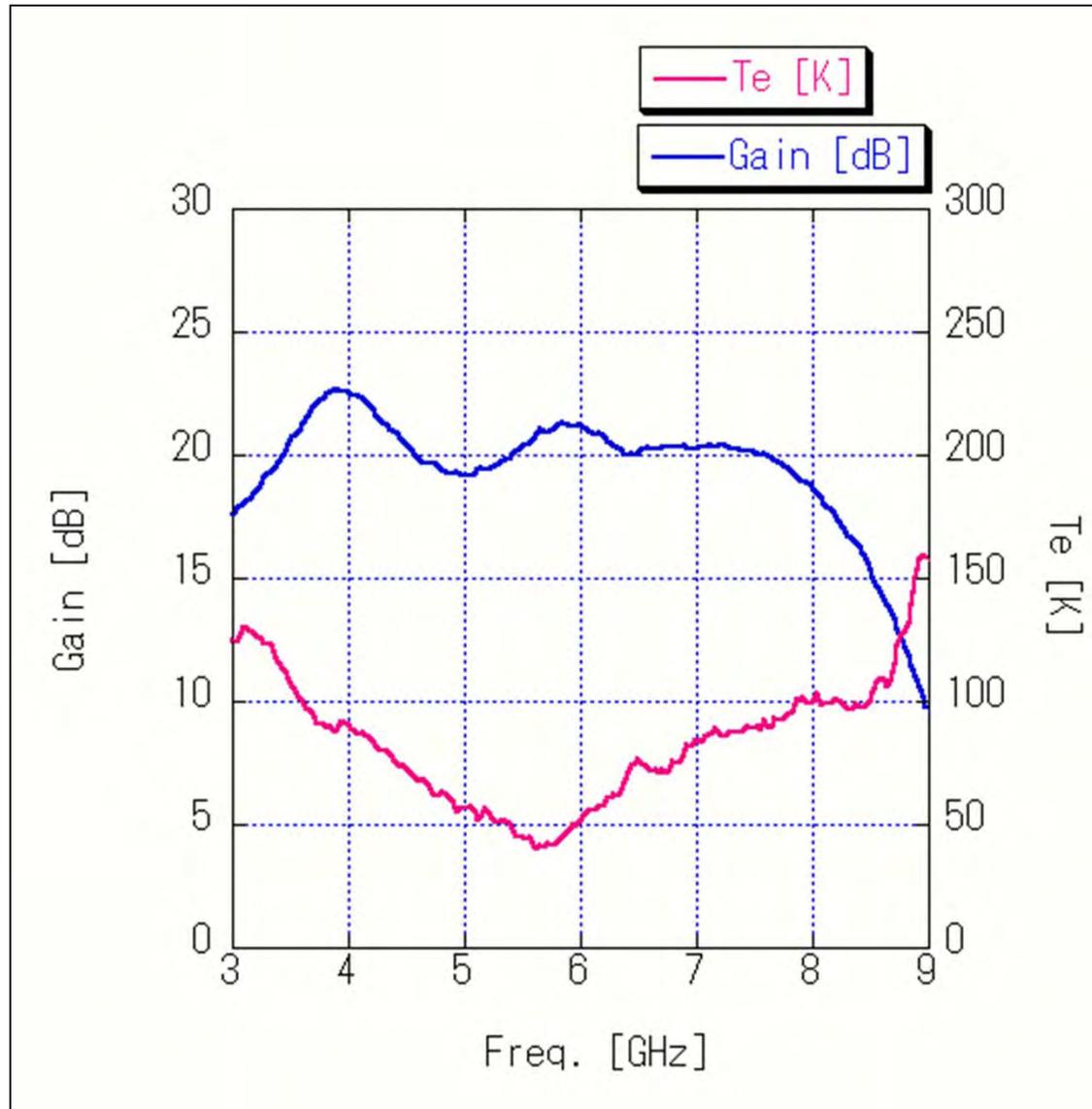
サイドバンド受信機で受信し、周波数変換された微弱な信号をノイズの付加を小さくして増幅することが重要である。そこで、受信機後にHEMT(High Electron Mobility Transistor)素子を用いた冷却増幅器の開発を行っている。



開発中のHEMT増幅器の写真



HEMT増幅器の性能測定



開発受信機例

ASTE 100GHz cartridge type receiver

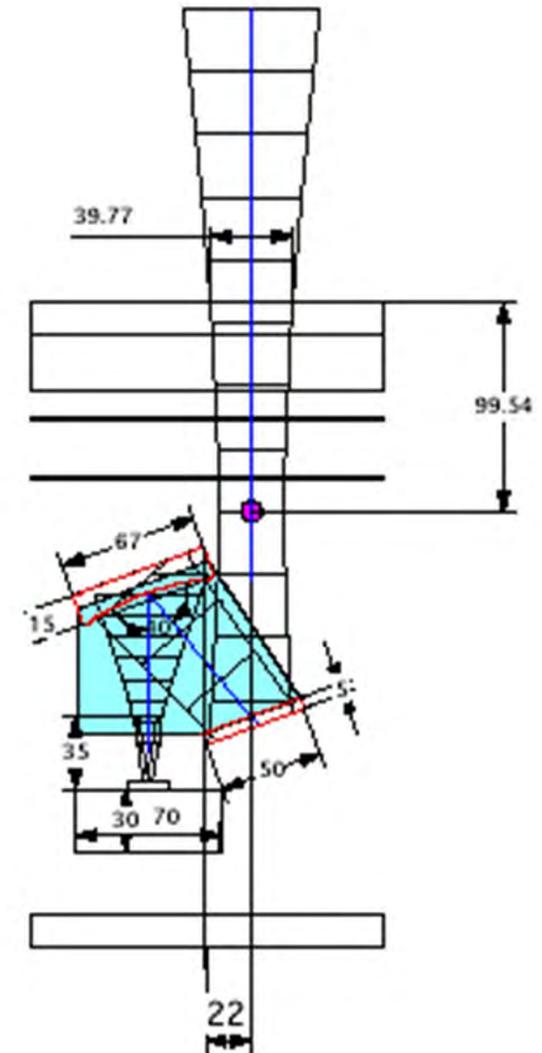
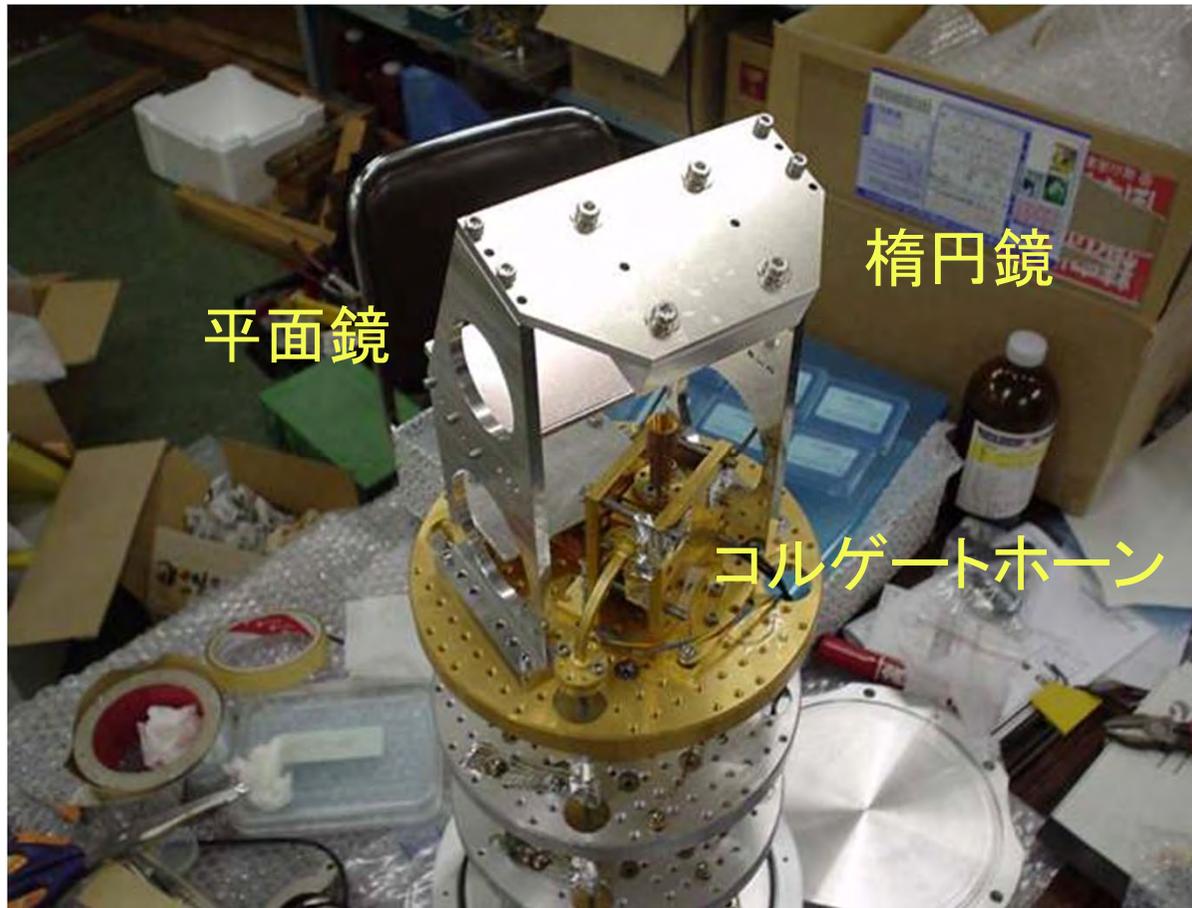


ASTE230GHzVLBI受信機



光学系	: 冷却光学系
円偏波発生方法	: 1/4波長板
ミクサー	: DSBミクサー
受信機雑音温度	~ 50K
システム雑音温度	~ 150K

ASTE 345GHz cartridge type receiver

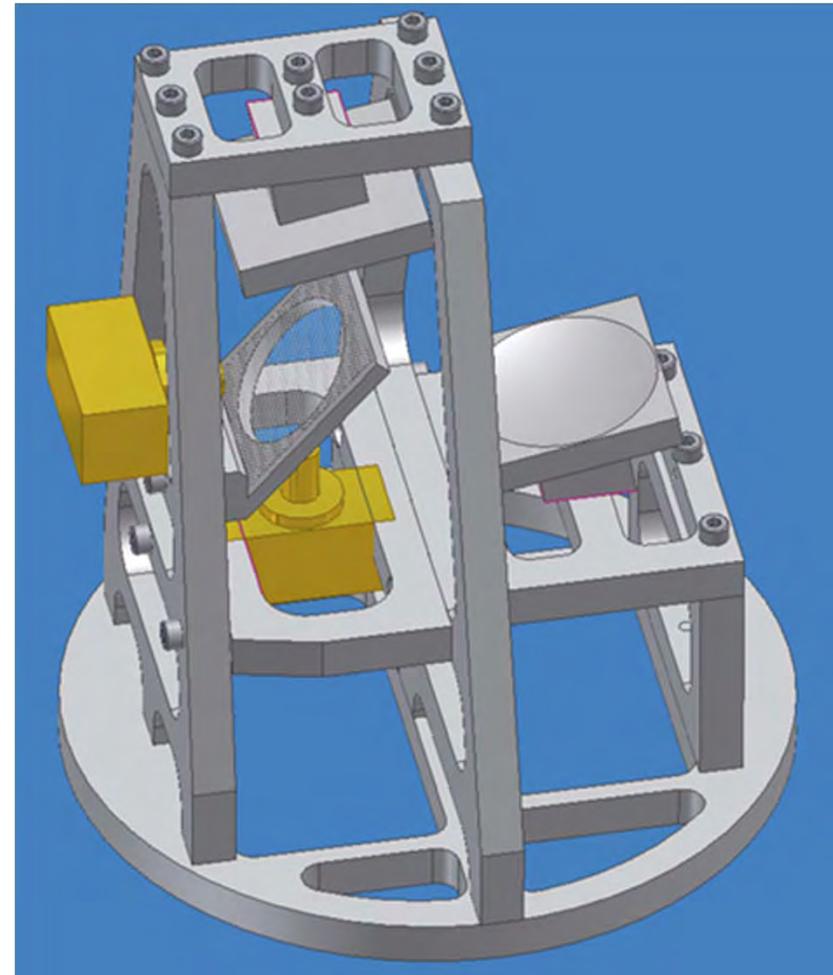
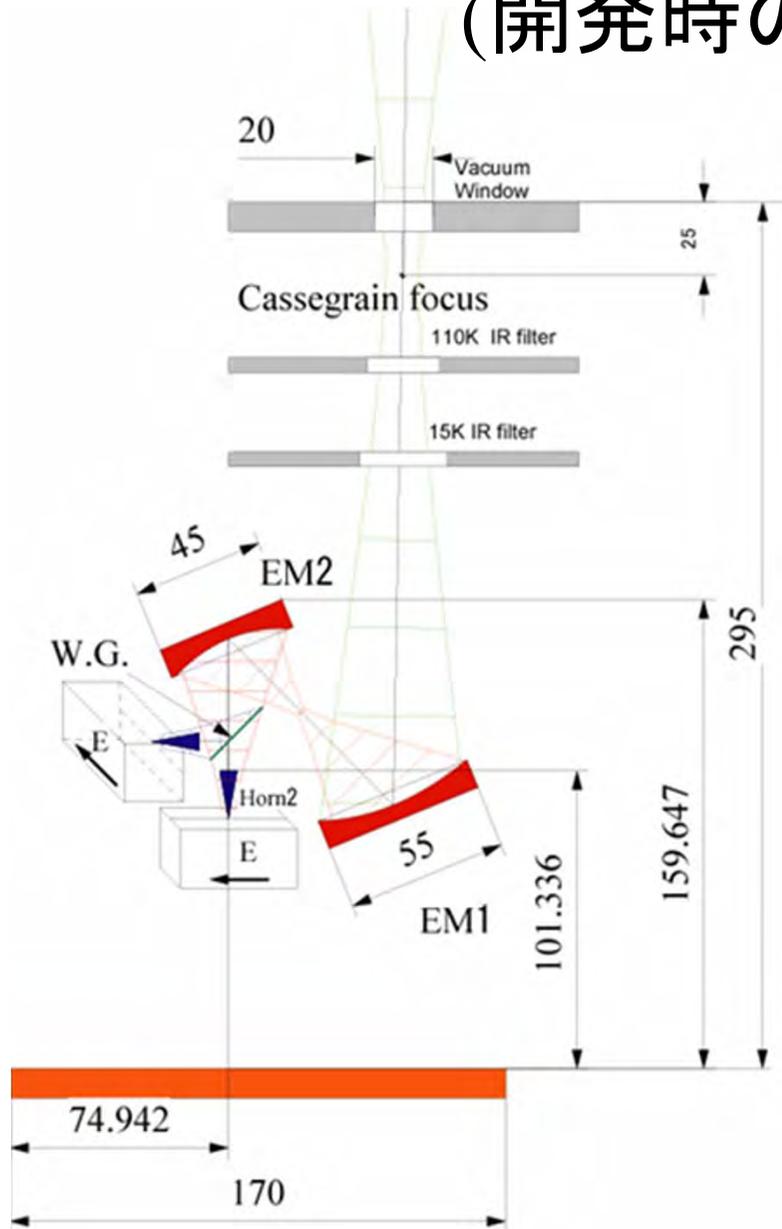


ALMAサイト

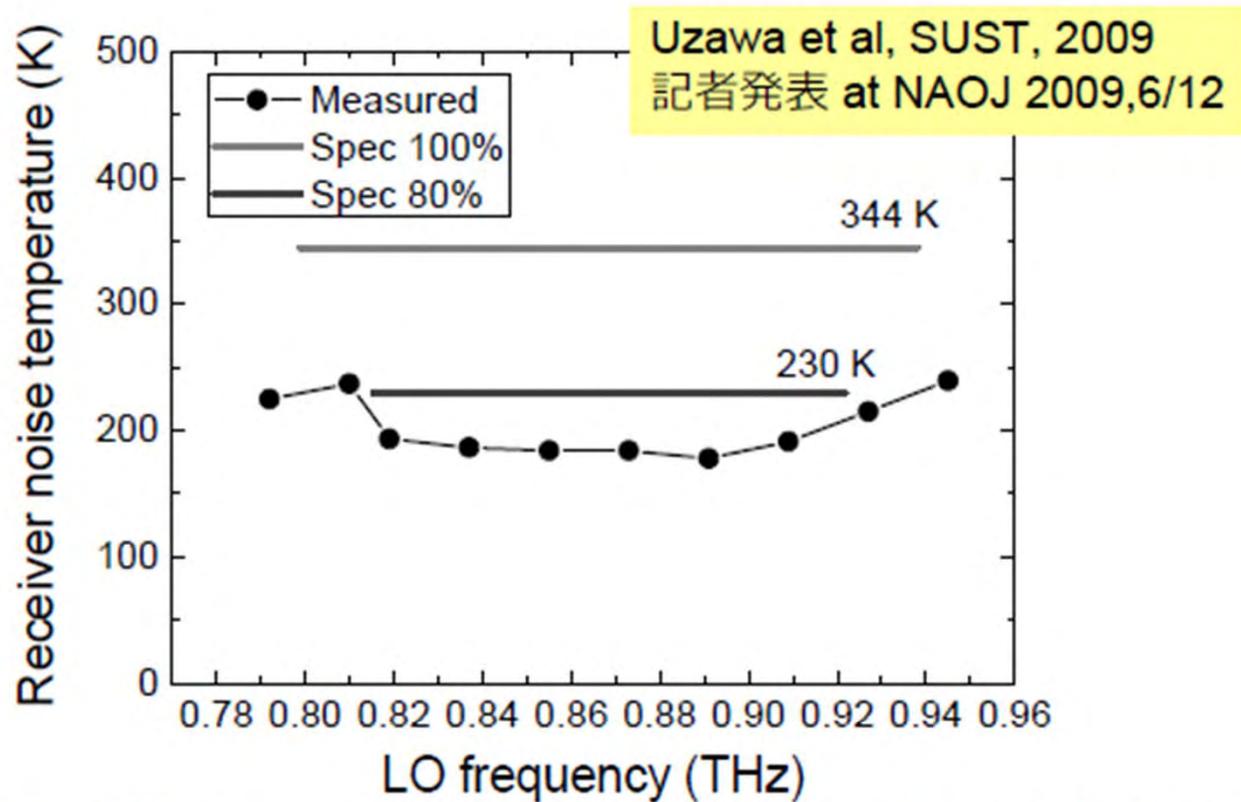


©国立天文台

ALMA Band10 cartridge type receiver (開発時のデザイン例)

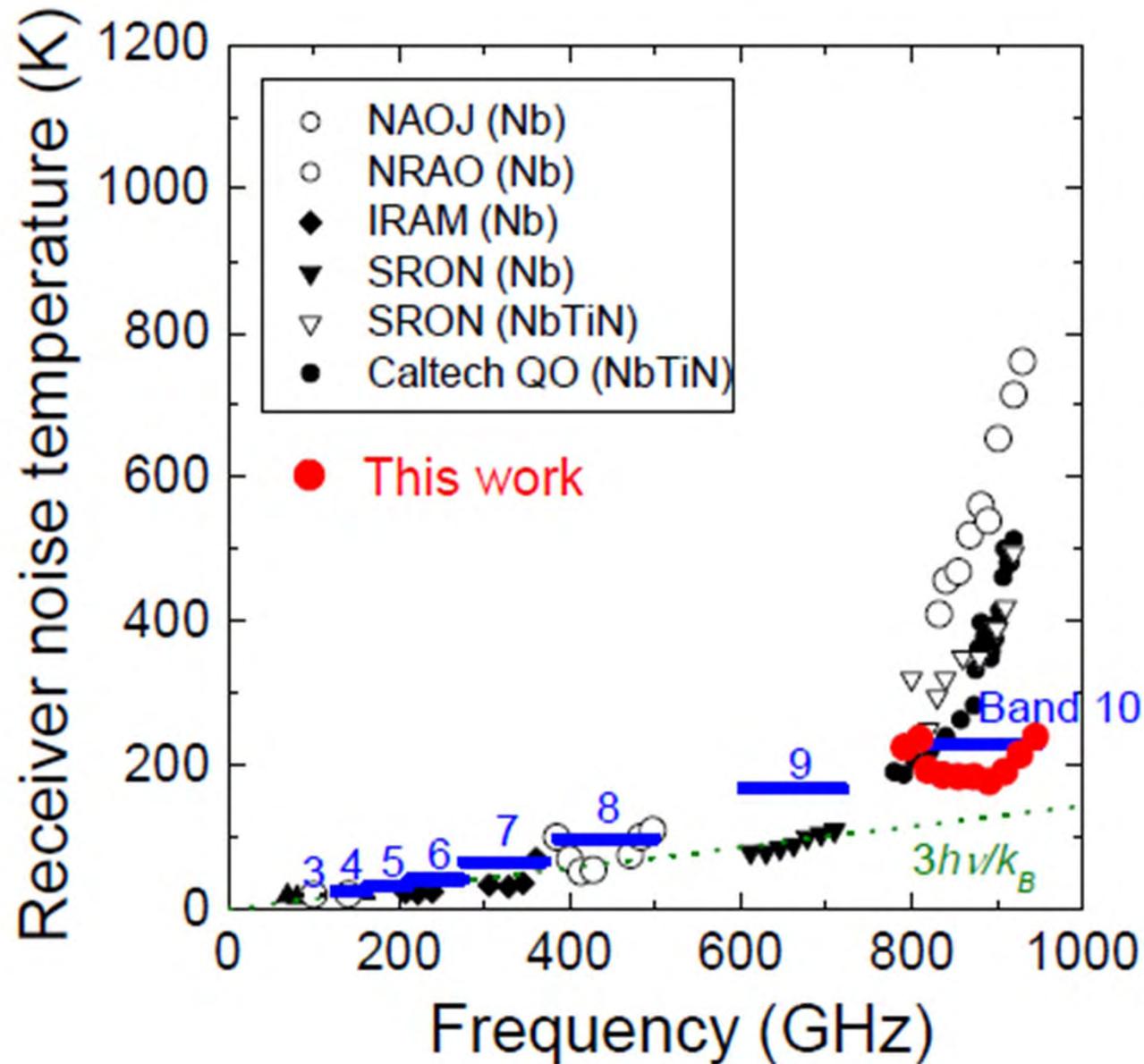


ALMA Band10 受信機雑音性能

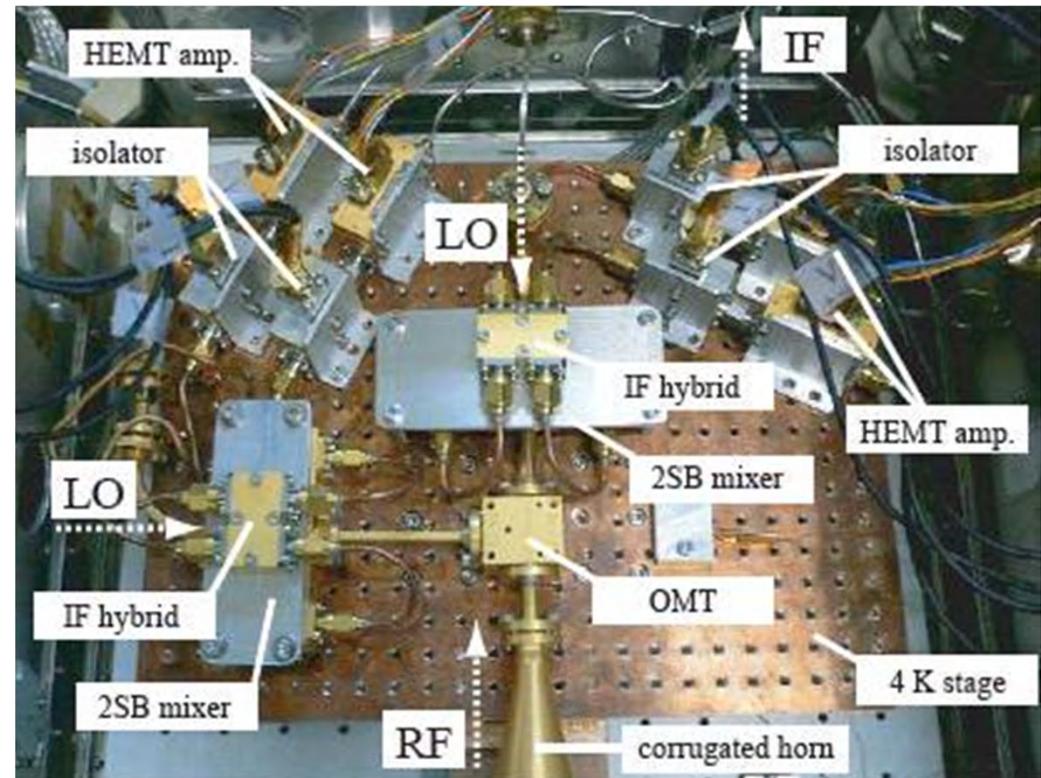
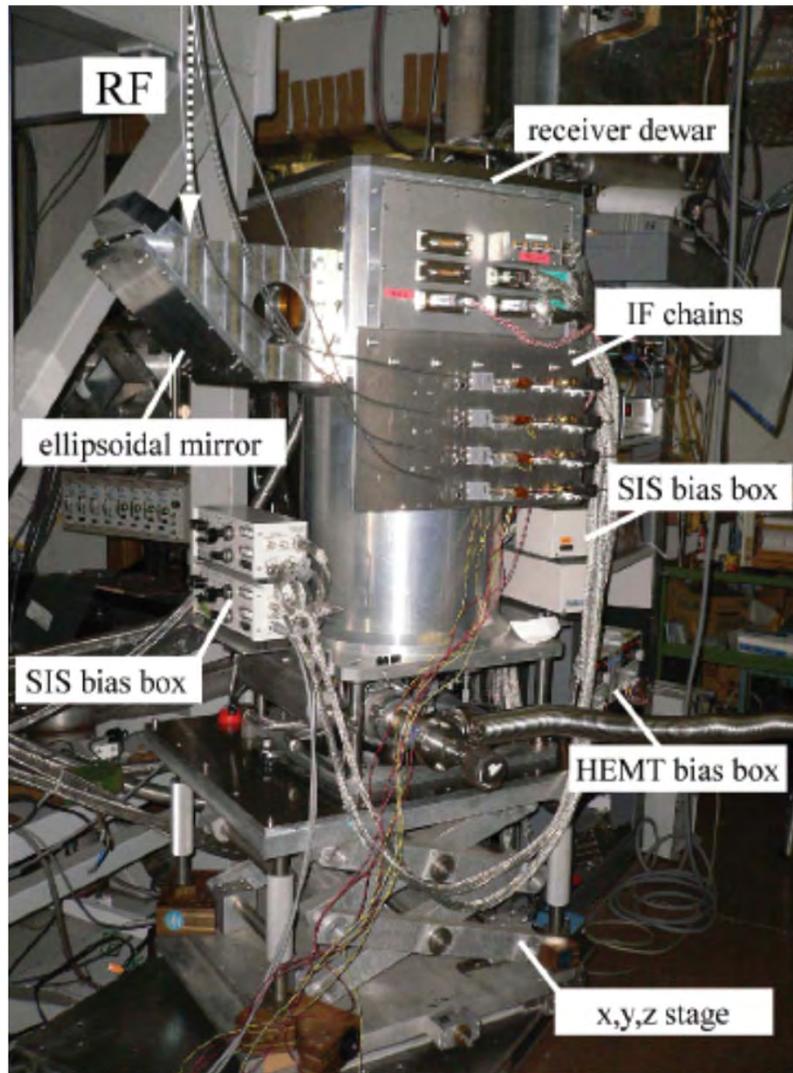


- 世界で始めてALMA Band 10の仕様を満たす受信機の開発に成功

ALMA Band10 受信機雑音比較

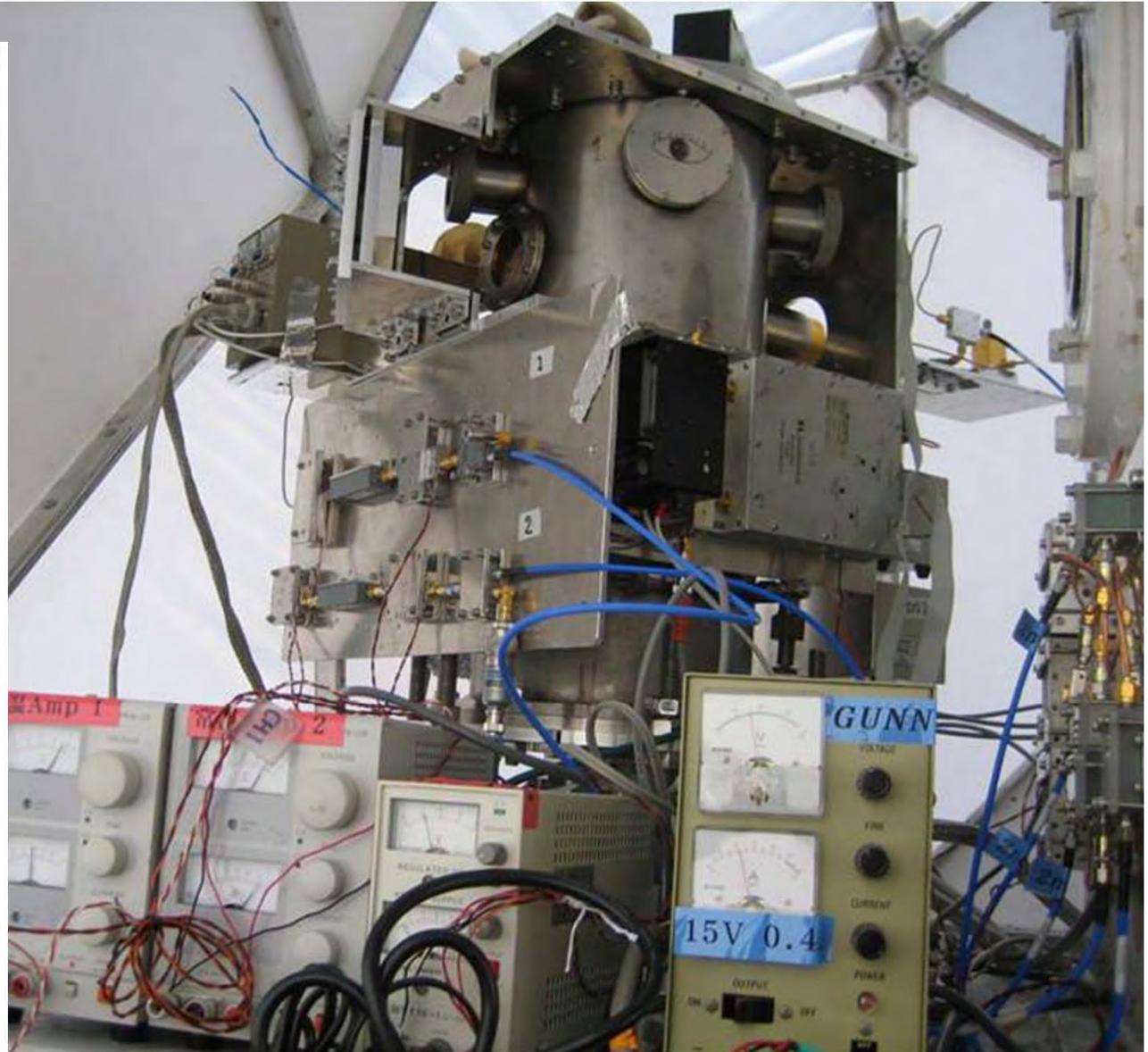
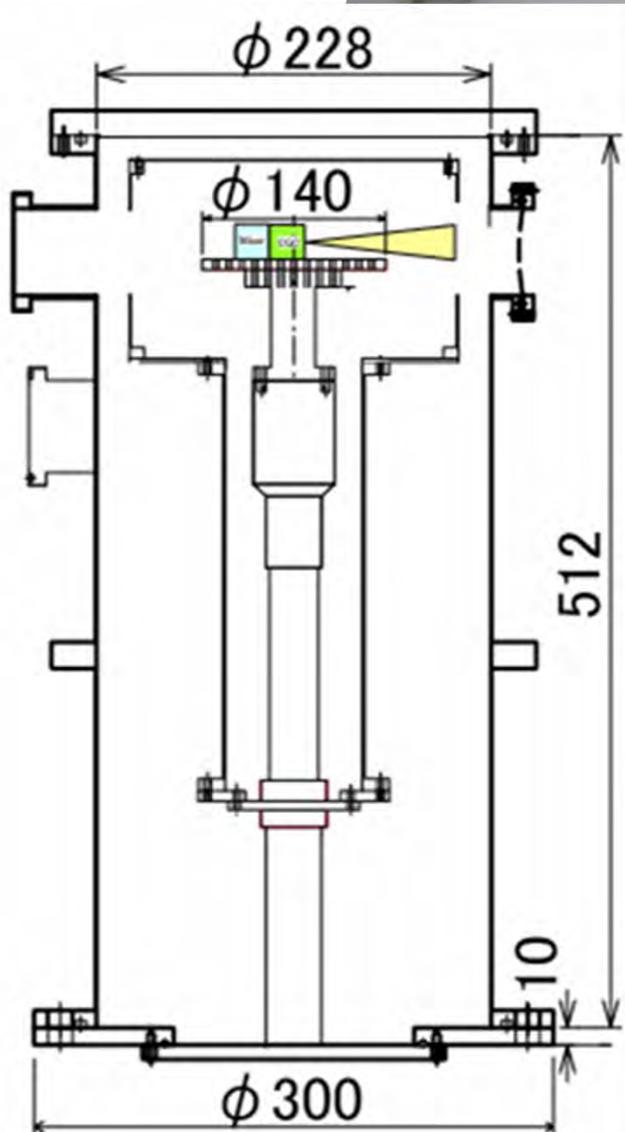


野辺山45m鏡搭載 100GHz帯2偏波2サイドバンド分離受信機(T100)

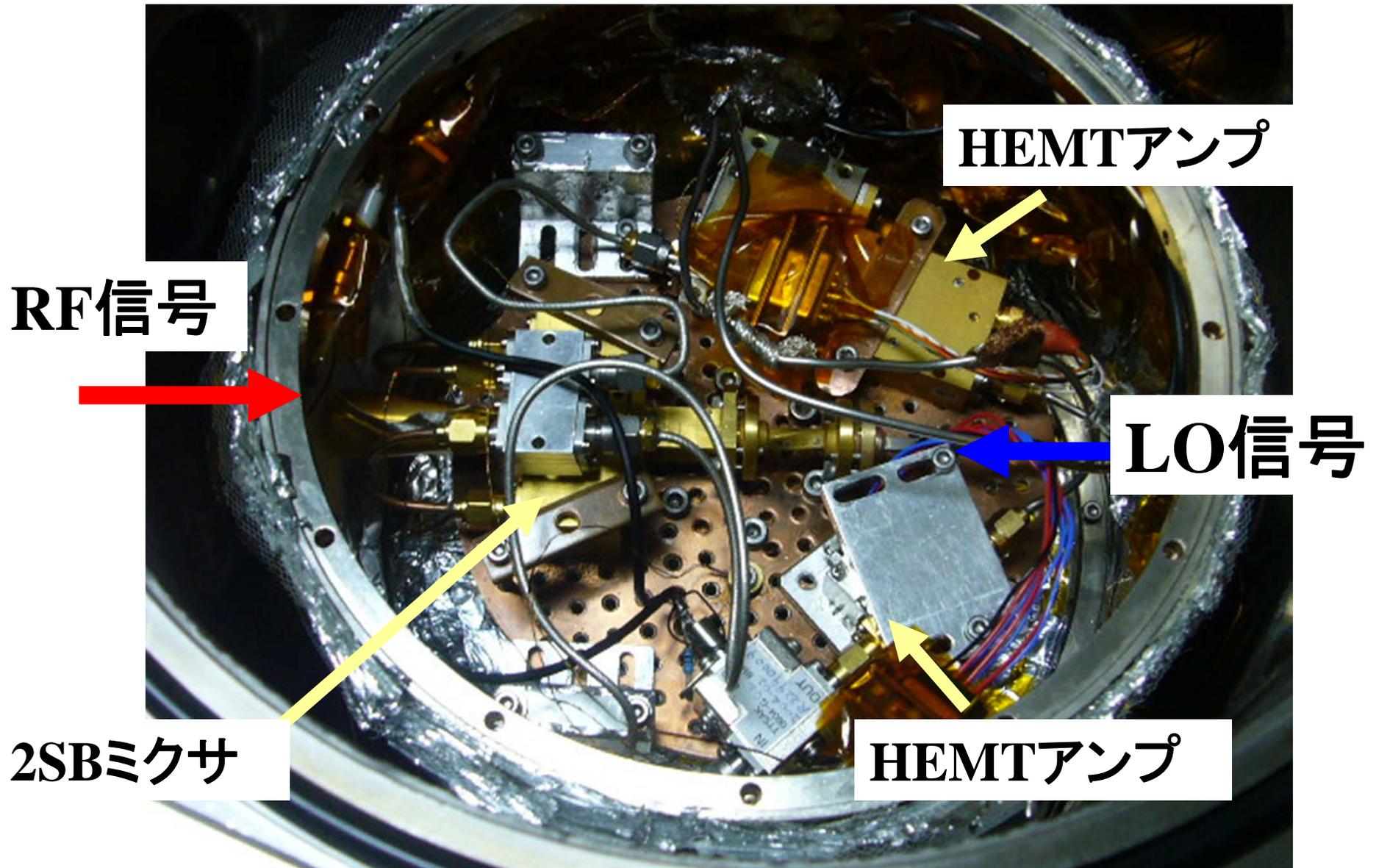


Nakajima et al.

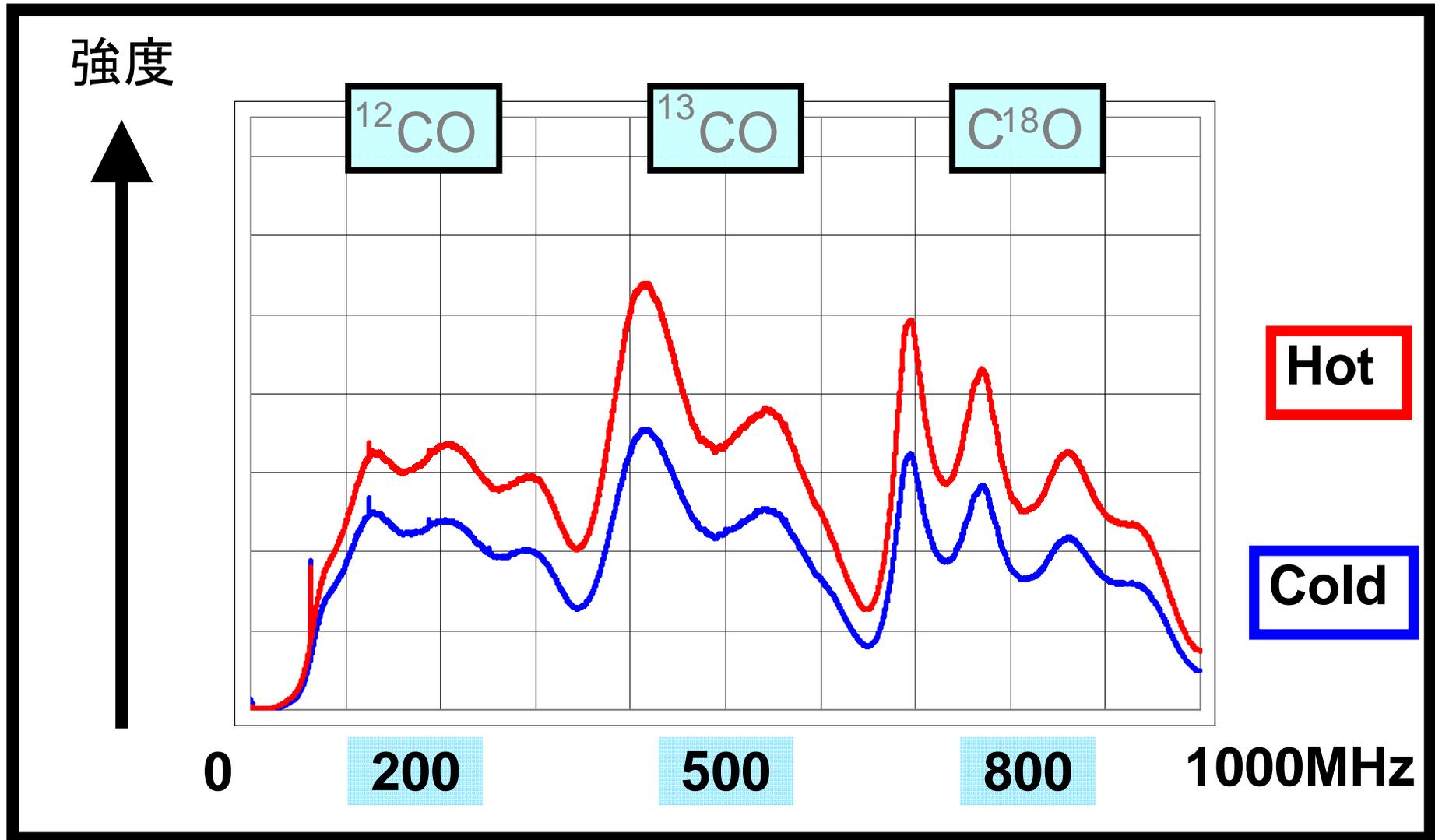
大阪府大1.85m電波望遠鏡搭載受信機



1.85m鏡に搭載されている超伝導SISミクサ受信機



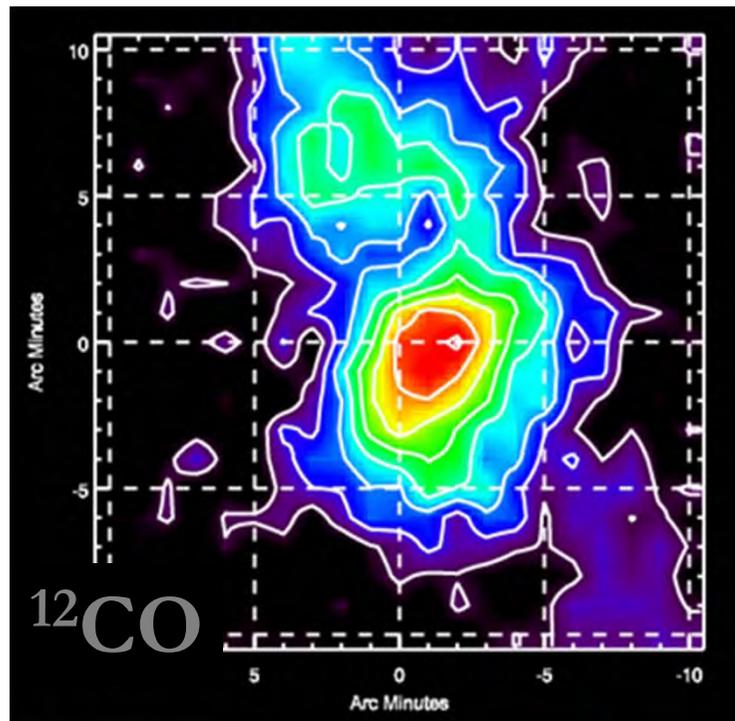
1.85m搭載デジタル分光計0-1GHzバンキアラ



2009年9月

1.85m電波望遠鏡の成果

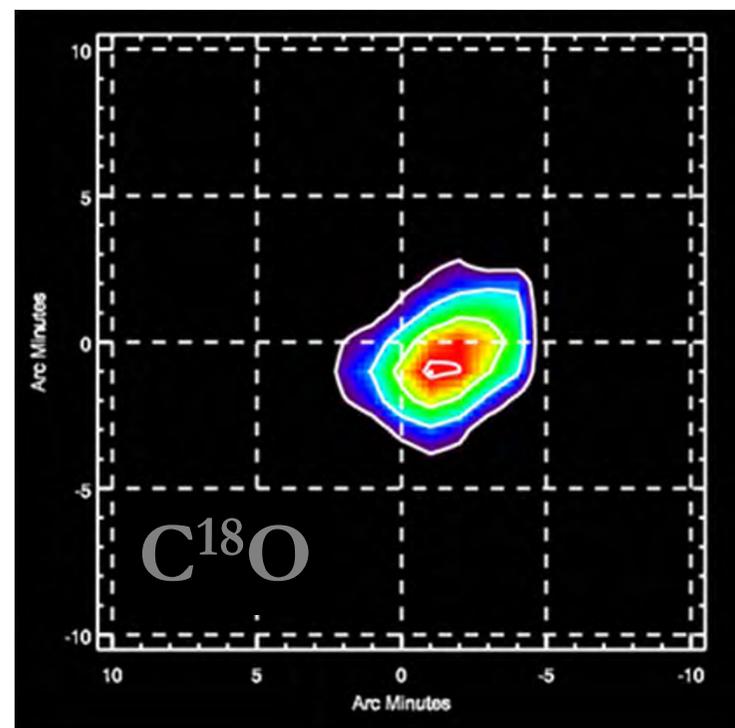
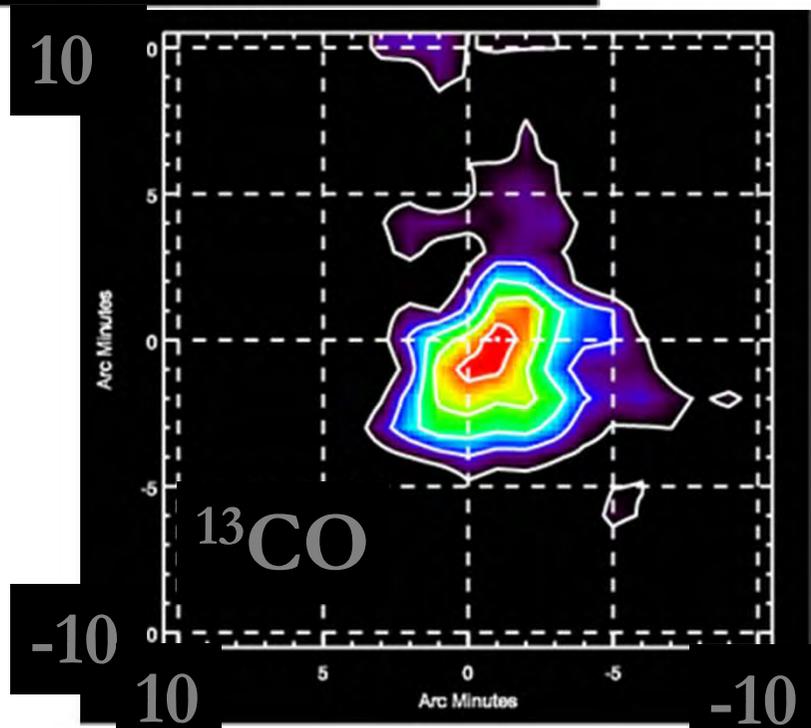
3ライン同時OTF観測@M17SW



$\tau \sim 0.8$

観測領域 20分角 \times 20分角

観測時間 40分+40分



まとめ

1. 0.1~1THz帯における天文学、大気観測は重要
2. 国内外で新観測装置の開発は進んでいる。
3. 光学系、偏波分離、受信機、HEMT等の高周波化