

プラズマ計測で必要とするミリ波・サブミリ波検出技術

徳沢季彦^{1,2}

(tokuzawa@nifs.ac.jp)

後藤勇樹¹、西浦正樹¹、辻村亨^{1,2}、久保伸¹、田中謙治¹

¹核融合科学研究所 ヘリカル研究部 高密度プラズマ物理研究系,
²総研大 物理科学研究所 核融合科学専攻

中部大学、九州大学、UC Davis, 福井大学、名古屋大学、東京大学



Contents

- はじめに
 - 核融合プラズマ計測におけるミリ波・サブミリ波利用
- “特に開発が期待されている” 技術
 - 高周波回路技術
 - 長時間連続運転できる安定な光源
 - その他：最適アレイ配置、低雑音ミキサ、真空中で使える集光光学系、Q値の高いノッチフィルタ、etc.

ミリ波・サブミリ波は電子との相互作用を調べるのに“ちょうどよい”

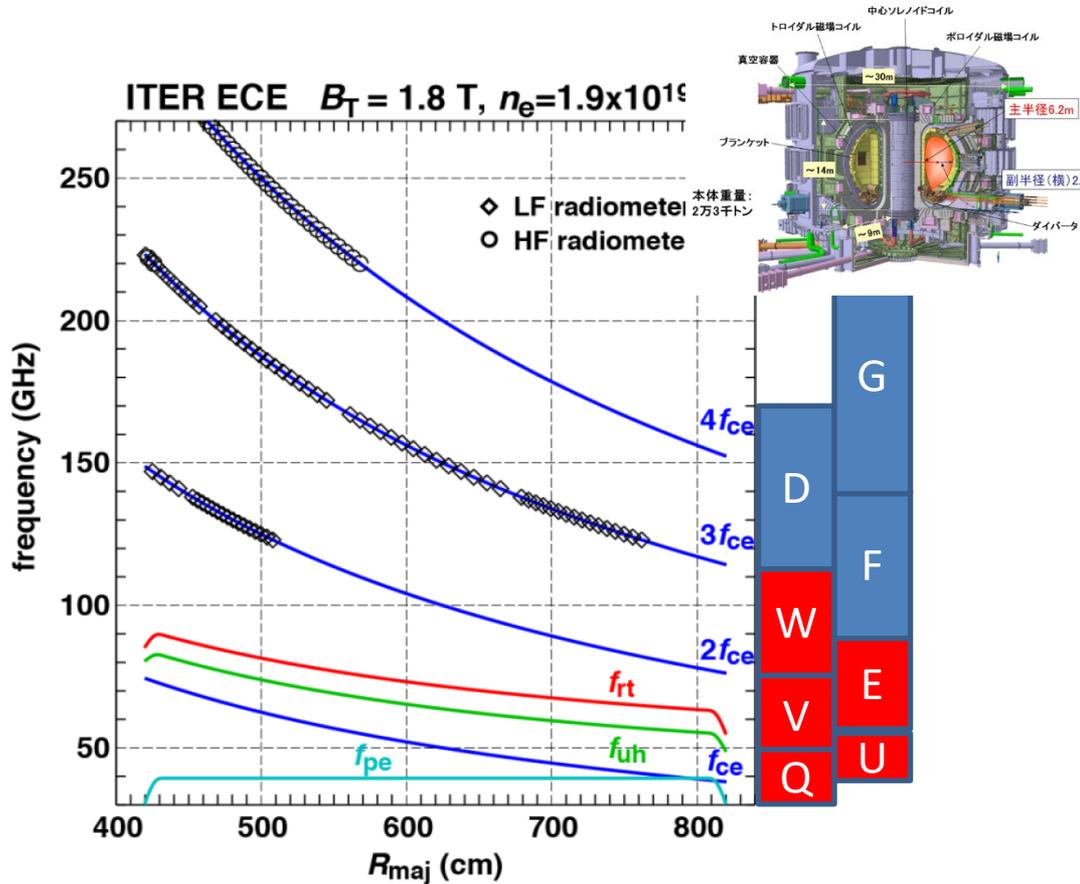


Fig. 3. Simulated frequencies and radial coverage by presently designed radiometers for 1.8 T ECE operation assuming recent METIS 0.5D kinetic profiles for Te and ne.

<https://doi.org/10.1051/epjconf/201920303003>

電子プラズマ振動数:

$$f_{pe} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}}$$

電子サイクロトロン周波数:

$$f_{ce} = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{m_e}$$

放射強度:

$$I_w = \frac{\hbar \omega^3}{8\pi^3 c^2} \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} \approx \frac{\omega^2 k_B T}{8\pi^3 c^2}$$

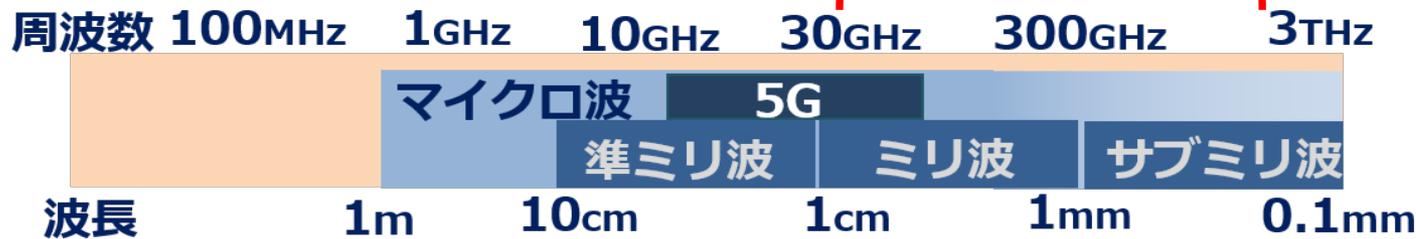
右回りカットオフ周波数:

$$f_r = \sqrt{\left(\frac{f_{ce}}{2}\right)^2 + (f_{pe})^2} + \frac{f_{ce}}{2}$$

→ 電子密度、電子温度、その場磁場、乱流・揺動等の計測への適用が進んできた

観測周波数レンジは電波望遠鏡と同じ辺

アルマ望遠鏡(31-950GHz)



ECE : 30 - 1000GHz (FTS)

核融合プラズマ計測

干渉計: 70GHz, 140GHz, 300GHz, 500GHz, 1THz, 3THz, 30THz

他に、反射計、散乱計、偏光計、...

アルマ望遠鏡

Band 10 receiver



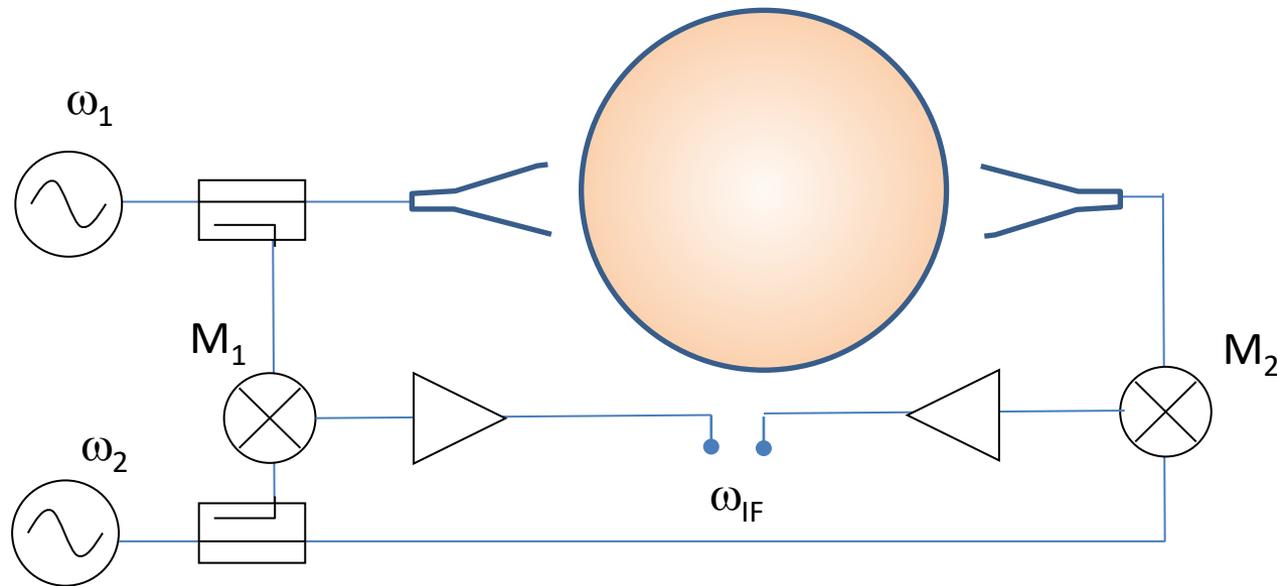
	核融合	天文
時間応答	高	低
受信器 雑音温度	高	低

Band	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lowest Freq. (GHz)	30	67	84	125	163	211	252	385	602	787
Center Freq. (GHz)	35	79	100	144	187	243	323	442	660	869
Highest Freq. (GHz)	40	90	116	163	211	275	370	500	720	950
Fractional Bandwidth	0.29	0.29	0.32	0.26	0.26	0.26	0.29	0.26	0.18	0.19
Trx (DSB) over 80% (K)	7.5	14	17	23.5	30	37.5	66.5	90.5	168	230
Institute	TBD	TBD	HIA	NAOJ	CUT	NRAO	IRAM	NAOJ	SRON	NAOJ

Band10:ALMAの最高周波数帯

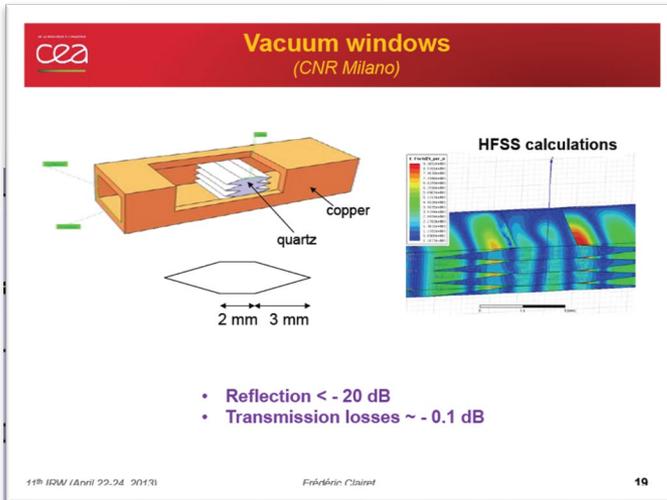
<https://alma-telescope.jp/news/press/mt-06-2>

ミリ波コンポーネント



- 発振器 : ガンダイオード、シンセサイザ、レーザー
- ミキサー、ディテクタ
- アンプ : パワー、ローノイズ
- アンテナ : ホーン、パラボラ、カセグレン、フォグホーン、...
- 伝送路 : 導波管、コルゲート管、高周波ケーブル、基板
- フィルタ : バンドパス、ローパス、ハイパス、ノッチ
- 偏光子 その他いろいろ....

ITERでのミリ波計測コンポーネント(案例)



計測器とプラズマまでを60mのコルゲート導波管で伝送
途中に、真空窓、中性子線保護用回廊などを挟む

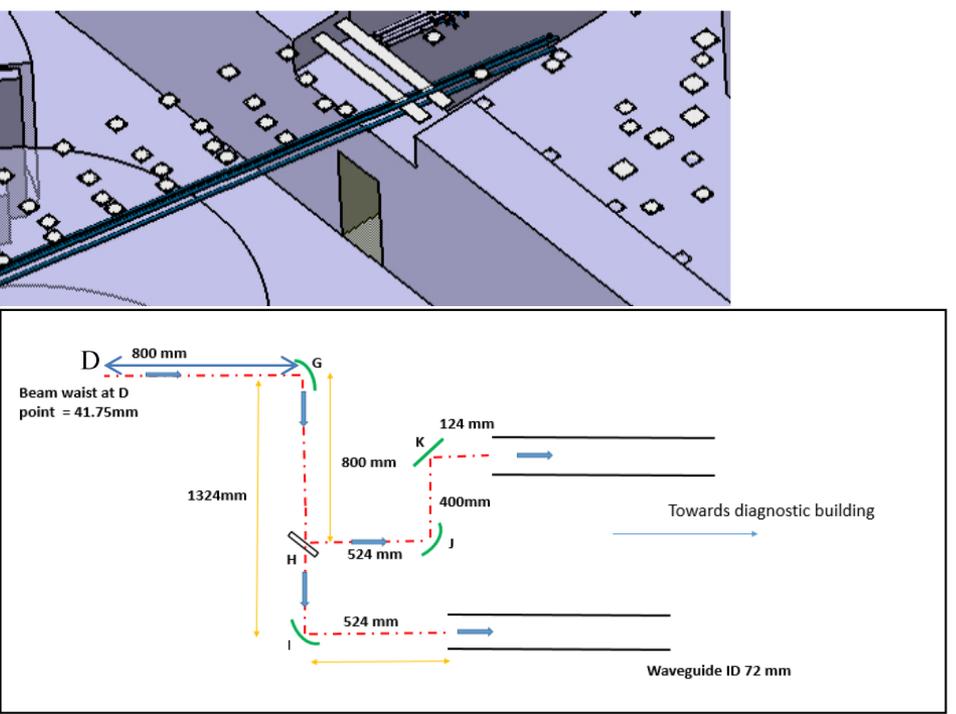
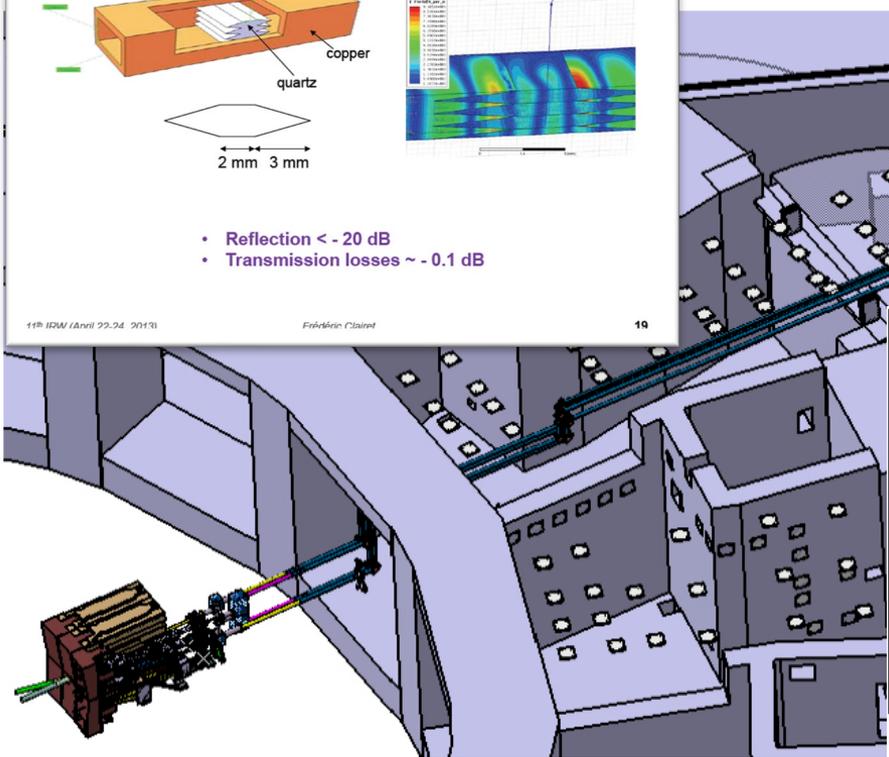


Figure 1. ECE transmission line layout at ITER

doi :10.1088/1742-6596/823/1/012033

期待：高周波回路技術

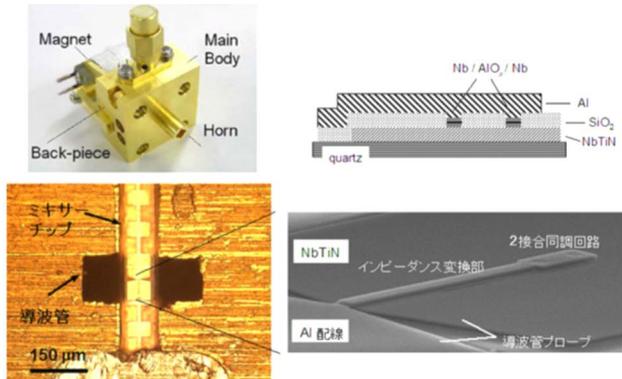
alma-telescope.jp/news/press/mt-06-2



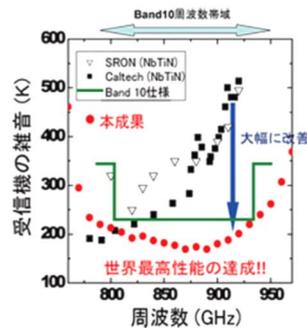
ALMA

アルマ望遠鏡とは [トピックス](#) [ギャラリー](#) [もっと知る](#)

[研究者向けサイト](#)



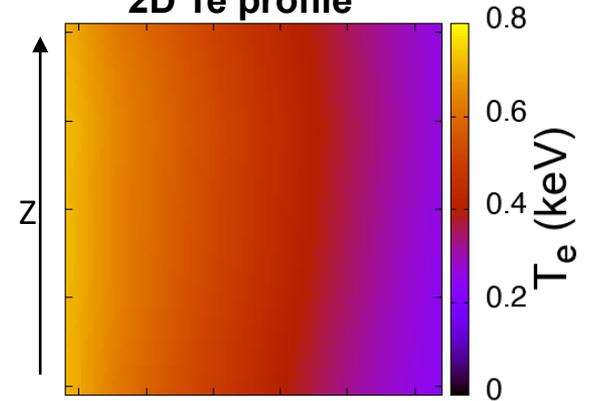
(図2) 窒化ニオブチタン (NbTiN) を用いたサブミリ波 (テラヘルツ) 受信機システム (左上)。NbTiN を用いた超伝導集積回路部の電子顕微鏡写真 (右下) と断面構造図 (右上)。



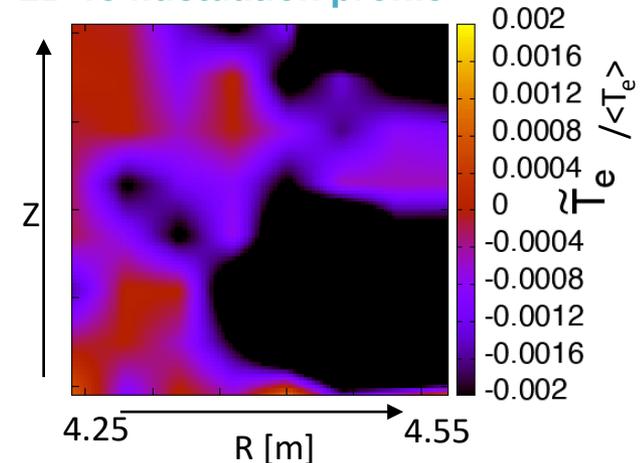
(図3) 750-950 GHz 帯受信機でのこれまでの世界最高性能 (動作温度4Kにおいて) はカルフォルニア工科大学やヨーロッパを代表する研究所であるSRON (Netherlands Institute for Space Research) が開発したものであったが、本研究チームが大幅に性能を向上することに成功した。

核融合プラズマ中の電子温度とその揺らぎの2次元分布

2D T_e profile

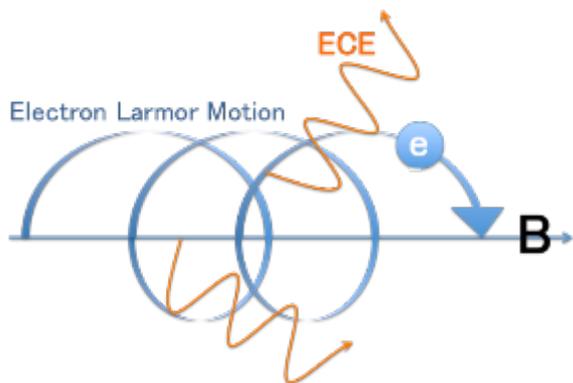


2D T_e fluctuation profile



電子サイクロトロン放射イメージング

Electron Cyclotron Emission (ECE)

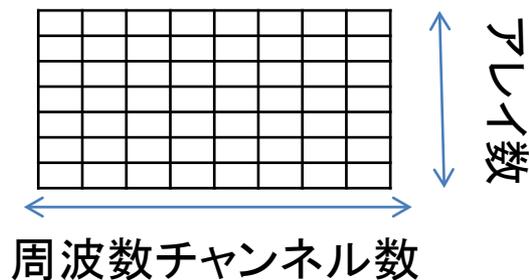
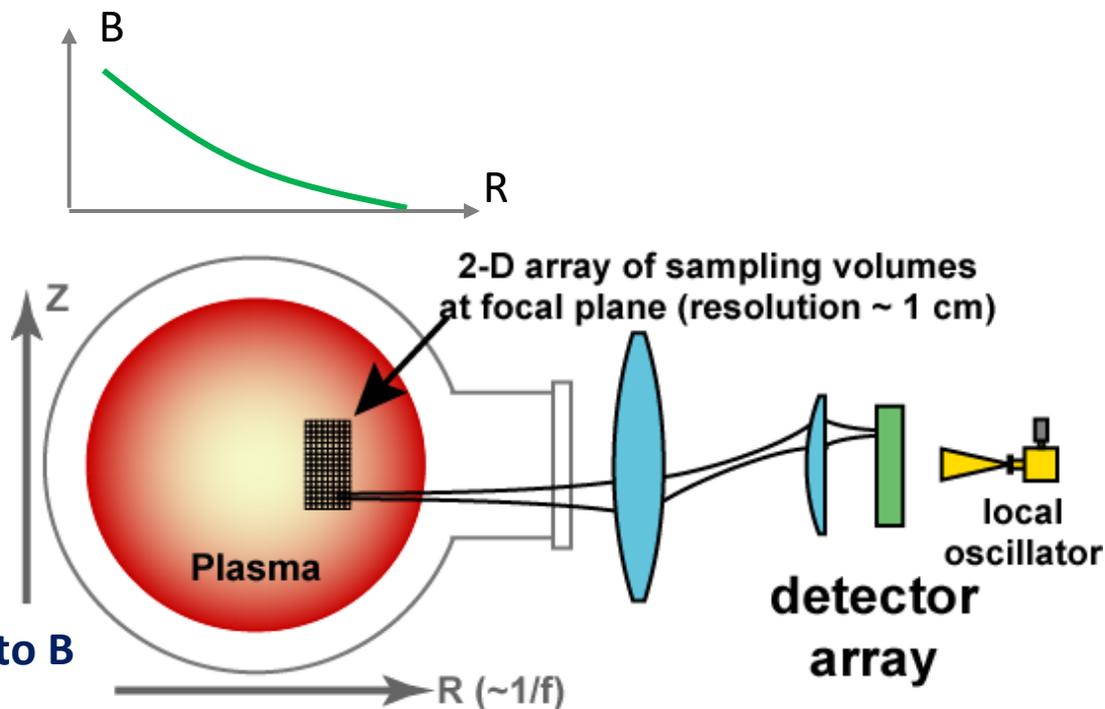


- ECE frequency ω_{ce} is proportional to B

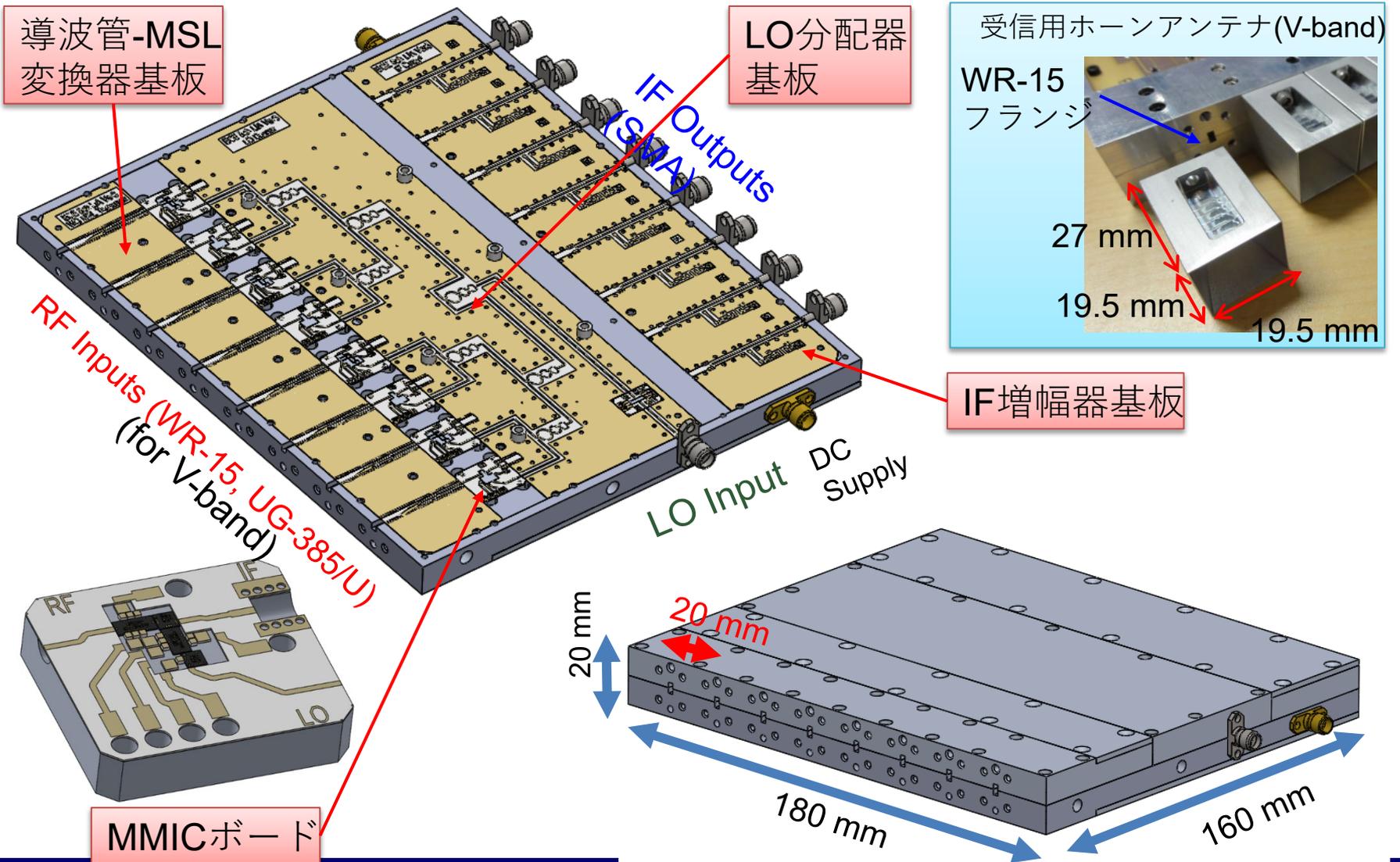
$$\omega_{ce} = \frac{eB}{m_e} = 2\pi \times 28 \times 10^9 B$$

- ECE intensity is proportional to the electron temperature

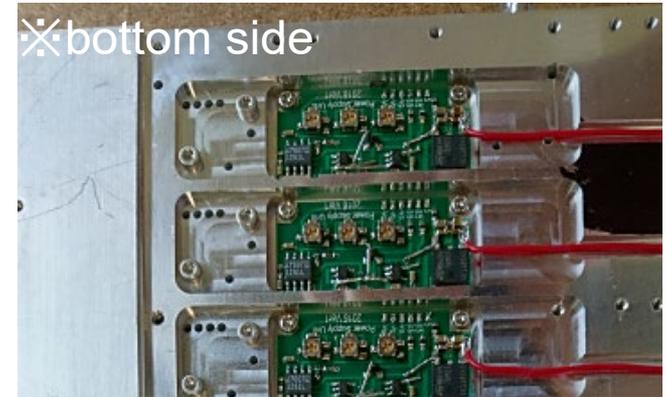
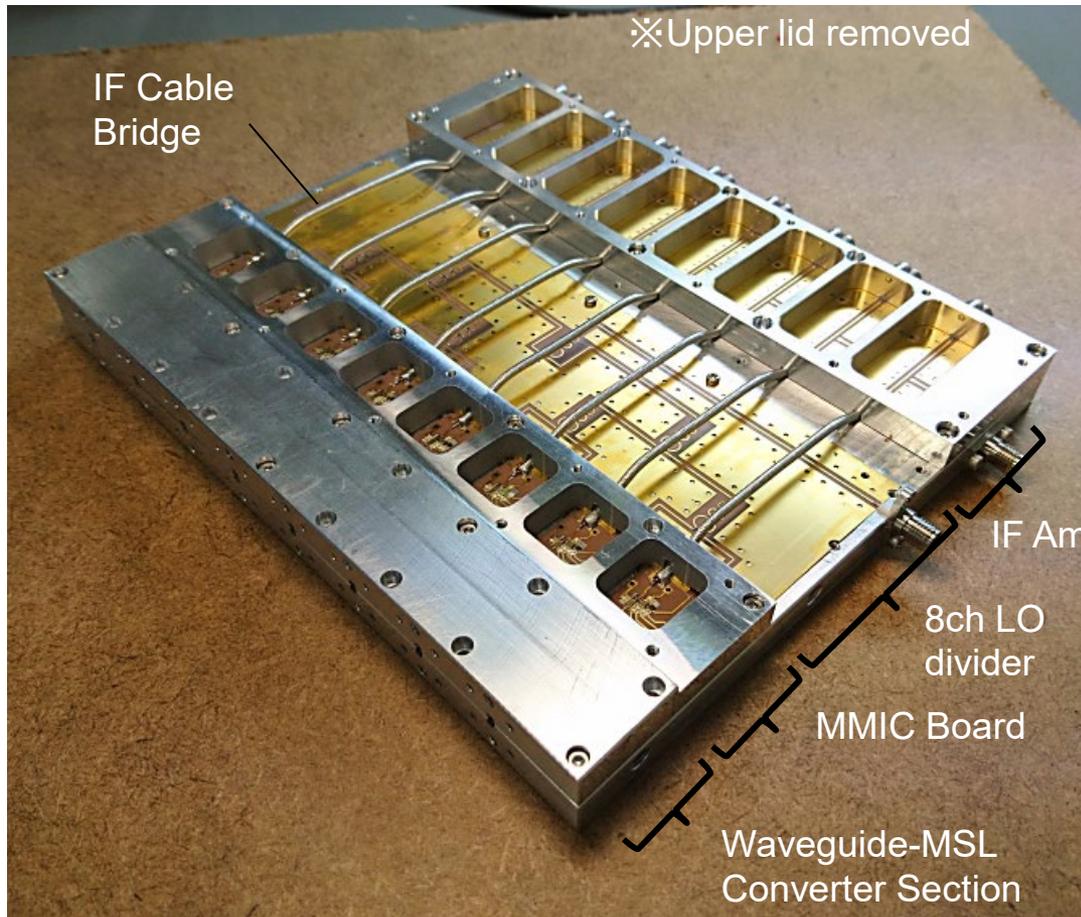
$$I_w = \frac{\hbar \omega^3}{8\pi^3 c^2} \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} \approx \frac{\omega^2 k_B T}{8\pi^3 c^2}$$



アンテナアレイ



アンテナアレイ

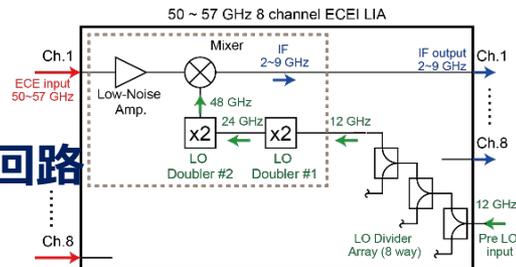


NIFS製ミリ波カメラの開発

MMIC (monolithic microwave integrated circuit)

能動素子や受動素子を一体化したマイクロ波・ミリ波用集積回路
(アンプ、ミキサ、逓倍器、発振器、送受信モジュール等)

※50 GHz以上の素子はベアチップ (ダイ) 形態



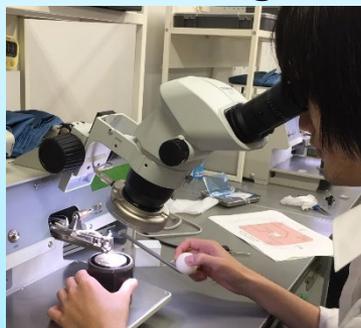
製作工程

Plasma Cleaning



Diener Electronics, FEMTO

Die Bonding



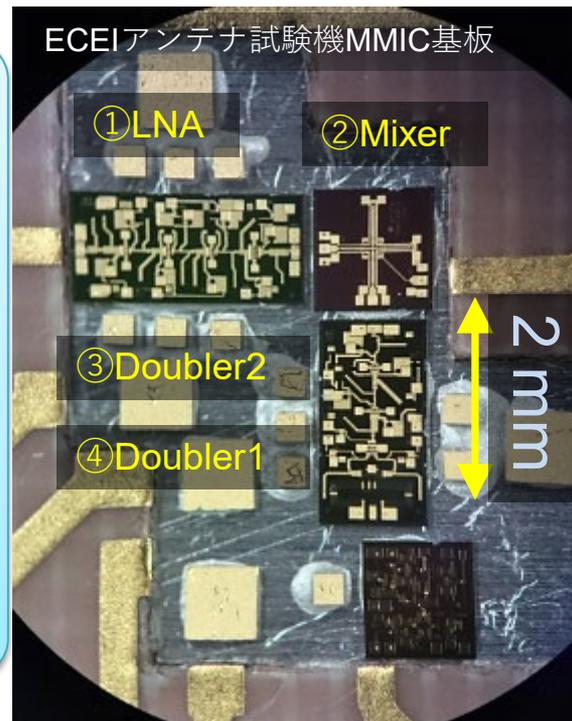
Die Bonder
Westbond, model 7200CR

Wire Bonding



Wire Bonder
Westbond, model 7476D

ECEIアンテナ試験機MMIC基板



現在、Q, V, (W)-bandに対応 → より高周波数帯域へ

期待：高周波回路技術

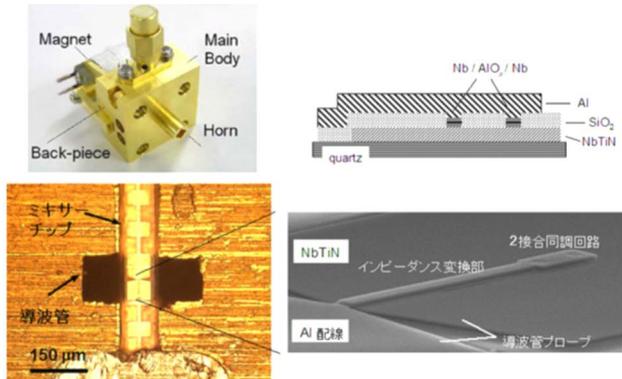
alma-telescope.jp/news/press/mt-06-2



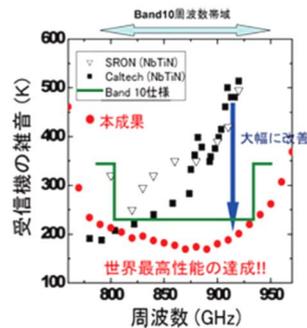
ALMA

アルマ望遠鏡とは [トピックス](#) [ギャラリー](#) [もっと知る](#)

[研究者向けサイト](#)



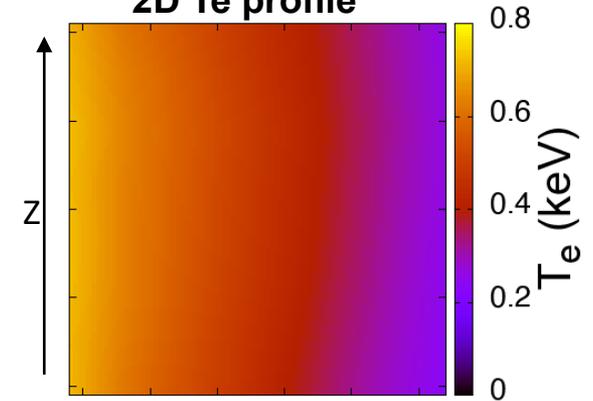
(図2) 窒化ニオブチタン(NbTiN)を用いたサブミリ波(テラヘルツ)受信機システム(左上)。NbTiNを用いた超伝導集積回路部の電子顕微鏡写真(右下)と断面構造図(右上)。



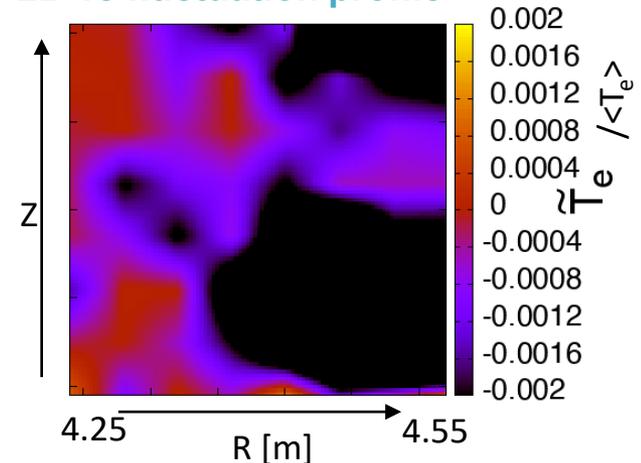
(図3) 750-950 GHz帯受信機でのこれまでの世界最高性能(動作温度4Kにおいて)はカルフォルニア工科大学やヨーロッパを代表する研究所であるSRON (Netherlands Institute for Space Research)が開発したものであったが、本研究チームが大幅に性能を向上することに成功した。

核融合プラズマ中の電子温度とその揺らぎの2次元分布

2D T_e profile



2D T_e fluctuation profile



期待：長時間連続運転できる安定な光源

UTC-PDを用いたフォトニックローカル

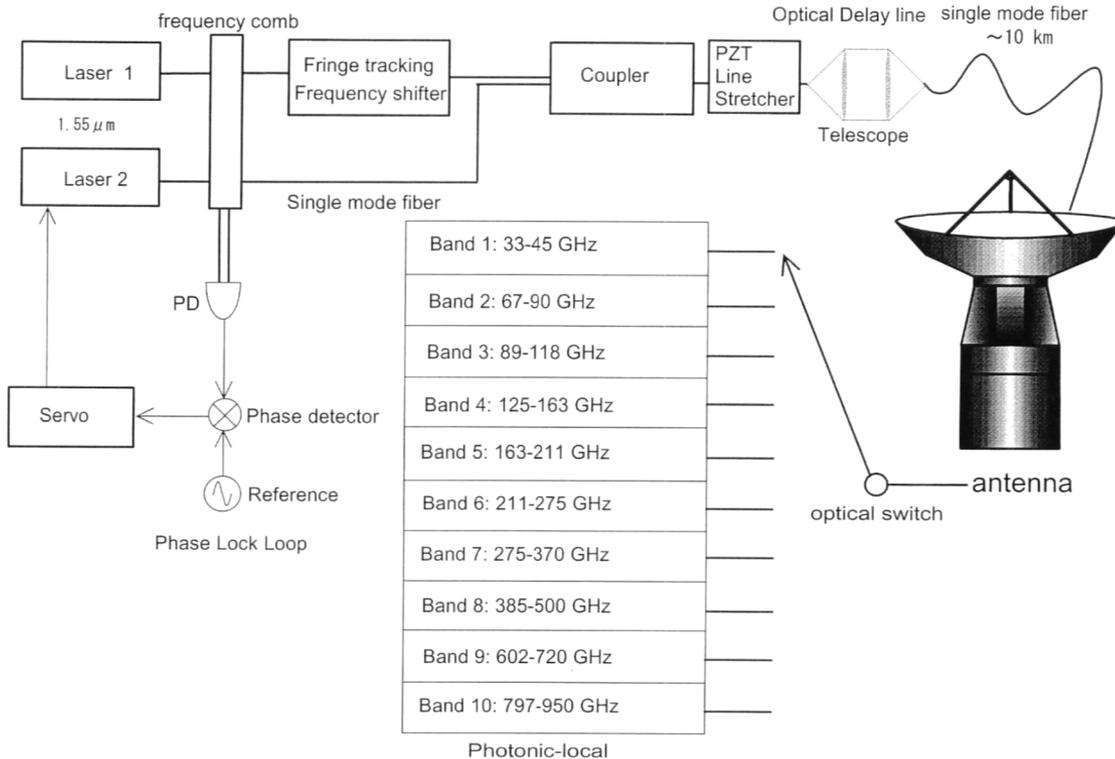


図1 ALMA フォトニックローカルシステムの模式図。使用レーザー波長は $1.55 \mu\text{m}$ 。フォトニックローカルの周波数帯域は 33~950 GHz。

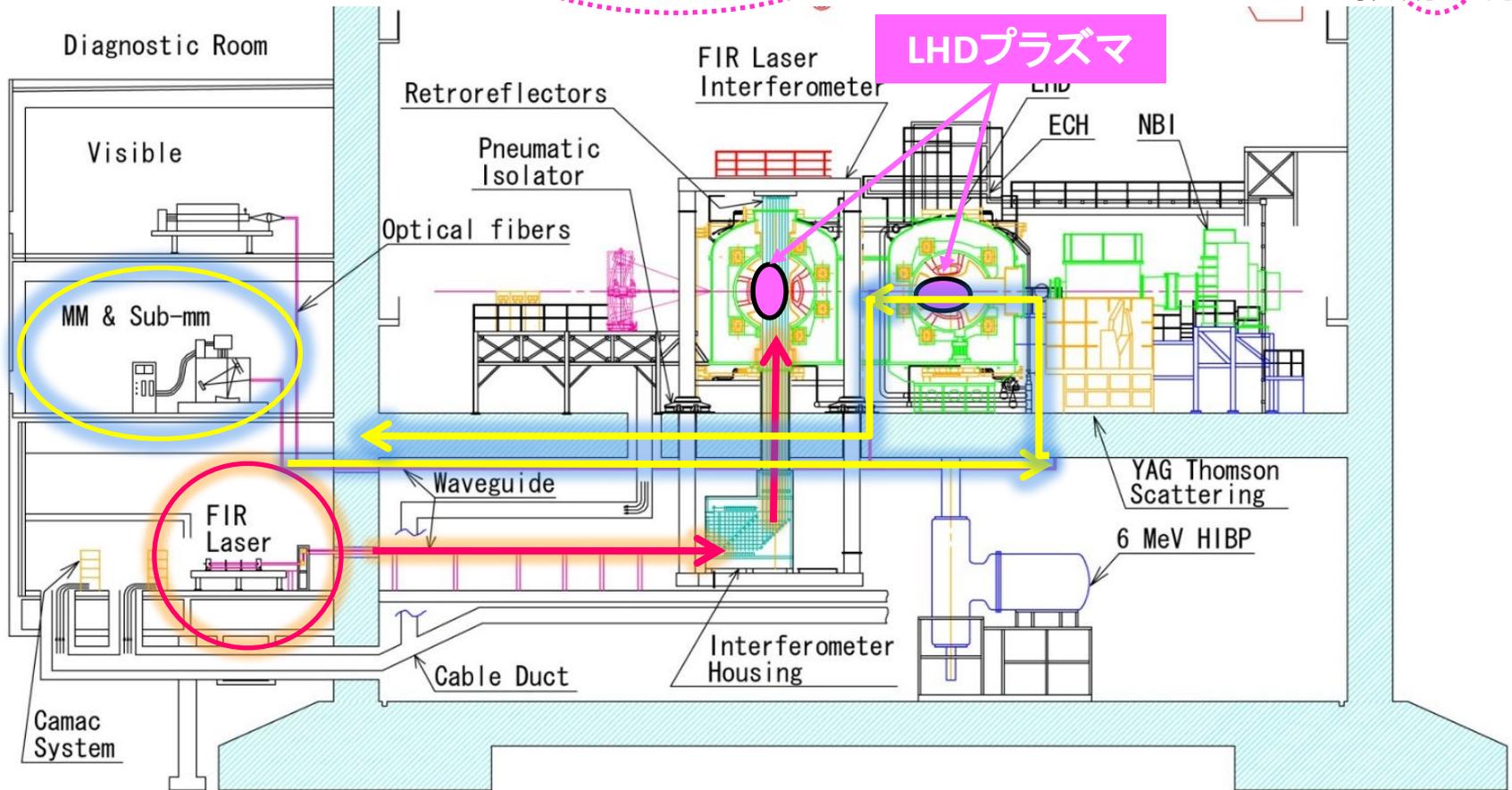
将来の核融合発電炉
に向けて、
24時間、365日運転で
きる光源
が必要

<https://annex.jsap.or.jp/photonics/kogaku/public/30-08-kaisetsu1.pdf>

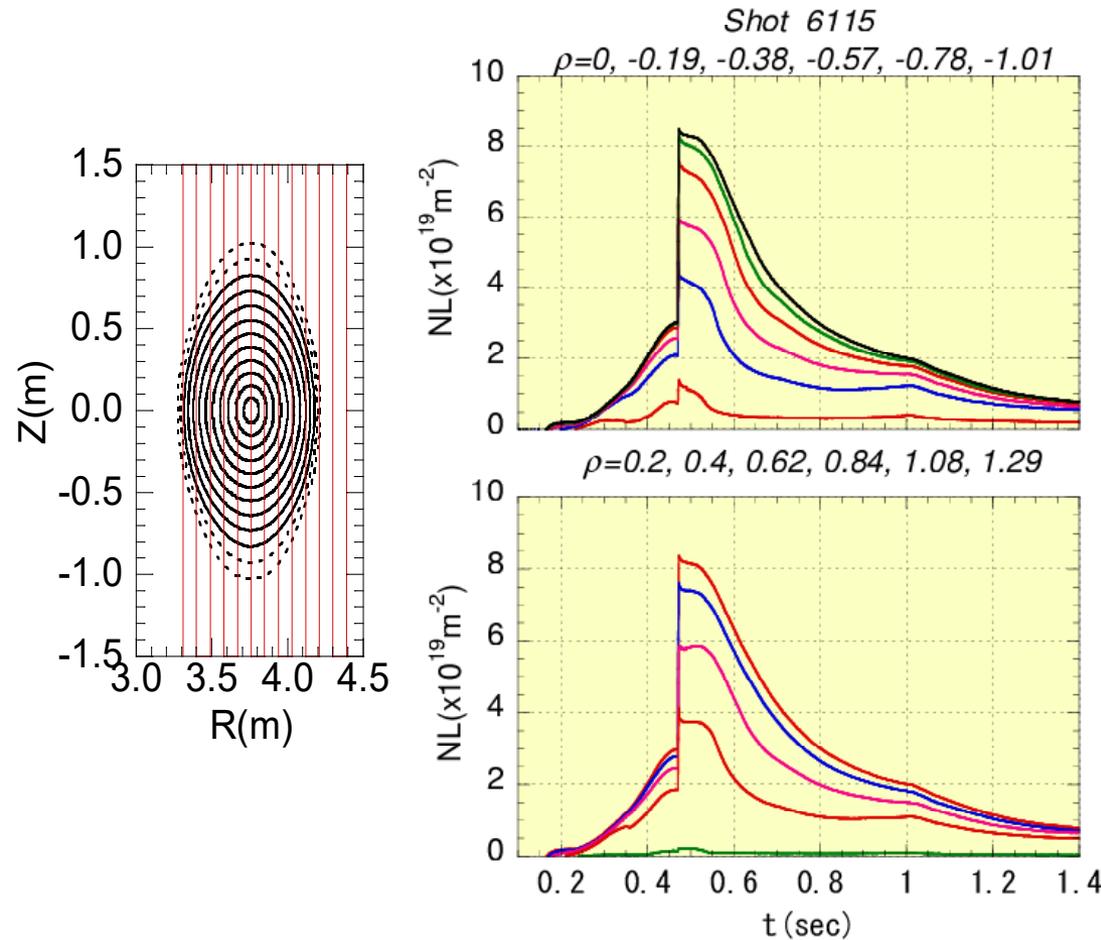
Interferometers in LHD

$$\Delta\phi = 2.8 \times 10^{-15} \lambda \int_{Y_1}^{Y_2} n_e(r) dy + \frac{3.9 \times 10^{-29}}{\lambda} \int_{Y_1}^{Y_2} n_n(r) dy + \frac{2\pi\Delta L}{\lambda}$$

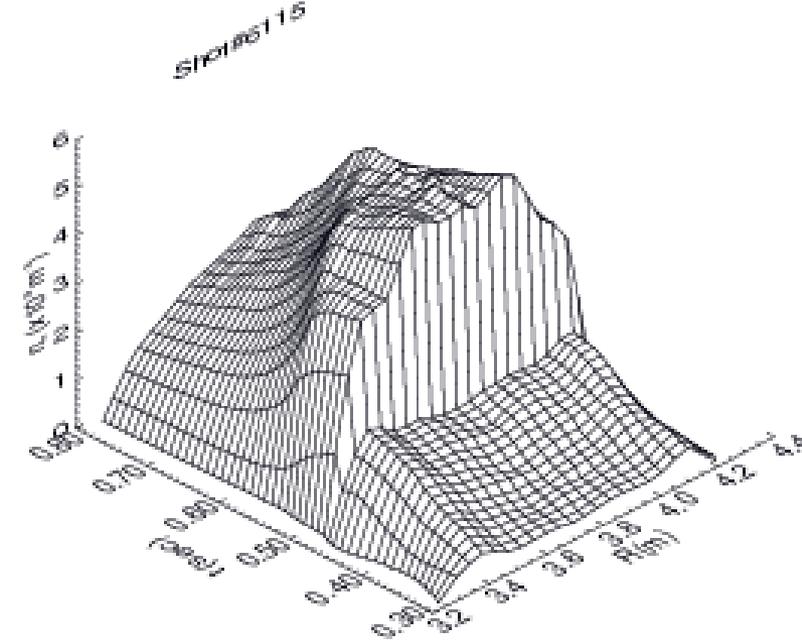
振動成分



電子密度の再構成分布の例



Density profile



Change of Density profiles after single pellet injection. $R_{ax}=3.75m$, $B_t=1.5T$, NBI heated

干渉法による密度計測の‘超’長時間測定における課題

◆ 振動(長周期振動)対策

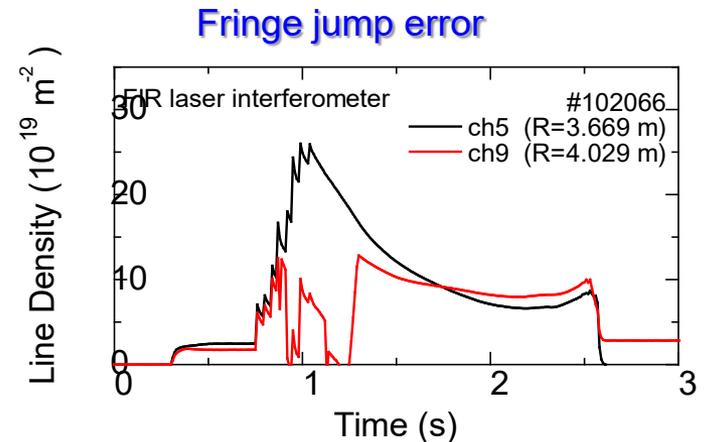
- 除振架台
- 2波長光源による補正

◆ Phase jump対策

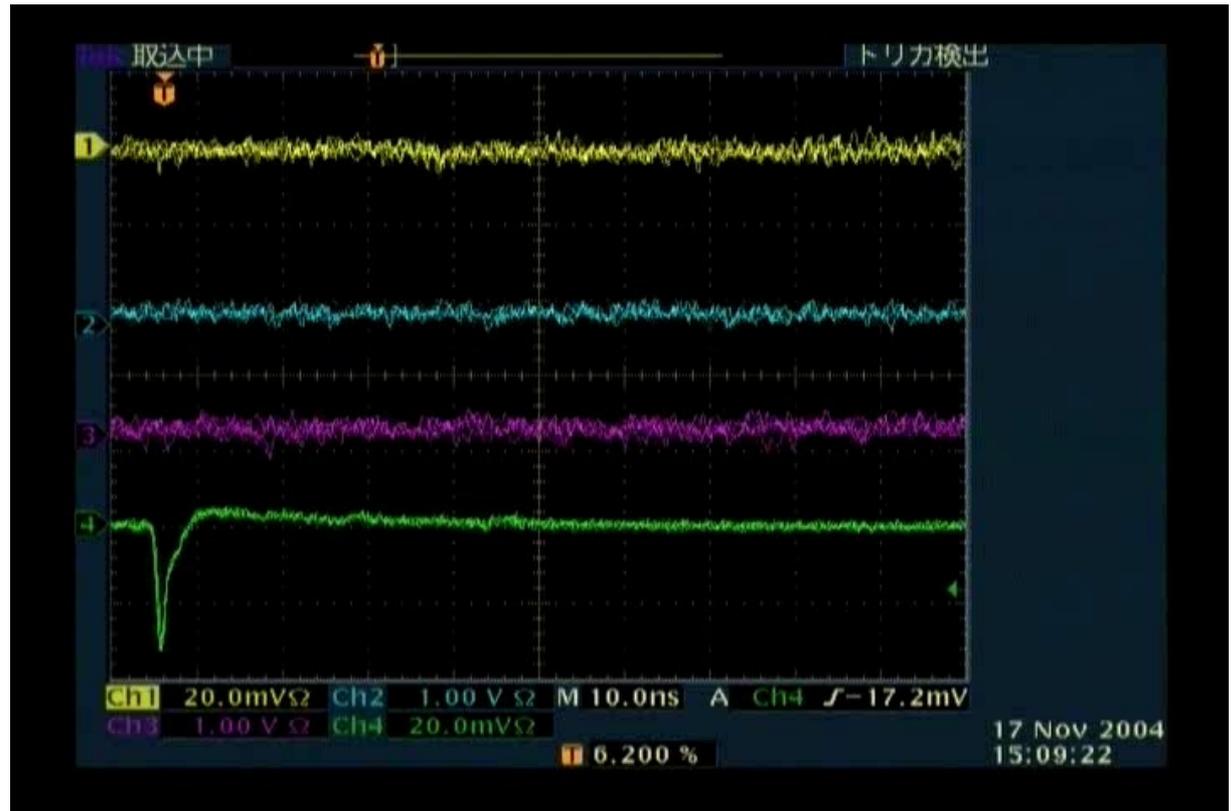
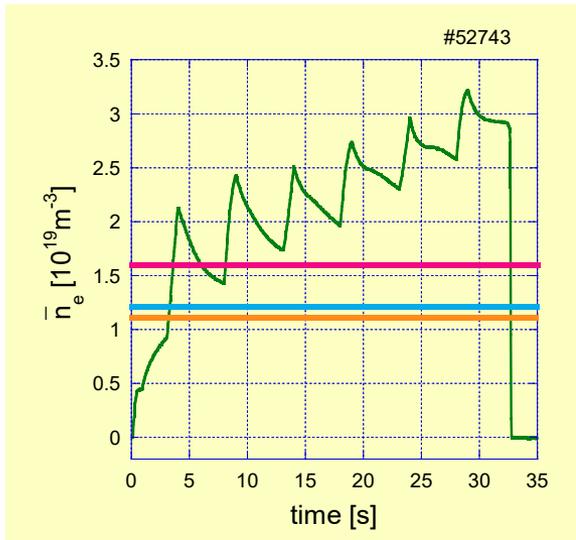
- 短波長光源(位相変化量を1フリンジ(2π)以内に)
- 偏光法等他の計測手法と共用して補正(→同一視線の確保)
- 位相差検出==>遅れ時間計測への変更

◆ 発振器の安定性(24時間365日発振)

- 複数光源の切替え(→較正方法の開発が必須)



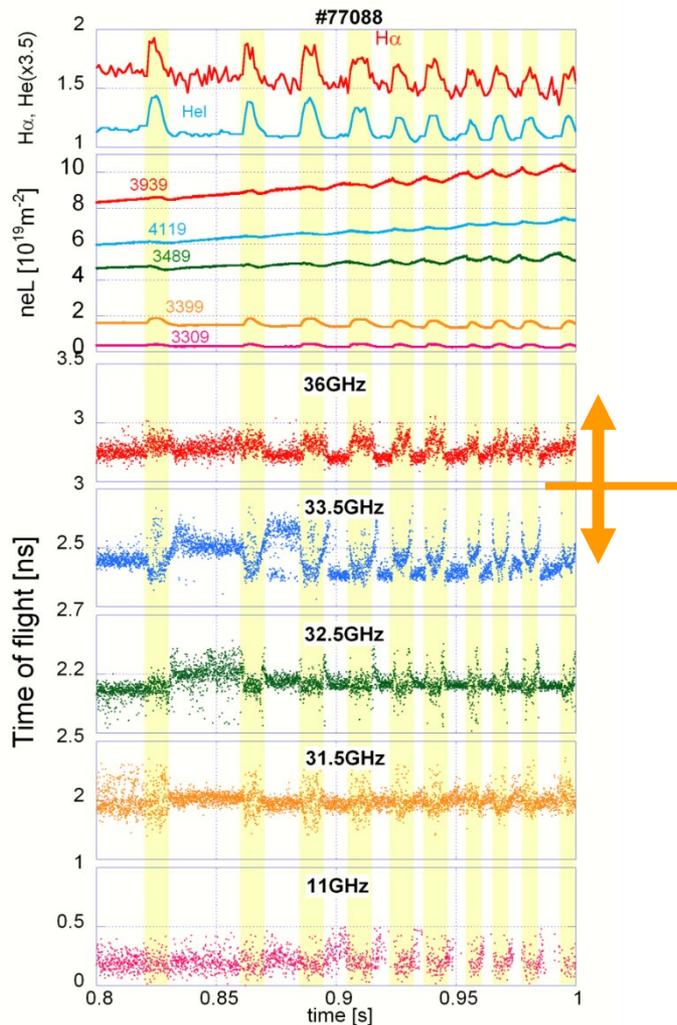
Pulsed radar signal reflected from plasma



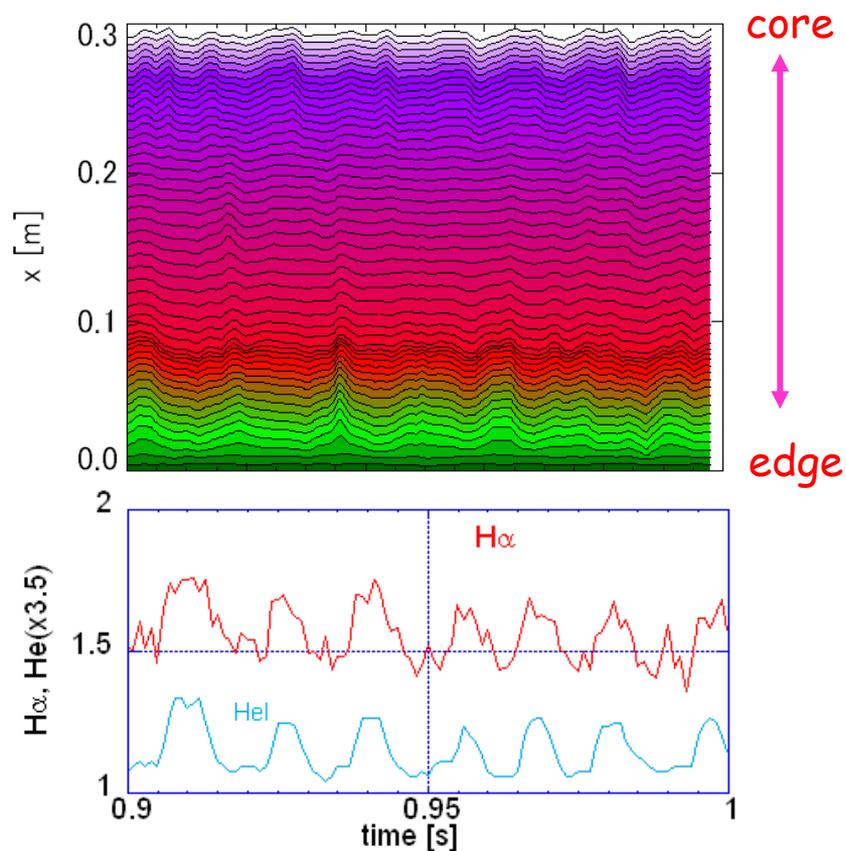
Yellow : 31GHz
Blue : 32GHz
Red : 36GHz
Green : Reference

遅れ時間から電子密度層の変動が見える

$$\tau_p(\omega_0) = \left(\frac{\delta\phi(\omega)}{\delta\omega} \right)_{\omega=\omega_0} = \frac{2}{c} \int_{r_a}^{r_c(\omega_0)} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2(x)}{\omega_0^2}}} dx$$

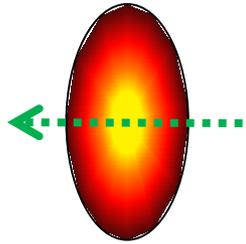


Contour plot of n_e



THz波のパルス発振が可能になれば...

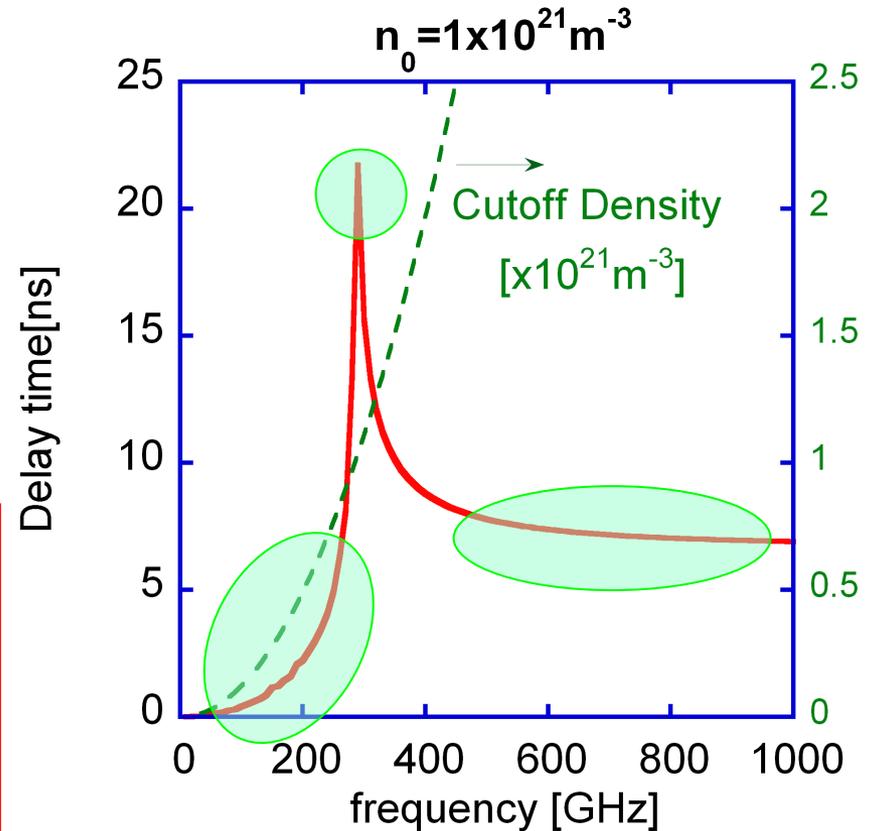
Delay time passing through a plasma



$$\tau_{pe} = \frac{2}{c} \int_{-a}^a \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2(x)}{\omega_0^2}}} - 1 dx$$

averaged density: $\bar{n}_e \cong \frac{\tau_{pe} c n_c}{2a}$

- カットオフ周波数よりも高いプローブ周波数を用いたDelayometry計測から
 → **線平均密度** \bar{n}_e
- 広帯域周波数をプローブすることで、Delay timeが最大となる周波数から
 → **ピーク密度** n_{e_max}
- 最大カットオフ周波数以下の信号による反射計測から
 → **密度分布** $n_e(\rho)$



サブミリ波～テラヘルツ波の長時間(数か月～1年程度)安定して発振できる光源が期待される。(パルス変調?)

期待：長時間連続運転できる安定な光源

UTC-PDを用いたフォトニックローカル

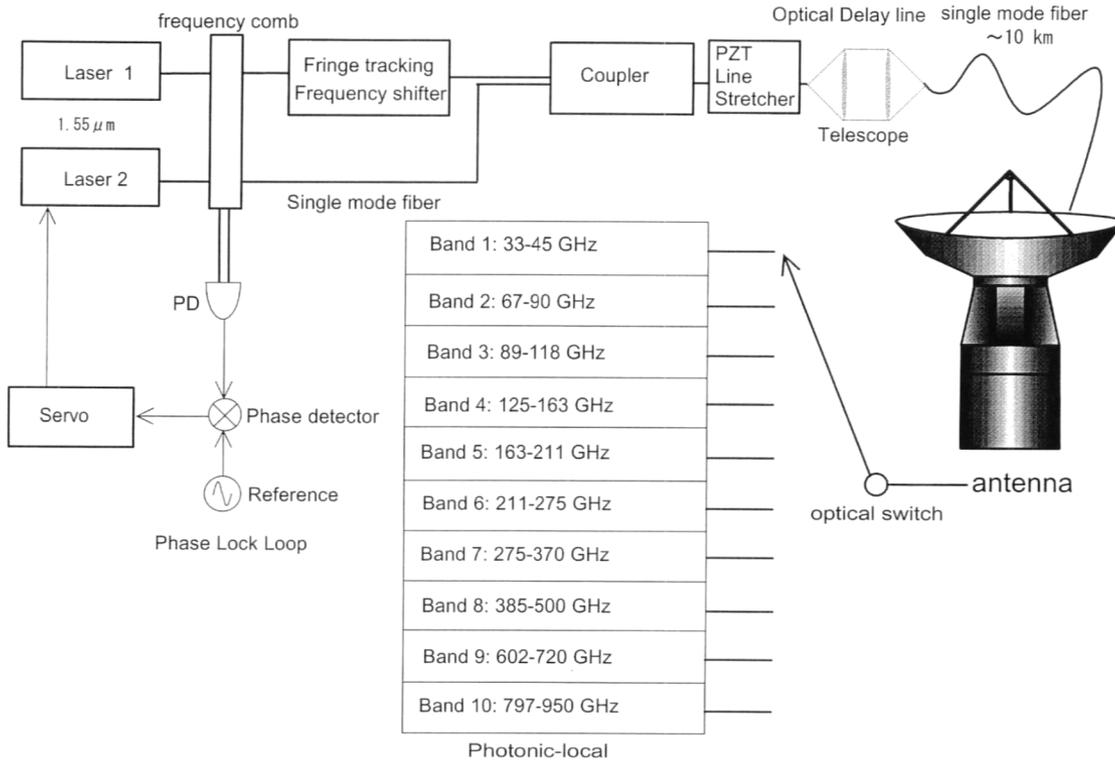


図1 ALMA フォトニックローカルシステムの模式図。使用レーザー波長は1.55 μm 。フォトニックローカルの周波数帯域は33~950 GHz。

将来の核融合発電炉
に向けて、
24時間、365日運転で
きる光源
が必要

<https://annex.jsap.or.jp/photonics/kogaku/public/30-08-kaisetsu1.pdf>

期待：微小電子温度揺らぎ測定

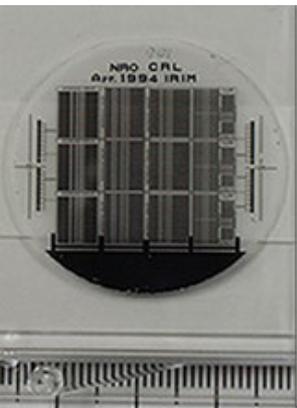
$$Q_e = \frac{3}{2} T_e \langle \tilde{n}_e \tilde{V}_r \rangle + \frac{3}{2} n_e \langle \tilde{T}_e \tilde{V}_r \rangle$$

熱雑音 → S/N比限界

$$T_{min} = T_{sys} \sqrt{\frac{2B_v}{\Delta f}}$$

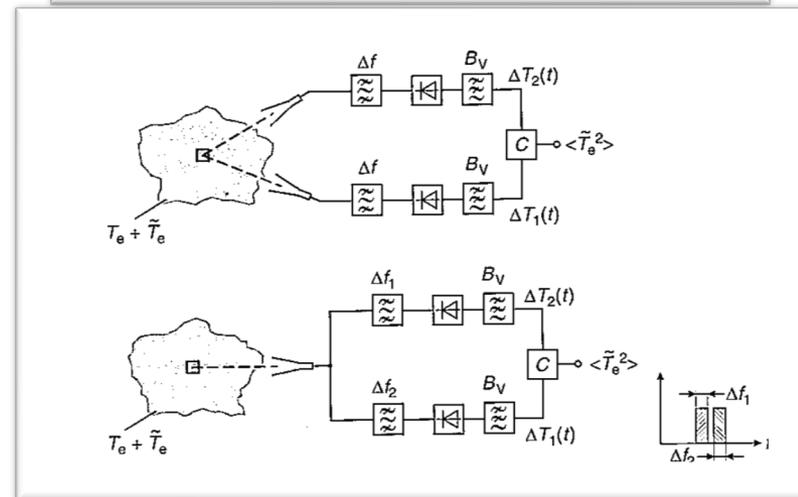
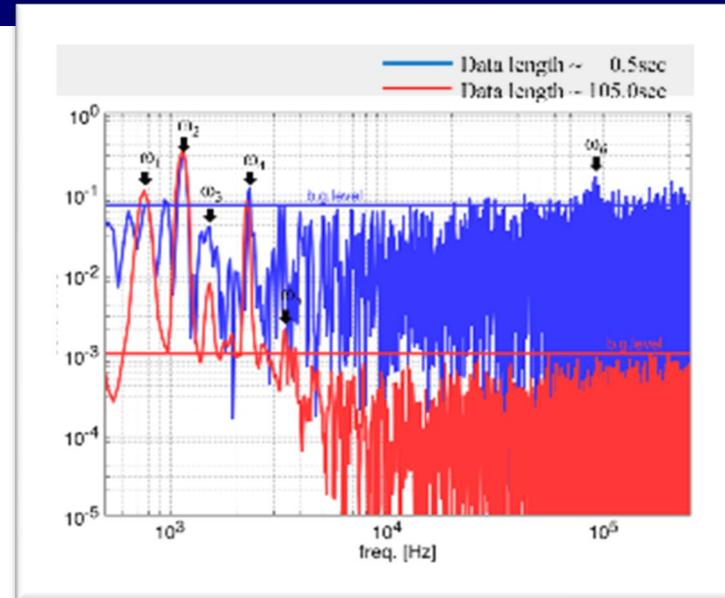
ECEで温度揺動を計測するため

- 長時間のデータため込み
- 相関計測



→ SISミキサの適用で
雑音温度を低下させ、
揺らぎの直接観測が
できないか？

http://atc.mtk.nao.ac.jp/ALMACartridge/index_SIS.html



期待：イメージング技術・干渉技術

alma-telescope.jp/column/almbasics-27doing_wp_cron=1617154536.2513980865478515625000



ALMA

アルマ望遠鏡とは [トピックス](#) [ギャラリー](#) [もっと知る](#)

[研究者向けサイト](#)

— 地球の自転の効果まで使うなんて、壮大ですね。

平松：こうやっているんな方向のアンテナペアで時間差を測ることで、空の上のどこに電波を出す天体があるか、つまり電波源の分布を知ることができるんです。電波源の分布を知るとはつまり、「電波写真」を撮ることと同じです。たくさんペアでいろいろな時間差を測ることで、天体の姿をちゃんと捉えられるようになるわけです。

「いろいろな方向のアンテナペア」というのは、アルマ望遠鏡のアンテナ配置にも表れています。



図7. アルマ望遠鏡の実際のアンテナ配列

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), A. Marinkovic/X-Cam

— アンテナの配置ですか。写真を見ると、特に法則性などはなさそうですが…。

平松：実はそれがポイントなんです。基盤の目状に規則正しくアンテナを配置すると、同じ方向に同じ間隔でアンテナが並んでしまいます。すると、同じ時間差を測っていることになるので、実はデータが重複してしまうんですね。アンテナの間隔や方向を少しずつ変えながらアンテナを置いていくと、一見ランダムな配置に見えます。でも、これは「計算しつくされたランダム」と言ってもいいでしょう。きれいに電波写真が合成できるように、アンテナの配置はあらかじめ設定されているんです。

SAMI (Synthetic Aperture Microwave Imaging)

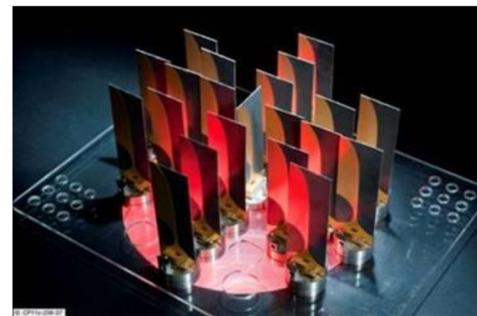
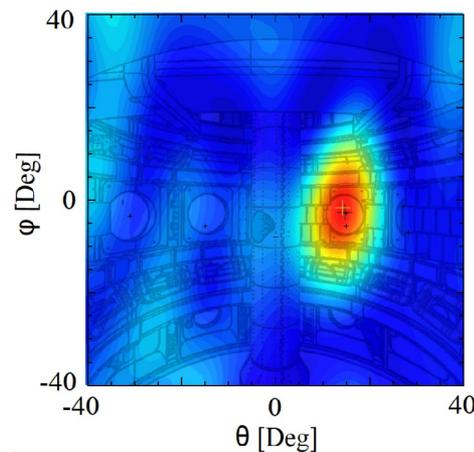


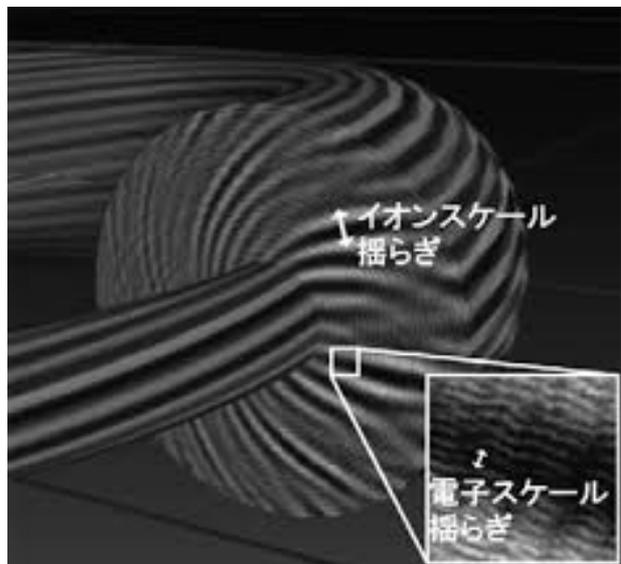
Figure 7. A photograph of the antenna array with 21 antipodal Vivaldi antennas.



アンテナの配置最適化はあるか？

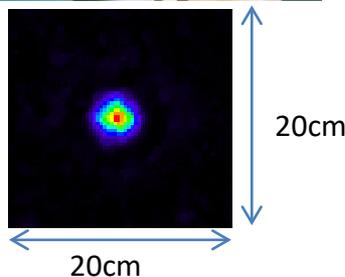
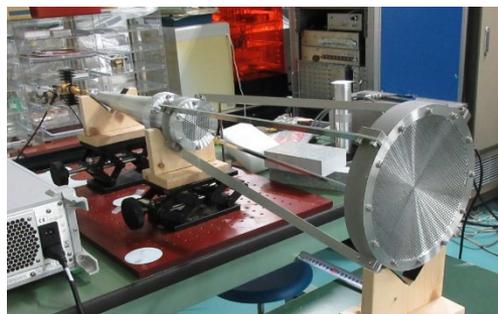
真空容器内で使える集光光学系・ビームステアリング

オールメタルでのミラー集光光学系

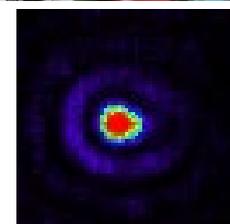


S. Maeyama, J. Plasma Fusion Res. 91, 9, 589 (2015)

Metal Lens relay antenna

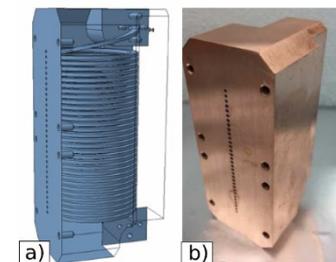
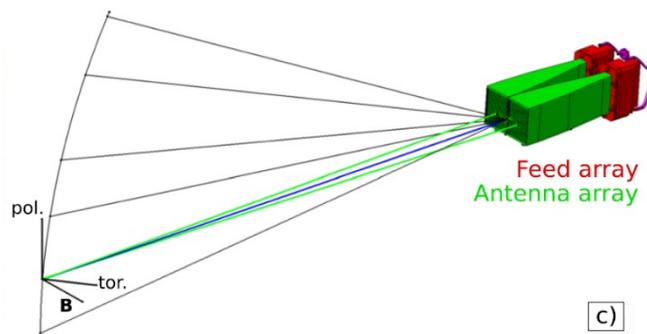


Cassegrain mirror (Fresnel zone)



フェーズドアレイアンテナを用いたビームステアリング

doi.org/10.1063/1.5039287

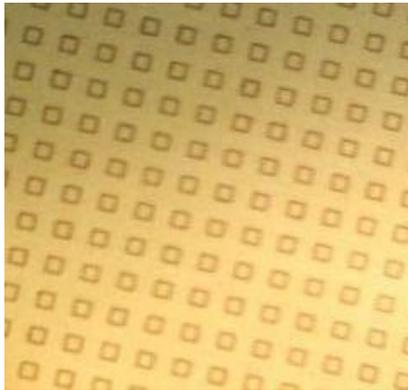


(c)

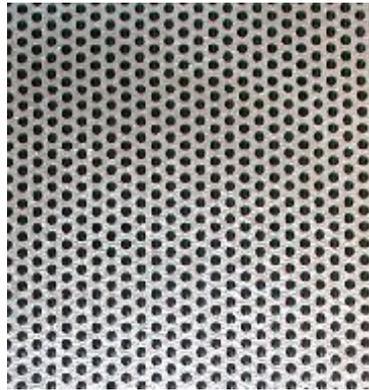
各種フィルタの製作

平面基板型

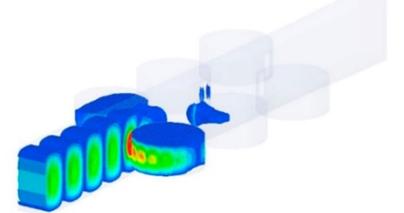
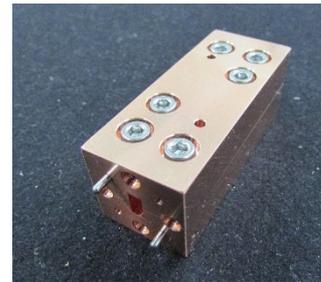
Notch Filter



Dichroic Plate

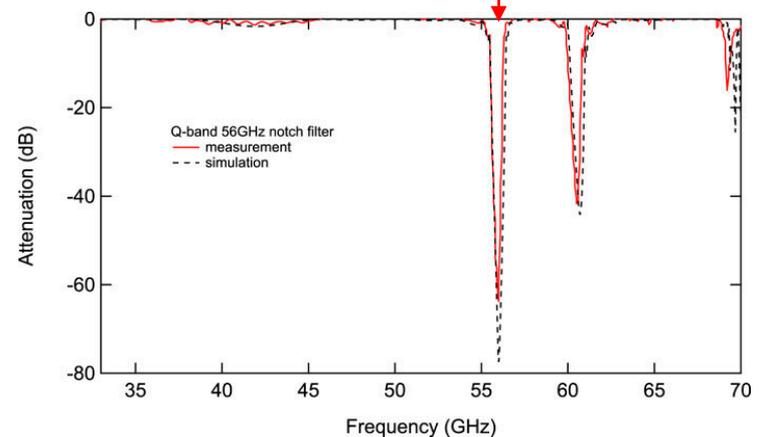
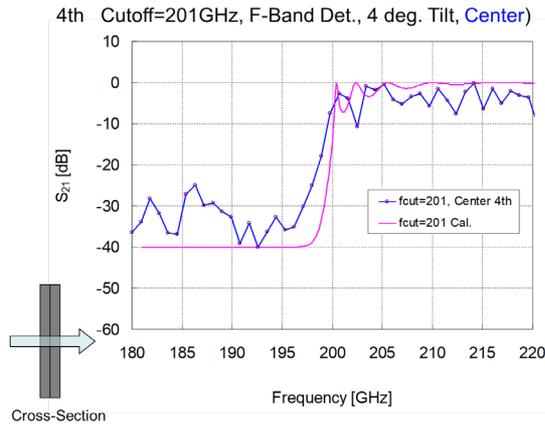


導波管型



Designed by HFSS simulation

gyrotron frequency → 56.05 GHz +/- 1.1 GHz



まとめ

- 核融合プラズマ実験において“特に開発が期待されている” 技術

ニーズ	内容
高周波回路技術	>150GHz(～1000GHz)の基板回路技術
長時間連続運転できる安定な光源	数10GHz～10THzまでの帯域でのパルス発振
最適アレイ配置	イメージング像を得るための最小アレイ数とその配置
低雑音ミキサ	ECEによる電子温度乱流揺らぎの直接観測
真空中で使える集光光学系・ビームステアリング	狭スペースでのビーム伝送、フェーズドアレイ等
Q値の高いノッチフィルタ	大電力加熱ジャイロトロン波動等の除去
ビーム・信号リアルタイム処理	アンテナのリアルタイム制御が今後重要に、補償光学の適用？
ビジュアライゼーション	研究成果(イメージング画像など)の物理的に意味のある可視化技法

- 実験室プラズマで何か検証に役立つ物理現象などは無いでしょうか？
 - ミリ波計測と光計測との協調測定とか 光渦とか 純粹に物理研究もぜひ