

ブラウンホーファー回折法(FD法) によるGAMMA10プラズマの 密度揺動計測

筑波大学
森川 裕亮

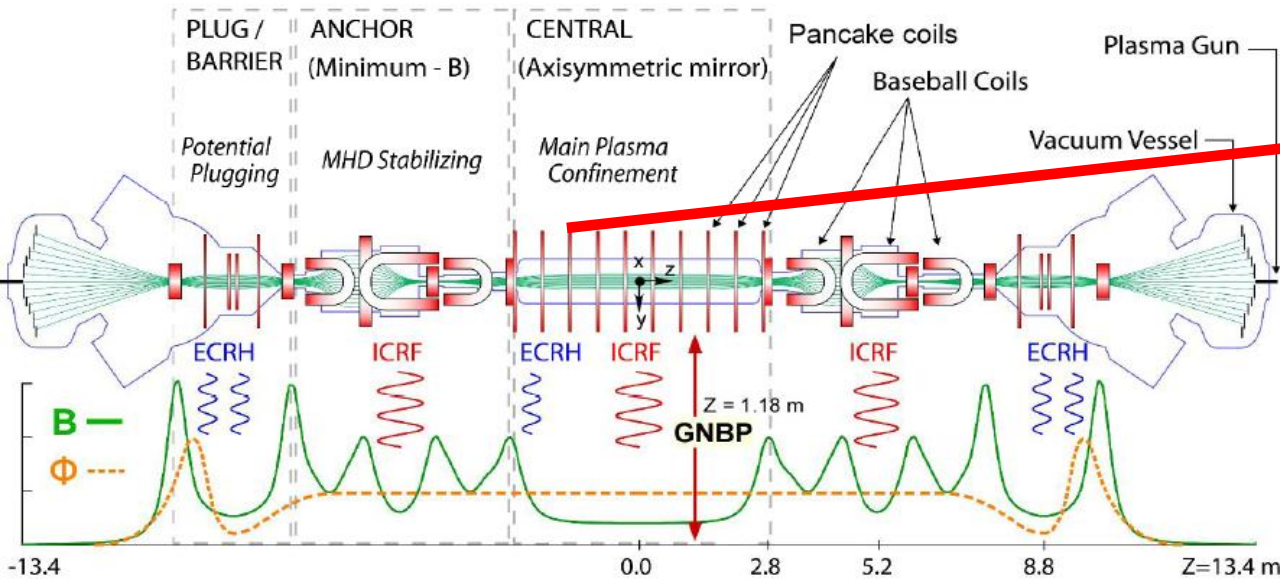
発表内容

- ・目的
- ・実験装置
- ・FD法の原理
- ・結果
- ・まとめ

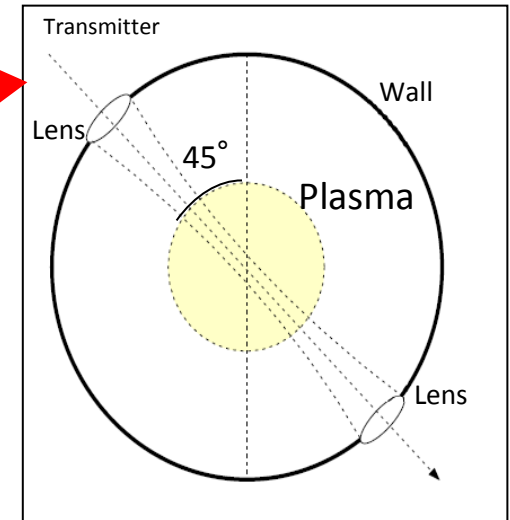
目的

- 核融合プラズマにおいて、さまざまな不安定性が生じ、それによって閉じ込め性能が劣化する。この不安定性を生じさせる要因のうち、密度勾配による反磁性ドリフトや電場による $E \times B$ ドリフトがあるが、これらの不安定性によって引き起こされる揺動について調べることは重要である。
- FD法を用いて、プラズマ中の密度揺動の波数・周波数スペクトルを測定し、プラズマの閉じ込め性能を向上させるための知見を得ることにした。
- 本研究の目的はブラウンホーファー回折法 (FD法) の整備を行い、GAMMA10セントラル部の密度揺動測定を行い、プラズマ密度揺動について調べることである。

GAMMA10 実験装置



FD method system



- GAMMA10における主な閉じ込めプラズマはICH(ion cyclotron heating)によって初期プラズマが加熱され、プラグ・バリア部においてECH(electron cyclotron heating)を用いて電位を形成する。
- GAMMA10セントラル部では $E \times B$ ドリフトのため不安定性が増大するという現象が起こる。けれどもこの不安定性がECHを適用し、電位を形成することによって抑制できることがFD法では確認することができる。

FD法計測器

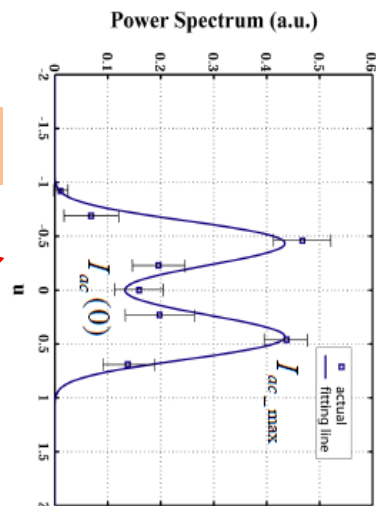
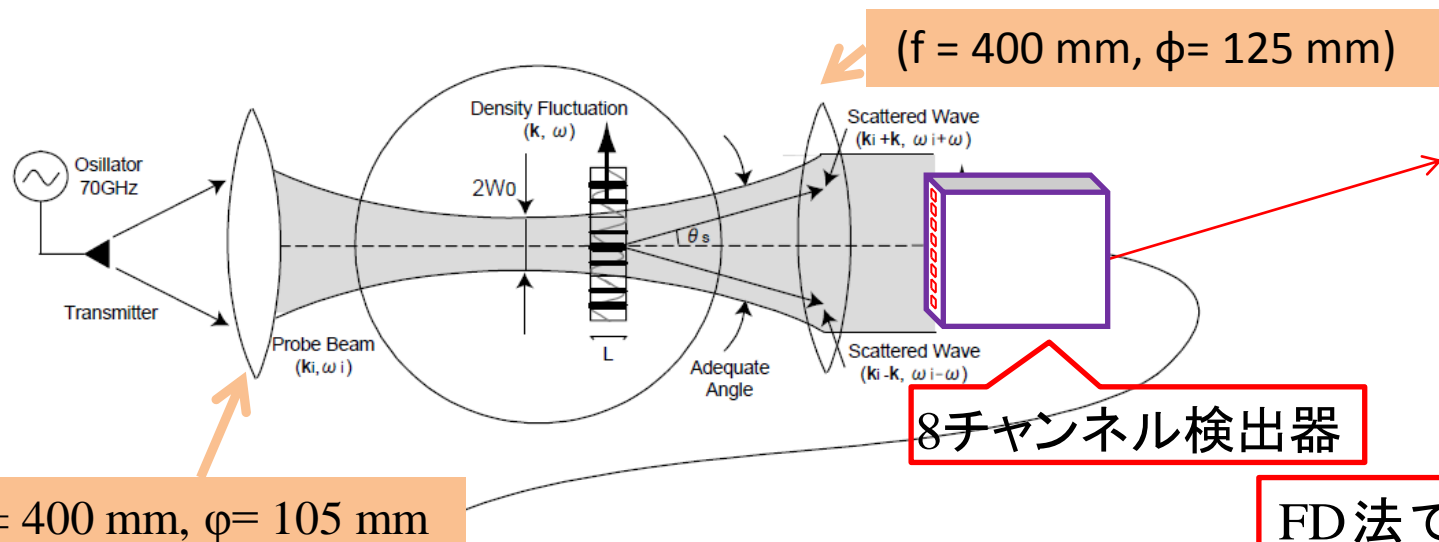
IMPATT
発振器

円錐ホーン

石英レンズ

誘電体レンズ窓

検出器



FD法で得られた信号
強度の径方向分布

サンプリングは100kS/s

FD法における波数測定①

$$I_{ac} = |B'|^2 \frac{\tilde{n}_e}{q^2} \exp\left[-\left(1 + \frac{u^2}{q^2}\right)u^2\right] \times \left[\left[\exp\{-(u-\Theta)^2\} \sin\{\rho(u^2 - (u-\Theta)^2)\} \right. \right. \\ \left. \left. + \exp\{-(u+\Theta)^2\} \sin\{\rho(u^2 - (u+\Theta)^2)\} \right] \cos \omega t \right. \\ \left. + \left[\exp\{-(u-\Theta)^2\} \cos\{\rho(u^2 - (u-\Theta)^2)\} \right. \right. \\ \left. \left. - \exp\{-(u+\Theta)^2\} \cos\{\rho(u^2 - (u+\Theta)^2)\} \right] \sin \omega t \right]$$

B' : 搬送波の振幅

$1/q = r_{pw} / 2Z_R$: 規格化波動幅

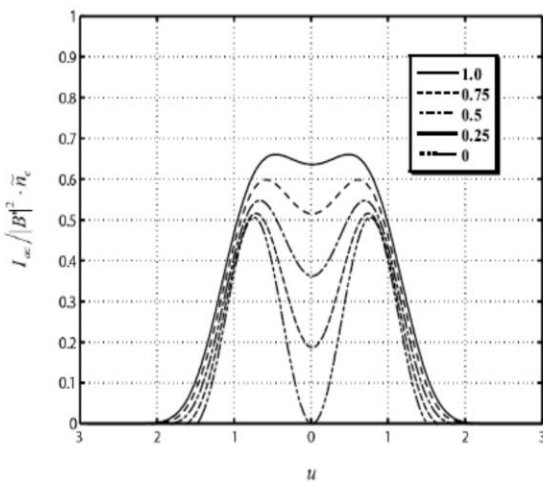
$u = x_f / w_f$: 規格化空間座標

$\Theta = kw_0 / 2$: 規格化波数

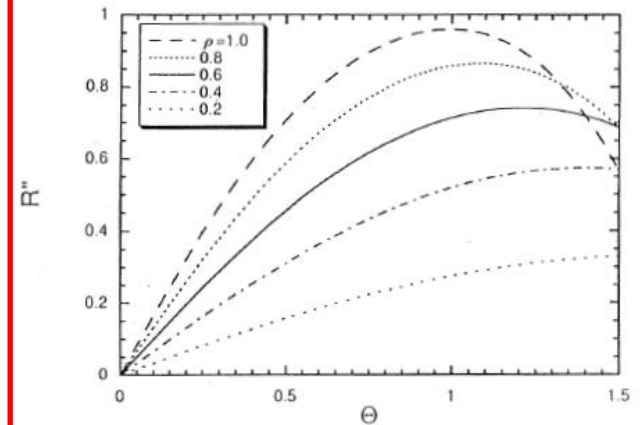
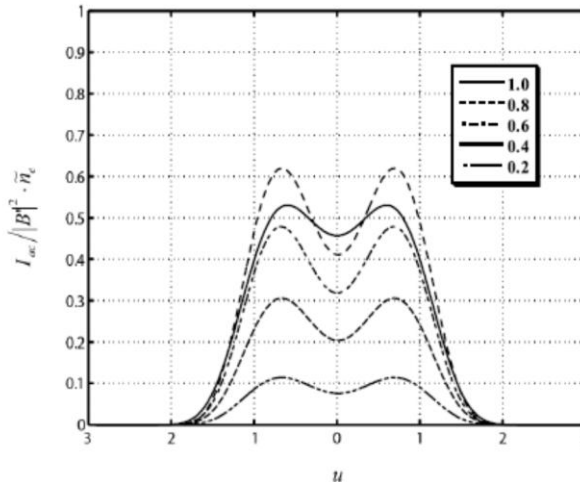
$\rho = z_0 / Z_R$: 規格化波動位置

Z_R : プラズマ中のレーリーゾーン

ρ を変化させた時の空間プロファイル



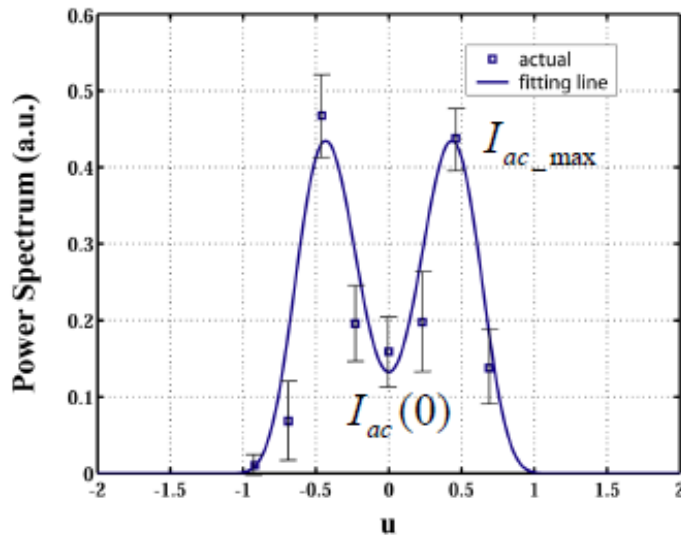
Θ を変化させた時の空間プロファイル



$$R'' = \frac{I_{ac}(0)}{I_{ac_max}}$$

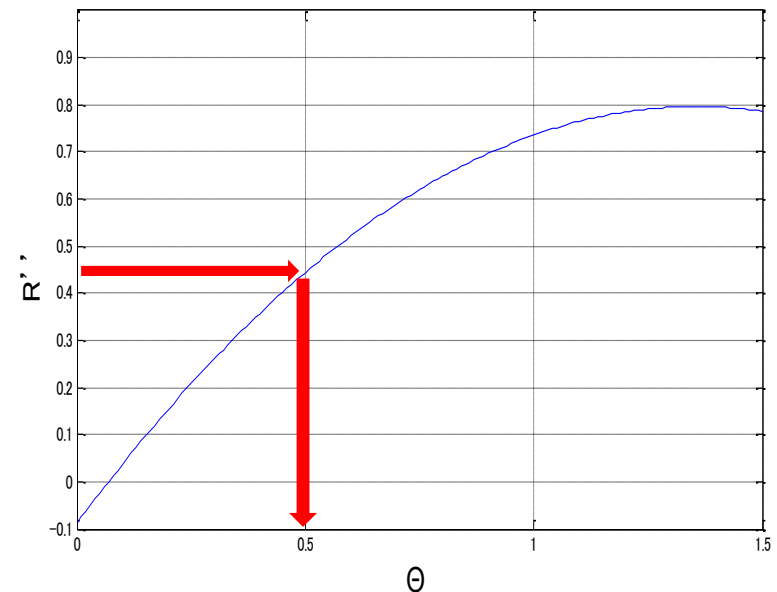
FD法における波数測定②

観測されたFD信号と
そこから求めた I_{ac}



$$R'' = \frac{I_{ac}(0)}{I_{ac_max}}$$

Θ と R'' の関係

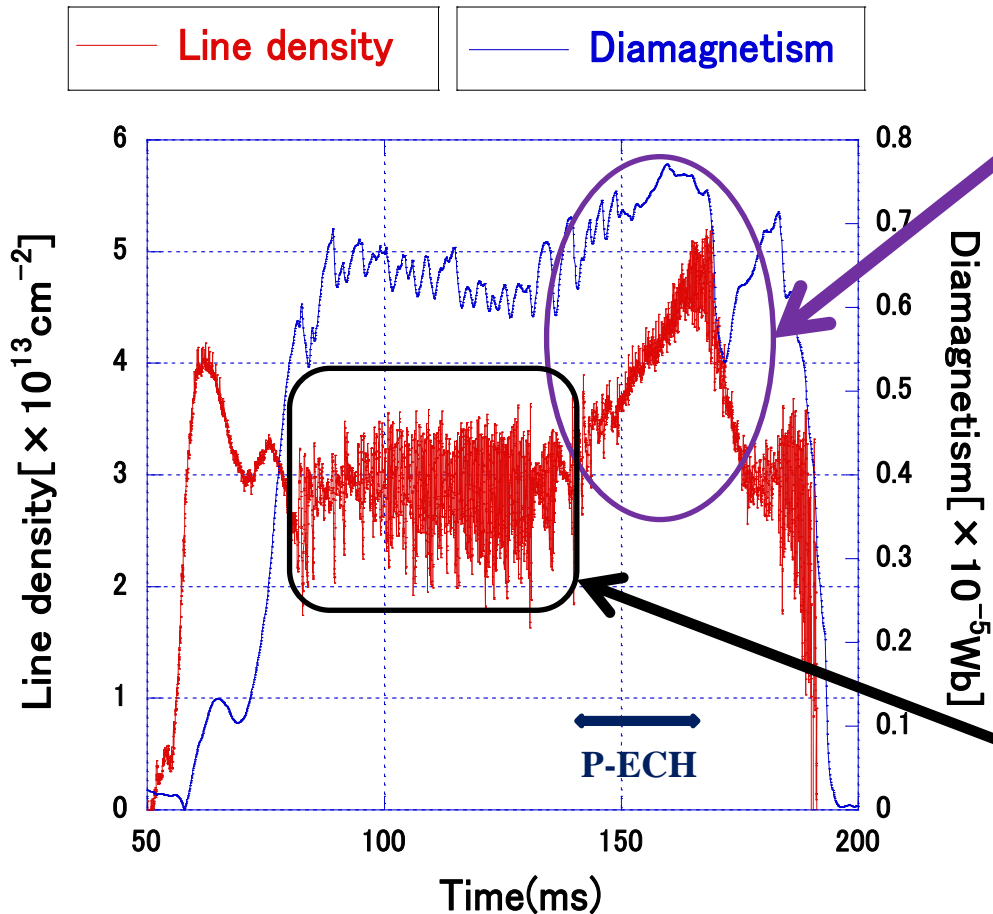


次の式から波数 k が得られる。

$$\Theta = kw_0/2$$

例えば、 R'' が0.45の時、この R'' から得られた Θ は右図より0.5となり、 $w_0=4.0$ cmなので、 k は0.25 [1/cm]となる。

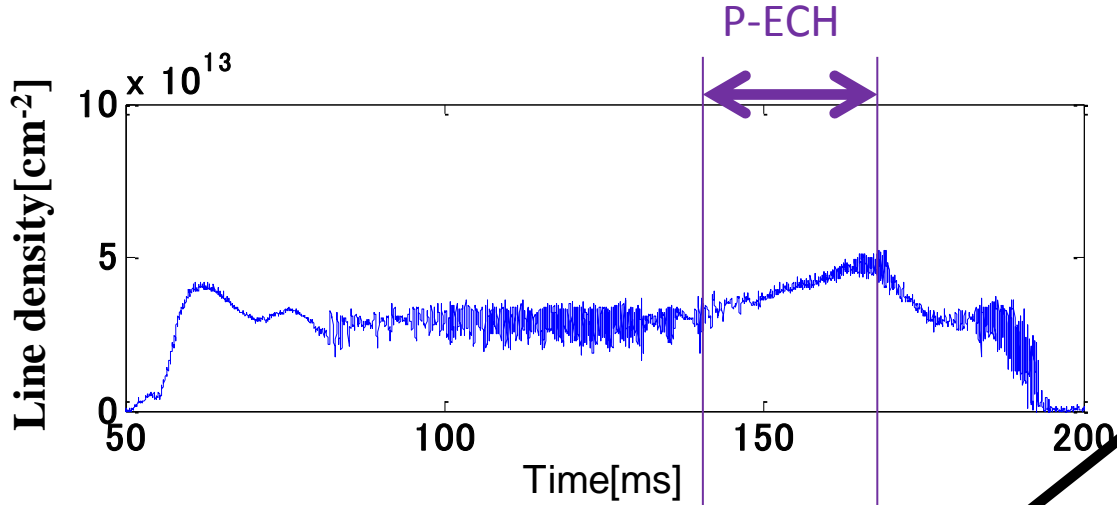
揺動計測



P-ECHを印加すると、**Line density**、**Diamagnetism**が共に上昇するショットを解析データとして使用した。

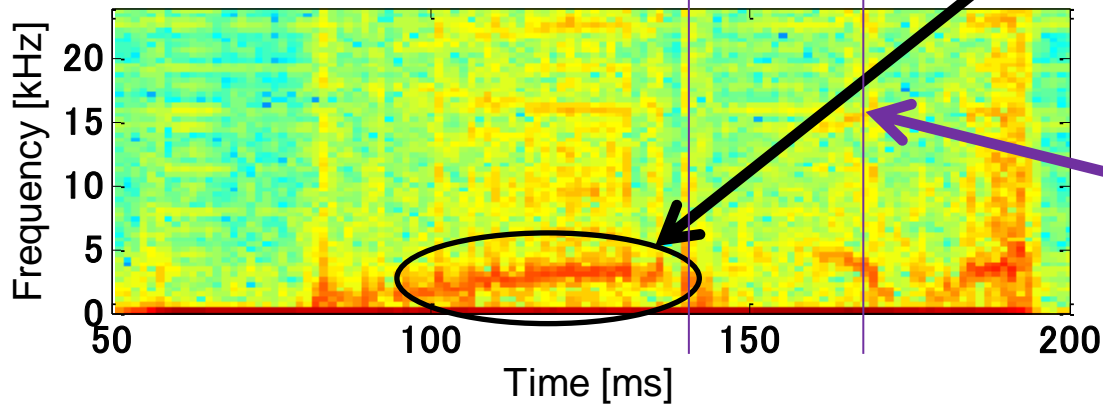
この時間帯で発生している揺動についてFD法の生信号で観測された。

電子線密度のFFT解析



70GHzのマイクロ波発振器を用いることで電子線密度は計測されている。

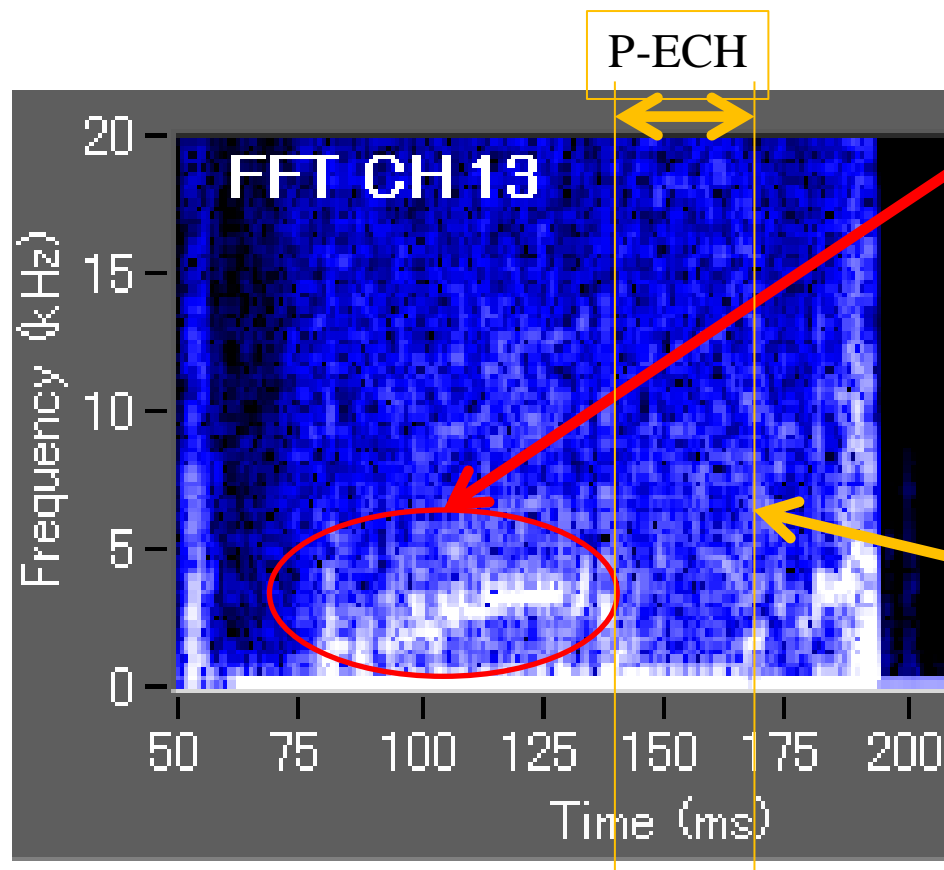
90ms ~ 140ms間において強い揺動が観測された。



P-ECHが印加しているときに揺動の抑制が観測された。

- 電子線密度の測定では4kHz近傍に強い揺動が観測され、その揺動が抑制されていることが分かった。

静電プローブにおける揺動計測



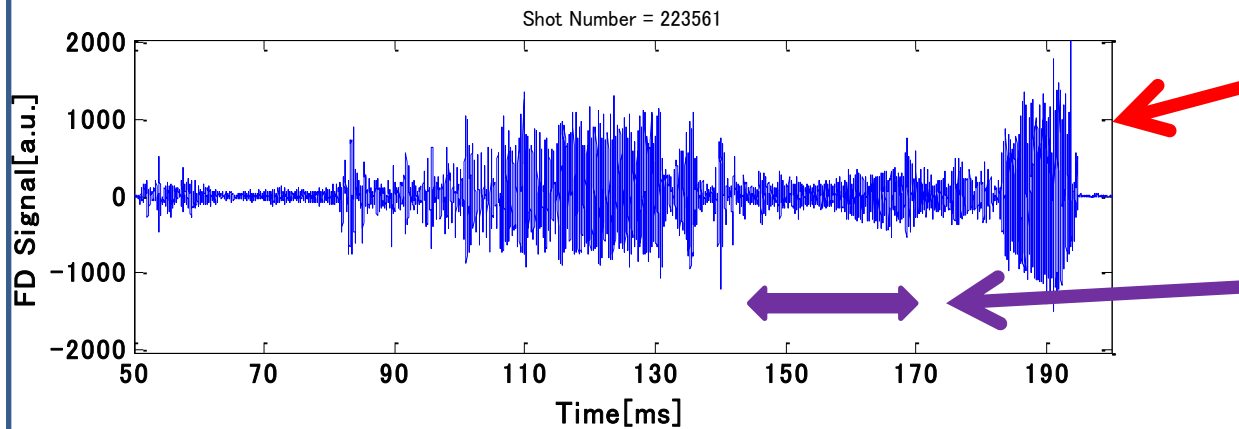
90ms ~ 140ms間において強い揺動が観測された。

P-ECHが印加しているときに揺動の抑制が観測された。

- 静電プローブ(ESP)はGAMMA10中心部の端に設置されている。
- ESPにおいても4kHz近傍の揺動が観測された。モード数を調べてみると、 $m = -1$ であった。

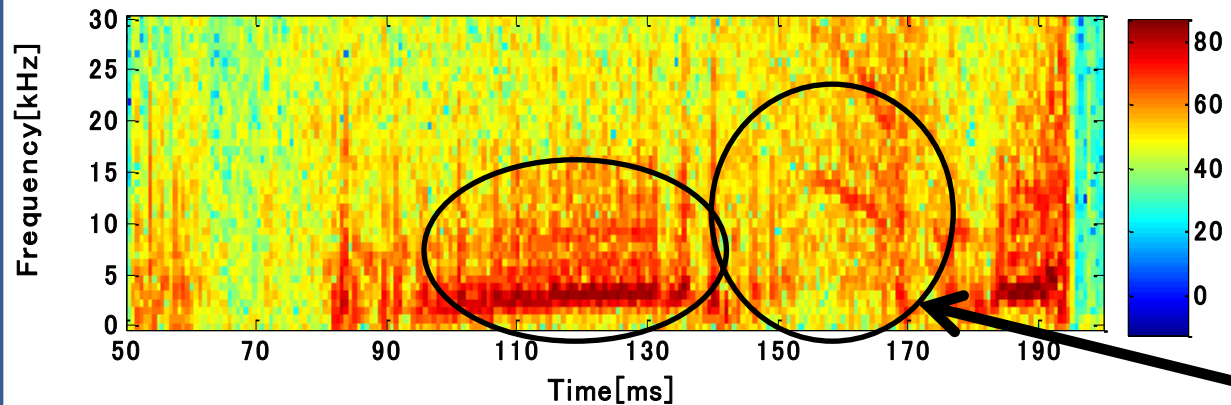
FD法による密度揺動計測

FD法による密度揺動計測



6チャンネルの信号

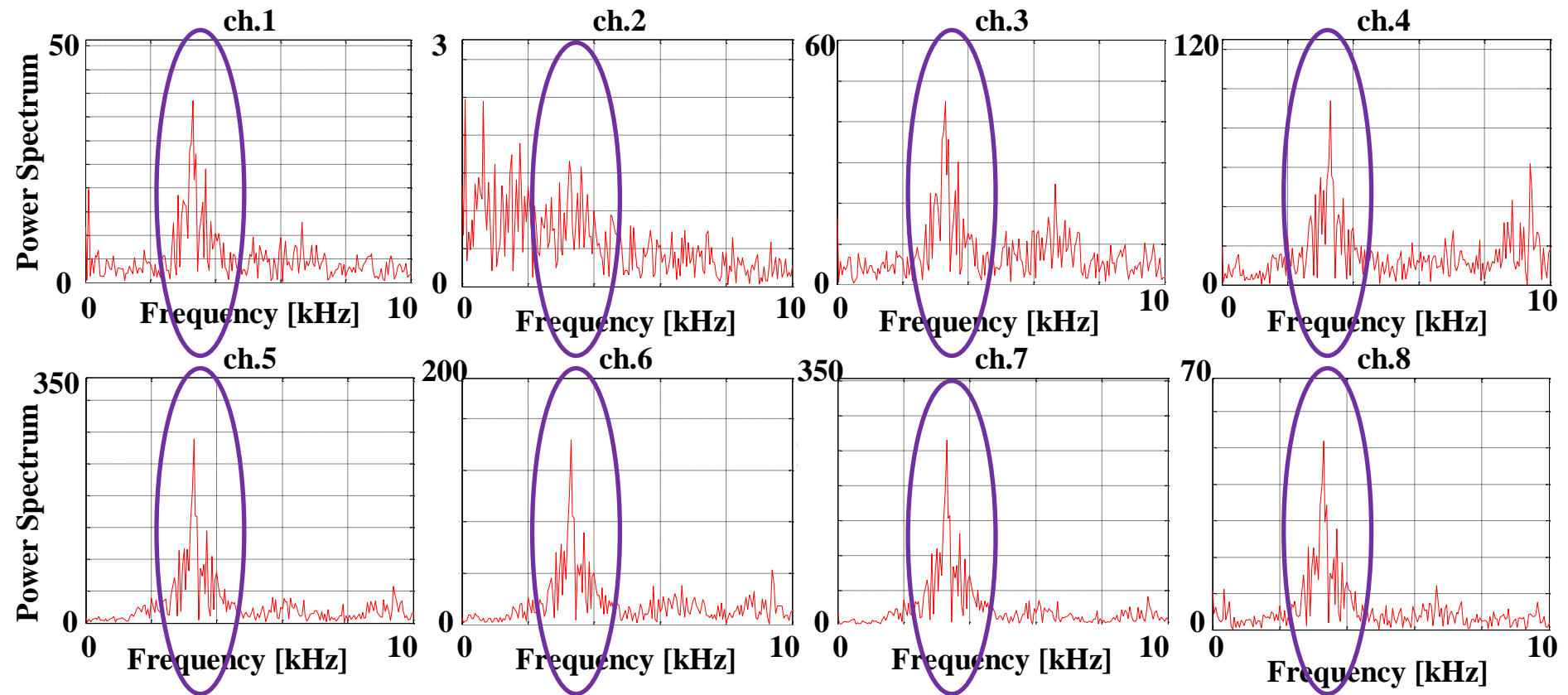
P-ECH(140 ms-170 ms)



FD法でも4kHz近傍の揺動が観測され、その後P-ECHの印加により揺動が抑制されていることが分かる。

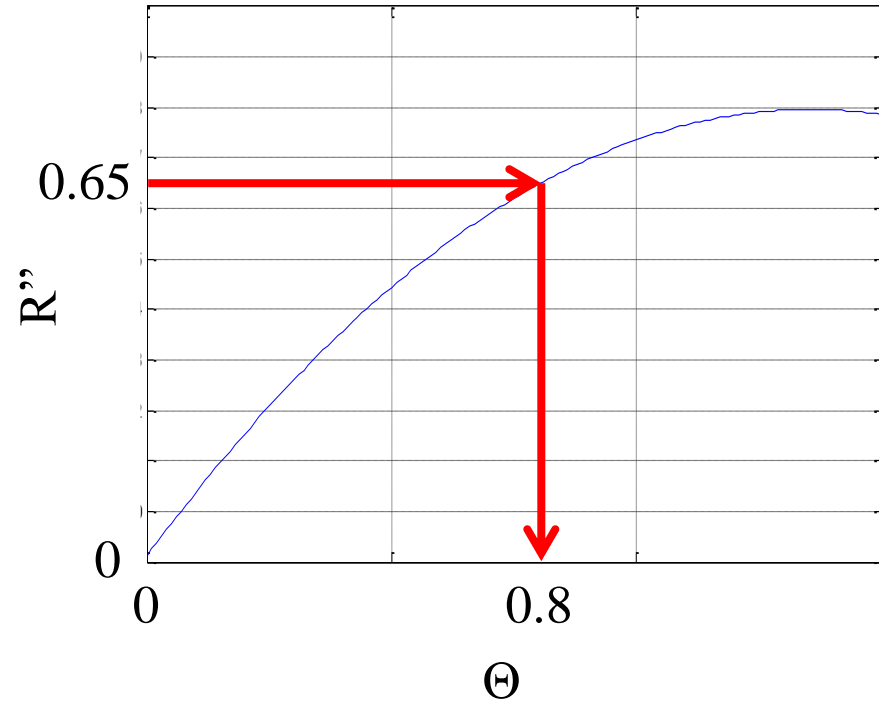
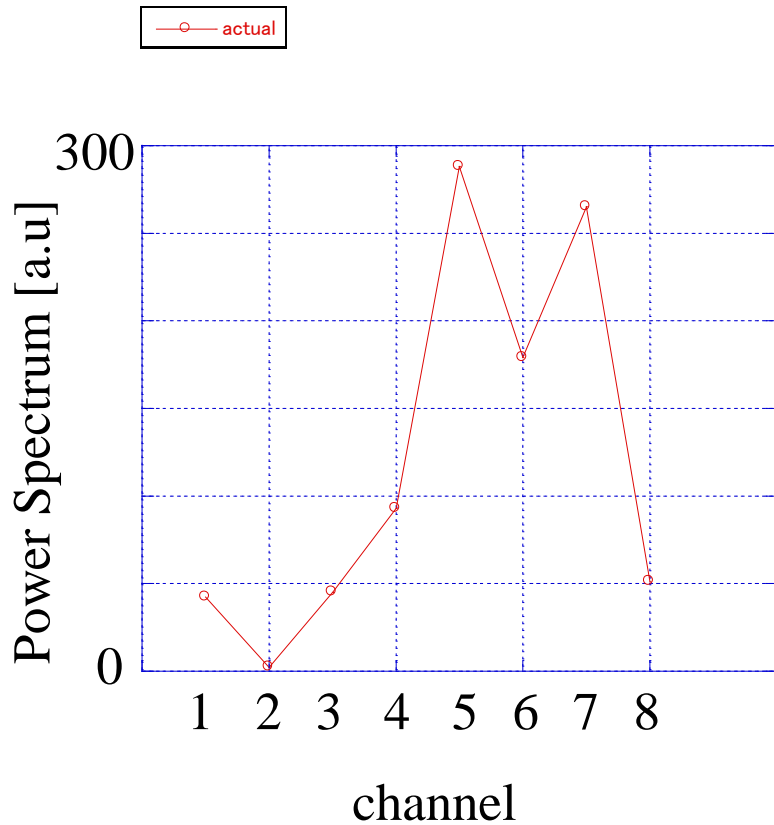
FD法による密度揺動計測2

FFT 解析



どのチャンネルでも4kHz近傍の強い揺動が観測されている。

径方向の信号強度



これは4kHz近傍の揺動に対するFD法で得られた信号強度の径方向分布である。

$R'' = I_{ac}(0)/I_{ac}(\max) = 0.65$
 $\Theta = 0.8.$
この結果から
 $\Theta = kw_0/2$, k is 40.2 [1/m].

考察

FD法で得られたデータを元に揺動の位相速度を計算した。

- 得られたコアプラズマの揺動から揺動の位相速度を計算した。
- 位相速度を求める上で $v_p = 2\pi f/k$ を使い、 0.52 ± 0.17 [km/s] という結果を得た。

他の計測器から得られたデータを元に揺動速度を計算し、FD法で得られたデータと比較した。E × B ドリフト速度 V_r と反磁性ドリフト速度 V_d は次のようにして得られる。

$$V_r = \frac{E_r}{B}, V_d = \frac{k_B T_e}{eB} \cdot \frac{1}{1 + k_{\perp}^2 \rho_s^2} L_n^{-1} \quad (T_e = 40 \text{ eV}, N_e = 1.7 \times 10^{12} [\text{cm}^{-3}], E_r = -35 \text{ V/cm})$$

- E × B ドリフト速度は $V_r = 0.875$ [km/s]. さらに反磁性ドリフト速度は $V_d = 1.63$ [km/s]. この時、求めたい揺動の位相速度 V_p は下の式を用いて、 V_p は **0.72 km/s** 。

$$V_p = \left| \frac{E \times B}{B^2} + \frac{\nabla p \times B}{qnB^2} \right| \equiv |V_r + V_d|$$

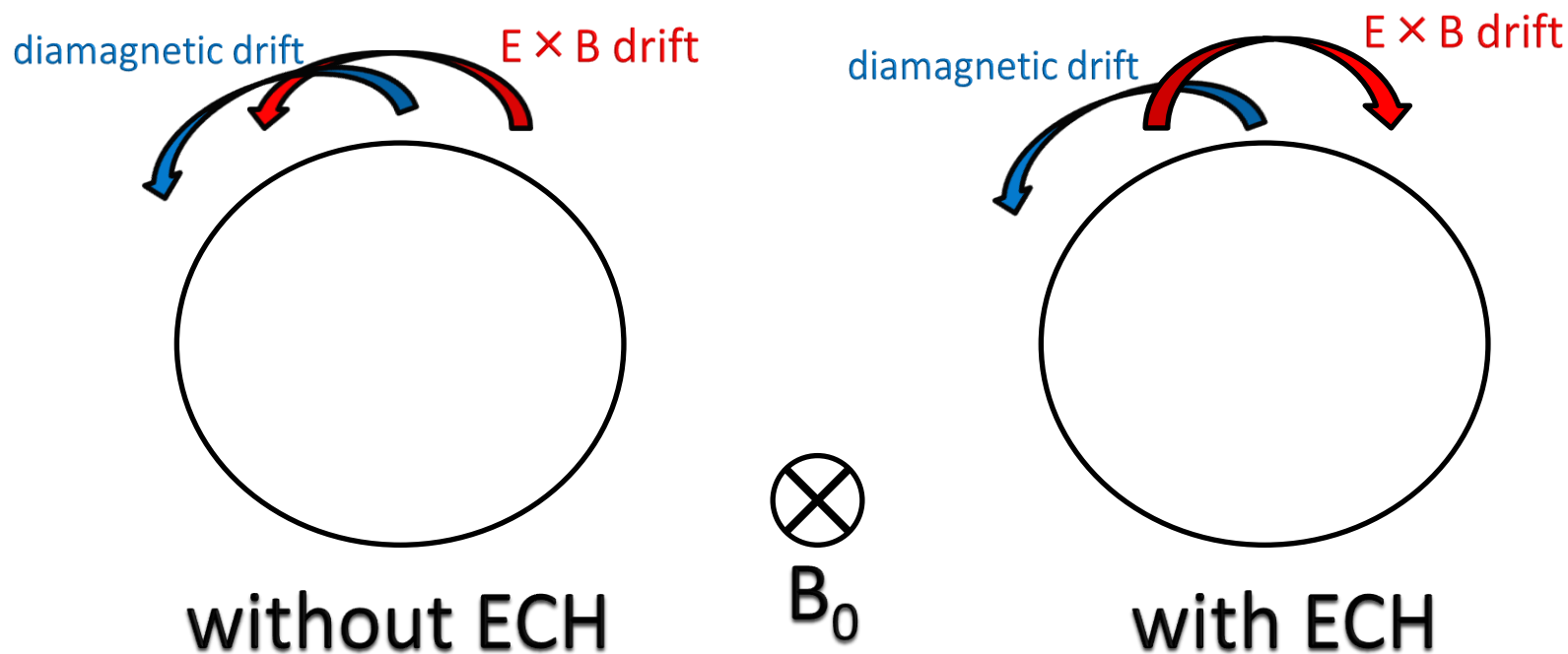
	位相速度[km/s]
FD法	0.52 ± 0.17
他の計測器からの計算結果	0.72 ± 0.47

- FD法で得られた結果と他の計測器から得られた結果は誤差の範囲内で一致したといえる。
- FD法を用いて位相速度の測定をすることができた。

まとめ

- 本研究ではGAMMA10セントラル部にFD法を適用した。
- ドリフト型の低周波揺動を観測し、それがP-ECHを適用することで揺動が抑制されたことが観測された。
- FD法で得られた計測結果から計算された揺動の位相速度と他の計測器から得られた計算結果が一致し、FD法での測定が正しく得られていることが分かった。
- FD法計測装置をGAMMA10プラズマに適用することは成功したが、位相速度の評価はより詳しい検討が必要である。

GAMMA10プラズマにおける位相速度の変化



without ECH: $E \times B$ ドリフトは反磁性ドリフトと同じ方向にはたらく。

with ECH: $E \times B$ drift はECH印加と共に反対の方向にはたらく。

Gold neutral beam probe (GNBP)

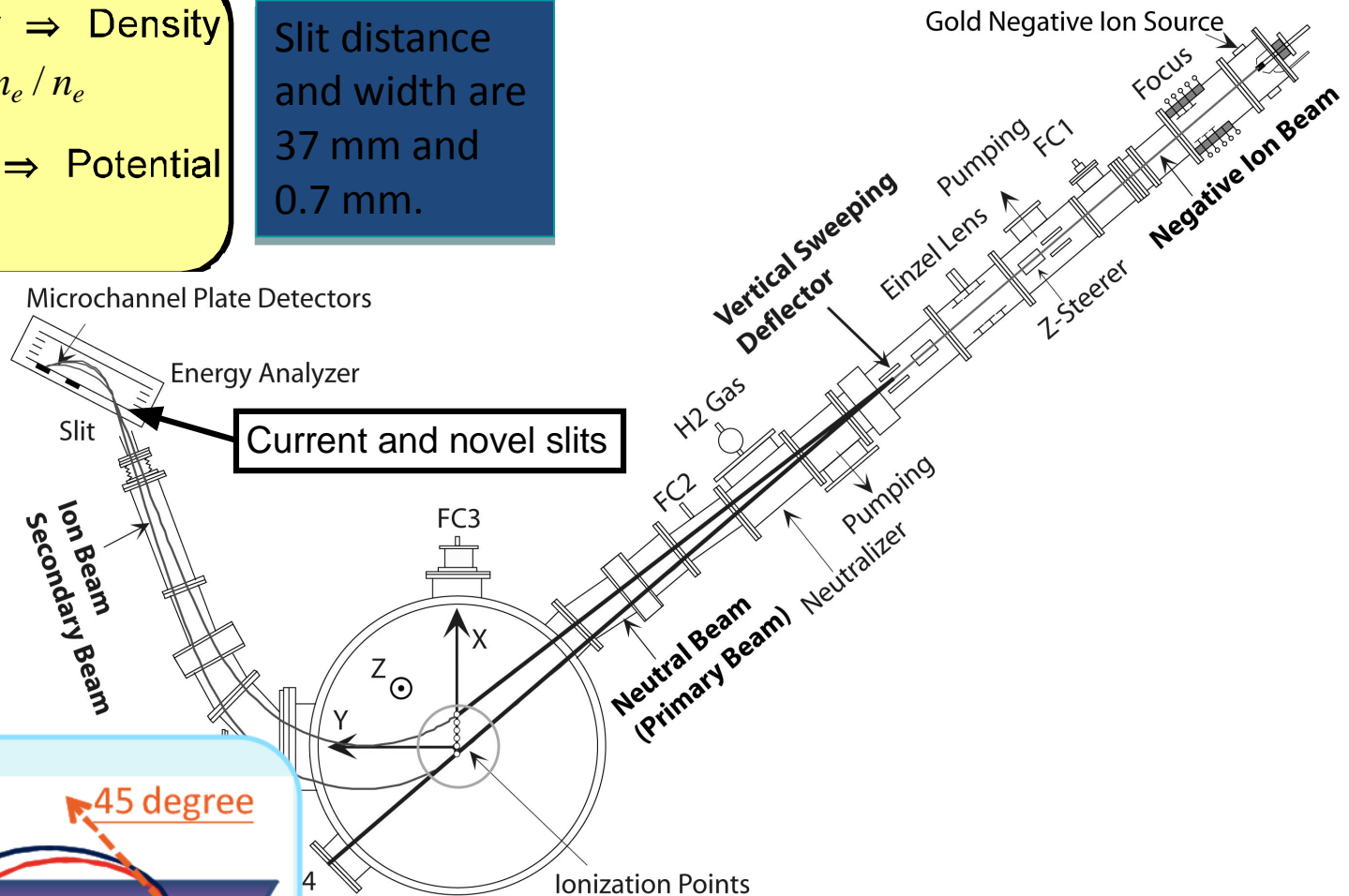
Beam Intensity \Rightarrow Density

$$\Delta I / I \cong \Delta n_e / n_e$$

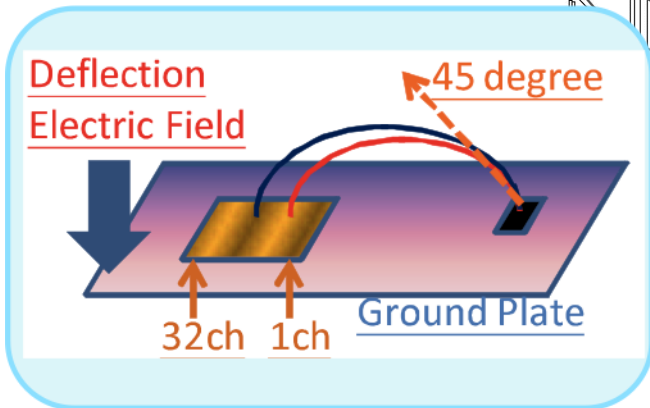
Beam Energy \Rightarrow Potential

$$\Delta E \cong \phi$$

Slit distance and width are 37 mm and 0.7 mm.

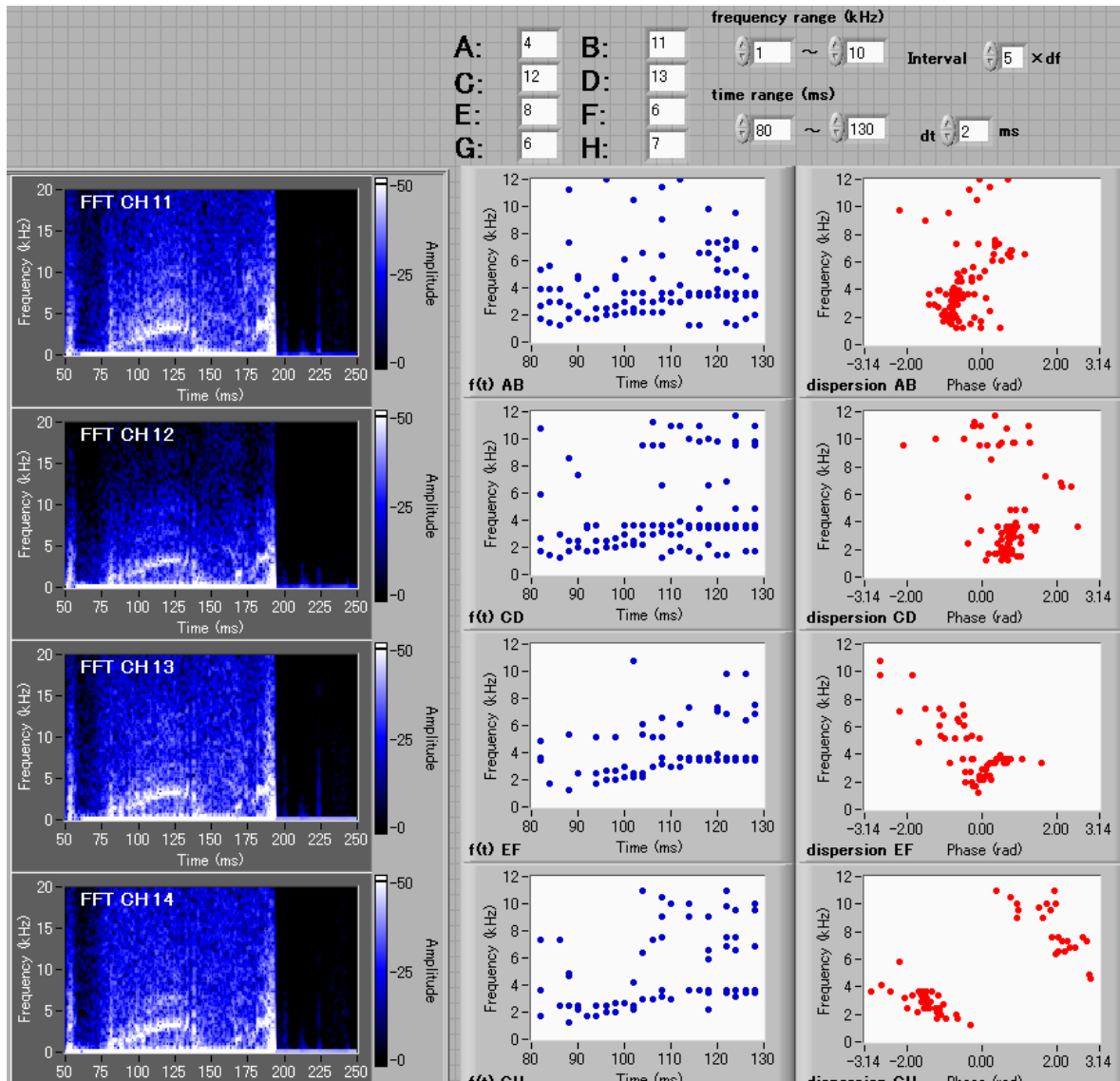


Current and novel slits

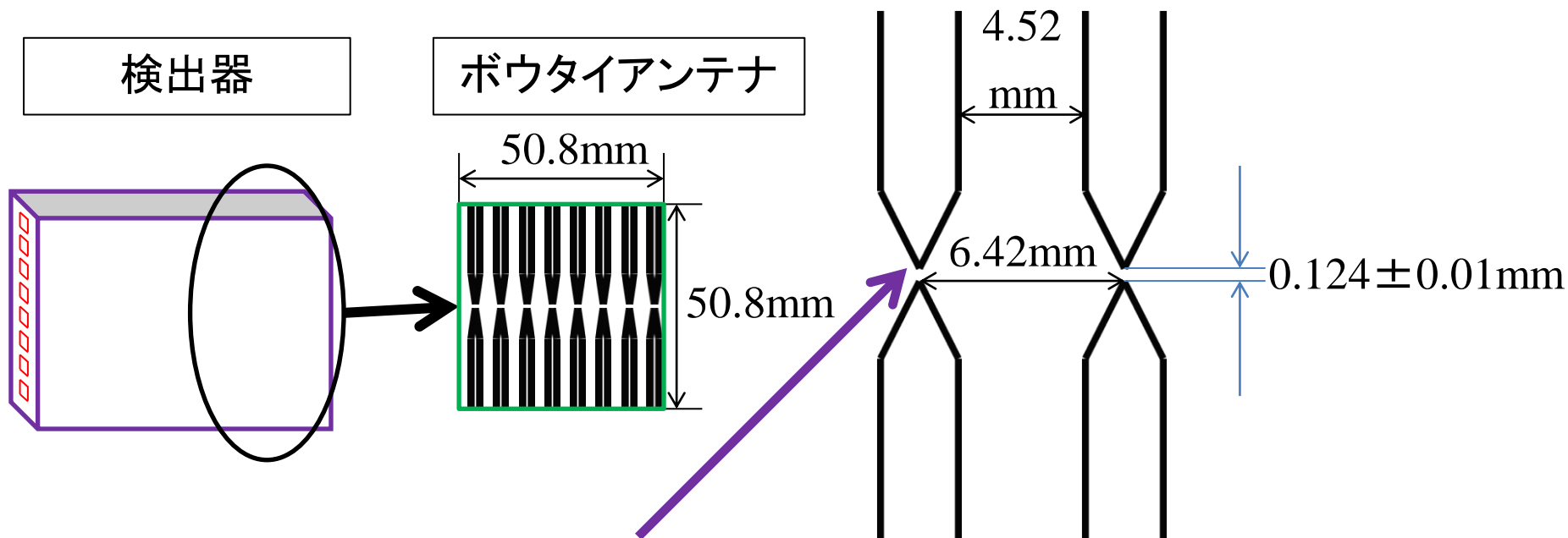


- GNBPでは電位や密度揺動を測定することができる。

ESP (静電プローブ) 解析



検出器



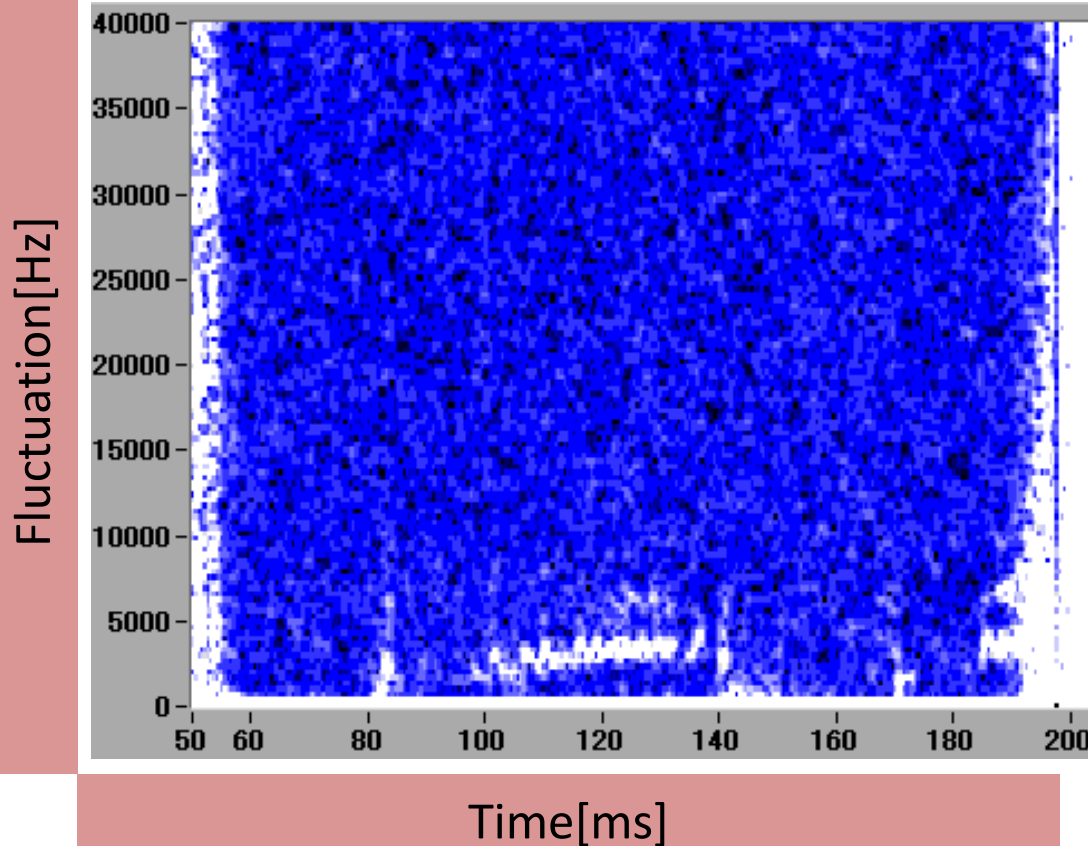
GaAs Schottky barrier diode mixers bonded to gold bow-tie antennas which form a monolith with a fused quartz substrate.

- The aperture is selected to be smaller than the beam width. The beam width at the observation plane is 14 mm.
- Rectangular waveguide antennas in the TE_{10} mode are installed on the reverse side of the diode detectors.
- The detector array can be moved in order to study the FD profiles in detail.

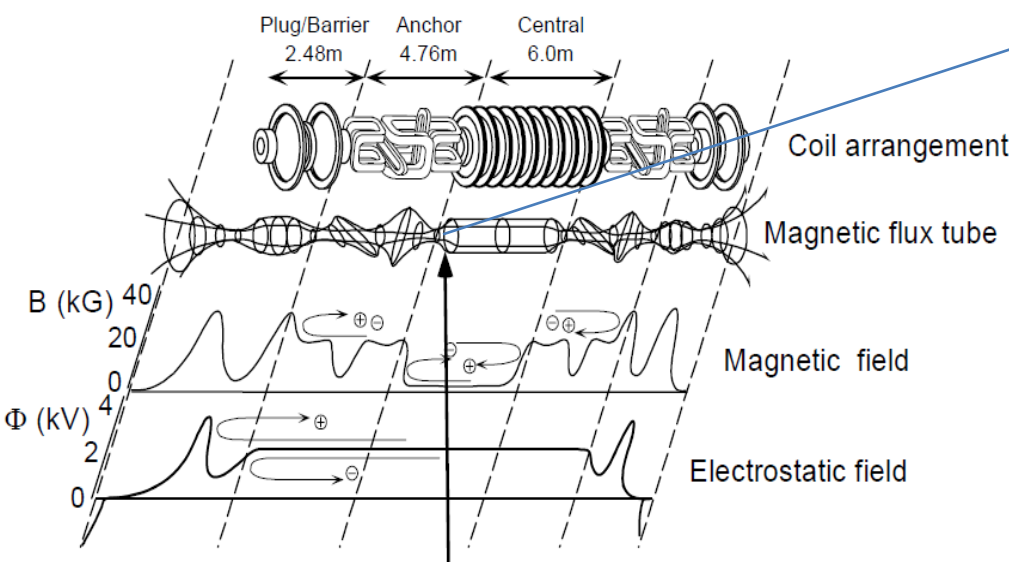
Wave number

- We can calculate the fluctuation with FD method. This displacement of the slit from the front focal plane is found to be useful for an accurate wave number determination by a curve fitting of the theoretical profiles with the measured intensity.

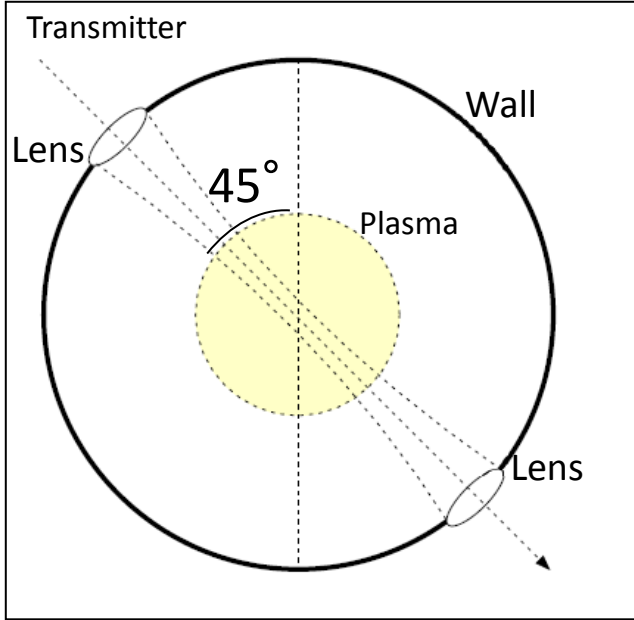
The spectra of density fluctuation



BP also observed suppression of the fluctuation at 4kHz in this experiment.



FD method apparatus



It is set at $z = -2.4\text{m}$, east side of GAMMA10 central cell, and the beam is incident 45-degree for the perpendicular axis.

