

金の中性粒子ビームプローブを利用した密度電位揺動及び位相差の同時計測

小島 有志, 宮田 良明
筑波大学プラズマ研究センター

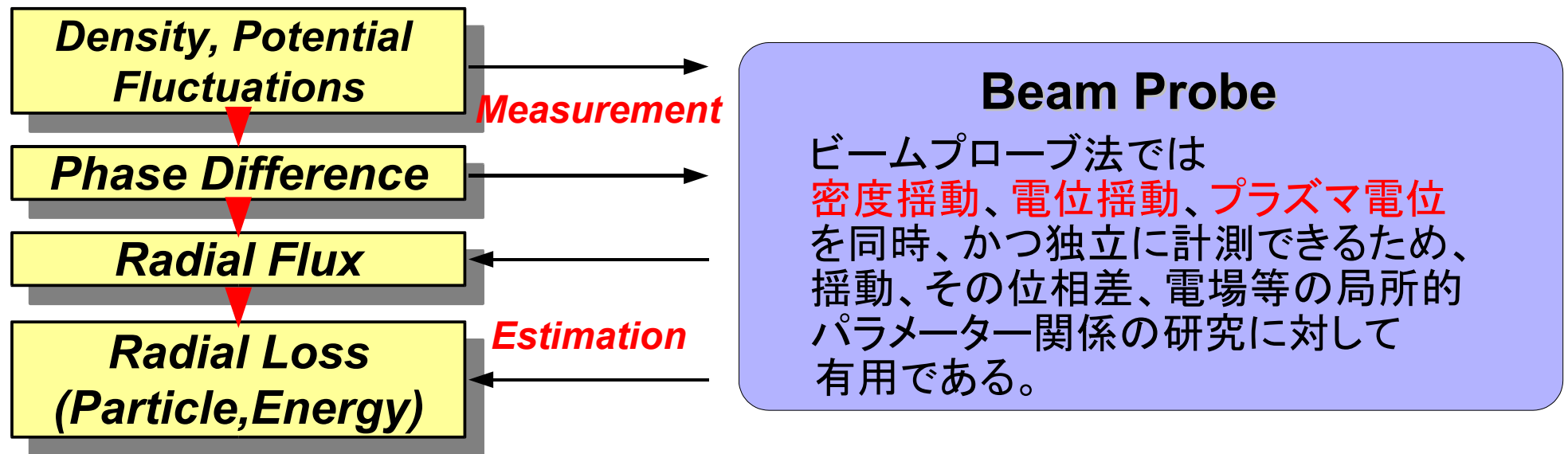
2005年3月 第8回 若手科学者によるプラズマ研究会

1. 研究の概要
2. フラックス計測の原理
3. ビームプローブによる揺動計測の原理
4. 揺動計測に対する Path Integral Effects
5. GAMMA 10 セントラルセルにおける揺動測定
6. まとめ

1. 研究の概要

密度揺動と電位揺動の間に生じる位相差は径方向粒子フラックスを見積もる上で重要なパラメータである。

また、揺動による異常損失は径方向閉じ込めと密接に関係しており、位相差の依存関係を調べることで揺動損失に対する知見を得ることができる。



〈研究の目的〉

- 密度揺動と電位揺動の位相差の依存性の解明。
- GAMMA 10におけるビームプローブ法によるフラックス計測法の確立。

2. フラックス計測の原理

方位角方向に伝播する密度揺動と電場揺動により生じる $\tilde{E}_\theta \times B_z$ ドリフトの平均値がゼロでないとするとき、径方向のフラックス Γ_r が存在する。

$$\Gamma_r = \langle \tilde{N} \tilde{V}_r \rangle = \langle \tilde{N} \tilde{E}_\theta \rangle / B_z$$

ここで、密度、電位、電場の揺動成分 $\tilde{N}, \tilde{\phi}, \tilde{E}_\theta$ を

$$\begin{aligned} \tilde{N} &= \int \tilde{n} \exp(i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t - \alpha_n)) d\omega \\ \tilde{\phi} &= \int \tilde{\phi} \exp(i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t - \alpha_\phi)) d\omega \\ \tilde{E}_\theta &= -\nabla_\theta \tilde{\phi} = \int -ik_\theta \tilde{\phi} \exp(i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t - \alpha_\phi)) d\omega \end{aligned}$$

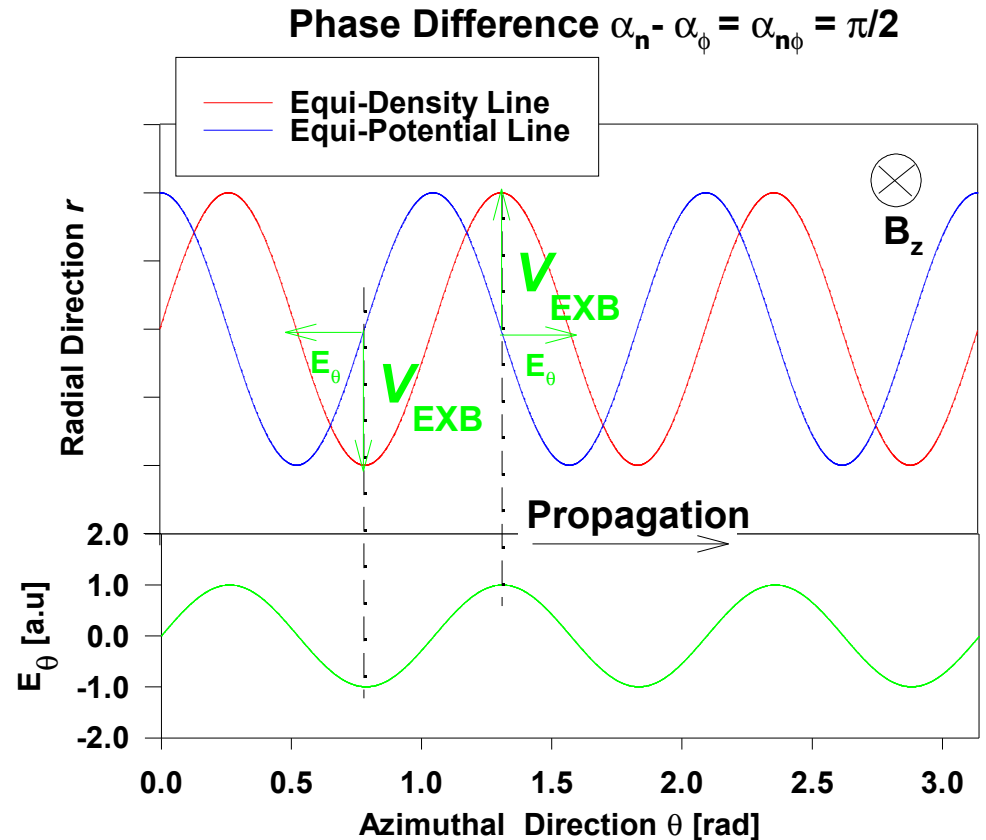
とすると、静電揺動による径方向フラックスは

$$\Gamma_r = \frac{-2}{B_z} \text{Re} \int ik_\theta \gamma \tilde{n} \tilde{\phi} \exp(i\alpha_{n\phi}) d\omega$$

ここで、 $\alpha_{n\phi} = \alpha_n - \alpha_\phi$ 、 γ は \tilde{n} と $\tilde{\phi}$ の位相差とコヒーレンスである。

よって径方向粒子フラックスは以下の式で見積もることができる。

$$\Gamma_r = \frac{-2}{B_z} \int k_\theta \gamma \tilde{n} \tilde{\phi} \sin \alpha_{n\phi} d\omega$$



揺動位相差による粒子フラックス

位相差により粒子フラックスの向きが変わり、さらに揺動の成長、減衰をも引き起こし得る。

3. ビームプローブによる揺動計測の原理

ビームプローブ法ではビームのエネルギーからプラズマ電位を計測することができる。また、ビーム電流量がプラズマの密度に依存するため、ビーム電流揺動も計測している。

計測されるビーム電流はビームがイオン化する速度係数を $Q_{i \rightarrow j} = n_e \times \langle \sigma_{\text{Au}^i \rightarrow \text{Au}^j} v_e \rangle / v_b$ 、イオン化点の幅を w_s とおくと

$$I_{\text{sec}} = I_0 Q_{0 \rightarrow 1} w_s \exp\left(-\int Q_{0 \rightarrow 1, 0 \rightarrow 2} dl_{\text{pri}}\right) \exp\left(-\int Q_{1 \rightarrow 2} dl_{\text{sec}}\right)$$

その揺動レベルは以下の式で表される。

$$\frac{\tilde{I}_{\text{sec}}}{I_{\text{sec}}} = \frac{\tilde{Q}_{0 \rightarrow 1}}{Q_{0 \rightarrow 1}} - \int \tilde{Q}_{0 \rightarrow 1}(l) dl_{\text{pri}} - \int \tilde{Q}_{1 \rightarrow 2}(l) dl_{\text{sec}}$$

第一項：イオン化点における揺動成分

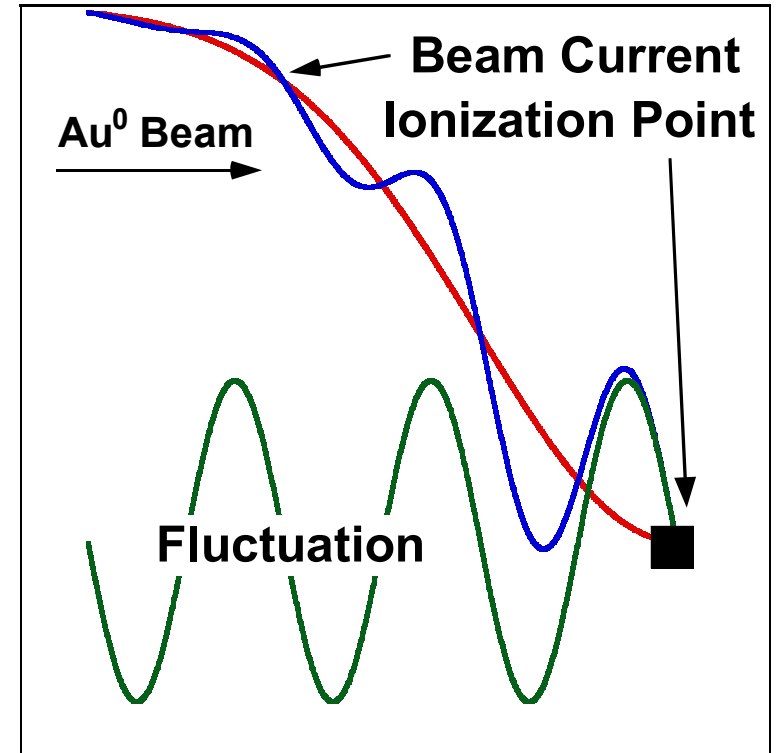
第二、三項：Primary, Secondary Beam における減衰項
⇒ Path Integral Effects

GAMMA 10 では中性粒子ビームを使用しているため、

$Q_{0 \rightarrow 1} \gg Q_{1 \rightarrow 2}$ である。

よって、計測される揺動レベルはイオン化点における揺動レベルと、Primary PIE である。

$$\frac{\tilde{I}_{\text{sec}}}{I_{\text{sec}}} \approx \frac{\tilde{n}_e}{n_e} - \int \tilde{Q}_{0 \rightarrow 1}(l) dl_{\text{pri}}$$



イオン化点に到着するビーム量が時間的に変動する。

4-1. 揺動計測に対する Path Integral Effects

単純なモデル

・ イオン化点における揺動 $Q = \Delta Q \sin(\omega t) + Q_0$

・ ビーム電流揺動 $I_{\text{pri}} = -\Delta I \sin(\omega t) + I_0$

(ビームは PIE により、イオン化点とは異なる位相になる。)
とすると、イオン化点で生成するビームは、

$$I_{\text{sec}} \propto I_{\text{pri}} Q = -\Delta I \Delta Q \sin^2(\omega t) - \Delta I Q_0 \sin(\omega t) + I_0 \Delta Q \sin(\omega t) + I_0 Q_0$$
$$I_{\text{sec}} \approx -\Delta I Q_0 \sin(\omega t) + I_0 \Delta Q \sin(\omega t)$$
$$I_{\text{sec}} \approx (I_0 \Delta Q - \Delta I Q_0) \sin(\omega t)$$

よって、イオン化係数とイオン化点までの Path Integral Effect の大きさにより Secondary Beam の位相が決まる。

$$\frac{\Delta I_{\text{sec}}}{I_2} \approx \frac{\Delta Q}{Q_0} - \frac{\Delta I}{I_0} \sin(\omega t)$$

ビーム電流揺動の位相、強度が密度揺動の位相、強度と異なる可能性がある。

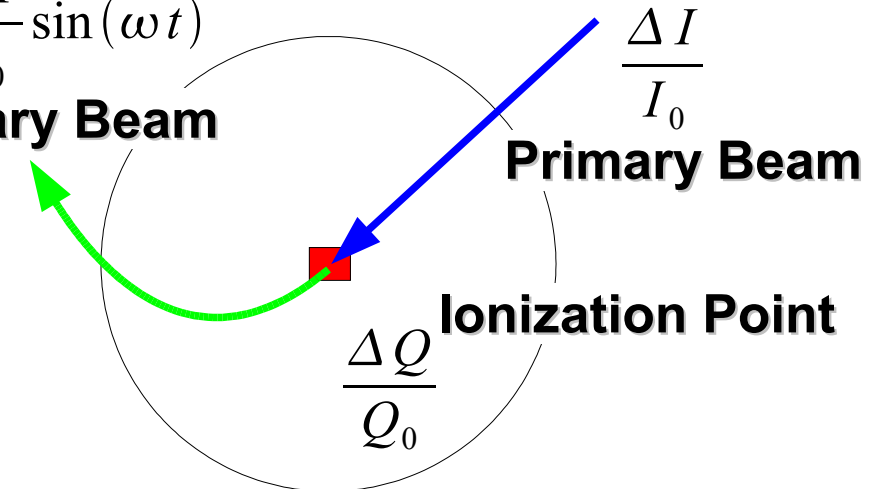


数値計算により、検討する。

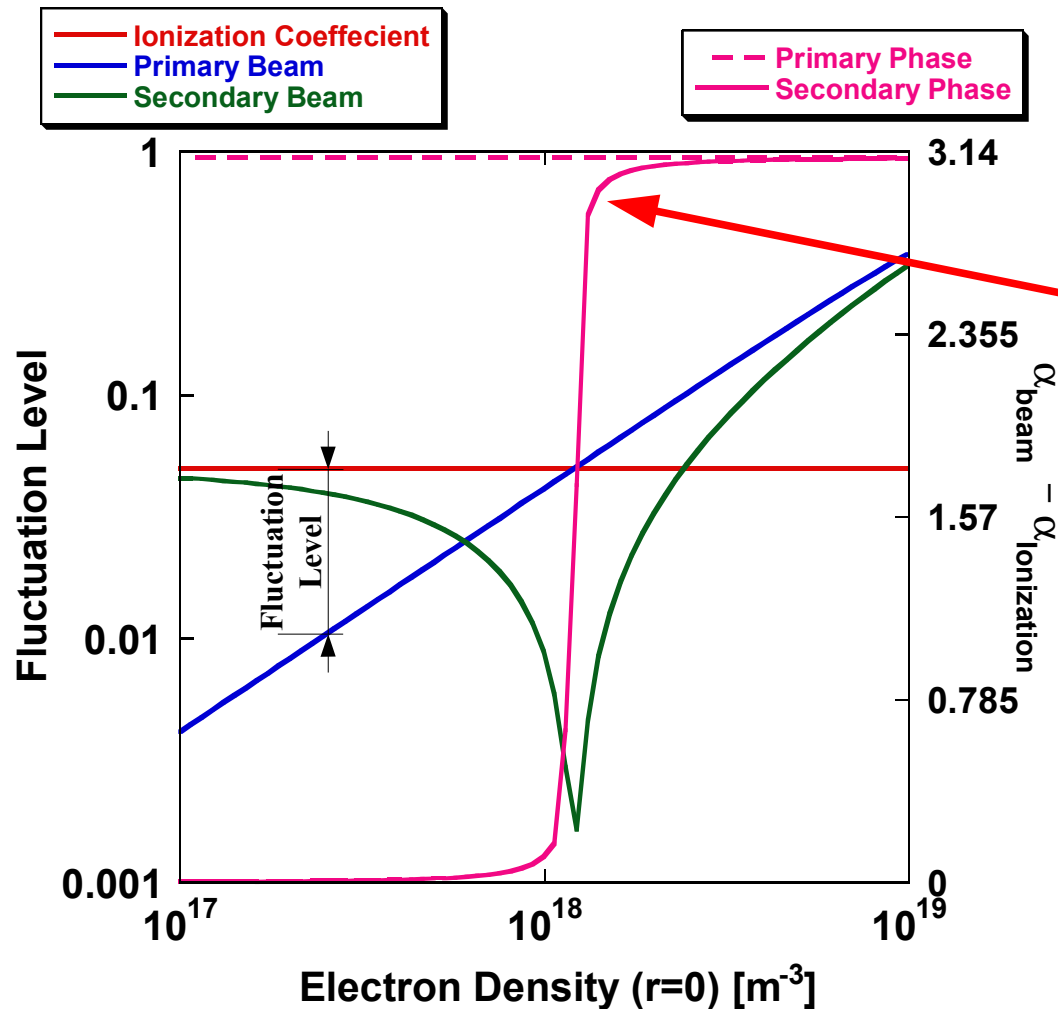
Secondary Beam

Primary Beam

Ionization Point



4-2.Path Integral Effects 数値計算



単純に振動する低周波揺動に対する結果では、密度が増加するにつれ PIE が大きくなり、

$$\frac{\tilde{I}_{\text{pri}}}{I_{\text{pri}}} = \frac{\tilde{Q}}{Q}$$

を満たすと、**Secondary Beam の位相が PIE の位相と同じになった。**

本研究では方位角方向に伝播する揺動が存在するプラズマでの計測を想定している。

⇒ ビームが軌道上で感じる実効的な波長が短い場合には単純な効果ではなくなる。

4-5.Path Integral Effects フローチャート

ビームプローブによる揺動計測

PIE による揺動レベル $\frac{\tilde{I}_{pri}}{I_{pri}}$ 、イオン化点における揺動レベル $\frac{\tilde{Q}}{Q}$

$$\frac{\tilde{I}_{pri}}{I_{pri}} > \frac{\tilde{Q}}{Q}$$

高密度 or 大振幅

低密度 or 小振幅

$n_e \approx 2 \times 10^{18} [\text{m}^{-3}], \text{Fluctuation } 10\%$

$$\frac{\tilde{I}_{pri}}{I_{pri}} < \frac{\tilde{Q}}{Q}$$

プラズマ中の Beam Path : l_{beam}
Beam が感じる揺動の波長 : λ_{beam}

高周波 or 短波長 | 低周波 or 長波長

$\lambda_{beam} \approx 5 \text{ cm}, \omega \approx 500 \text{ k Hz}$

$$l_{beam} > \lambda_{beam}$$

$$l_{beam} < \lambda_{beam}$$

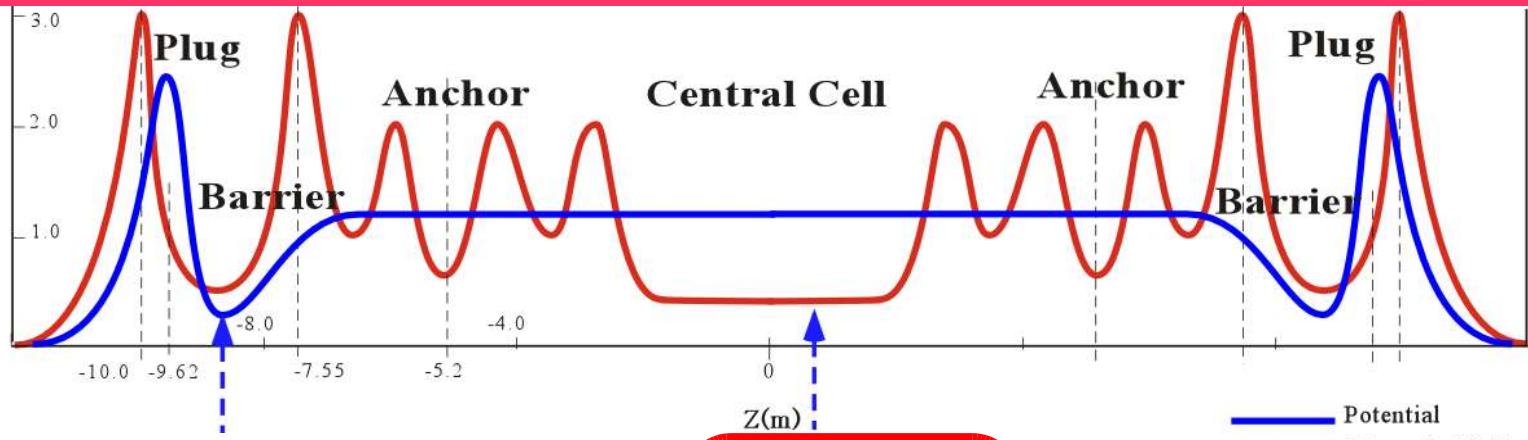
強度、位相共に計測可能

強度が積分される。ビームの位相は揺動と同じ、あるいは反転
⇒ 強度の Path Integral Effects

位相が積分される。ビームの強度は軌道上でキャンセルされ、揺動強度に近づく。
⇒ 位相の Path Integral Effects

本研究では、方位角方向に伝播する低周波揺動を計測しているため、計測された位相差は $|\sin(\alpha_{n\phi})|$ とすれば、PIEの影響を考慮しなくて良い。

5-1.GAMMA 10 におけるビームプローブ

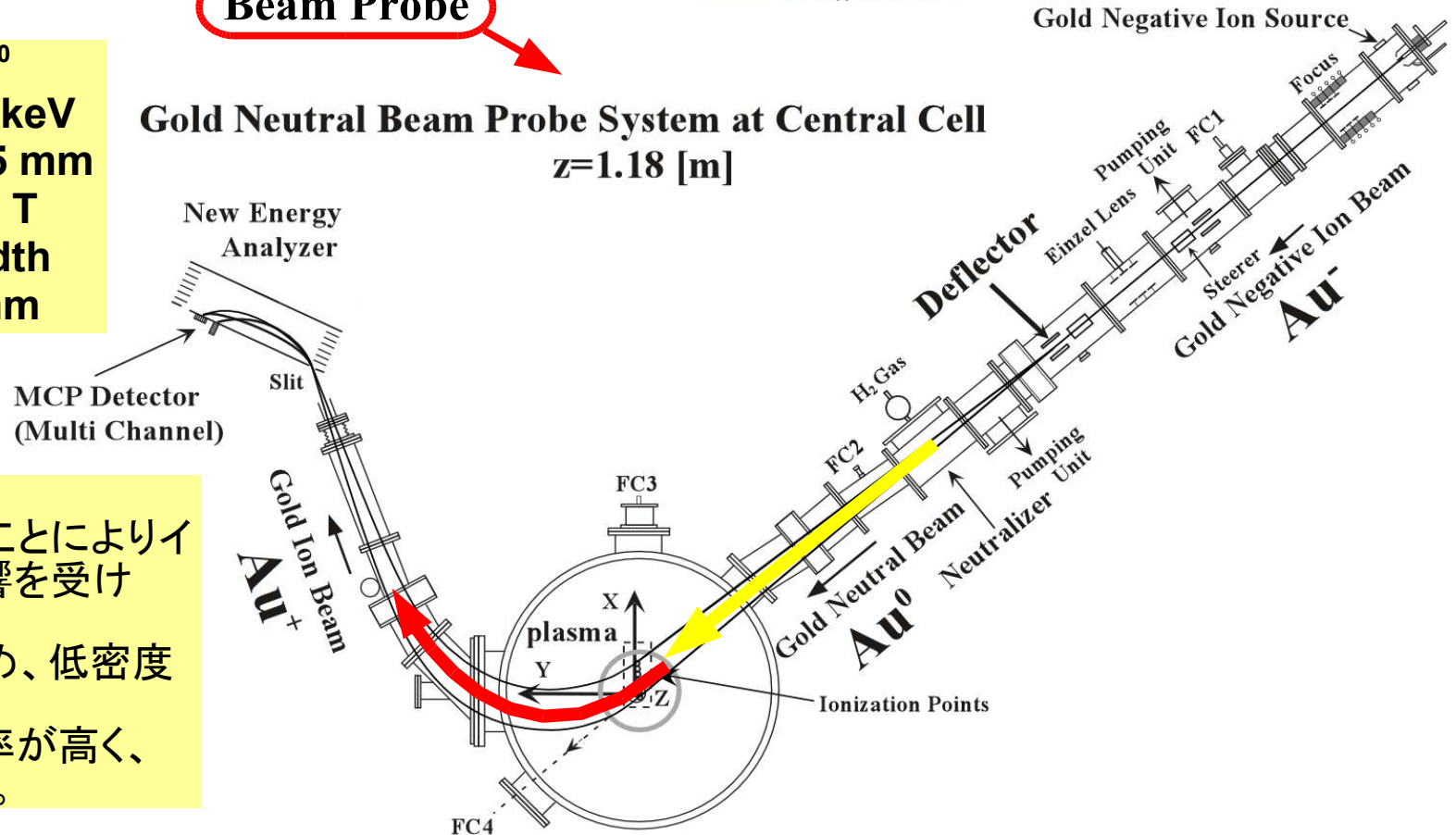


Beam Probe

Beam Probe

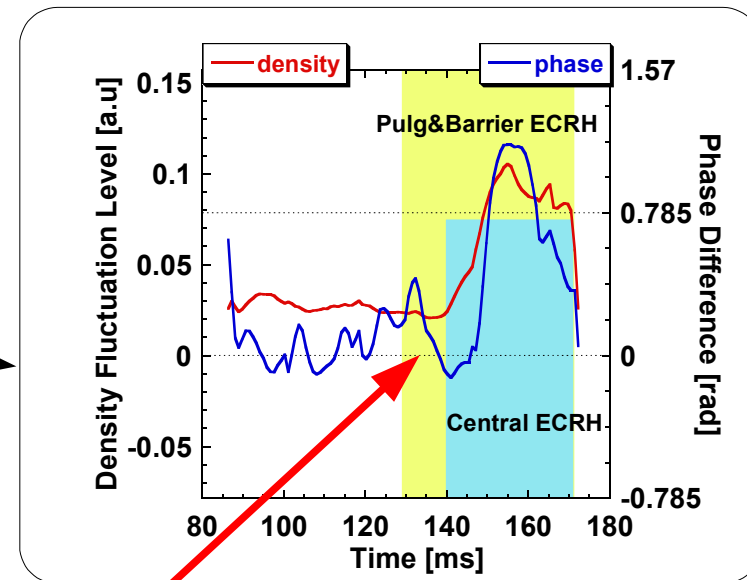
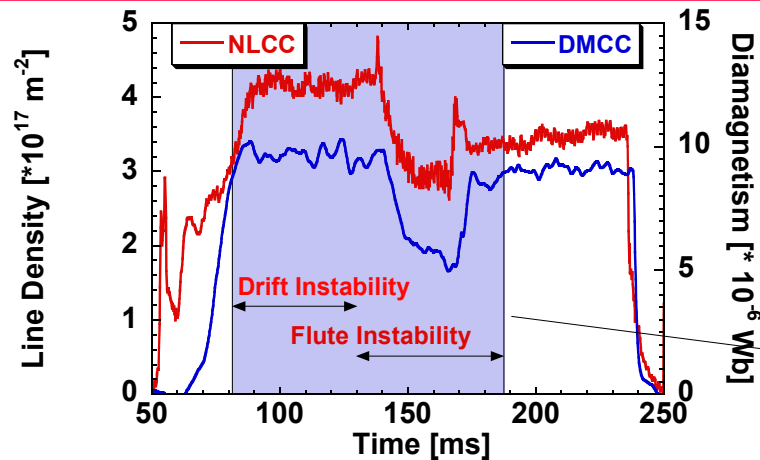
Beam	: Au^0
Beam Energy	: 12 keV
Beam Radius	: ~ 5 mm
B_z	: 0.4 T
Ionization Points Width	: 1 mm

Gold Neutral Beam Probe System at Central Cell
 $z=1.18$ [m]



- 特徴:
- 中性粒子ビームを利用することによりイオン化点までに電磁場の影響を受けず、軌道が単純。
 - イオン化断面積が大きいいため、低密度領域での計測も可能。
 - 負イオンを利用し中性化効率が高く、ビーム電流量を大きく取れる。

5-2. 揺動計測結果〈Path Integral Effects の例〉

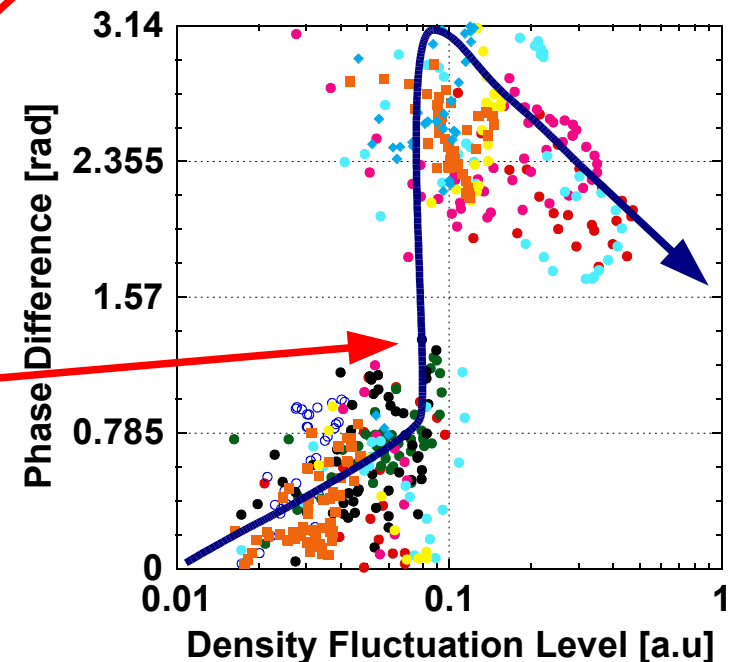


GAMMA 10 では壁コンディショニングが進んでいない時、ECRH 印加と共にフルート不安定性が発生する。

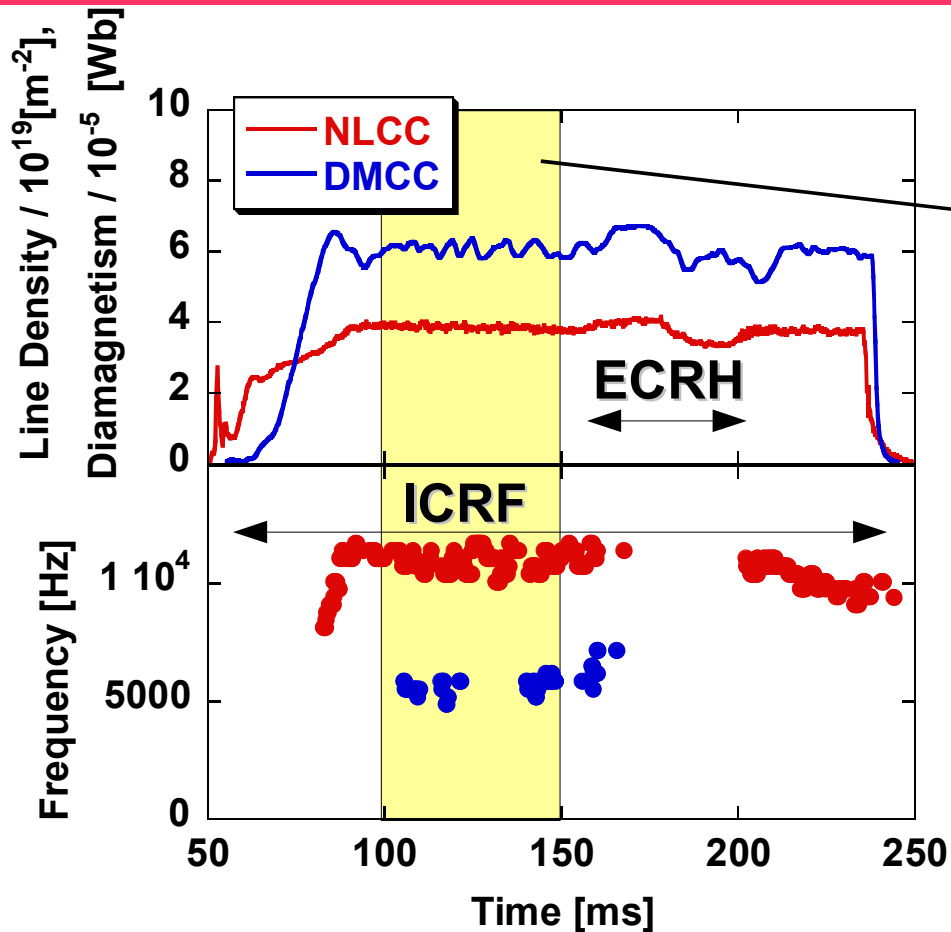
ビームプローブによるフルート型揺動の計測では、密度揺動レベルが上昇するにつれ、密度揺動と電位揺動の位相差が大きくなる。

位相差の揺動レベル依存性を調べると、0.1 程度で π 反転し、 $\pi/2$ に向かう傾向がある。

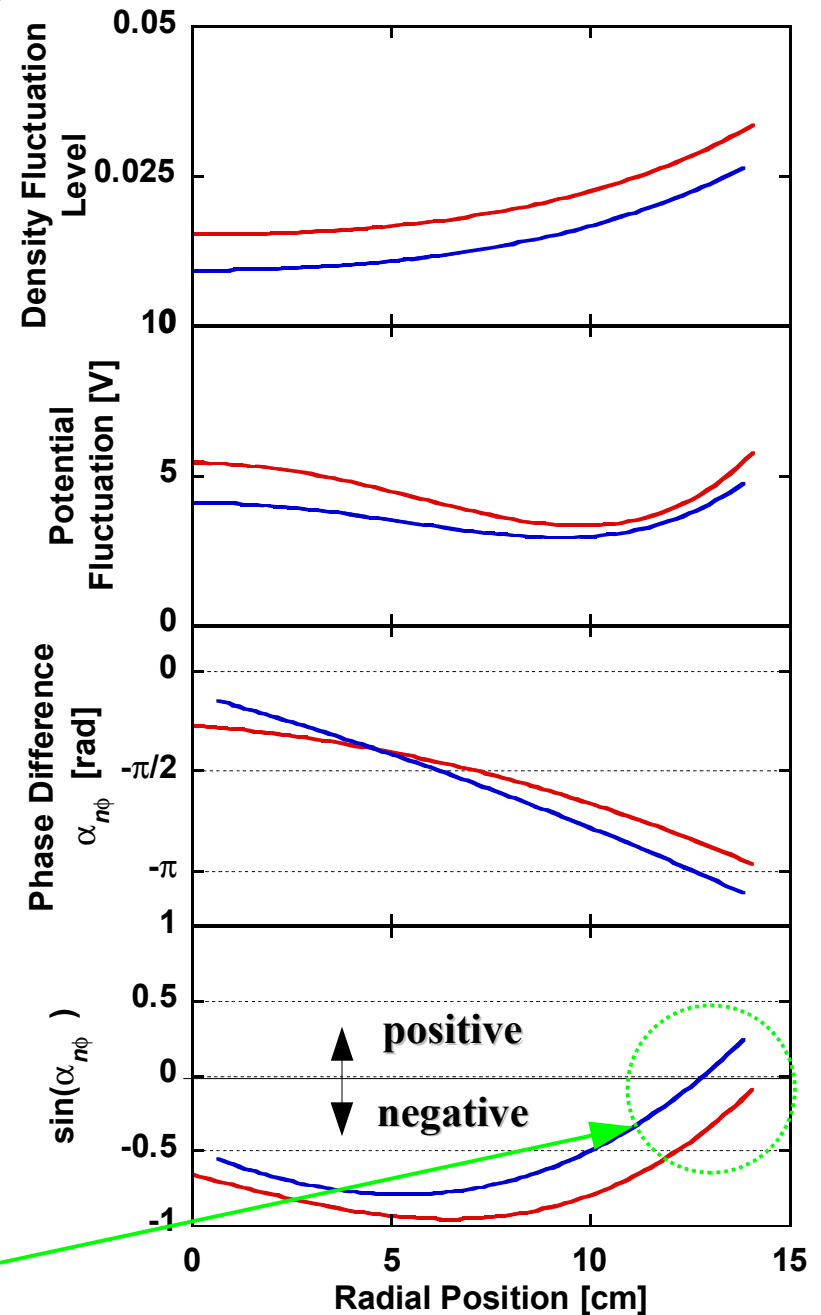
これは PIE により、ビーム電流揺動が本来の密度揺動に対して位相が π 反転したことによると思われる。



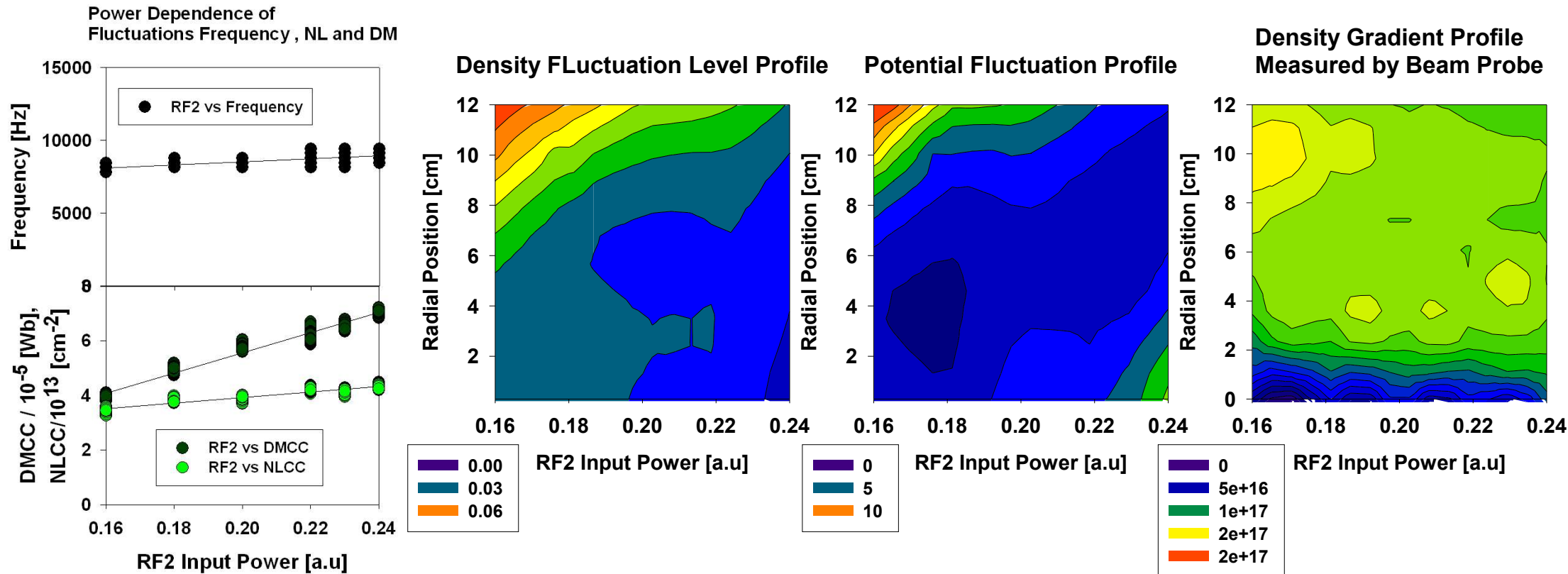
5-3.GAMMA 10 セントラルセルにおける揺動計測



GAMMA 10 では ICRF 印加中に数 kHz ~ 数 10kHz のドリフト型揺動が観測される。周波数は径方向位置に依存せず、周辺部での揺動レベルが大きく、モードによって径方向のプロファイルが異なる。また、定常状態では位相差が周辺部で正負の値をとる事がある。



5-4.ドリフト型揺動のイオン加熱電力に対する変化

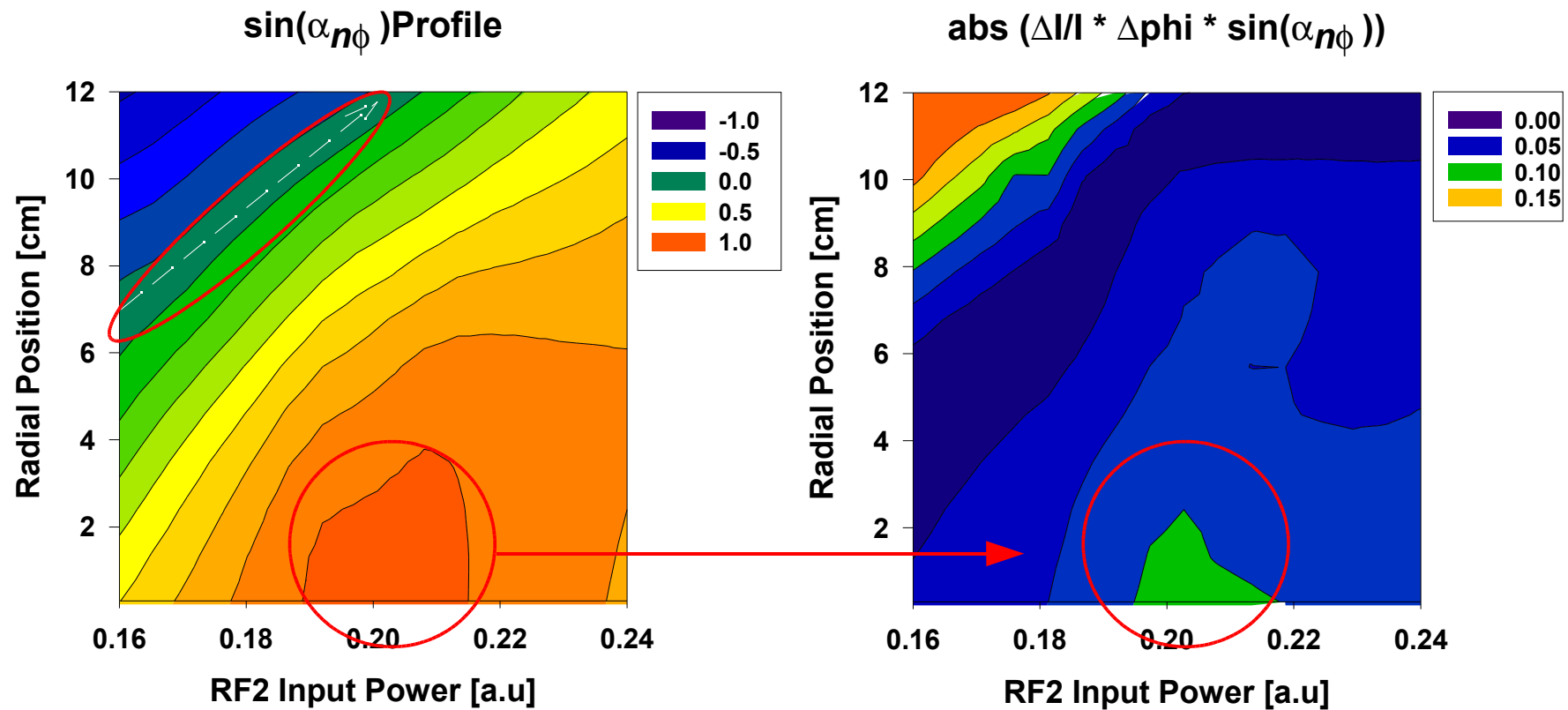


イオン加熱電力の増加に対して、

- **密度揺動**⇒周辺部に局在している。
- **電位揺動**⇒高電力時 (High T_i) に中心部での強度が増加

密度勾配の大きいところと、密度揺動レベルは似たような振る舞いを示した。

5-5.ドリフト型揺動のイオン加熱電力に対する変化



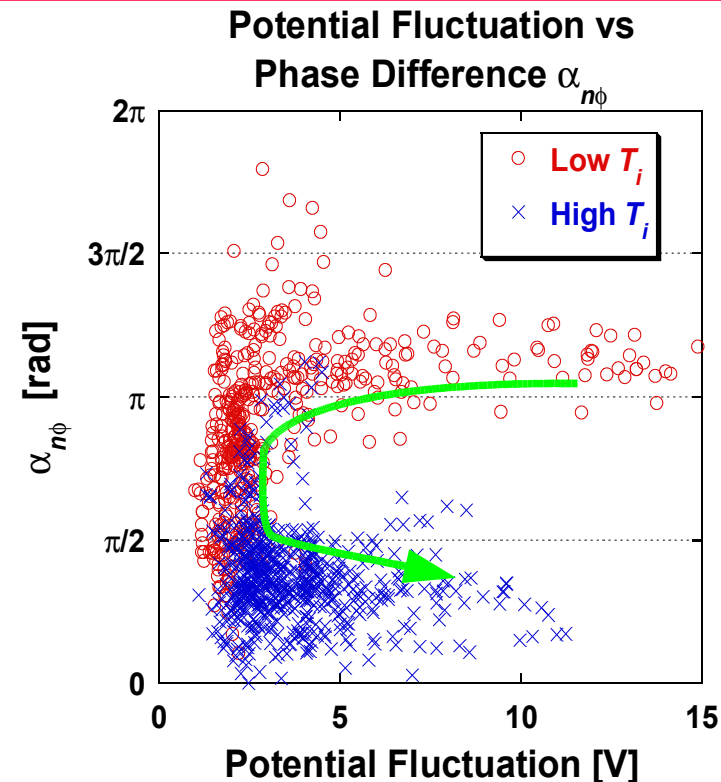
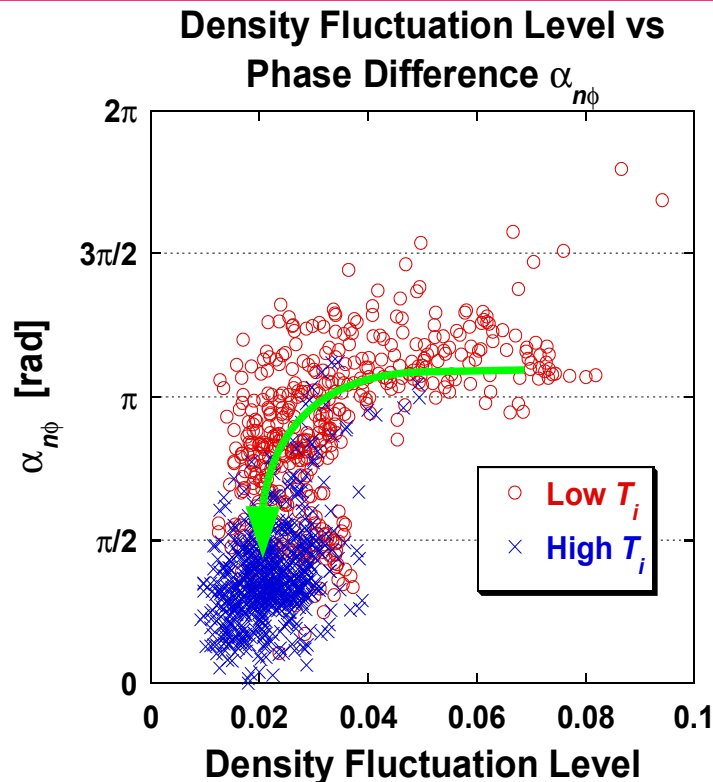
イオン加熱電力の増加に対して、

- 位相差分布 \Rightarrow 位相差がゼロになる点があり、外側へ移動
- フラックス \Rightarrow 高電力時 (High T_i) に中心部での強度が増加

フラックスの中心部での増加は位相差と電位揺動の増加による影響と考えられる。

高電力時のドリフト波の振る舞いは低電力時と異なる。

5-6. ドリフト型揺動のイオン加熱電力に対する変化



イオン温度、密度電位揺動に対する位相差の振る舞いが異なっている。

揺動の位相差は何によって決まるのか。

- ドリフト型揺動の場合、揺動の強度ではないパラメーターによって、揺動の位相差が決まる？

ドリフト型揺動では局所的なパラメーターによって位相差が決まっている可能性がある。

5-7.ドリフト型揺動の位相差

<ドリフト波の位相差決定>

局所的なパラメーターで位相差が決まっている。

電位摂動が存在する時の電子密度の応答は修正ボルツマン分布により以下の式で表される。

$$\frac{n_{ek}}{n_e} = [1 - i\delta_k] \frac{e\Phi_k}{T_e}$$

ドリフト波の場合、

$$\delta_k = \frac{\sqrt{\pi/2}(\omega_{De} + \omega_{E \times B} - \omega)}{|k_z|v_{Te}}$$

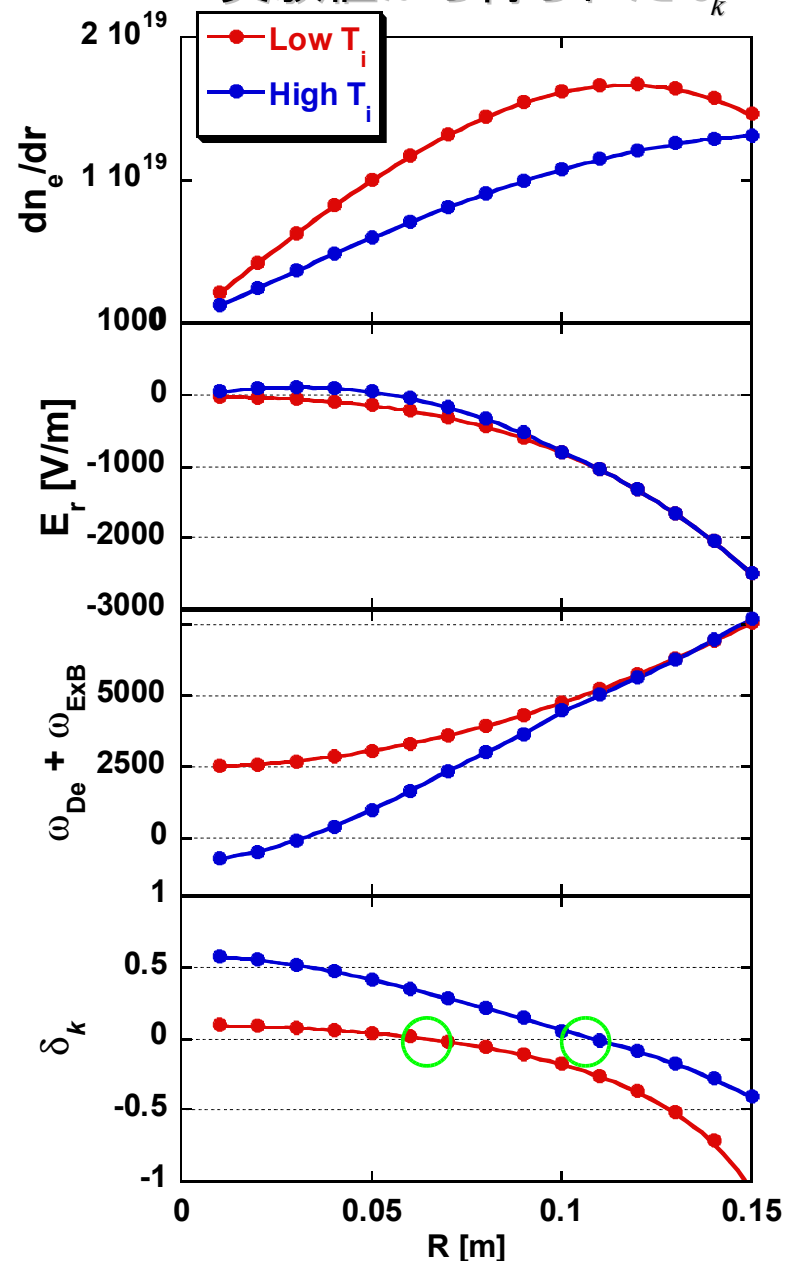
である。 ω_{De} 、 $\omega_{E \times B}$ は電子ドリフト周波数、 $E \times B$ ドリフト周波数、 v_{Te} は電子の熱速度、 ω は観測された周波数である。

密度揺動と電位揺動の位相差 $\alpha_{n\phi}$ と δ_k は以下の関係になっている。

$$\sin(\alpha_{n\phi}) \approx -\delta_k$$

よって、局所的なドリフト周波数とプラズマ全体で観測される揺動の周波数の差で位相差が決まると考えられる。

実験値から得られた δ_k



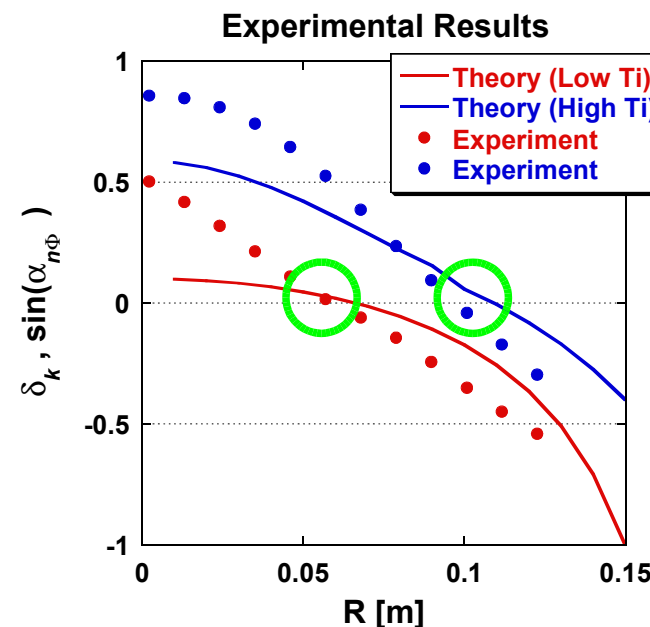
5-8.ドリフト型揺動の位相差

実験値と理論曲線を比較したところ、同じ傾向が見られた。
また、 $\delta_k=0$ になるところは

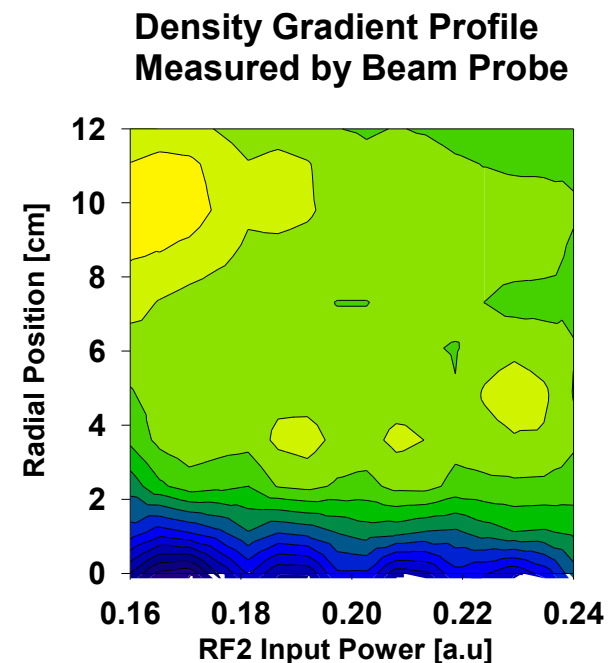
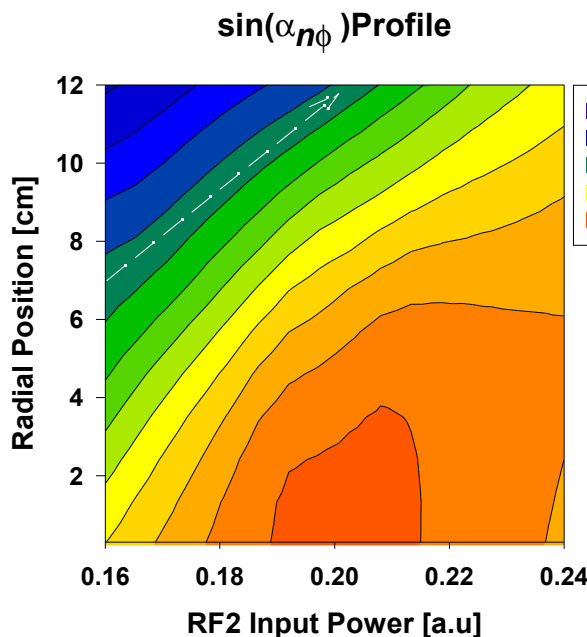
$$\delta_k \propto \omega_{De} + \omega_{E \times B} - \omega = 0$$

$$\omega = \omega_{De} + \omega_{E \times B}$$

であり、観測される周波数が局所的なドリフト周波数と等しい、つまり、ドリフト波のソースとなっている場所であることが予測される。



位相差がゼロになる点、つまりドリフト波の発生源が外側へ推移しているという解釈ができ、これは密度勾配の推移からも予測される。



6.Summary

- ビームプローブを用いてドリフト型揺動を測定し、密度揺動レベル、電位揺動強度、またそれらの位相差を求めて、フラックス計測法の確立を目指した。
- ドリフト型揺動の揺動強度は周辺部に局在し、径方向の密度勾配分布と共に、周辺部へと推移した。
- 揺動の位相差は揺動強度には依存しておらず、局所的な電子ドリフト周波数、また、 $E \times B$ ドリフト周波数に依存していることが示唆された。
- 位相差がゼロになる点では観測される周波数と、局所的なドリフト周波数が釣合っており、揺動のソースとなっている場所と思われる。

<future tasks>

- 径方向に広範囲な揺動測定が必要
- 径方向の相関長、電場シアーとの関連性
- フラックスと径方向粒子輸送の評価