



ヘリオトロンJにおける干渉計測による ガスパフ密度変動実験

大谷芳明¹, 野崎勇樹¹

田中謙治², 南貴司³, 大島慎介³, 秋山毅志², 長崎百伸³, 中村祐司¹, 岡田浩之³,
門信一郎³, 小林進二³, 山本聡³, 木島滋³, 鈕持尚輝¹, 呂湘浚¹, 水内亨³

¹京都大学エネルギー科学研究科

²自然科学研究機構核融合科学研究所

³京都大学エネルギー理工学研究所

otani.yoshiaki.68r@st.kyoto-u.ac.jp



1. 導入
2. ヘリオトロン J 及び干渉計システム
3. 計測結果
4. 粒子輸送解析手法及び結果
5. まとめ

1. 導入
2. ヘリオトロン J 及び干渉計システム
3. 計測結果
4. 粒子輸送解析手法及び結果
5. まとめ

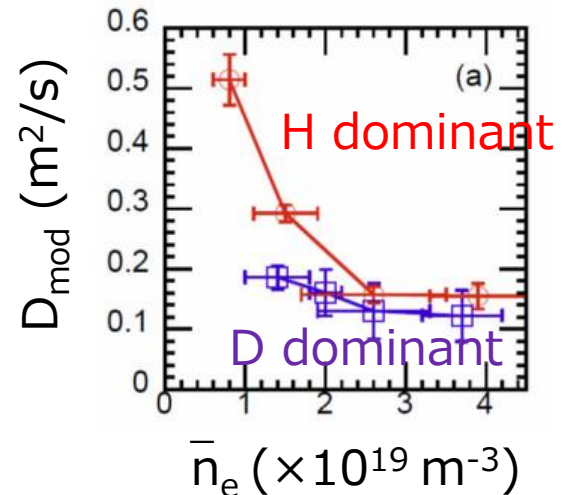
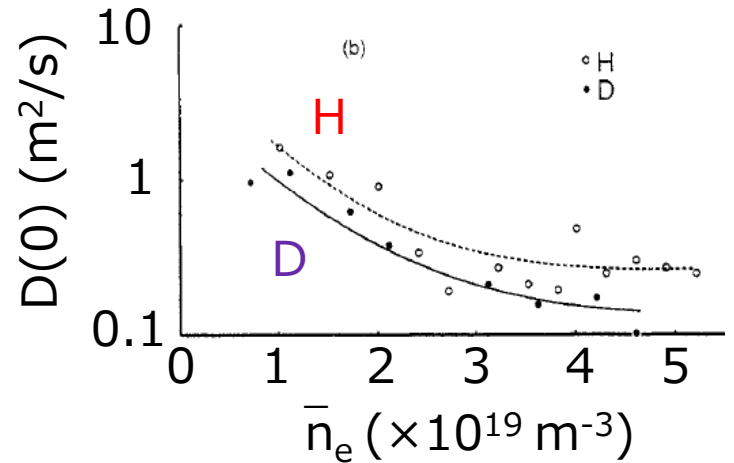
➤ 粒子輸送特性に対する水素同位体効果は、将来のD-T反応による核融合炉の閉じ込め性能を評価する上で重要。

➤ ASDEXトカマクにおいては軽水素プラズマよりも重水素プラズマの粒子輸送特性が良いと報告されている。

[K. W. Gentle et al., Nucl. Fusion **32**, 2 (1992)]

➤ ヘリカル型装置であるCHSにおいては $\bar{n}_e < 2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の密度領域において、軽水素プラズマと比較して重水素プラズマの拡散係数は小さく、大きな内向き対流速度を持つが、 $\bar{n}_e > 2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の密度領域では、明確な粒子輸送特性に対する水素同位体効果は観測されていない。

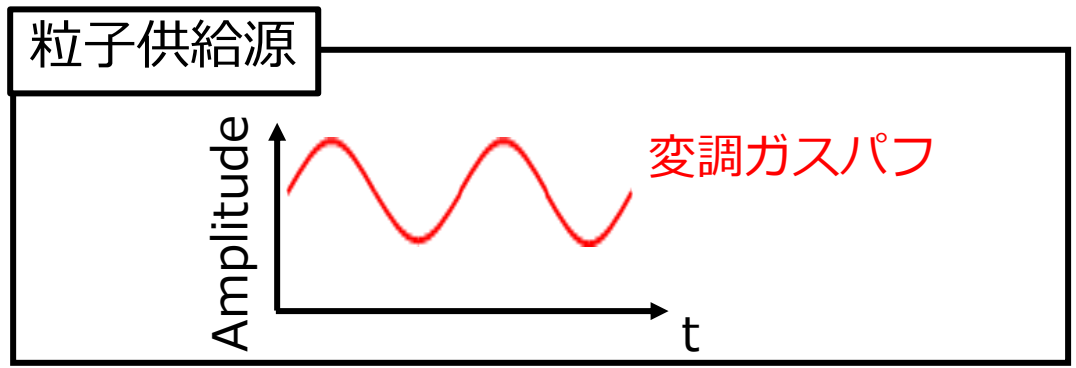
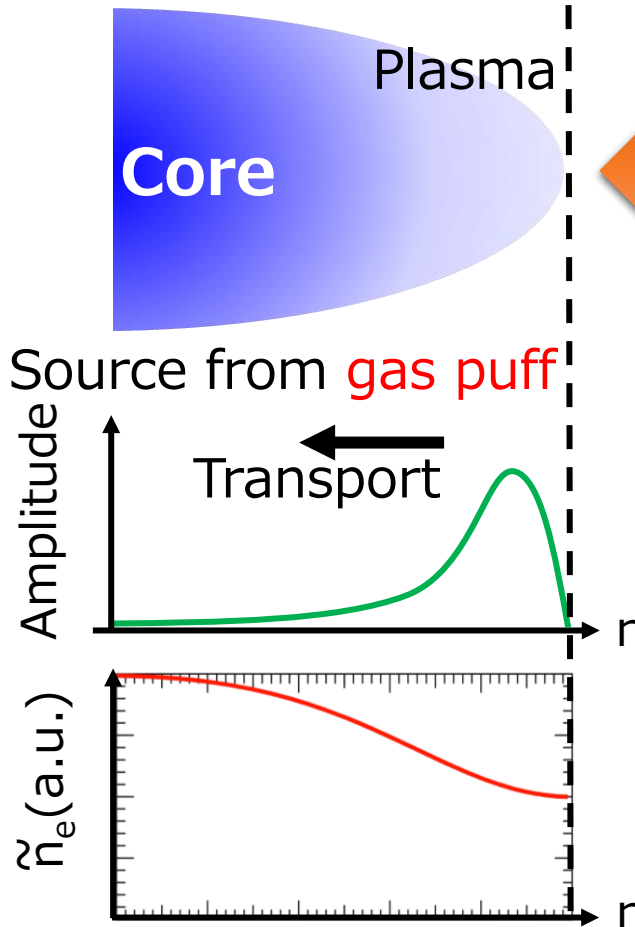
[K. Tanaka et al, to be published Plasma Phys. Contrl. Fusion (2016)]



ガスパフによる密度変調実験の概要

JT-60U, ASDEX, CHS 等において、ガスパフ変調実験が行われており、多視線の干渉計を用いた計測により、粒子輸送特性の評価をしている。

[K. NAGASHIMA et al., Nucl. Fusion **33**. 11 (1993), K. W. Gentle et al., Nucl. Fusion **32**. 2 (1992), K. Tanaka et al., to be published Plasma Phys. Contrl. Fusion (2016)]



- 変調ガスパフ入射
- ➔ プラズマの粒子輸送特性に従い、揺動が中心部へ伝搬
- 粒子輸送
- ➔ 中心への揺動伝搬
- ➔ 周辺の振幅
- ➔ 周辺と中心の位相差
- ➔ 干渉計の視線差により振幅と位相を調べる

小
遅
大
大

変調振幅と位相遅れから粒子輸送特性を評価可能



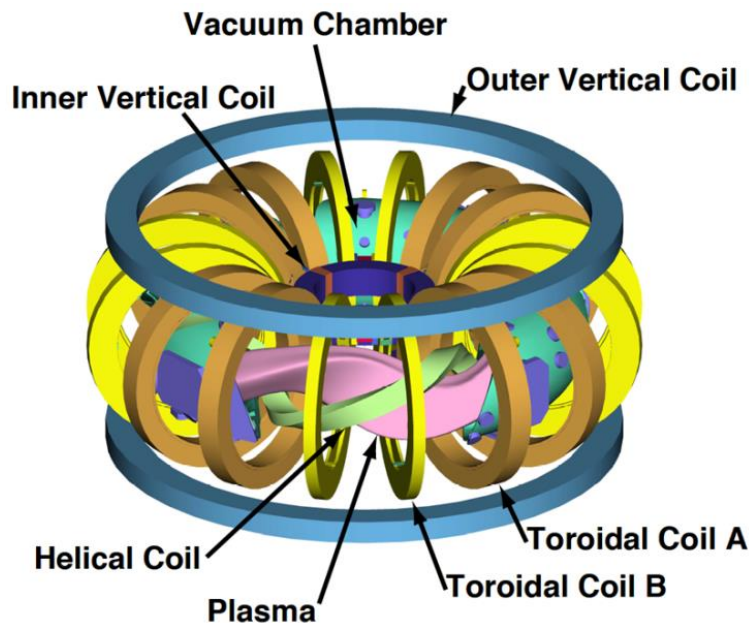
1. 導入

2. ヘリオトロン J 及び干渉計システム

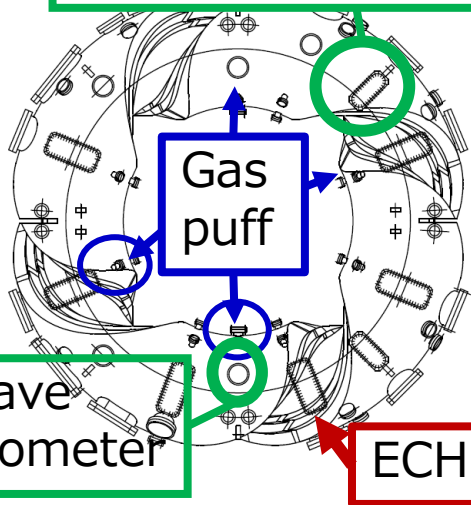
3. 計測結果

4. 粒子輸送解析手法及び結果

5. まとめ



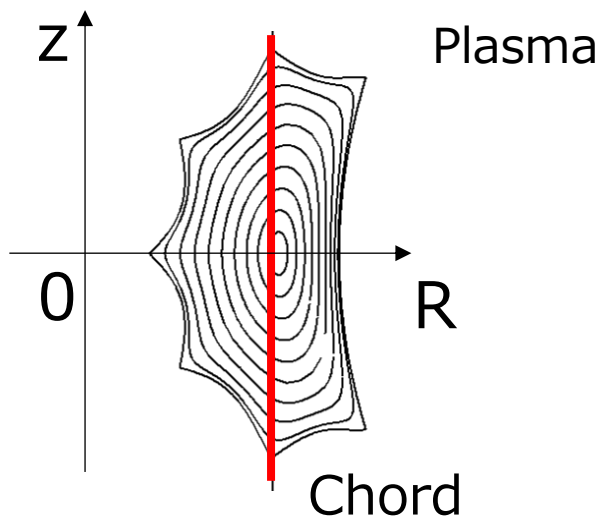
FIR laser interferometer



- ヘリカルコイル
Pole / Pitch number $L/M = 1/4$
- プラズマサイズ
大半径 = 1.2 m
小半径 = 0.1 ~ 0.2 m
- 磁場強度
 $B_{Tmax} \leq 1.5 \text{ T}$
- 電子密度
 $n_e : 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
- 電子温度
 $T_e : 2.5 \text{ keV}$
- イオン温度
 $T_i : 0.4 \text{ keV}$
- 加熱装置
ECH, NBI, ICH
- 給気装置
ガスパフ, SMBI, ペレット

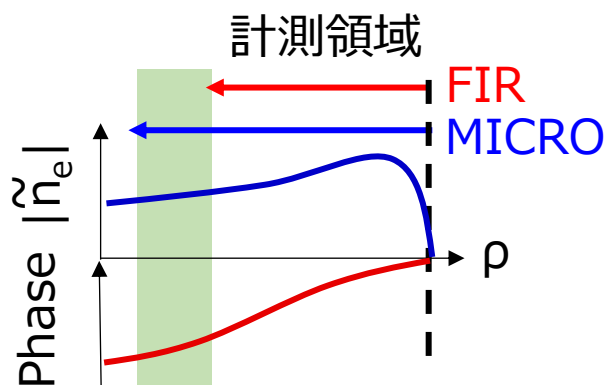
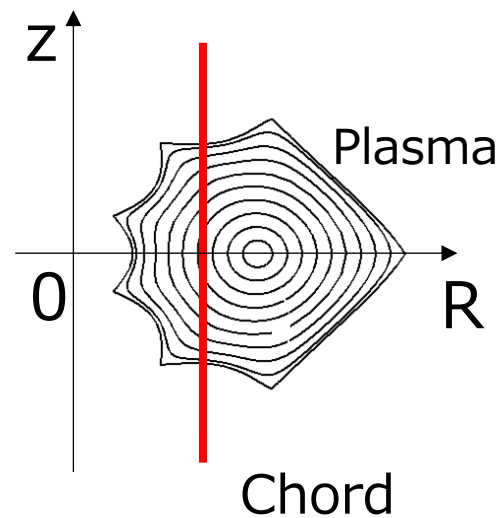
マイクロ波干渉計 ($\lambda = 2.3 \text{ mm}$)

視線 $\rho = 0.05$



FIRレーザー干渉計 ($\lambda = 337 \mu\text{m}$)

視線 $\rho = 0.35$



FIRレーザー干渉計：周辺領域を中心に計測

マイクロ波干渉計：全域を計測

→ 比較することで周辺領域から中心領域への変調成分の伝搬を調べる。



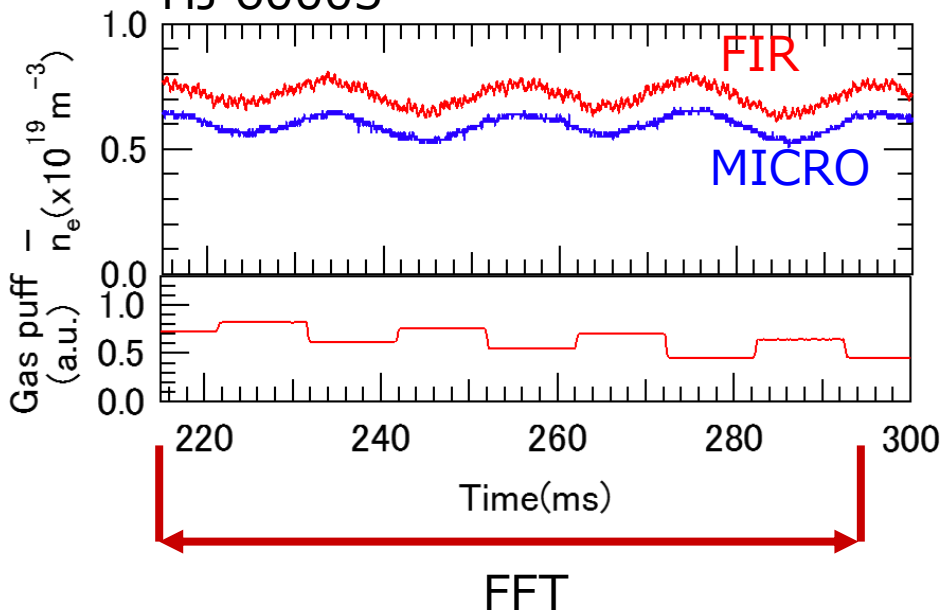
1. 導入
2. ヘリオトロン J 及び干渉計システム
3. 計測結果
4. 粒子輸送解析手法及び結果
5. まとめ

HJ 60003 ~ 60011

D plasma $H/(H+D) \sim 0.1$

ECH 250 kW 50 Hz modulation

HJ 60003



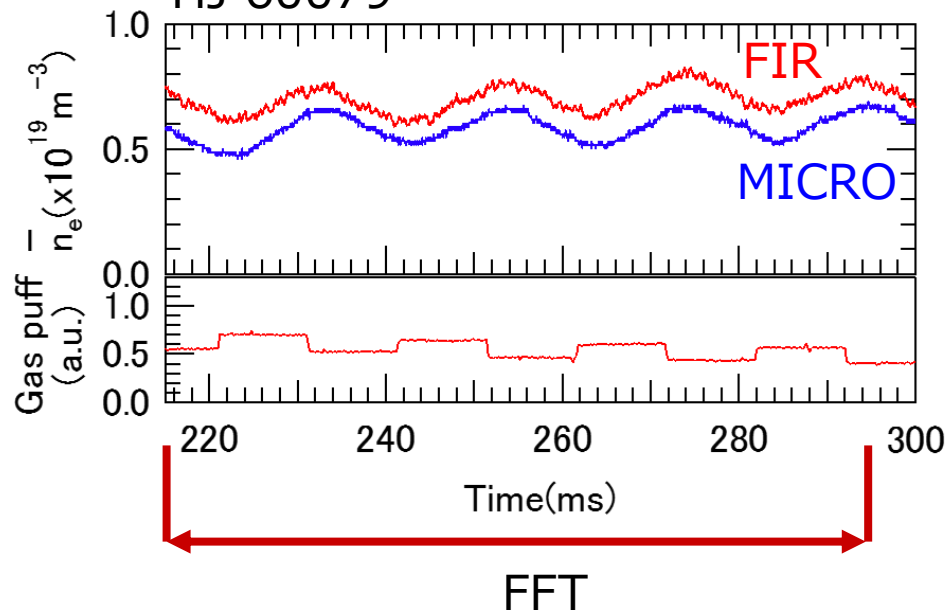
密度変調 : $\bar{n}_e^{\text{MICRO}} \sim 0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \pm 10 \%$

HJ 60079 ~ 60088

H plasma $H/(H+D) \sim 0.8$

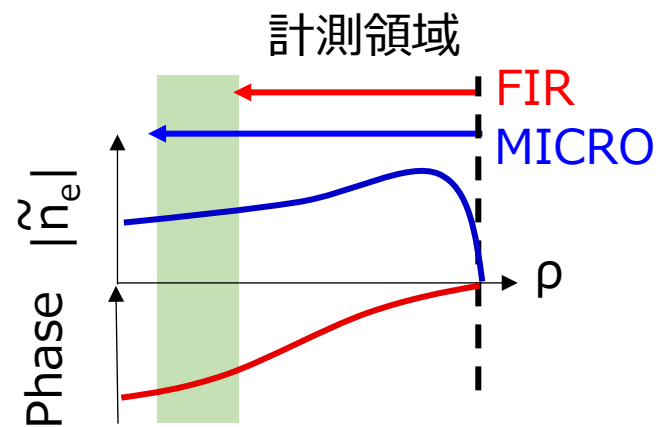
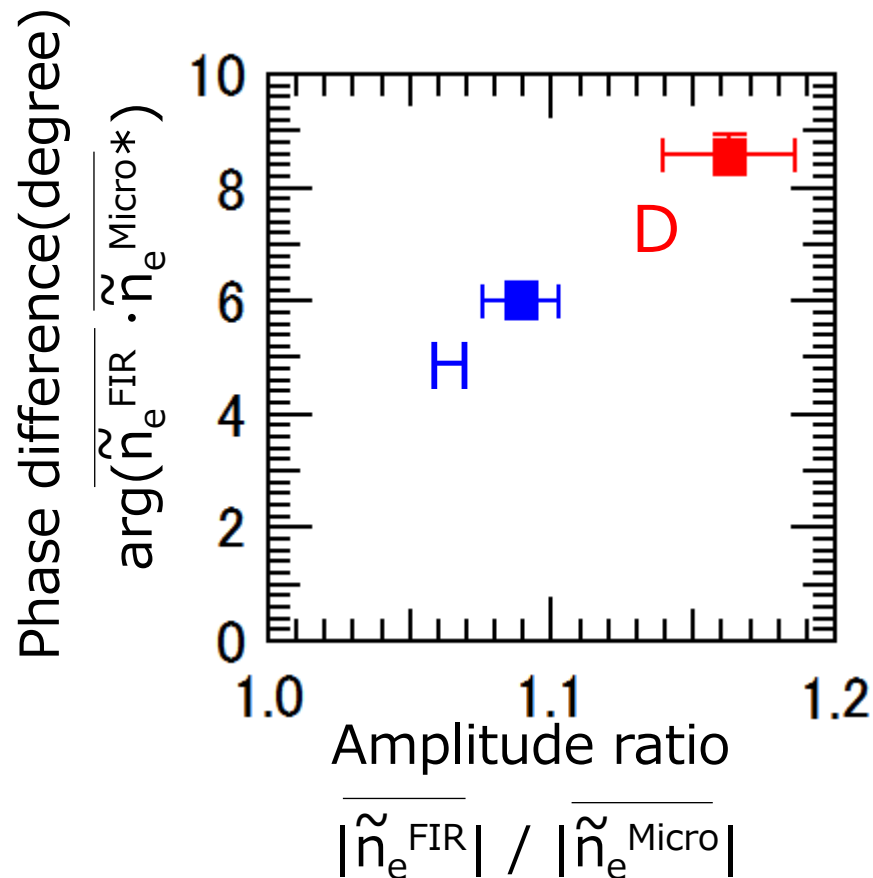
ECH 250 kW 50 Hz modulation

HJ 60079



➔ FIRレーザー干渉計とマイクロ波干渉計間の位相差と振幅比をフーリエ解析により評価

重水素及び軽水素プラズマの線平均電子密度に対して、マイクロ波・FIRレーザ干渉計間の位相差及び振幅比を求めた。



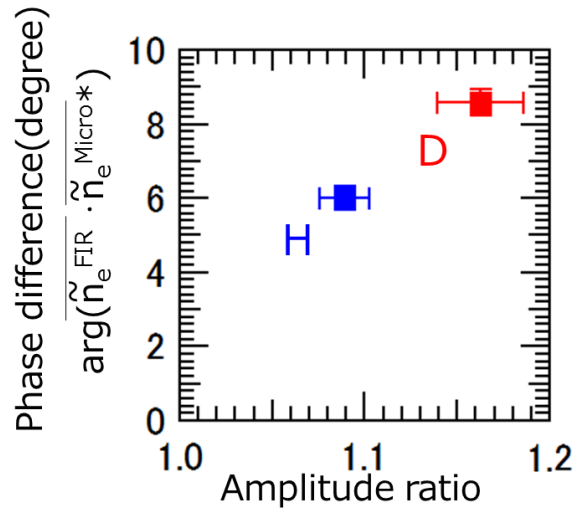
- 振幅比
- ➔ D plasma > H plasma
- 位相差
- ➔ D plasma > H plasma

位相差・振幅比ともに重水素プラズマの方が大きい値をとった。



1. 導入
2. ヘリオトロン J 及び干渉計システム
3. 計測結果
4. 粒子輸送解析手法及び結果
5. まとめ

実験結果



↓ 複素振幅

$$\overline{\tilde{n}_{eR}} = A \cos \varphi \quad \overline{\tilde{n}_{eI}} = A \sin \varphi$$

モデル計算

Particle balance

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = -\nabla \cdot \Gamma + S$$

Particle flux

$$\Gamma = -D\nabla n_e + n_e V$$

↓
D, V, S を仮定
数値計算

$$\tilde{n}(r) = \tilde{n}_{eR}(r) + i\tilde{n}_{eI}(r)$$

↓ 干渉計視線で線平均

$$\tilde{n}_e^{FIR} \quad \tilde{n}_e^{MICRO}$$

↓ 位相差 φ · 振幅比 A
↓ 複素振幅

$$\overline{\tilde{n}_{eR}} = A \cos \varphi \quad \overline{\tilde{n}_{eI}} = A \sin \varphi$$

実験結果とモデル計算の結果を比較することにより
拡散係数 D 及び対流速度 V を決定する。

Particle balance equation

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = -\nabla \cdot \Gamma + S$$

Particle Flux equation

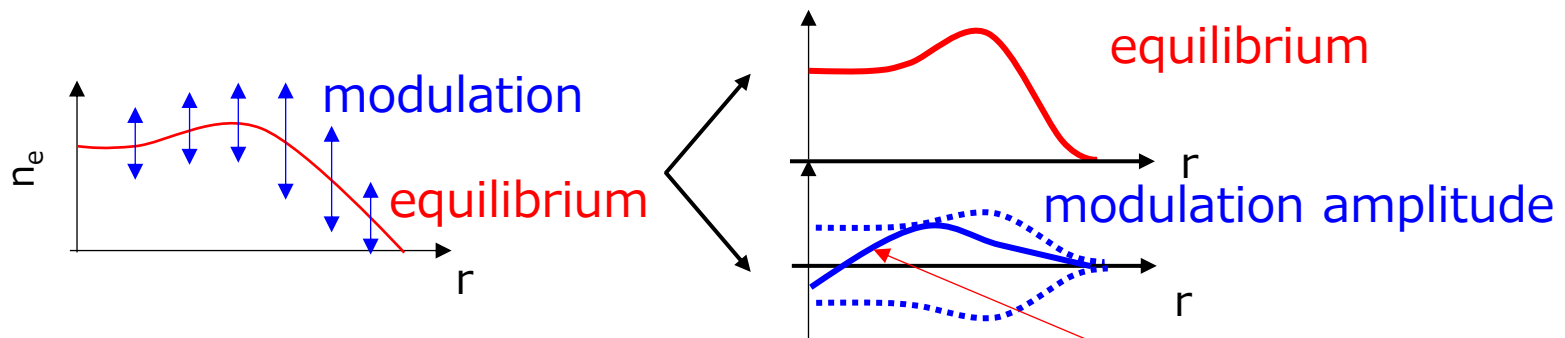
$$\Gamma = -D\nabla n_e + n_e V$$

D : 拡散係数

V : 対流速度

S : ソース項

$$n_e = n_{e\text{ eq}} + \underbrace{\tilde{n}_e(t, r)}_{\text{変動成分}}, \quad S = S_{\text{ eq}} + \underbrace{\tilde{S}(t, r)}_{\text{変動成分}}$$



➤ 仮定

変動成分はソースの変調角周波数 ω に同期。

ある瞬間での変動成分

$$\tilde{S}(t, r) = \tilde{S} e^{i\omega t}, \quad \tilde{n}_e(t, r) = \tilde{n}_e e^{i\omega t}, \quad \frac{\partial \tilde{n}_e}{\partial t}(t, r) = i\omega \tilde{n}_e$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{n}_e}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{D} \frac{\partial D}{\partial r} - \frac{V}{D} \right) \frac{\partial \tilde{n}_e}{\partial r} - \left(\frac{V}{rD} + \frac{1}{D} \frac{\partial V}{\partial r} \right) \tilde{n}_e - i \frac{\omega}{D} \tilde{n}_e + \frac{\tilde{S}}{D} = 0$$

Particle balance equation

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = -\nabla \cdot \Gamma + S$$

Particle Flux equation

$$\Gamma = -D\nabla n_e + n_e V$$

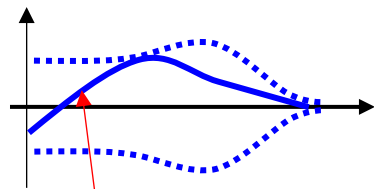
D : 拡散係数

V : 対流速度

S : ソース項

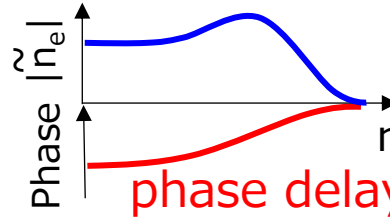
$$\frac{\partial^2 \tilde{n}_e}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{D} \frac{\partial D}{\partial r} - \frac{V}{D} \right) \frac{\partial \tilde{n}_e}{\partial r} - \left(\frac{V}{rD} + \frac{1}{D} \frac{\partial V}{\partial r} \right) \tilde{n}_e - i \frac{\omega}{D} \tilde{n}_e + \frac{\tilde{S}}{D} = 0$$

\tilde{n}_e の振幅強度及び位相の空間分布

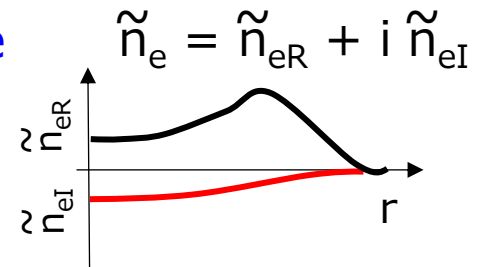


ある瞬間での変調成分

modulation amplitude



phase delay



$$\tilde{n}_e = \tilde{n}_{eR} + i \tilde{n}_{eI}$$

ソースの位相分布は0と見なす。

$$\frac{\partial^2 \tilde{n}_{eR}}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{D} \frac{\partial D}{\partial r} - \frac{V}{D} \right) \frac{\partial \tilde{n}_{eR}}{\partial r} - \left(\frac{V}{rD} + \frac{1}{D} \frac{\partial V}{\partial r} \right) \tilde{n}_{eR} + \frac{\omega}{D} \tilde{n}_{eI} + \frac{\tilde{S}}{D} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{n}_{eI}}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{D} \frac{\partial D}{\partial r} - \frac{V}{D} \right) \frac{\partial \tilde{n}_{eI}}{\partial r} - \left(\frac{V}{rD} + \frac{1}{D} \frac{\partial V}{\partial r} \right) \tilde{n}_{eI} - \frac{\omega}{D} \tilde{n}_{eR} = 0$$

境界条件 :

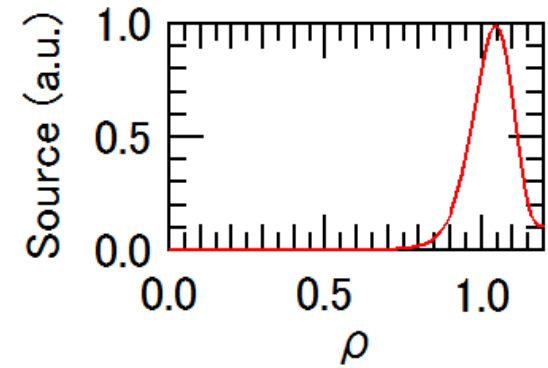
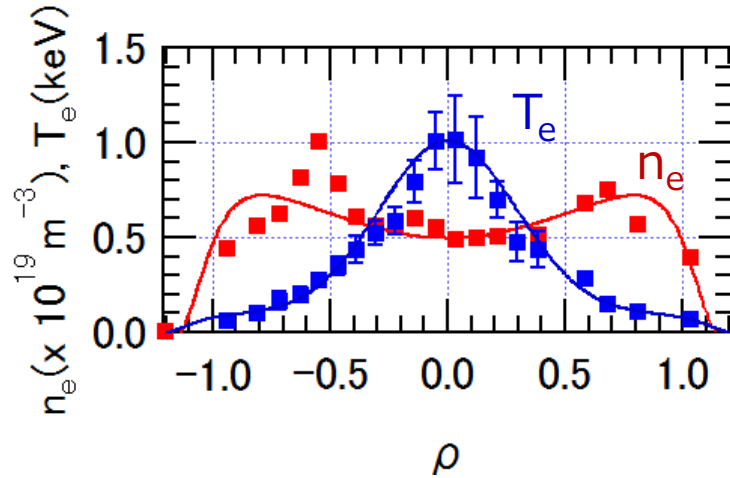
$$\frac{\partial \tilde{n}_{eR}}{\partial r} = \frac{\partial \tilde{n}_{eI}}{\partial r} = 0 \quad \text{at } \rho = 0$$

$$\tilde{n}_{eR} = \tilde{n}_{eI} = 0 \quad \text{at } \rho = 1.2$$

D, V, \tilde{S} 及び ω が決まれば密度変調成分が求まる

ソースの分布の仮定 及び拡散係数・対流速度分布形状の仮定

ソース分布 \tilde{S}



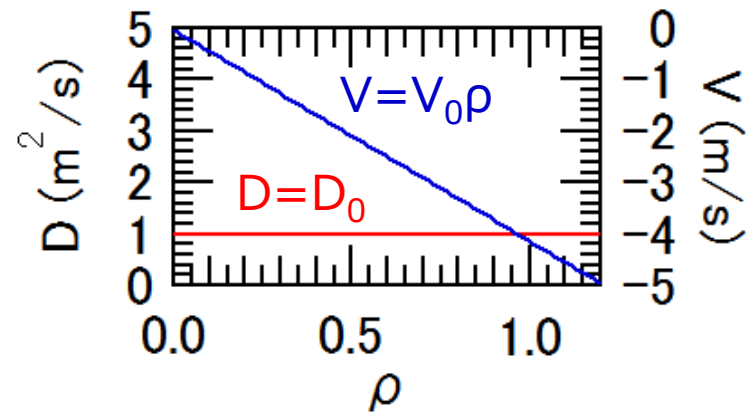
トムソン散乱計測で得た温度・密度分布及びスラブモデルにより計算した中性粒子密度からソース分布を計算。

D, V の分布形状を仮定

マイクロ波・FIRレーザー干渉計の2視線のみ

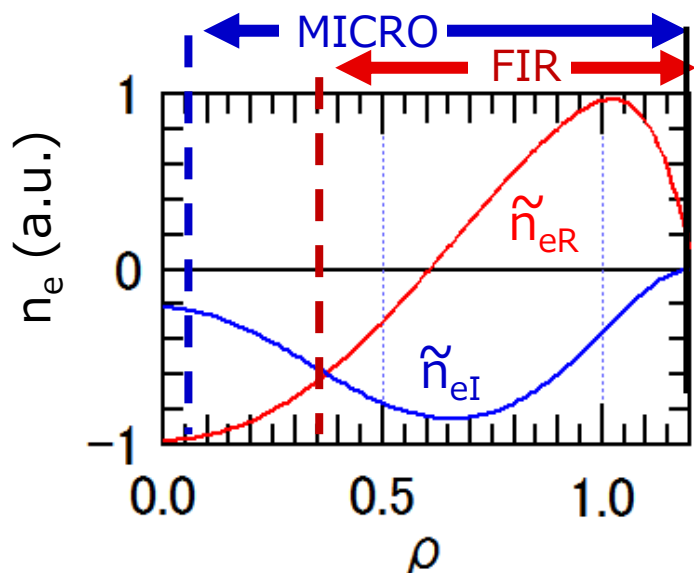
- 拡散係数分布はプラズマ全域で一定
- 対流速度分布は ρ に比例

すると仮定。

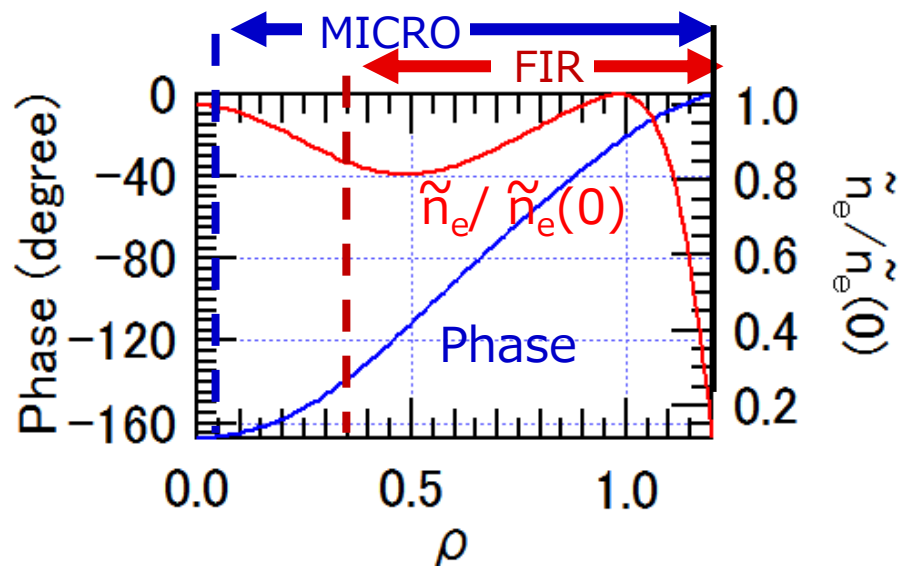


- $D_0 = 0.65 \text{ m}^2/\text{s}$, $V_0 = -16 \text{ m/s}$, $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ rad/s}$ としたとき

複素振幅分布



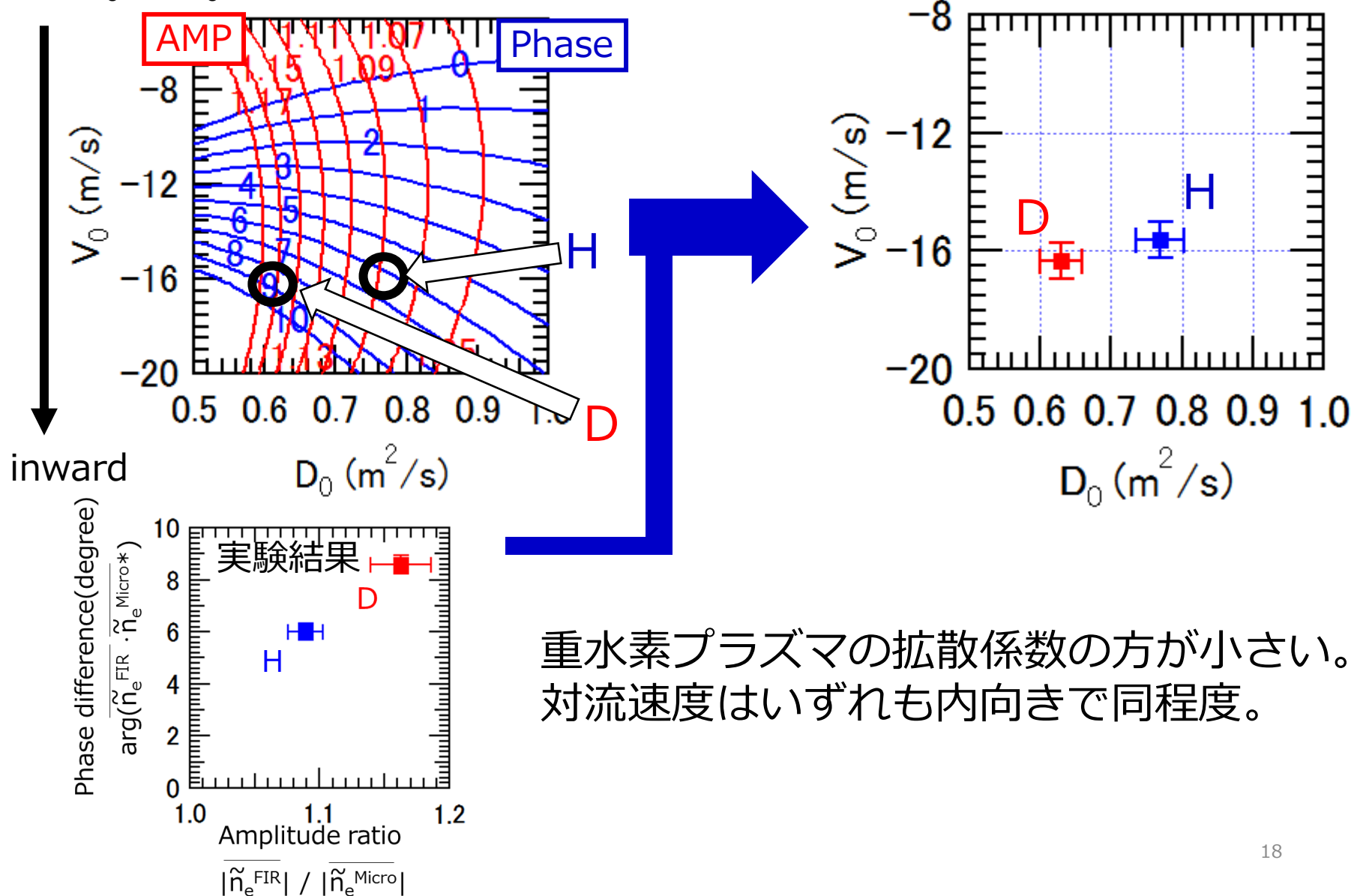
位相・振幅分布



D_0, V_0 をスキャンすることにより、実験値と矛盾のない位相差・振幅比をもつ D_0, V_0 を求める。

拡散係数は重水素プラズマの方が小さく、対流速度は同程度であった

D_0 と V_0 に対する位相差と振幅比



- ヘリオトロン J において重水素プラズマ及び軽水素プラズマの粒子輸送特性を評価するために、ガスパフ変調実験を行った。
- ECHプラズマに対し、ガスパフを用いて線平均密度が $0.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \pm 10\%$ の範囲で密度変調をかけた。
- マイクロ波及びFIRレーザー干渉計により計測した線平均電子密度に対しフーリエ解析を行うことにより、各視線における線平均電子密度の変調成分の振幅比及び位相差を求めた。
- 各干渉計から得られた密度変調の振幅比及び位相差はいずれも重水素プラズマの方が大きい値となった。
- ソース分布及び拡散係数・対流速度分布を仮定したモデル計算と実験結果との比較を行い、重水素プラズマ及び軽水素プラズマの拡散係数及び対流速度を評価した。
- 重水素プラズマの拡散係数は軽水素プラズマの拡散係数より小さく、対流速度は内向きで同程度であった。