

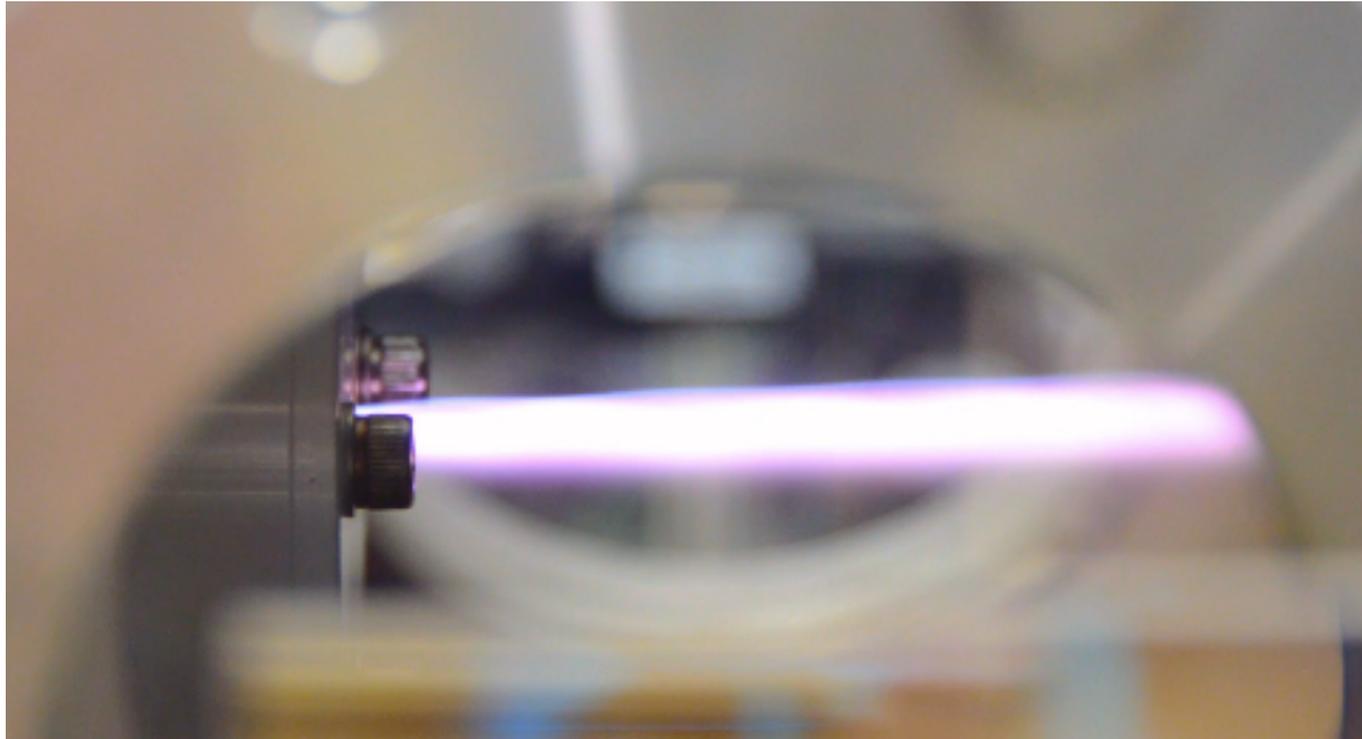
# アークジェットプラズマの 空間分解レーザー吸収分光

---

松岡雷士<sup>1</sup> 園山裕太郎<sup>1</sup> 西谷徳高<sup>1</sup> 吉村善治<sup>1</sup>  
前田祐一郎<sup>1</sup> 溝口亮<sup>1</sup> 草野雄也<sup>1</sup> 結城健太<sup>1</sup> 鈴木千尋<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院 工学研究科機械物理工学専攻

<sup>2</sup> 核融合科学研究所



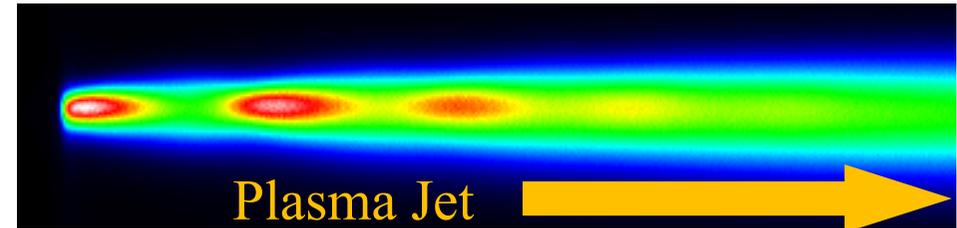
アノード：銅圧縮膨張ノズル

Throat  
diameter :  
1.0 mm $\phi$   
Outlet  
diameter :  
6.0 mm $\phi$

Discharge Current : 20~30 A  
Discharge Voltage : ~30 V  
Flow rate : 0.25 ~ 1.0 L/min  
Pressure in discharge section :  
55 ~ 130 kPa  
Pressure in expansion section :  
0.4 ~ 0.7 kPa



Helical structure (Spiral mode)



Cell structure  
(Sloshing mode)

- 各モードは以下の重力崩壊型超新星爆発を参考に命名

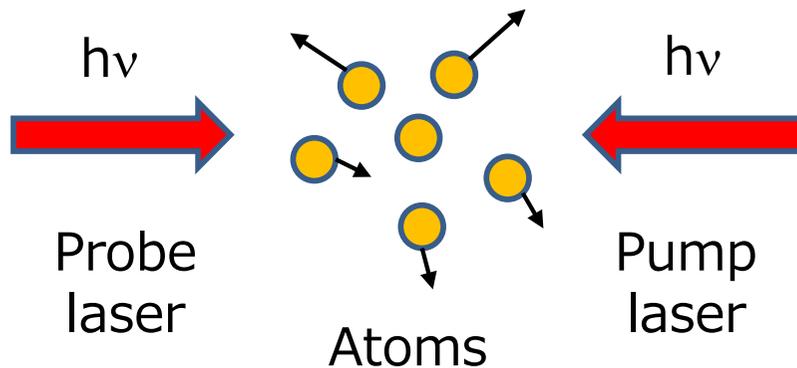
Wakana Iwakami, Kei Kotake, Naofumi Ohnishi, Shoichi Yamada, and Keisuke Sawada : “Effects of rotation on standing accretion shock instability in nonlinear phase for core-collapse supernovae”, *Astrophysical journal*, Vol. 700, No. 1, pp. 232-242 (2009).

- 完璧な再現性があるわけではないが、各モードはカソード配置の調整によって制御可能

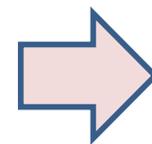
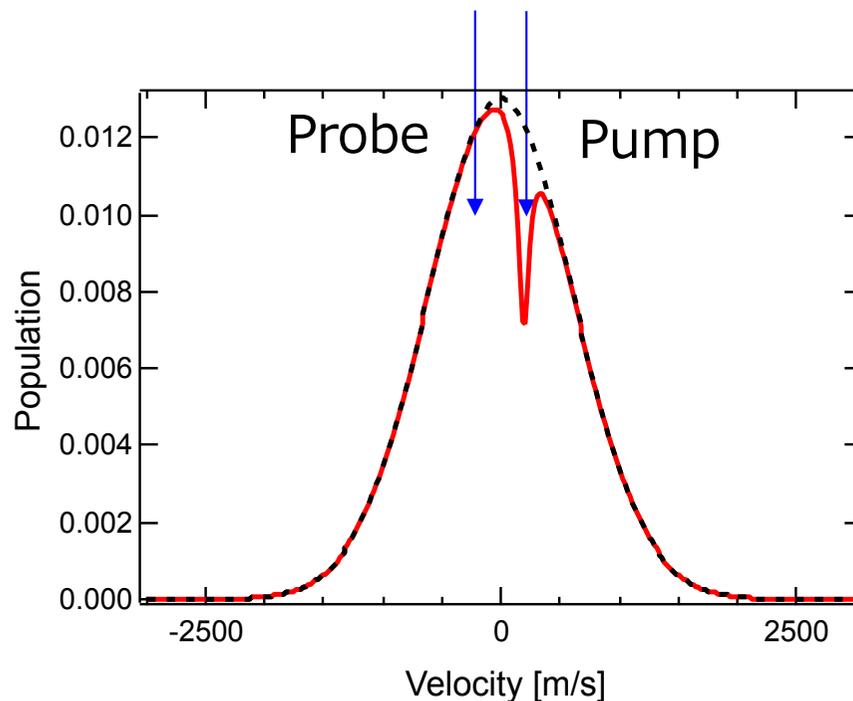
## 研究の目的

- アークジェットプラズマにおける発光構造形成機構の解明
- 発光構造とプラズマパラメータ分布の対応の解明

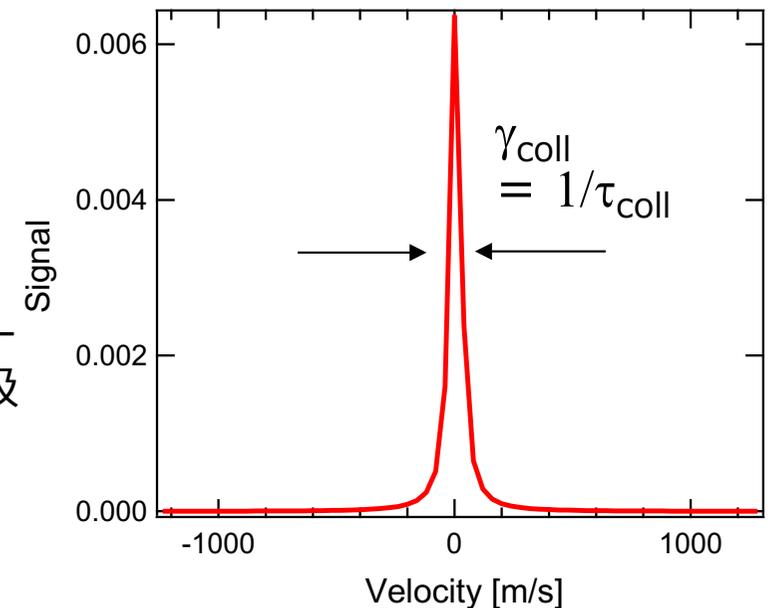
- 発光分光
  - 発光密度・電子温度・電子密度の視線積分は導出可能
  - ただし速度は軽元素の軸方向速度で辛うじて計測できるレベル
- 静電プローブ
  - 電子温度・電子密度・イオン速度は導出可能
  - ただし擾乱の影響が大きい
- レーザー吸収分光
  - ドップラー効果によって準安定状態の速度分布を計測可能
  - 計測速度の分解能はアルゴン原子で 1 [m/s] 以下
  - 原子密度分布（≠発光密度分布）の視線積分も計測可能
- 飽和吸収分光
  - 波長標準
  - 電場計測
  - 衝突頻度の計測（全く未完成だが新しい手法??）

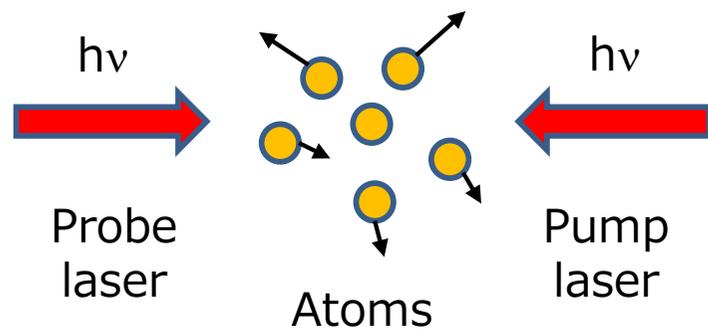


- ドップラー幅に隠れた吸収波長の真の位置を検出可能
- 電磁場の影響、飽和の影響、Velocity-changing collision(VCC)の影響が無い場合はPhase-interrupted collision による衝突幅が支配的となる

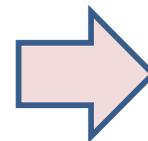
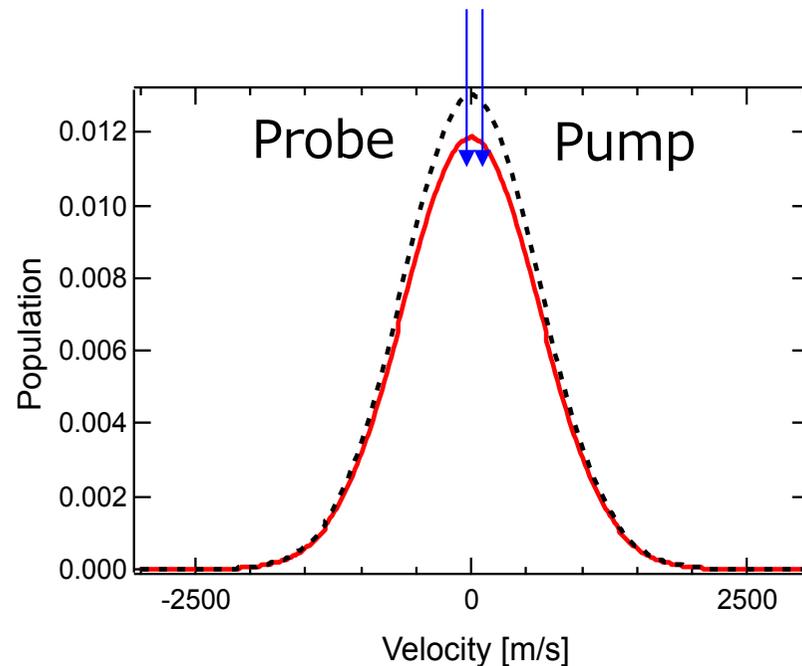


ポンプレーザーの有無による吸光度の差

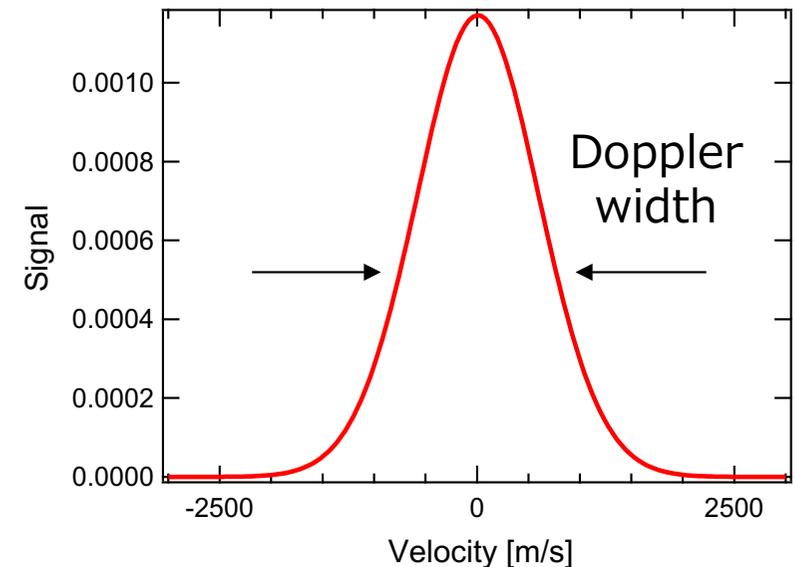




- 熱分布への速度再分配がポンププローブプロセスよりも早い速度で進行する（強衝突）
- 上準位・下準位が完全に再分配してしまうと、飽和吸収スペクトルは熱分布そのものに

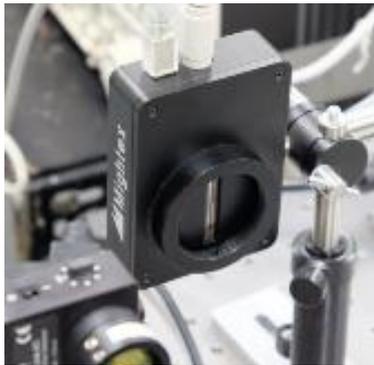


ポンプレーザーの有無による吸光度の差



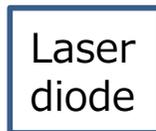
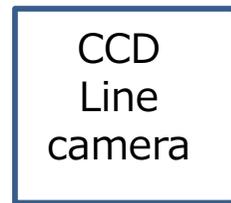
- アルゴンアークジェットプラズマは圧力的には中間的な領域
- 様々な中間的な飽和吸収スペクトルが出現
- 飽和吸収スペクトルから衝突頻度を求める逆問題は成り立つのか？

Target transition  
Ar I : 794.8176nm



CCD Line camera

100 fps  
1000 frames

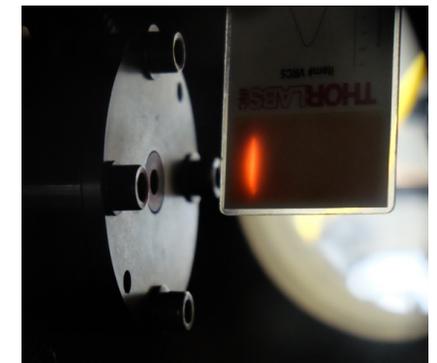
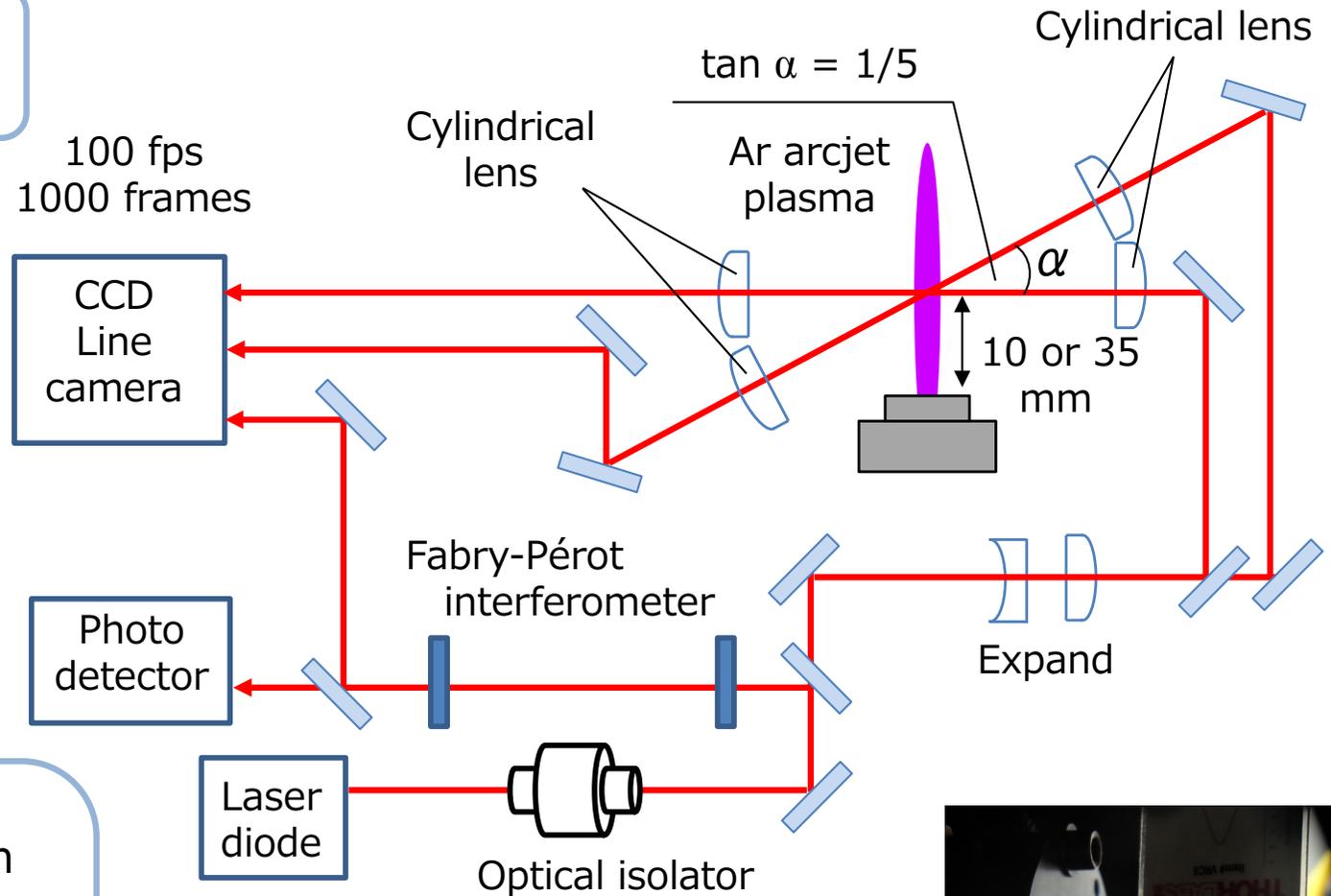


Operating condition  
for 795nm oscillation

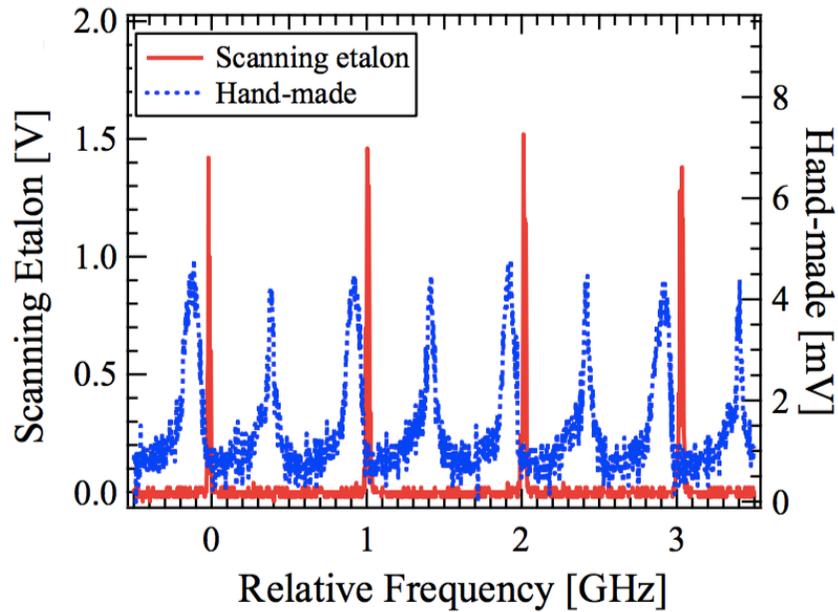
$$T_c = 46.85 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$I_{op} = 136 \text{ mA}$$

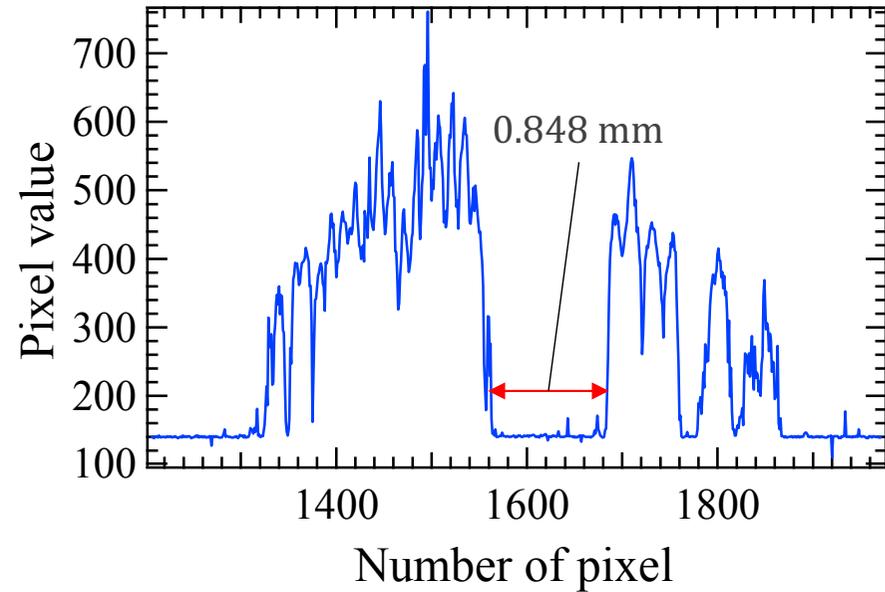
(795 nm, 90 mW)  
Without external  
cavity



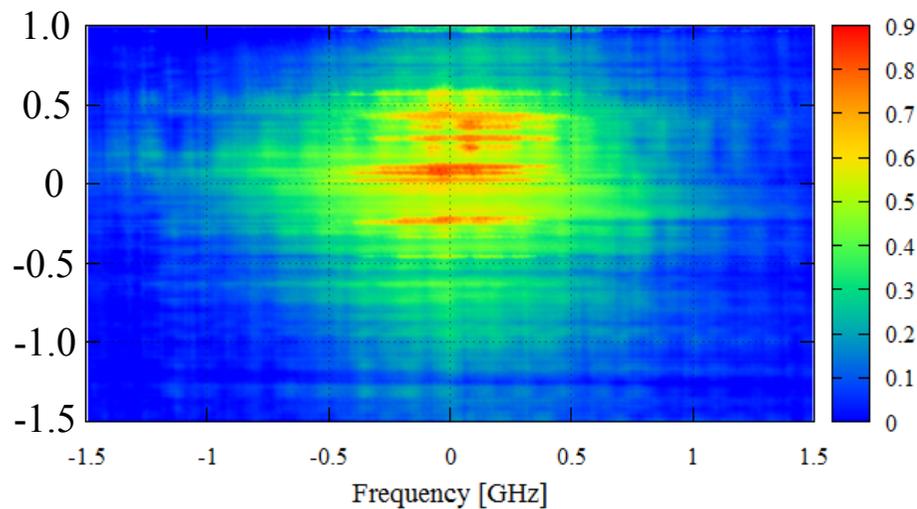
Focused laser



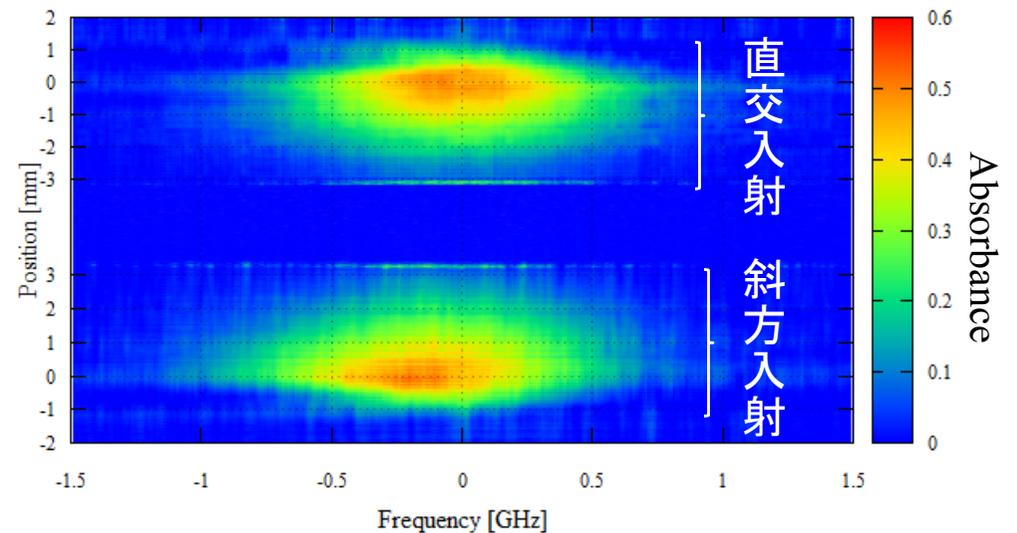
レーザーのスペクトル



針金の影の結像

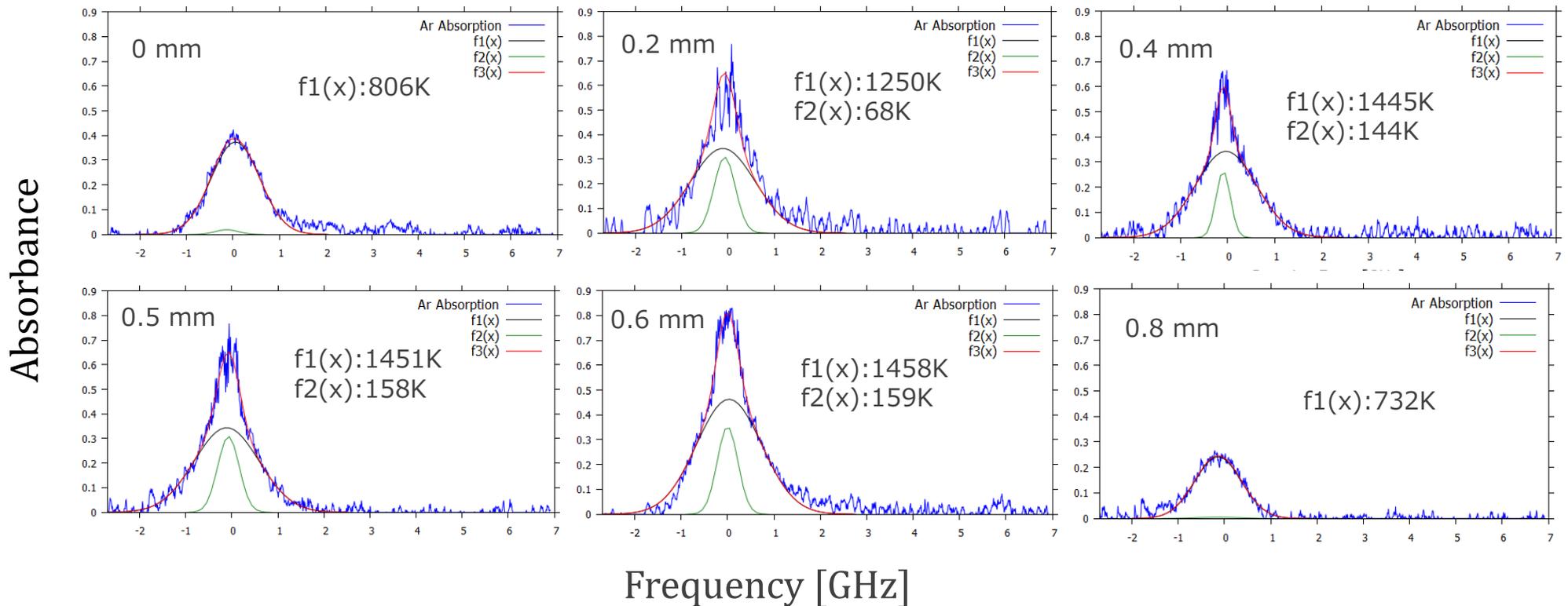


スロッシングモード ノズルから10 mm

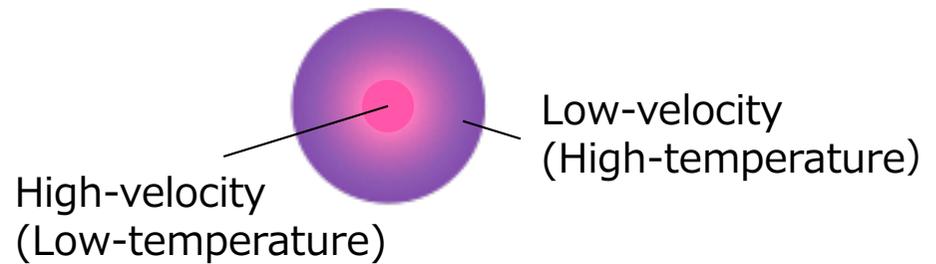


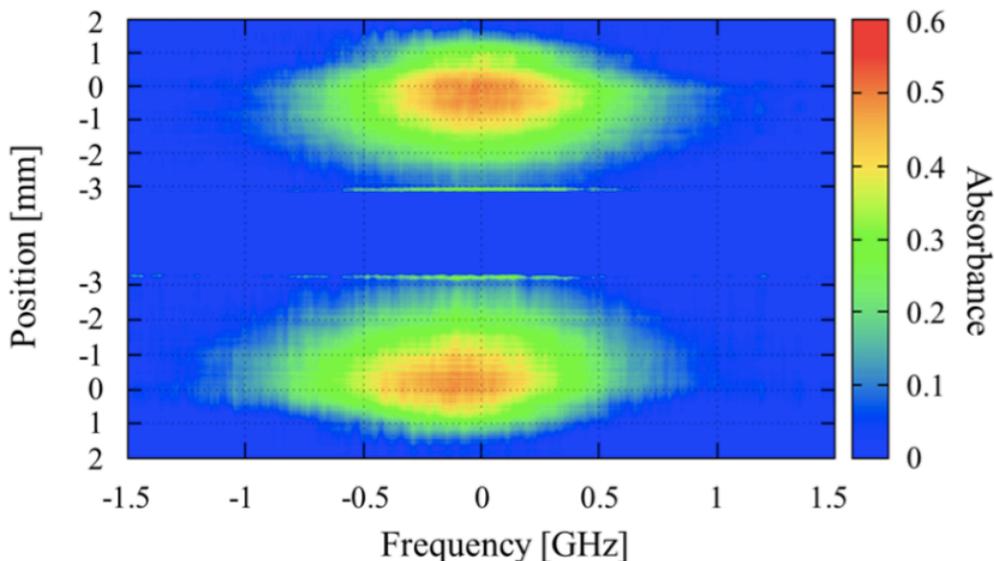
スパイラルモード(??) ノズルから35 mm

# 空間分解吸収スペクトル (スロッシングモード) 9/14



- 中心軸付近に低温の成分がオーバーラップしているように見える
- 右図のような二成分構造が形成されているのか??



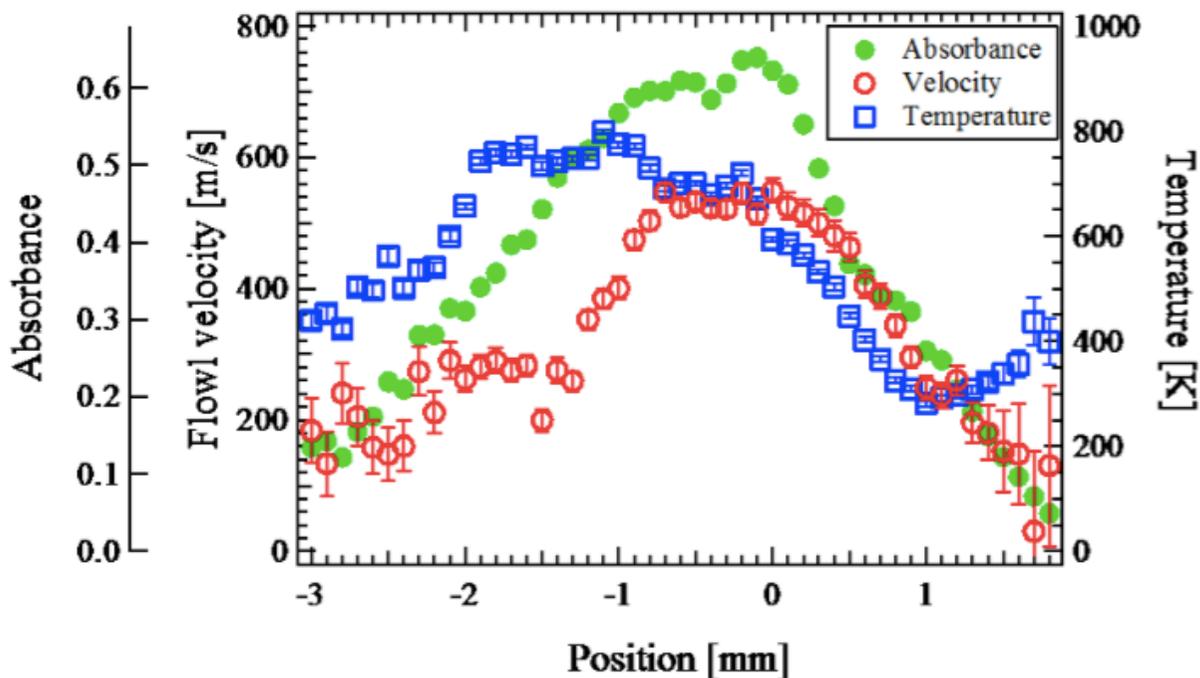


- 速度分布・温度分布にはプラズマ中に0.1 mmレベルの微細な構造がある

- 速度分布・温度分布はピーク位置が異なる

- 高速低温成分と低速高温成分が上下に分かれて存在している？

- 流量を変えてみたが、明確な傾向の変化は見られなかった



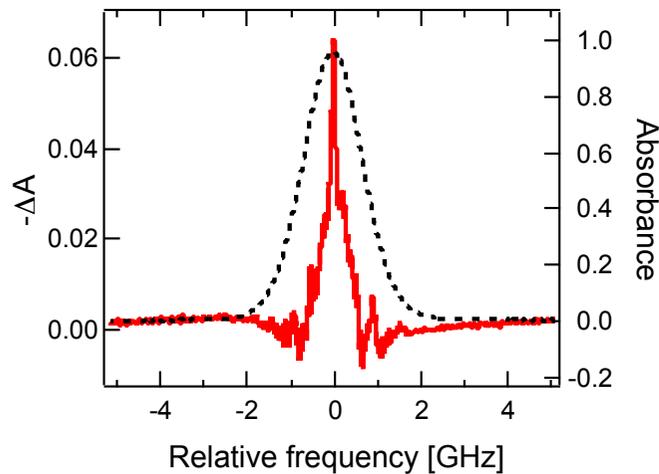
一次元空間分解分光の限界  
やはり二次元計測が必要

# 飽和吸収スペクトル (ノズルから 5mm)

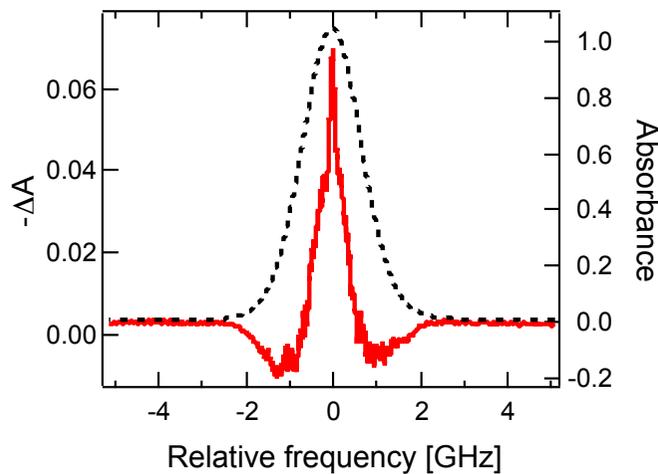
11/14

— Saturated absorption spectrum (Experiment)

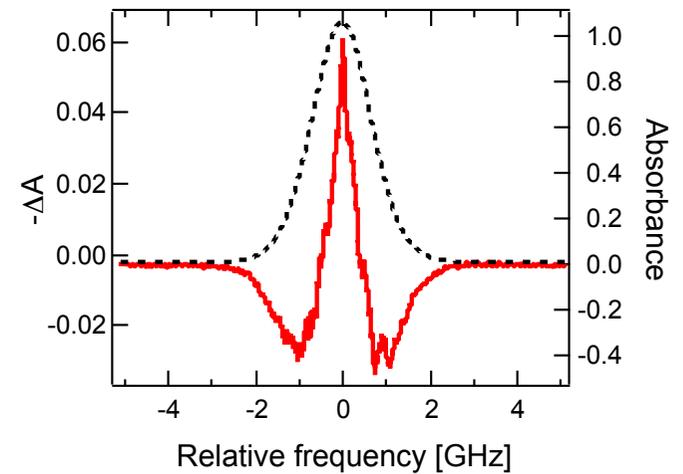
- - - Doppler absorption spectrum (Experiment)



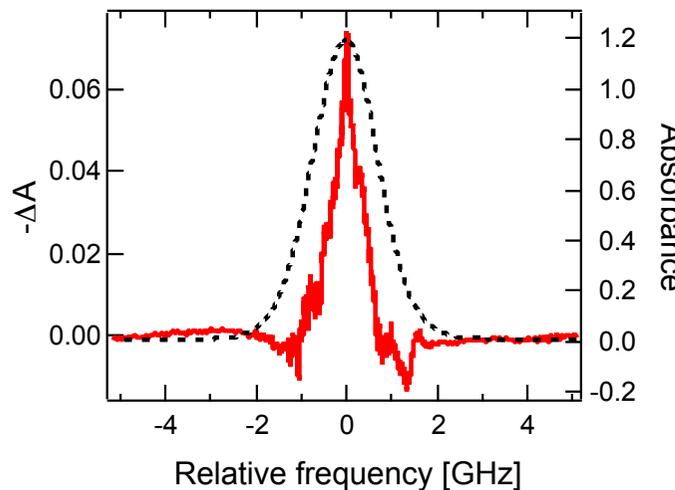
0.25 L/min, 55 kPa



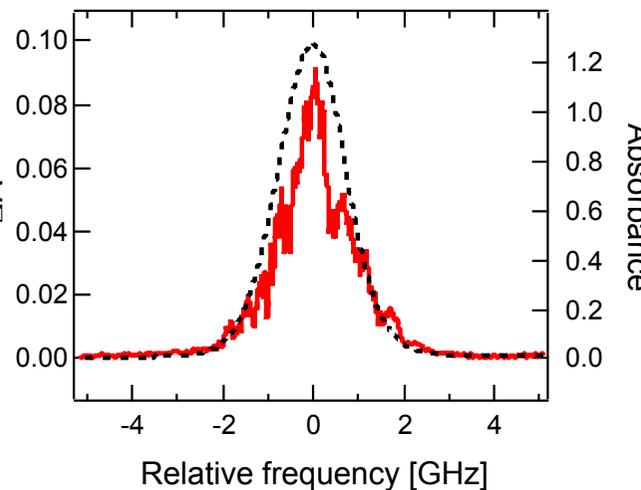
0.3 L/min, 60 kPa



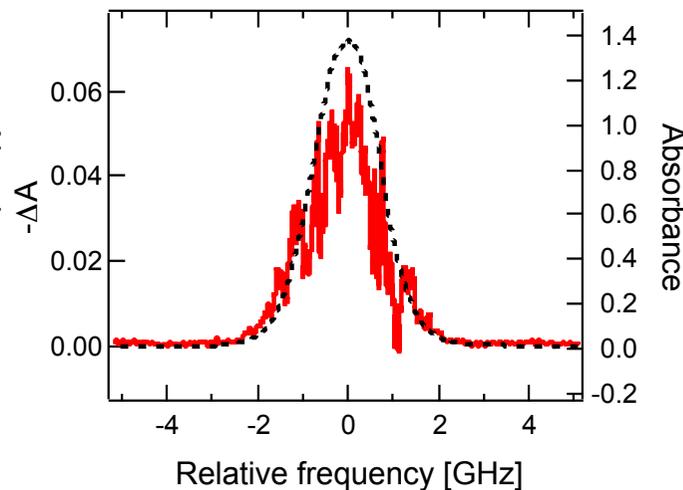
0.4 L/min, 75 kPa



0.5 L/min, 90 kPa



0.7 L/min, 110 kPa



1.0 L/min, 130 kPa

# 飽和吸収スペクトルのシミュレーション<sup>12/14</sup>

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}n_g(v) &= -\sigma(v-v_0)I_p(n_g(v)-n_e(v)) + \gamma n_e - \Gamma g(n_g(v) - N_g G(v)) \\ \frac{d}{dt}n_e(v) &= -\sigma(v-v_0)I_p(n_e(v)-n_g(v)) - \gamma n_e - \Gamma e(n_e(v) - N_e G(v))\end{aligned}$$

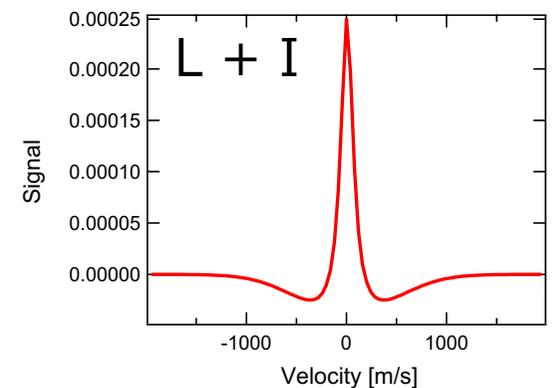
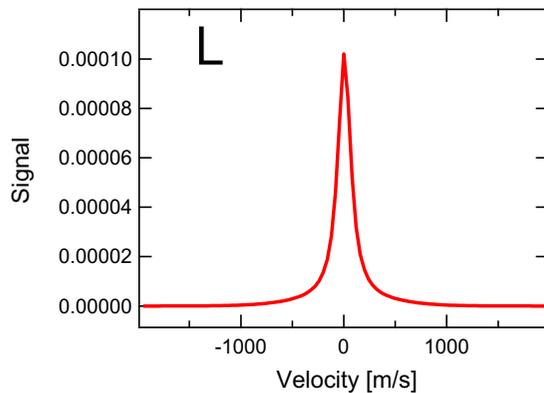
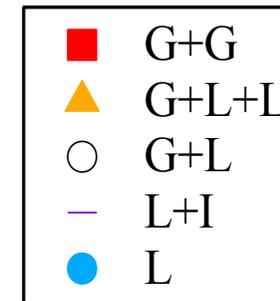
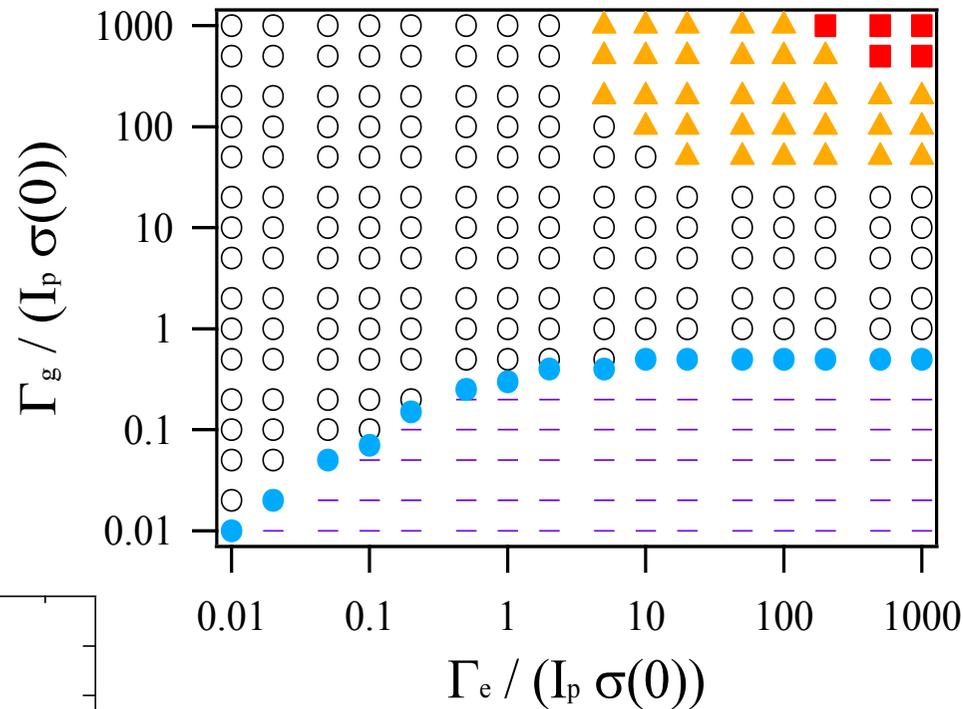
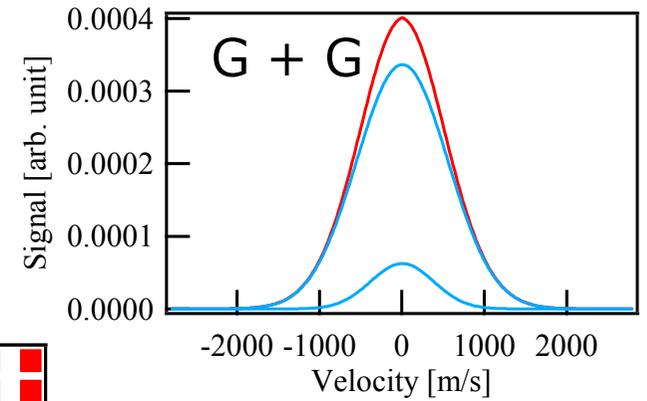
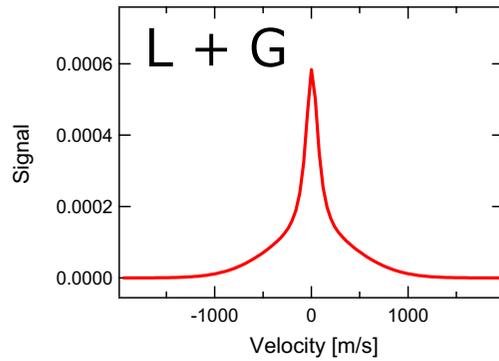
ただし、 $n_g, n_e$  は下準位，上準位における単位速度当たりの原子密度， $\sigma(v)$  は吸収断面積， $I_p$  はポンプレーザー強度， $\gamma$  は上準位から下準位への減衰率， $\Gamma g, \Gamma e$  は下準位，上準位における速度交換衝突の頻度， $N_g, N_e$  は下準位と上準位の原子密度の速度空間での積分値。

飽和吸収スペクトルは以下の式で評価する。

$$S(v_0) = \frac{I(d) - I'(d)}{I_0} = \frac{\pi\sigma_0\gamma_0 d}{k} \left( (N_g + N_e)G(-v_0) - n_g(-v_0) + n_e(-v_0) \right)$$

ただし、 $I(d), I'(d)$  はそれぞれポンプレーザーがある場合と無い場合の吸収長 $d$ におけるプローブレーザーの透過光強度， $\sigma_0$  は共鳴吸収断面積， $\gamma_0$  は原子の均一拡がり。

# 飽和吸収スペクトルの形状マップ



$\gamma = I_p \sigma(0)$  を仮定した時のマップ

$\gamma$  ごとにマップを作成  
定性的傾向は変わらなかった

## 最終的に目指すこと

発光計測、レーザー吸収分光、飽和吸収分光を用いた  
アークジェットプラズマの発光構造と  
速度分布・衝突頻度分布との関連の解明

## 現状

- 一次元空間分解レーザー吸収分光により、アークジェットプラズマ内部が高速低温成分と低速高温成分の二成分で形成されていることが示唆された
- 非空間分解飽和吸収分光により Velocity-changing collision が支配的に発生することが判明したため、飽和吸収スペクトルの数値計算によってスペクトルから衝突パラメータへの逆解析が成立するかを検証中