

水素原子バルマーアルファ線における 飽和吸収分光法

佐々木 浩一, ¹浅川 れんげ, ²後藤 基志, ³サデギ ナダー

北海道大学 大学院工学研究院 量子理工学部門

¹名古屋大学 大学院工学研究科 電子情報システム専攻

²核融合科学研究所

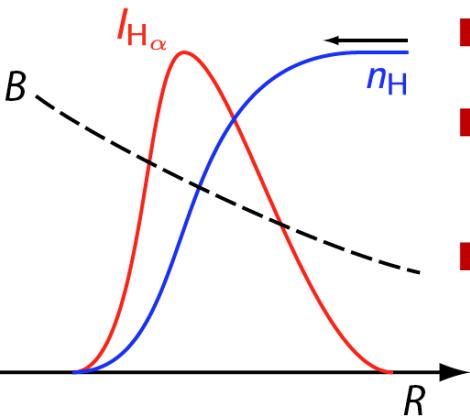
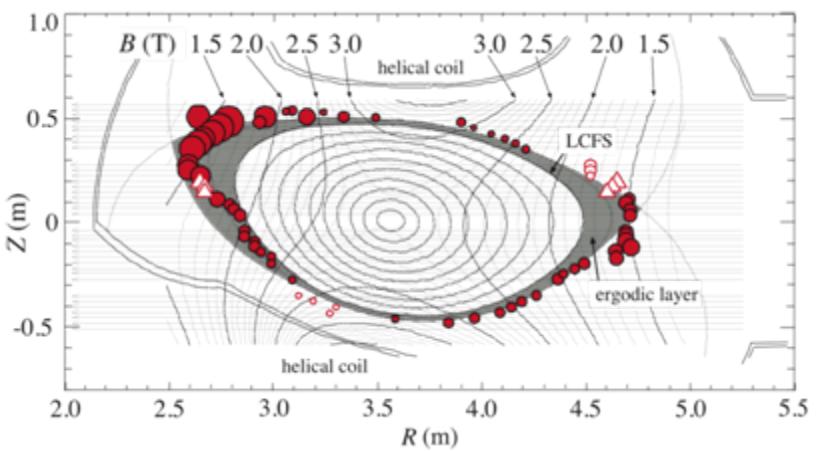
³ヨゼフフーリエ大学グルノーブル校

*Email: sasaki@qe.eng.hokudai.ac.jp

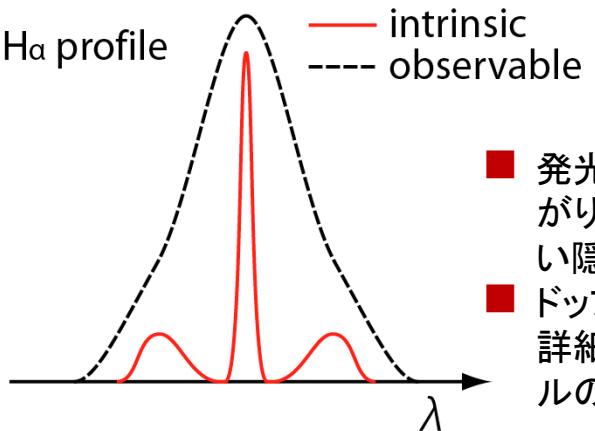


本研究の直接的動機はLHD実験

エルゴディック層内の粒子輸送



- 電離による原子密度の減少は原子発光を伴う。
- 磁場強度は位置により異なるため、発光線のゼーマン分離の大きさは発光位置に依存する。
- ゼーマン分離構造から、電離レート、つまり粒子ソースの空間分布が得られる。

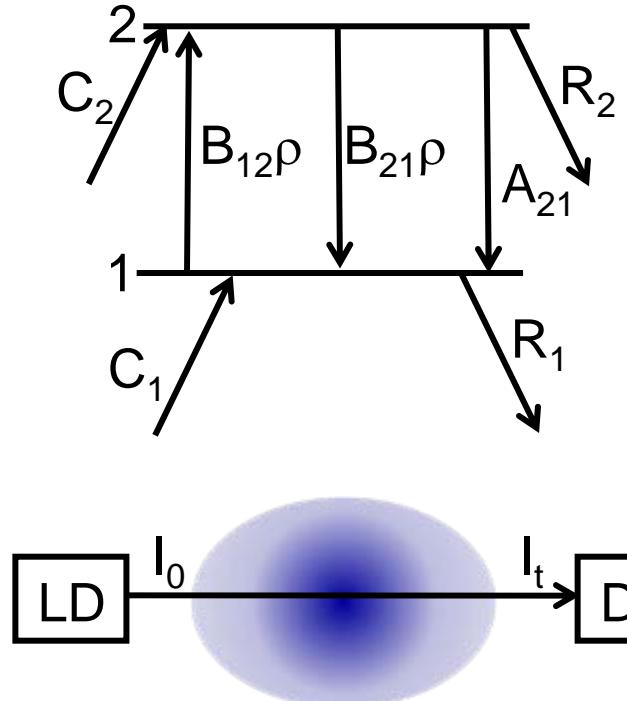


- ゼーマンスペクトルの偏光分離計測等を利用して、ヘリウム原子および水素原子の主な発光位置は計測されているが、発光の空間的広がり、つまり原子の侵入長は明らかになっていない。

- 発光線計測では、ドップラー広がりによりゼーマン分離が覆い隠される。
- ドップラーフリー計測により、詳細なゼーマン分離プロファイルの計測が可能となる。

レーザー吸収の飽和の理論

2準位系



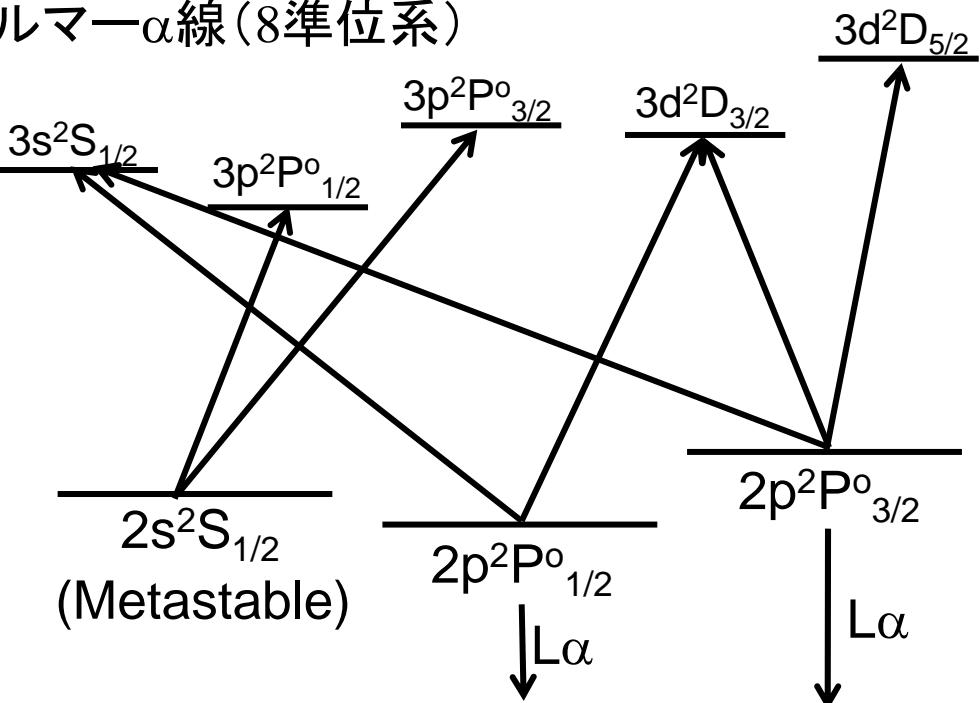
吸収の飽和

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + S}$$

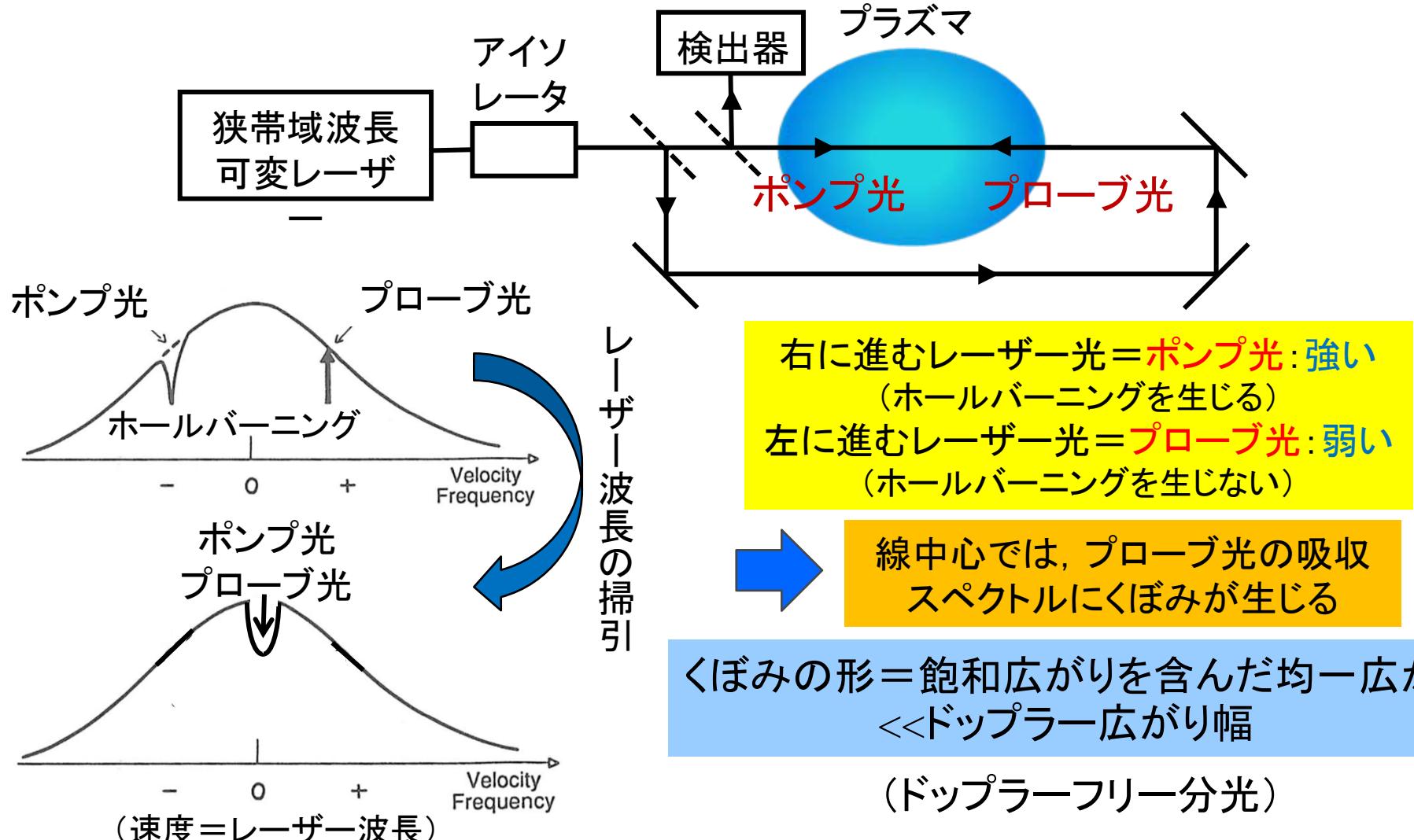
$$S = \frac{B_{12}\rho}{R}$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \approx R_1$$

バルマ- α 線(8準位系)



ドップラーフリー分光法(飽和分光法)の原理



飽和吸収分光法の理論

ホールバーニングのスペクトル

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{S_0}{2} \cdot \frac{(\gamma_s/2)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\Gamma_s^*/2)^2}$$

$$\gamma_s = \gamma_0 \sqrt{1 + S_0}$$

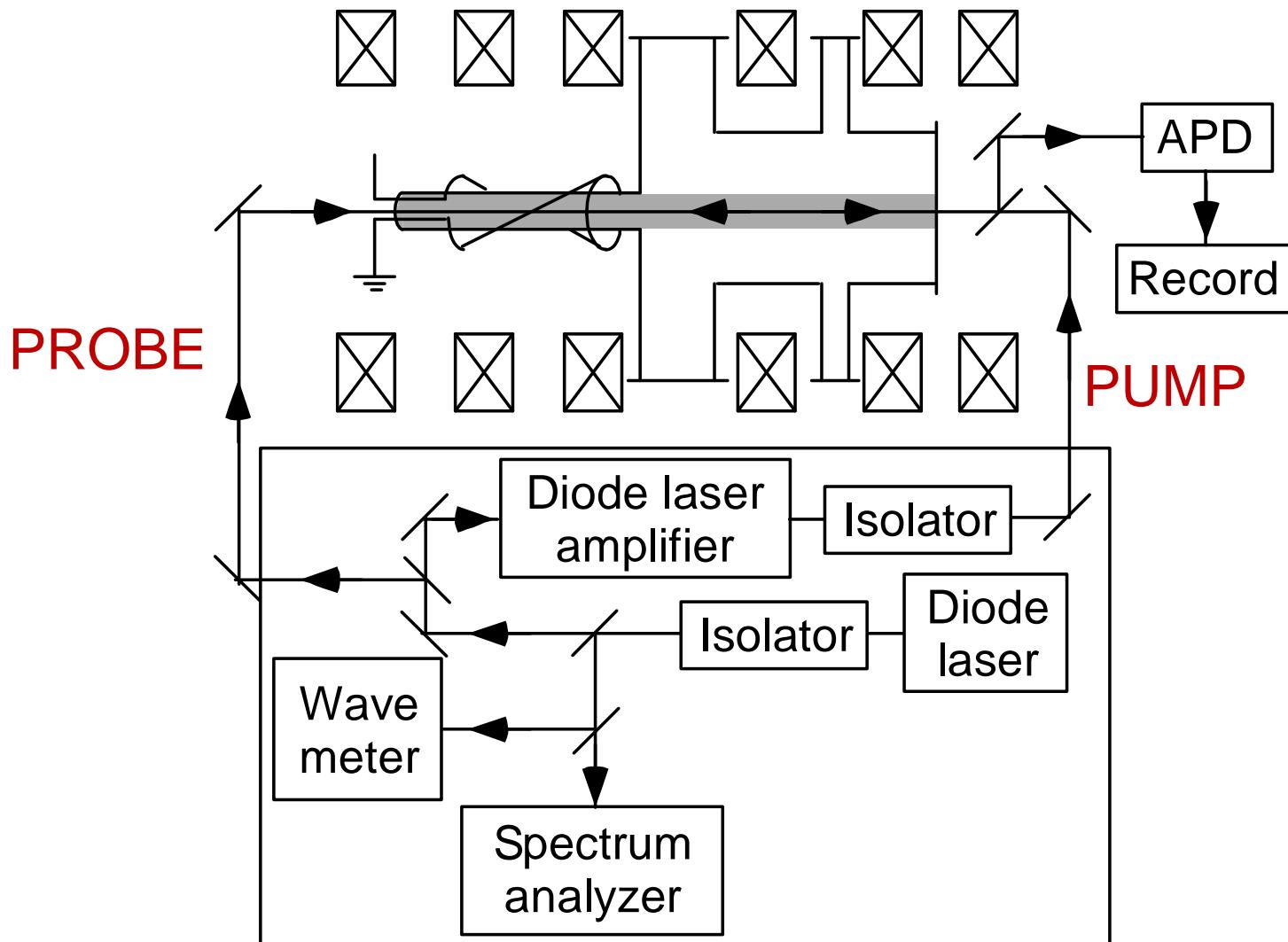
$$\Gamma_s^* = \frac{\gamma_0}{2} \left(1 + \sqrt{1 + S_0} \right)$$

γ_0 : 均一広がり幅

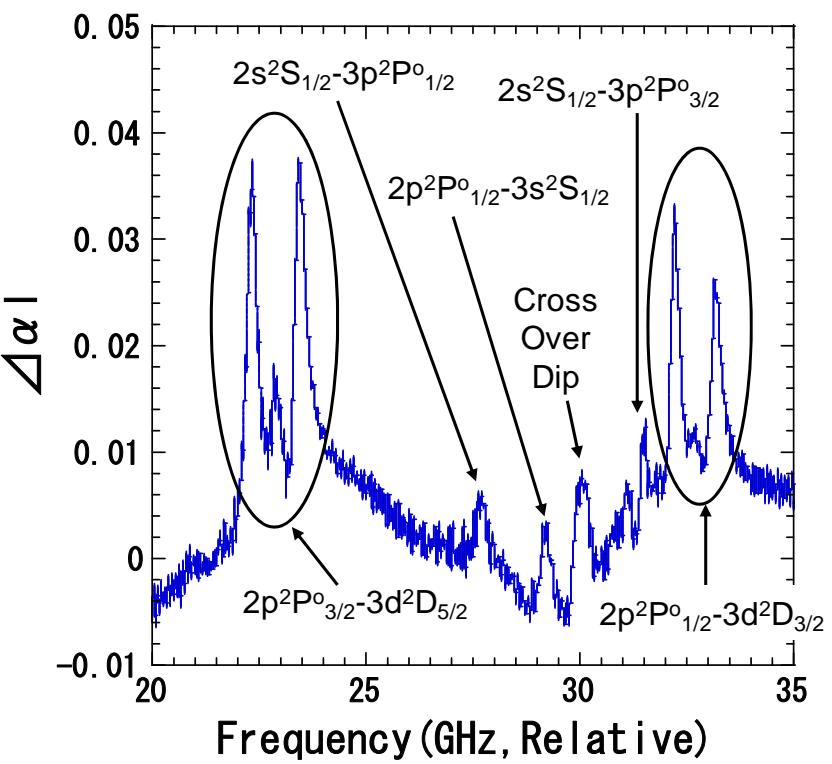
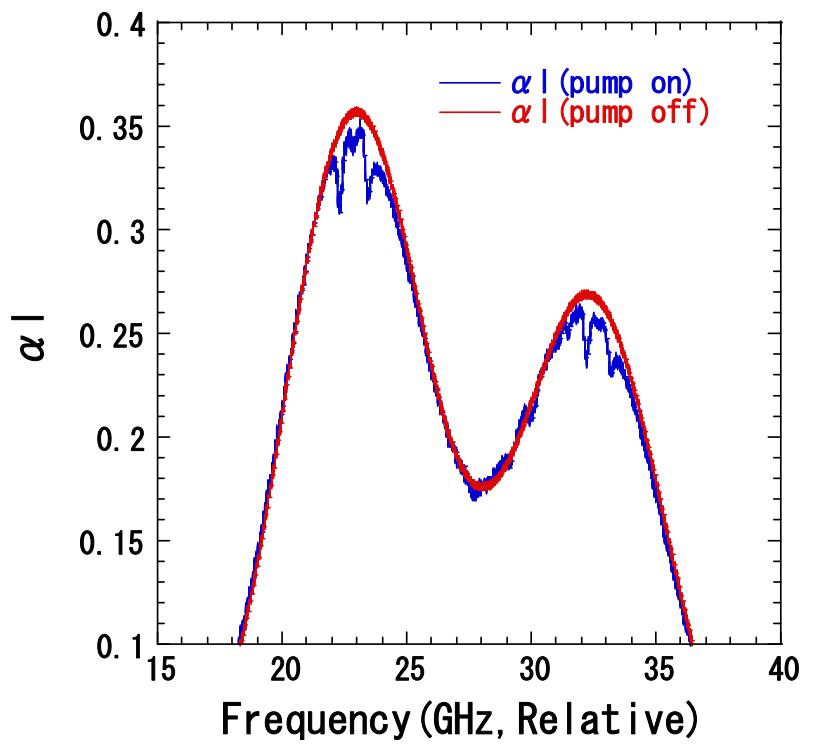
$$S_0 = \frac{B_{23}\rho}{R} \propto A_{23}, I_L, \frac{1}{R} (\tau_r)$$

- 飽和吸収スペクトルのLine shapeはローレンツ型。
- その振幅は飽和パラメータに比例する。
- 飽和パラメータは、遷移確率、レーザー強度、および、放射寿命に比例する。
- ローレンツ型Line shapeの広がり幅は、均一広がり幅より広がる（飽和広がり）。

実験装置

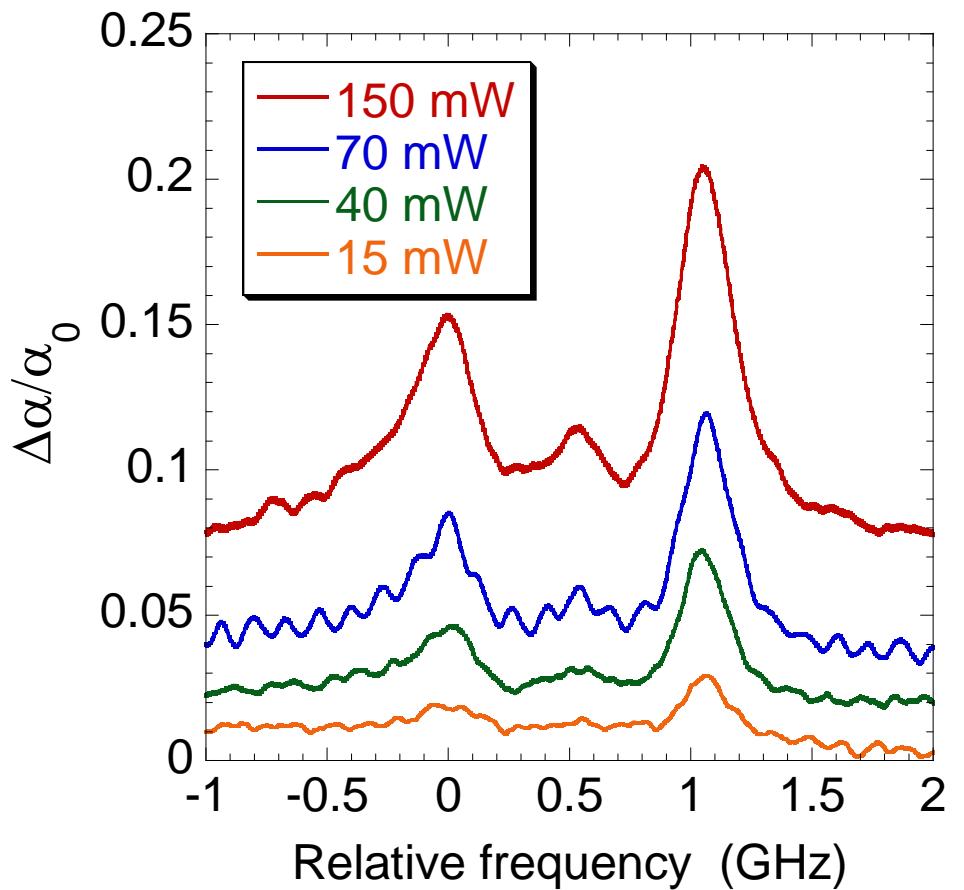


飽和吸収スペクトルの取得とアサインメントに成功



- 飽和吸収スペクトルのピークはゼーマン分裂したバルマーアルファ線の微細構造として同定できた。
- 検討すべき事項: ピークの強度(振幅)が飽和パラメータに比例するなら, それは, 遷移確率および緩和周波数と強く関係しているはず。

飽和吸収スペクトルのポンプパワー依存性



$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{S_0}{2} \cdot \frac{(\gamma_s/2)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\Gamma_s^*/2)^2} \propto S_0$$

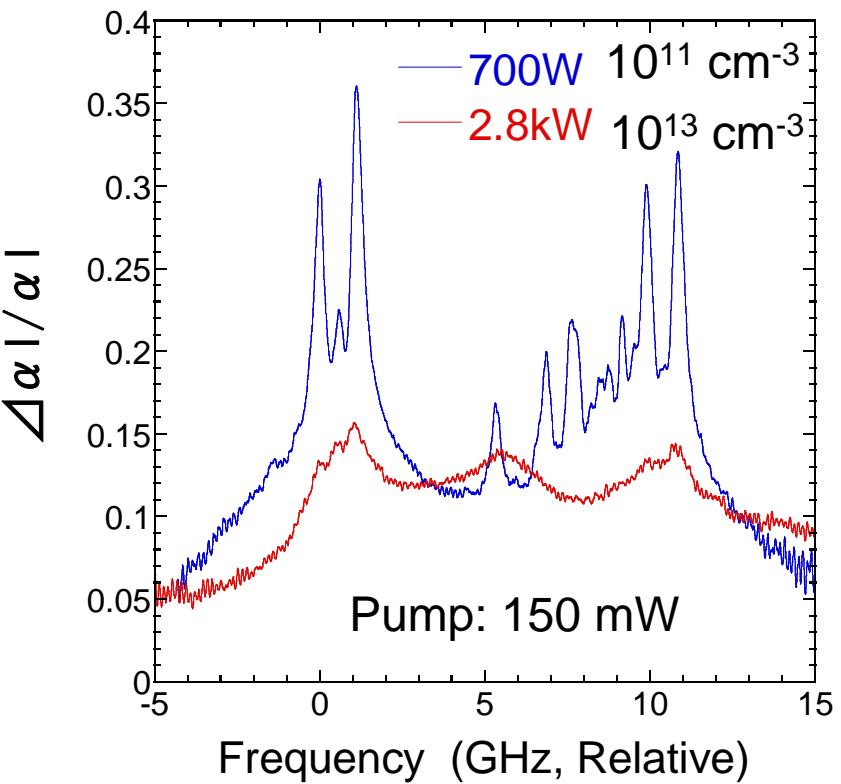
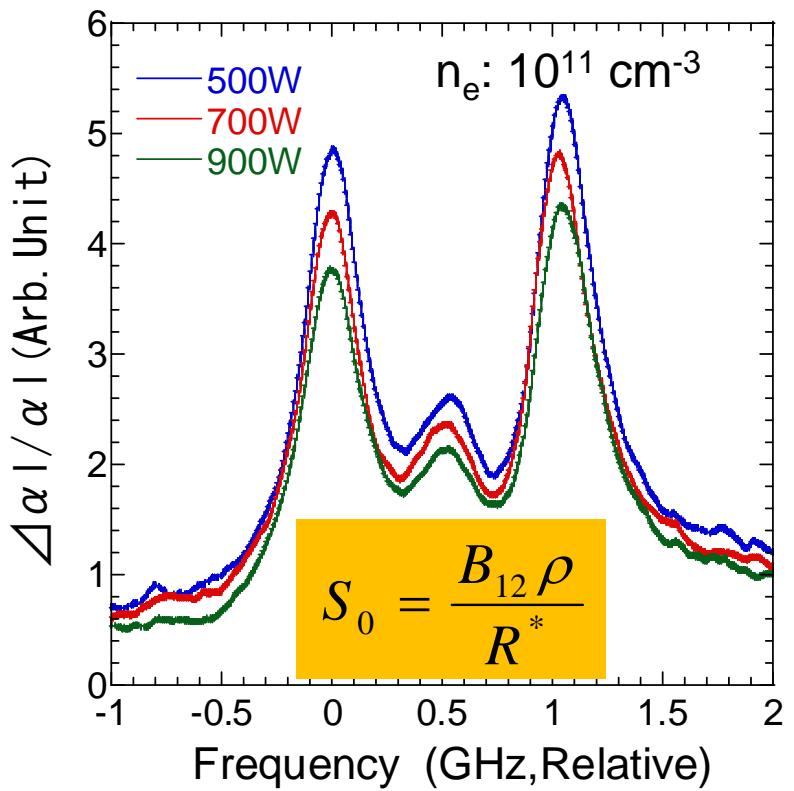
$$S_0 = \frac{B_{12} \rho}{R^*} \propto \text{Pump power}$$

- ポンプパワーの増加により飽和吸収スペクトルの振幅が増加した。この傾向は理論と一致する。
- しかし、同時に、ピークの下部に存在するブロード成分の振幅も増加した。



速度空間での輸送の存在を意味する？

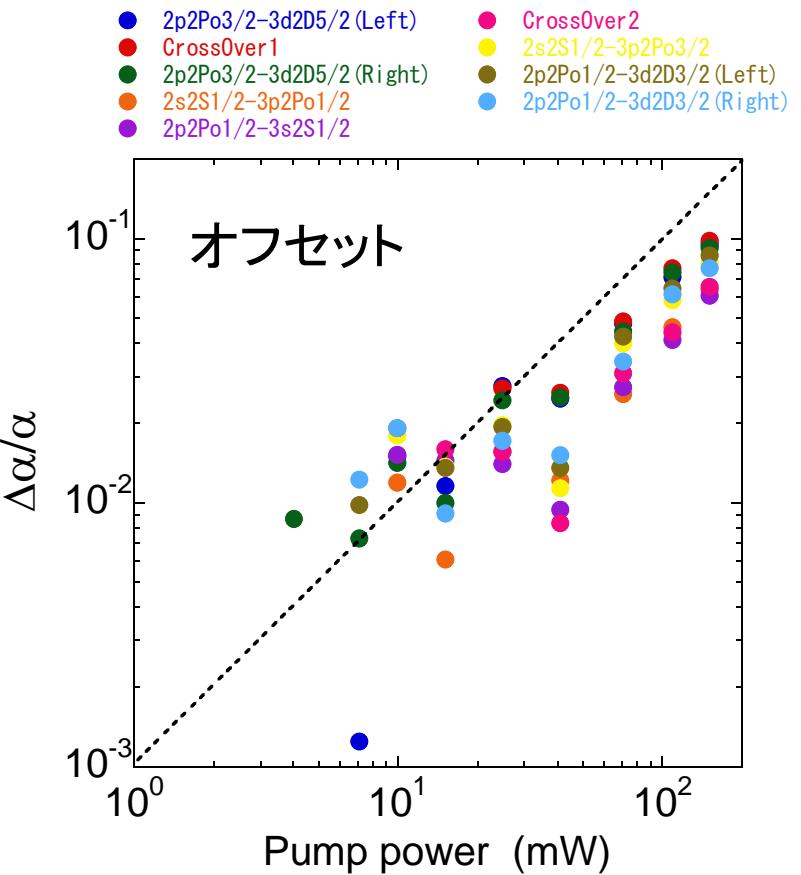
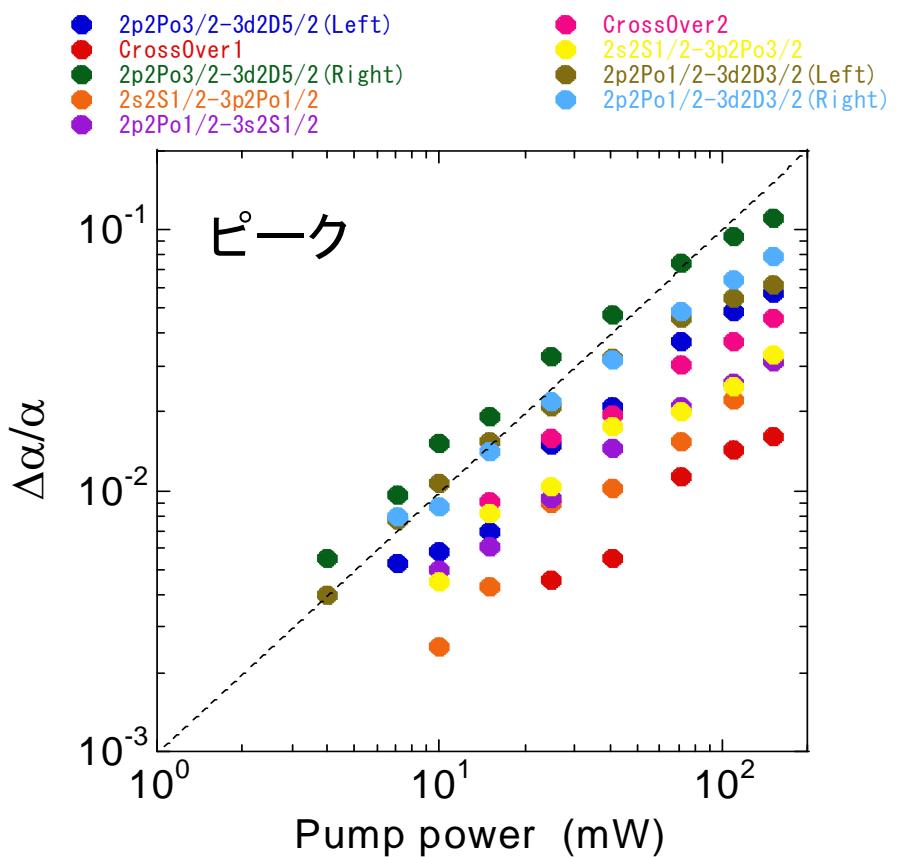
飽和吸収スペクトルのプラズマ密度依存性



- プラズマ密度が高いとき, 飽和パラメータが低下する傾向が観測された。高プラズマ密度において速度空間での輸送が顕著となる可能性を示唆する。
- しかしながら, LHDプラズマに近い 10^{13} cm^{-3} のプラズマ密度においても飽和吸収スペクトルを得ることに成功した。



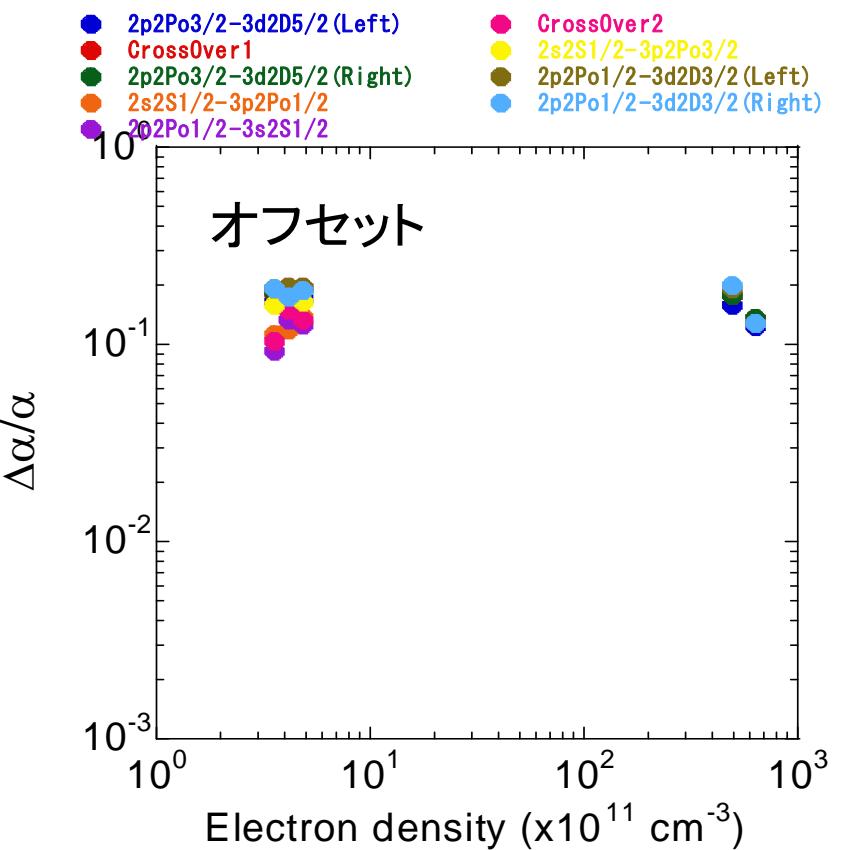
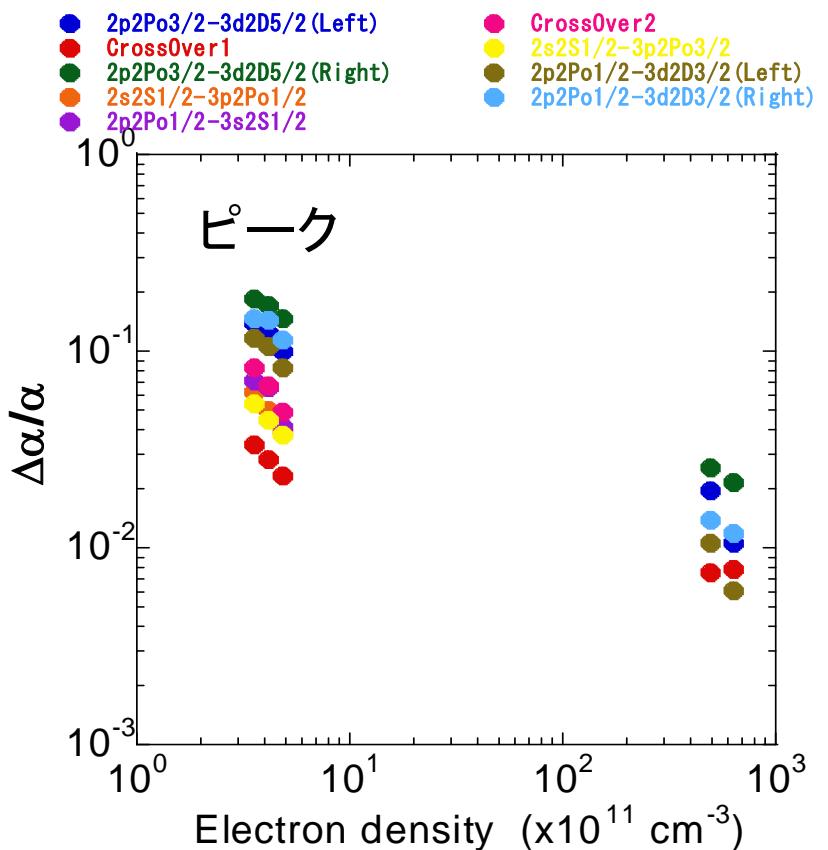
ポンプ光強度に対する飽和吸収スペクトル強度の変化



- ピークの強度は、ほぼ、ポンプ光強度に比例して増加した。
- オフセットの大きさもポンプ光強度に対して増加した。



電子密度に対する飽和吸収スペクトル強度の変化



- ピーク強度は電子密度に対して減少したが、オフセットはほぼ一定であった。電子衝突により速度空間での輸送が生じ、ピーク強度が低下すると考えられる。

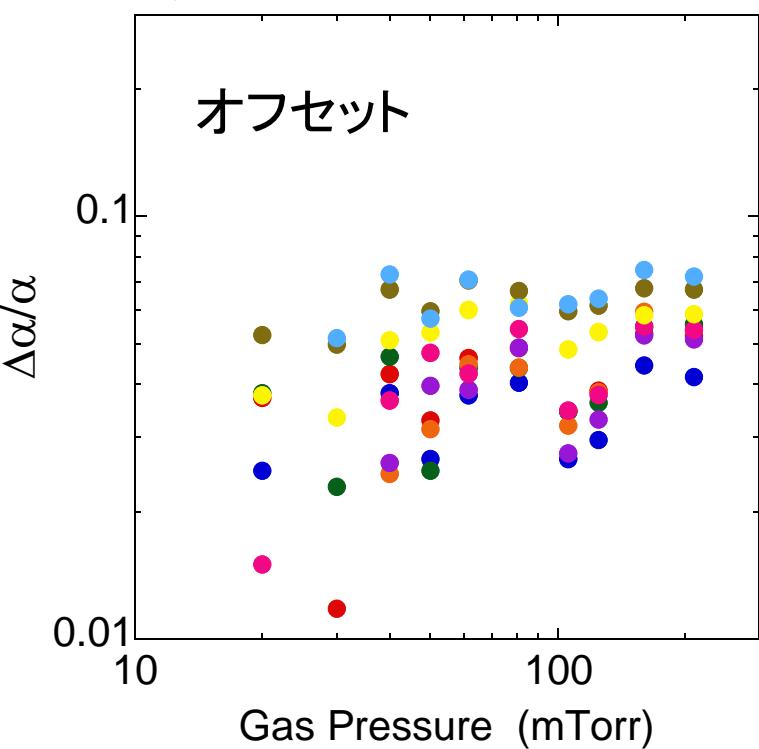
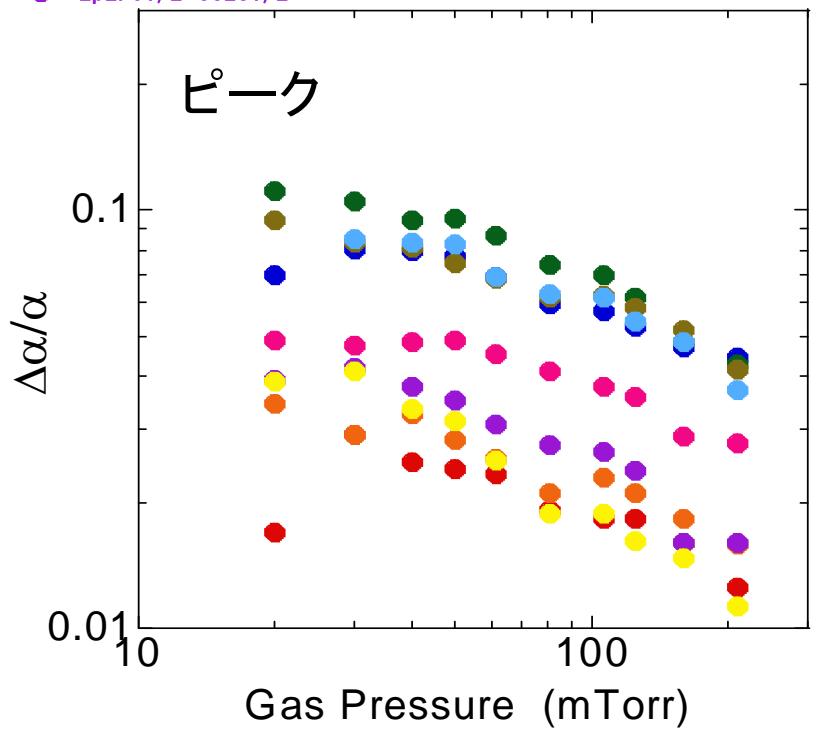


ガス圧力に対する飽和吸収スペクトル強度の変化

- 2p2Po3/2-3d2D5/2 (Left)
- CrossOver1
- 2p2Po3/2-3d2D5/2 (Right)
- 2s2S1/2-3p2Po1/2
- 2p2Po1/2-3s2S1/2

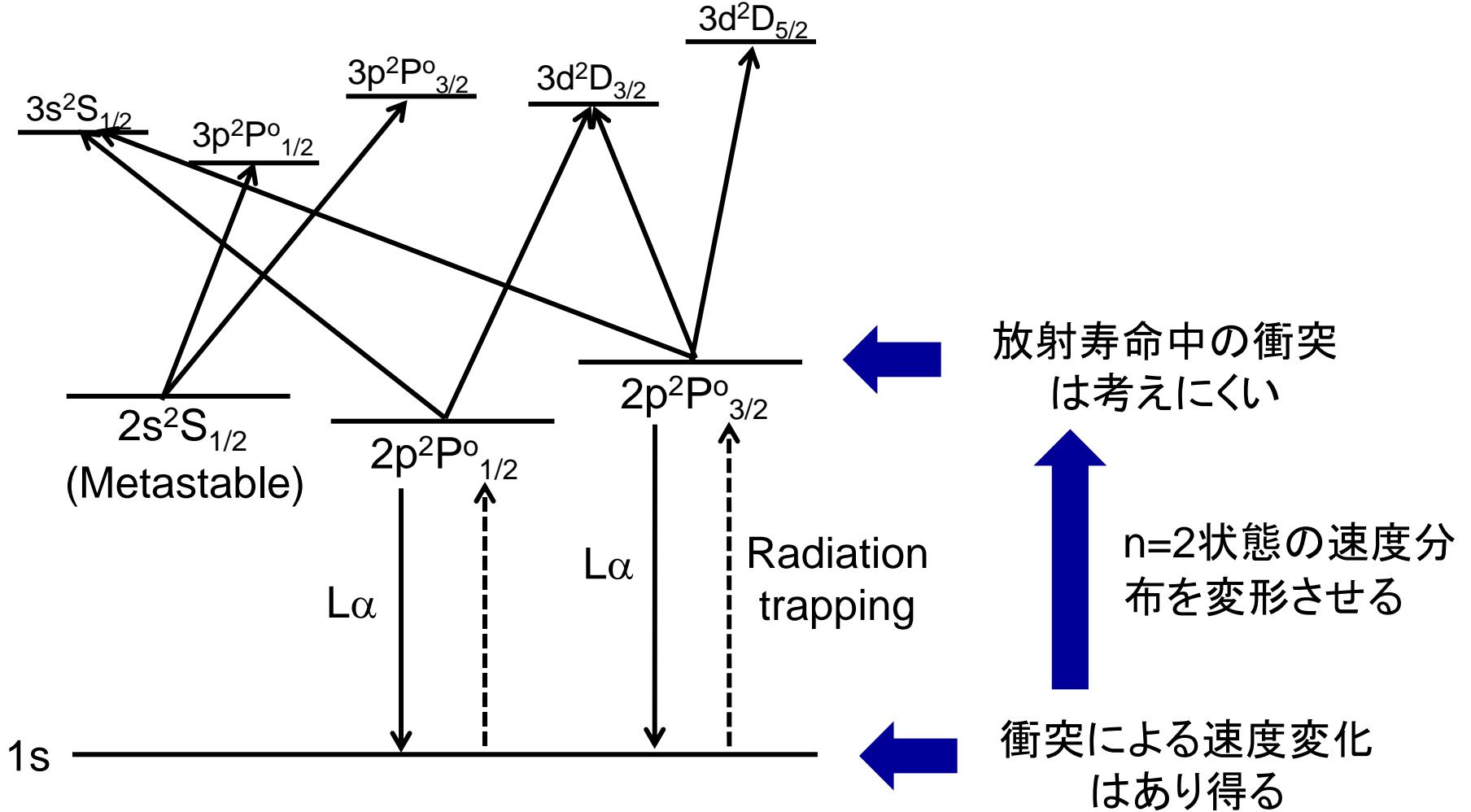
- CrossOver2
- 2s2S1/2-3p2Po3/2
- 2p2Po1/2-3d2D3/2 (Left)
- 2p2Po1/2-3d2D3/2 (Right)

- 2p2Po3/2-3d2D5/2 (Left)
- CrossOver1
- 2p2Po3/2-3d2D5/2 (Right)
- 2s2S1/2-3p2Po1/2
- 2p2Po1/2-3s2S1/2
- CrossOver2
- 2s2S1/2-3p2Po3/2
- 2p2Po1/2-3d2D3/2 (Left)
- 2p2Po1/2-3d2D3/2 (Right)

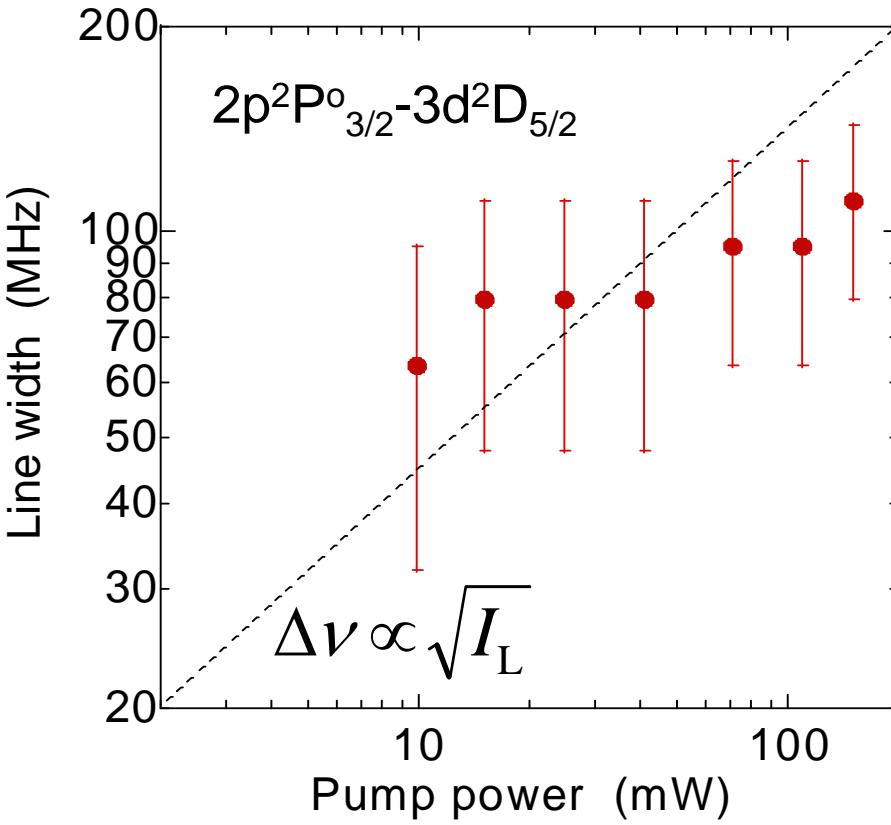
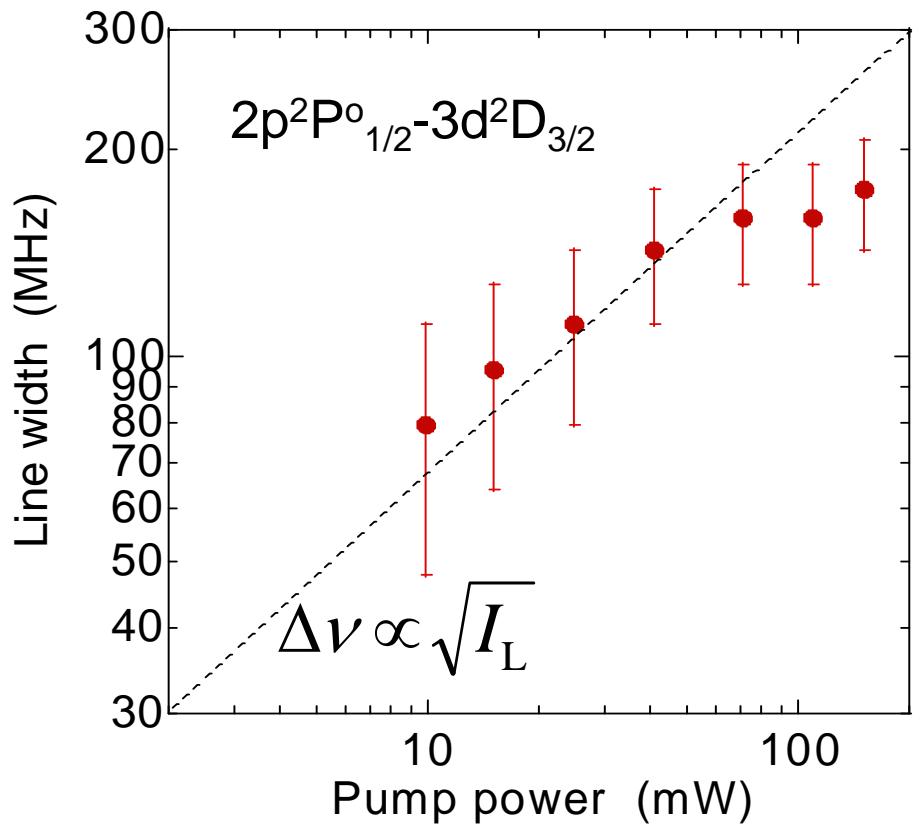


- ピーク強度はガス圧に対して減少したが、オフセットはガス圧に対して弱く増加した。中性粒子との衝突によっても速度空間での輸送が生じている。

$n=1$ 状態の衝突による速度変化と 放射補足の両方を考えれば説明できるのでは?

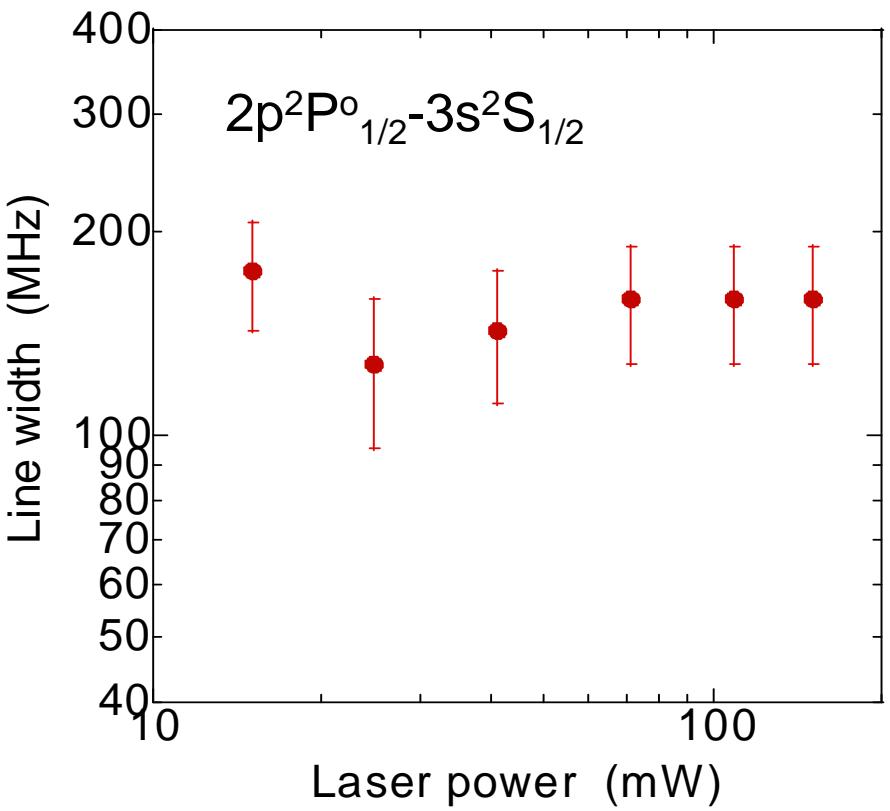
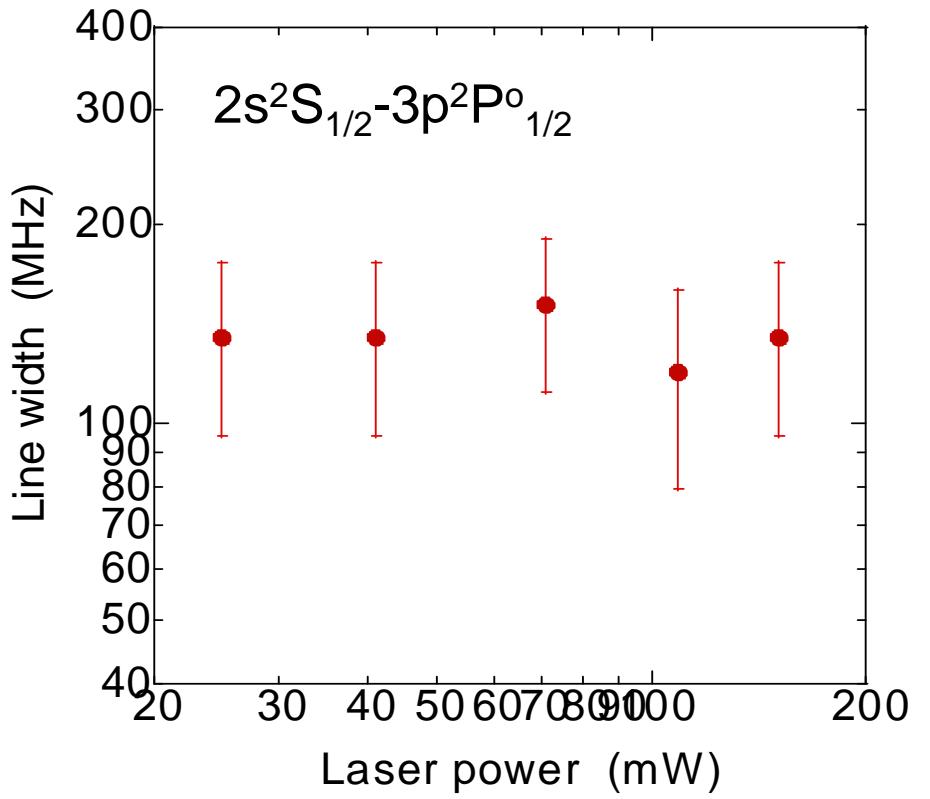


スペクトル幅のポンプ光強度に対する依存性



- スペクトル幅がポンプ光強度に対して増加しており、飽和広がりが見えている可能性がある。

スペクトル幅のポンプ光強度に対する依存性



- スペクトル幅がポンプ光強度に依存しない遷移もある。
- スペクトル強度(即ち飽和パラメータ)の小さいラインの幅は変化しない傾向があり、飽和パラメータが小さいためにスペクトル幅の変化が見えない可能性がある。

まとめ

- 飽和吸収分光法を水素原子のバルマーアルファ線に適用した。
- 水素原子のバルマーアルファ線は、吸収の飽和が生じにくい遷移であることがわかり、当初かなりの苦労があったが、現在ではS/Nのよい飽和吸収スペクトルを取得できるようになった。
- LHDへの適用という元来の目的からは、なかなか有望な結果が得られている。
- 飽和吸収スペクトルのピーク強度は、衝突による速度変化により埋められ、S/Nが低下する。基底状態の衝突と放射補足が組み合わさった過程と考える。
- スペクトル特性の細部については理解できていない事項が多い。

皆様方のアドバイスをお願いいたします。

