

ダイバータシミュレータMAP-IIIにおける分光研究(レビュー)

1

門信一郎, 東大高温プラズマ研究センター

(4月より原子力国際専攻へ異動予定)

学生: 栗原洋介(2008M), 栗原公紀(2008M), 飯田洋平, 鈴木弘(M1), 鈴木健二(B4),

卒業生等: 梶田信(2005D, JAEA), 大石鉄太郎(2006D, 4月より名大), 四竈泰一(2007D:4月より京大), 岡本敦(前PD: 東北大), 山崎大輔(2006M),

研究協力者: 肖炳甲(Bingjia XIAO, 中国科学院), 鄭奎善(K-S. Chung 韓国漢陽大学)

Contents:

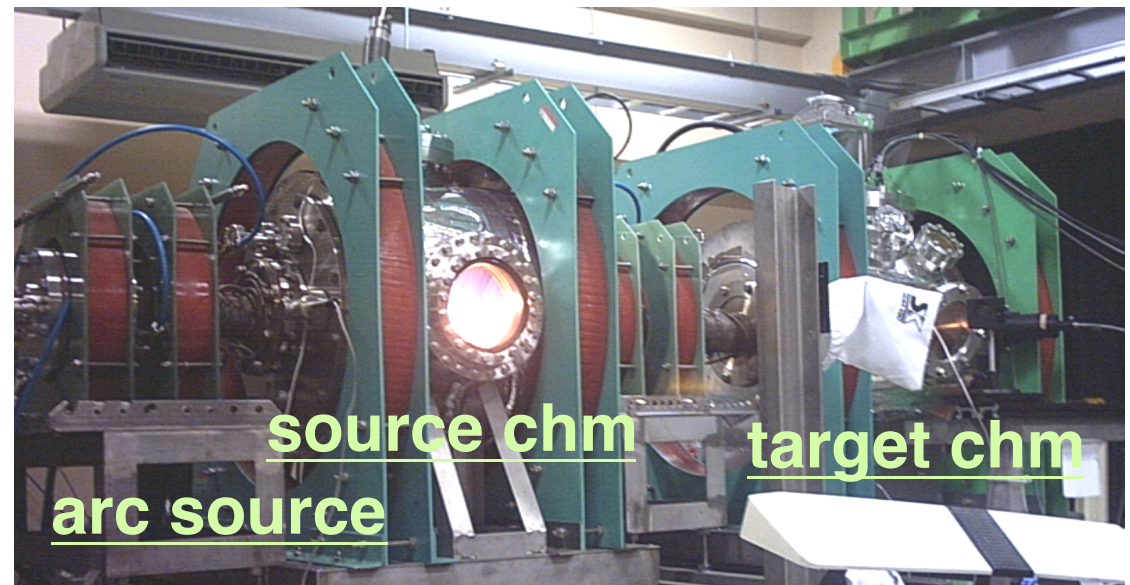
(1) イントロ

境界層プラズマにおける
プラズマ診断

(1) 実験装置の概略

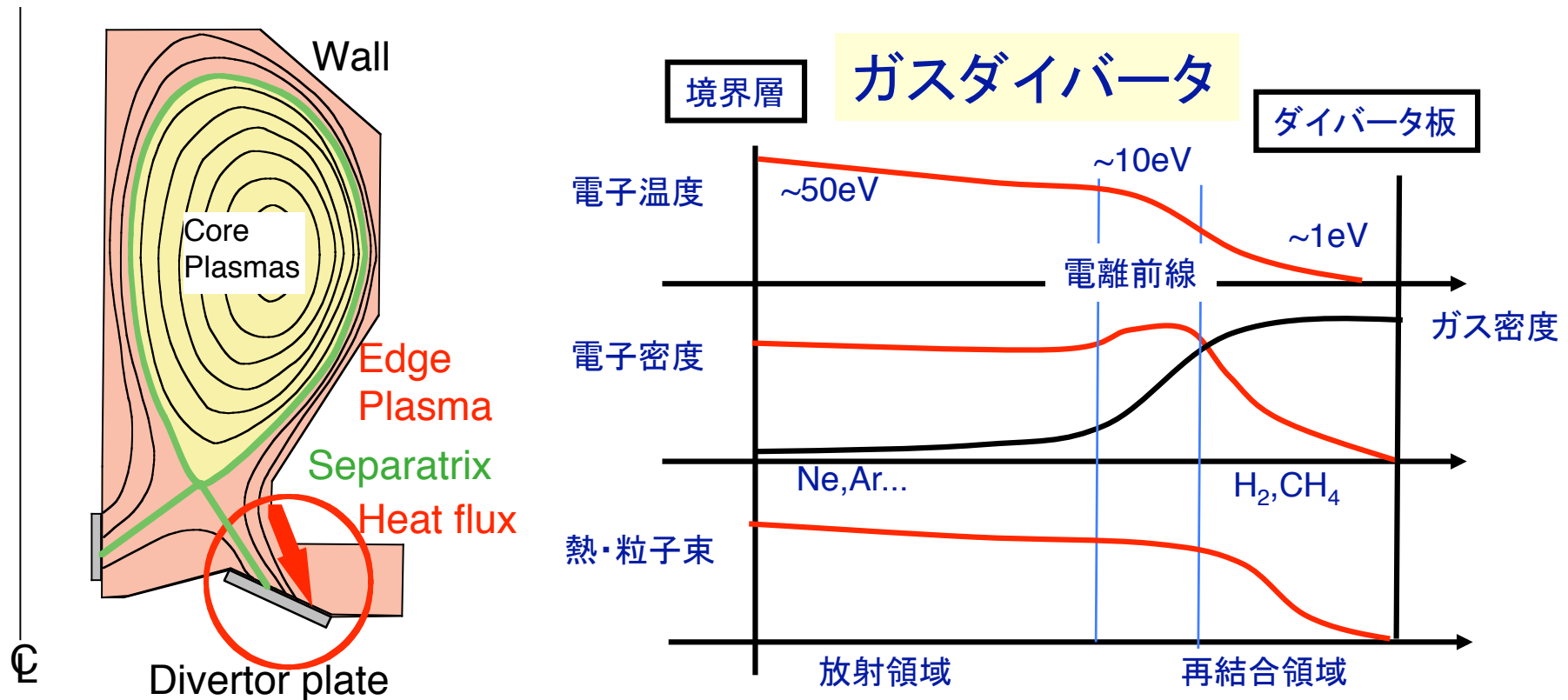
(2) 水素分子の分光診断

(3) He 原子の分光診断



研究背景：ダイバータデタッチメント(非接触化)

2



ガス入射によるダイバータデタッチメント(非接触化)が有効なシナリオ。

不純物放射冷却（制動輻射・不純物線輻射）・・・必要条件

低温高密度化によるイオン・電子再結合（EIR）・・・閉じ込め装置で現れる

水素分子活性化再結合（H₂-MAR）・模擬装置（名大NAGDIS-II）で確認

炭化水素活性化再結合（Hydrocarbon-MAR）・2000年予測→2002年実証（東大MAP-II）

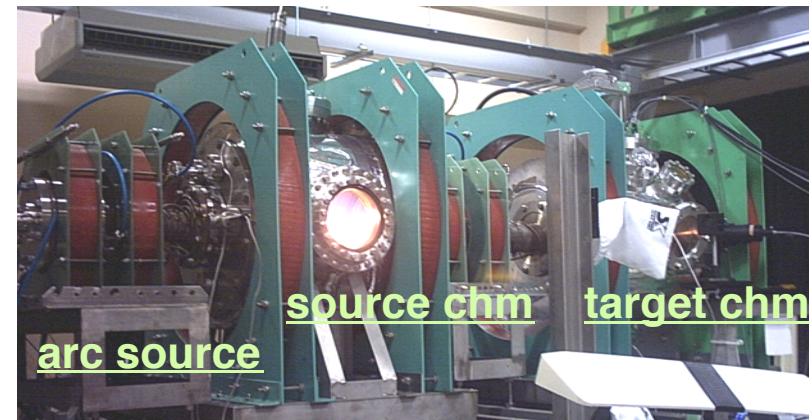
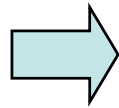
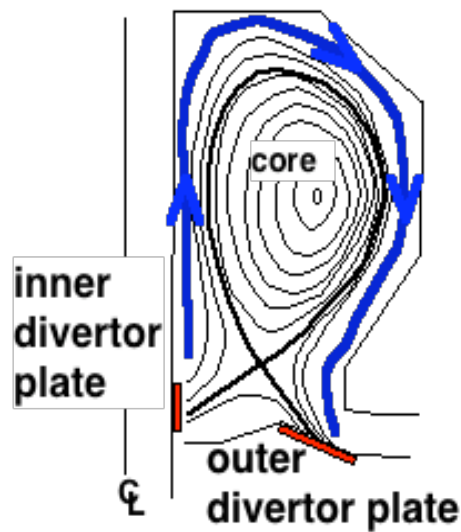
複合的・効率的なデタッチメントの追求

原子分子素過程の利用

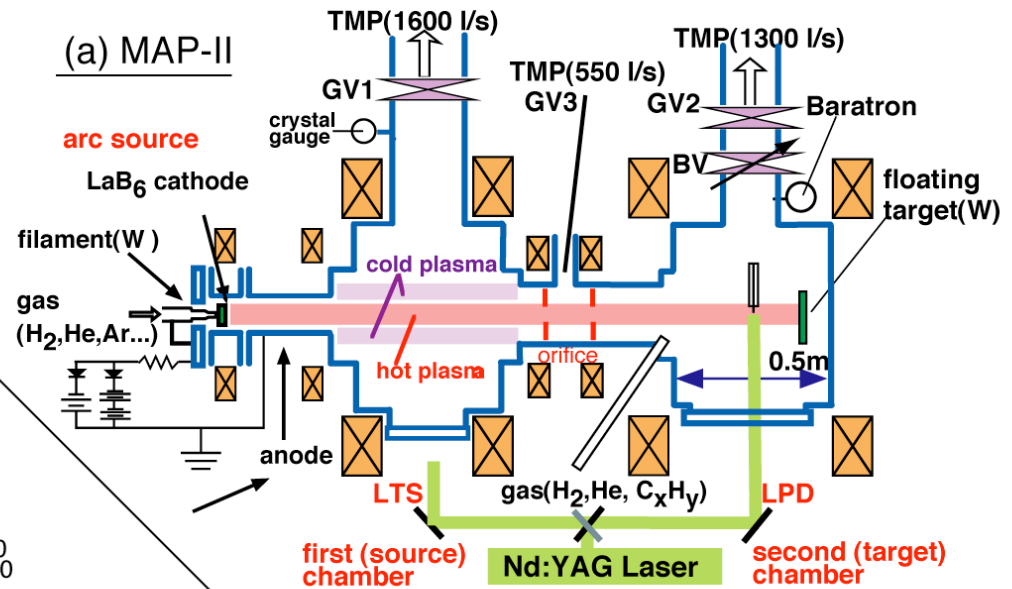
診断法の開発・活用

ダイバータ模擬装置MAP-II

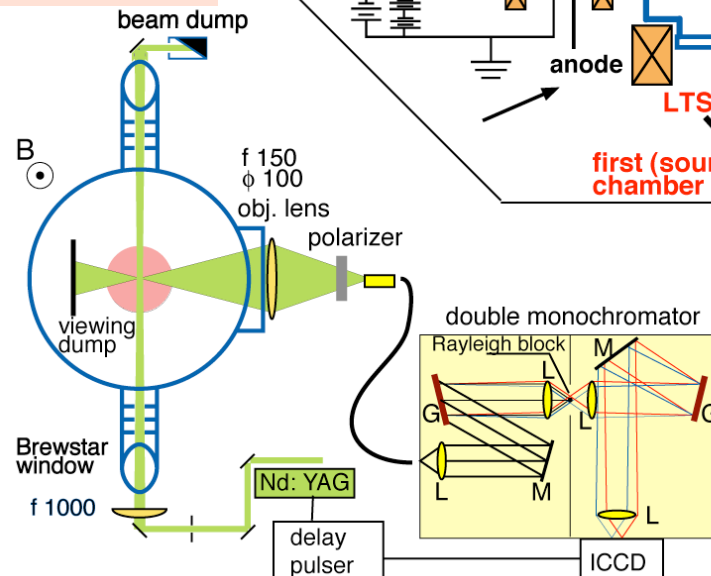
3



(a) MAP-II



トムソン散乱



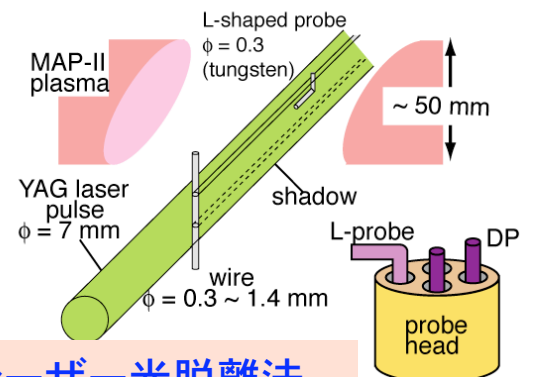
Arc discharge:
70-100V, 30-45A

B = 0.02T

差動排気:

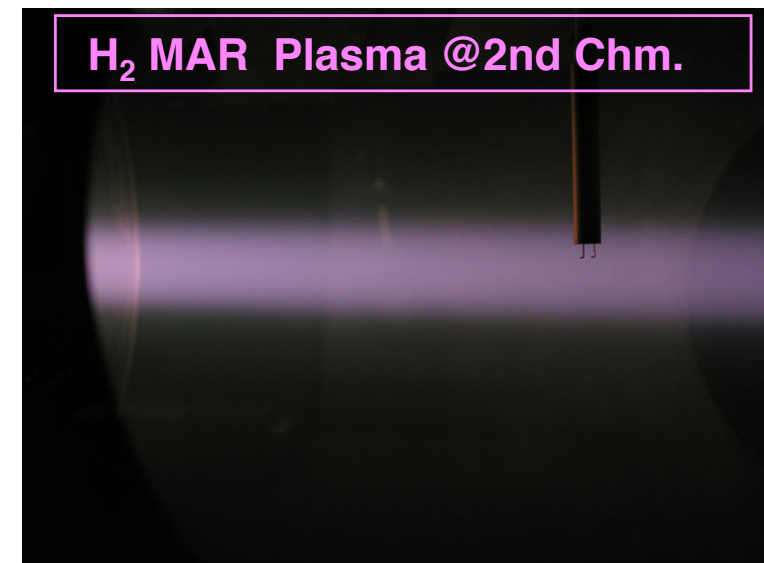
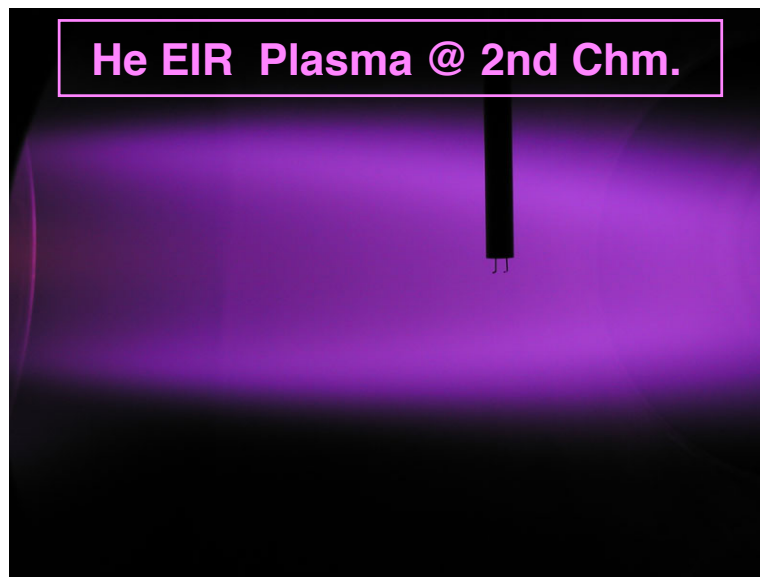
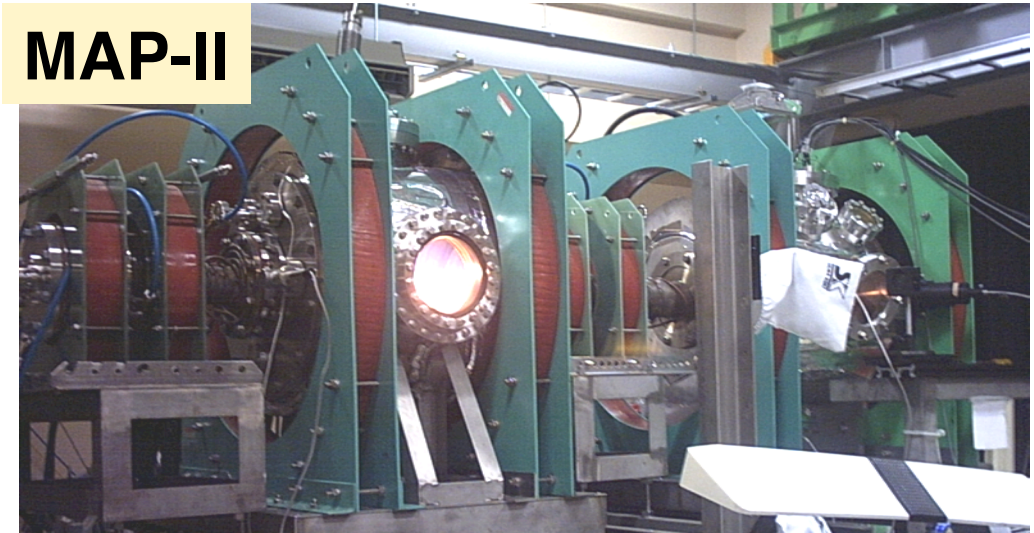
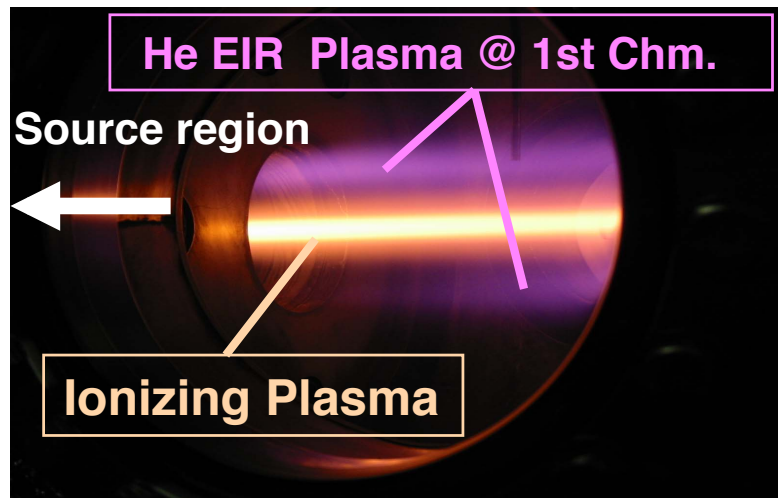
on--> アタッチ運転

off --> デタッチ可能



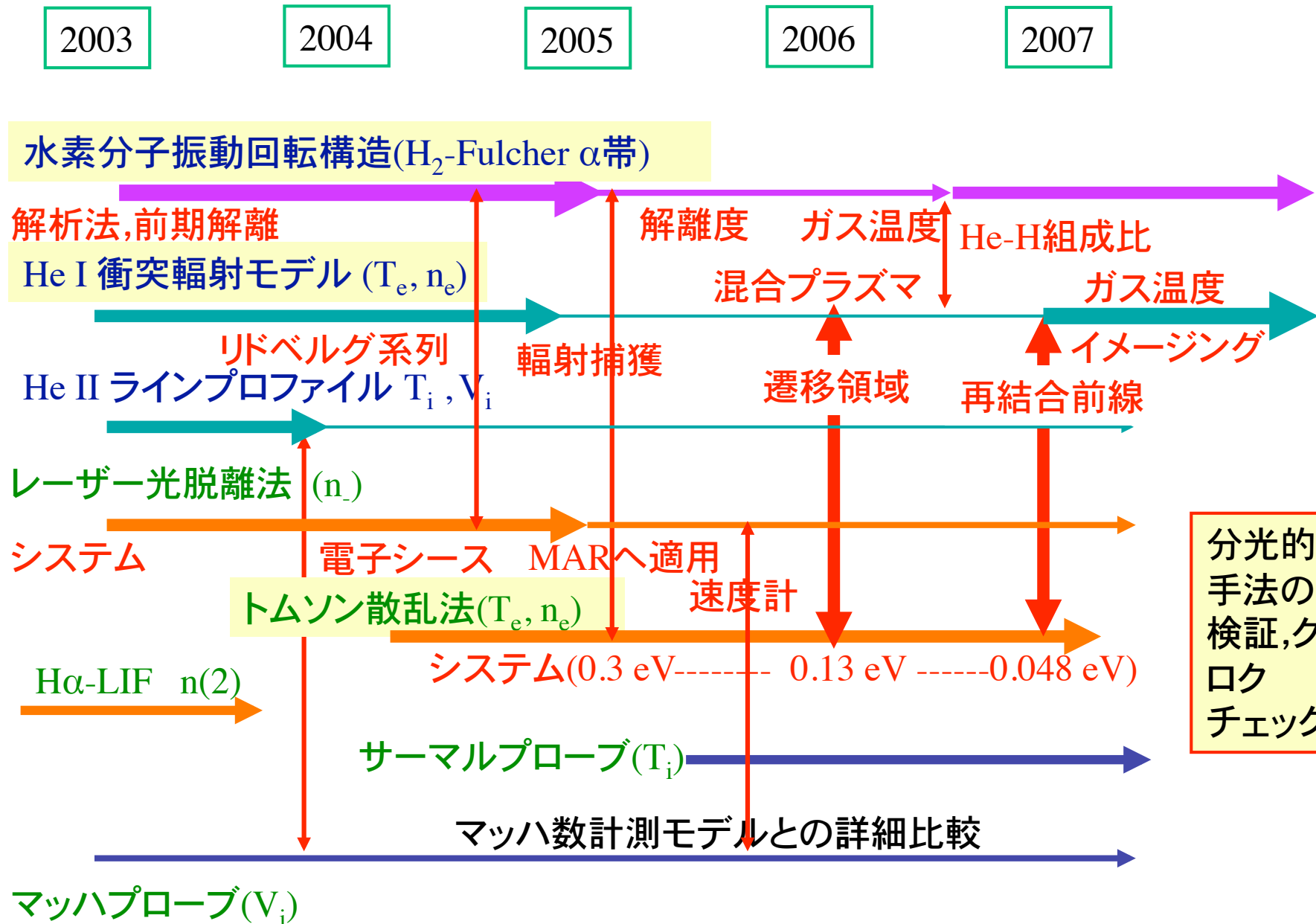
レーザー光脱離法

Study in the Divertor Simulator MAP-II



Objective: Clarifying the A&M processes relevant to the plasma detachment

ここ数年の分光研究全体像・進行状況



本発表の内容

水素分子Fulcher- α 帯($d^3\Pi_u^- \rightarrow a^3\Sigma_g^+$)計測の確立

- 動機: 分子活性化再結合, リサイクリング, F-C原子のエネルギー,
輸送コードへの入力パラメータ 決定に重要 → 励起準位間のデータ不足
- データ点を増やせるか? 精度は十分か? → データベースの補完
- 検証方法の発案, 従来手法による回転温度評価の誤差

- 振動温度- 負イオン生成 ----- 負イオン計測
- 回転温度- ガス温度に関連(低密度ではガス温度に一致) -- 壁温度計測
- 解離度- 励起係数の振動構造の評価 ----- 原子分子比計測

ヘリウム原子

- He I 衝突輻射モデル

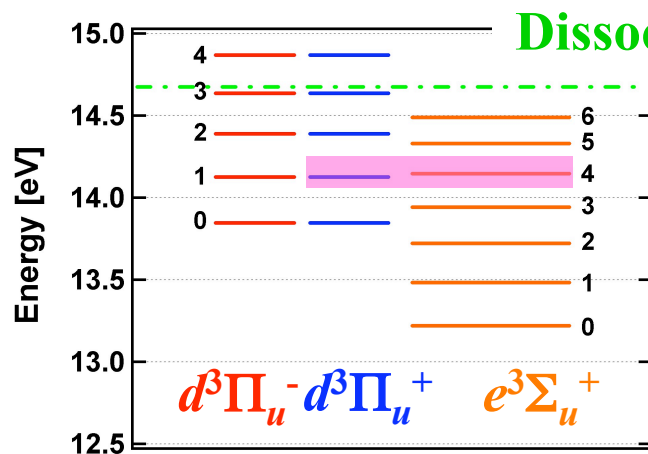
- 再結合プラズマの電子温度 ----- トムソン散乱による検証
- 輻射捕獲過程の組み込み ---- 実効的輻射捕獲半径, 原子温度(進行中)

Fulcher- α 分光法の確立

Fulcher- α 帯分光診断法の特徴と問題点

感度 --- $v=0-4$ を反映（高振動励起は得られない）

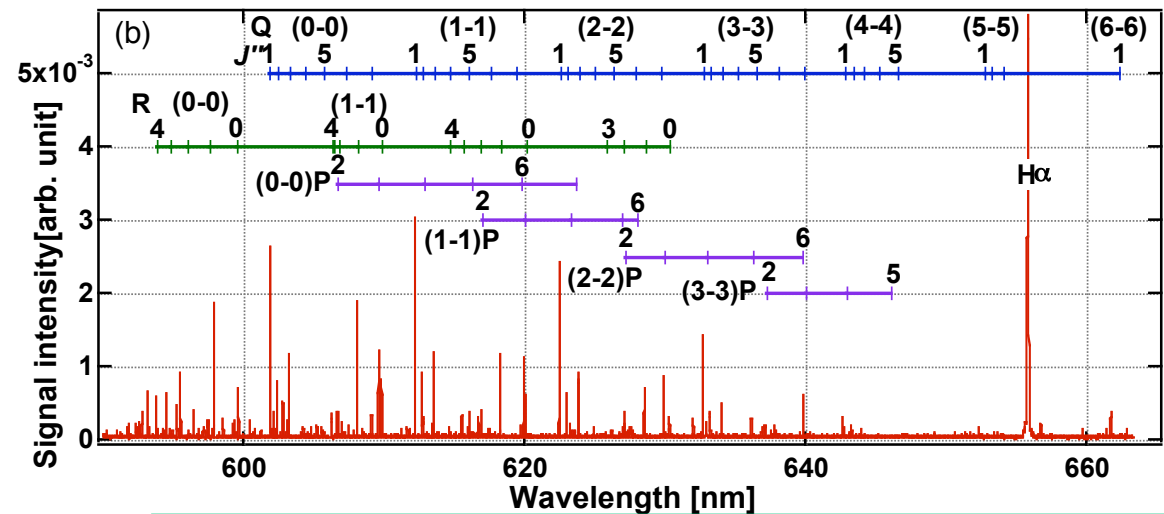
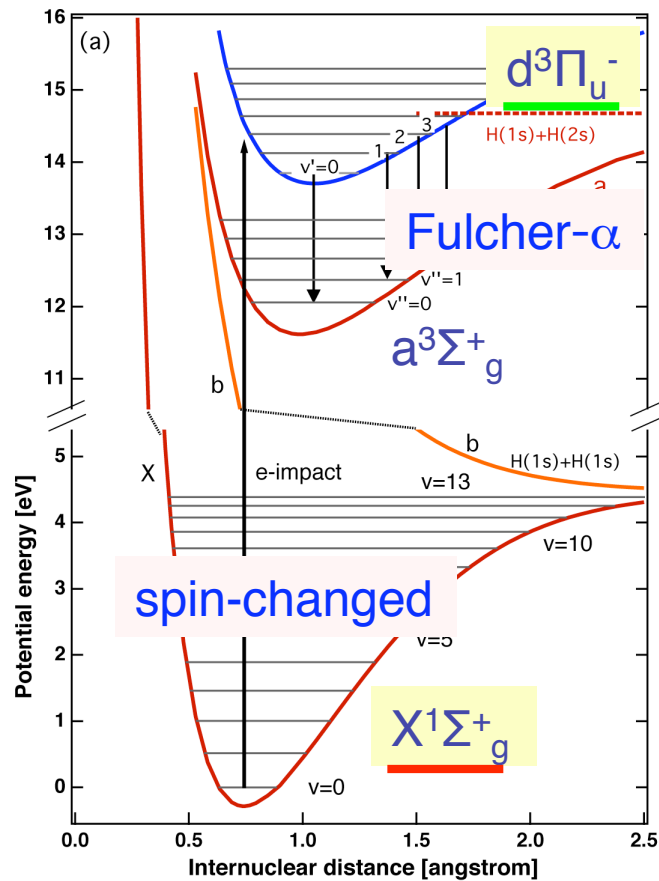
- 可視光領域にある(600-640 nm)
- 低密度($\leq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)基本的に2準位系とみなせる.
- ×励起準位からの励起係数に関するデータベースがない.
- ×摂動により断熱近似(B.O.近似)に従わないものがある.
- △ライン数が限られる.



- ◆ $d^3\Pi_u$ 準位の $v'=3$ と4の間に $\text{H}(1s)+\text{H}(2s,2p)$ への解離極限があるため, $v'\geq 4$ 由来の発光強度は弱くなる.
- ◆ $d^3\Pi_u^+$ と $e^3\Sigma_u^+$ の相互作用のために, $d^3\Pi_u^+$ 由来の発光(P,R枝)比は異常性を示す.

- データ点増大のために,最新の寿命データをもとに解離極限以上の発光,およびP,R枝の発光の異常性を調べる.
- 高振動励起分布に起因する発光が観測できるLyman帯分光診断法の確立(準備中)

水素分子Fulcher- α 帯($d^3\Pi_u^- \rightarrow a^3\Sigma_g^+$)の振動・回転構造



1m-Czerny-Turner (2400 G/mm), PMT(Hamamatsu R928)

Wavelength resolution(FWHM) < 0.03 nm @50 μ m slit

励起過程
(コロナ平衡)

$$\sum_v \sum_J \{ R_{X,vJ}^{d,v'J'} N_{vJ}^X \} = N_{v'J'}^d \sum_{J'} A_{d,v'J'}^{a,v''J''}$$

発光過程

$$I_{d,v'J'}^{a,v''J''} = h\nu \cdot A_{dv'J'}^{av''J''} N_{vJ}^d$$

$$I_{av''J''}^{dv'J'} = \frac{hc}{\lambda_{dv'J'}} \frac{A_{av''J''}^{dv'J'}}{\sum_{v'',J''} A_{av''J''}^{dv'J'}} n_e \sum_{v,J} \left[R_{XvJ}^{dv'J'} C_v (2J+1) g_{as}^J \exp \left[-\frac{F_X(J,v)}{kT_{\text{rot}}^X} - \frac{\Delta G_X(v)}{kT_{\text{vib}}^X} \right] \right]$$

Experiments

Dataset → 補完が必要

Fitting parameters

Gryzinski Method for spin-change excitation cross-section

$$Q^{Gryzinski}(E_i) = \int_{E_1}^{E_2} \sigma(\Delta E) d(\Delta E)$$

$$\sigma(\Delta E) = \frac{N_{elec} \times 6.56 \times 10^{-14}}{\Delta E^2} \sqrt{\frac{E_i + E_{ion}}{(E_t + E_i + E_{ion})^3}}$$

$$\times \left(1 - \frac{E_t}{E_i + E_{ion}} + \frac{4E_t}{3\Delta E} \ln \left[2.7 + \sqrt{(E_i + E_{ion} - \Delta E)/E_t} \right] \right) \times \left\{ 1 - \left(\frac{\Delta E}{E_i + E_{ion}} \right)^{\frac{E_t}{E_t + \Delta E}} \right\} [\text{cm}^2/\text{eV}]$$

N_{elec} : 標的の電子の数

= 2 理論 :

= 1 にとれば実験に合う (従来)

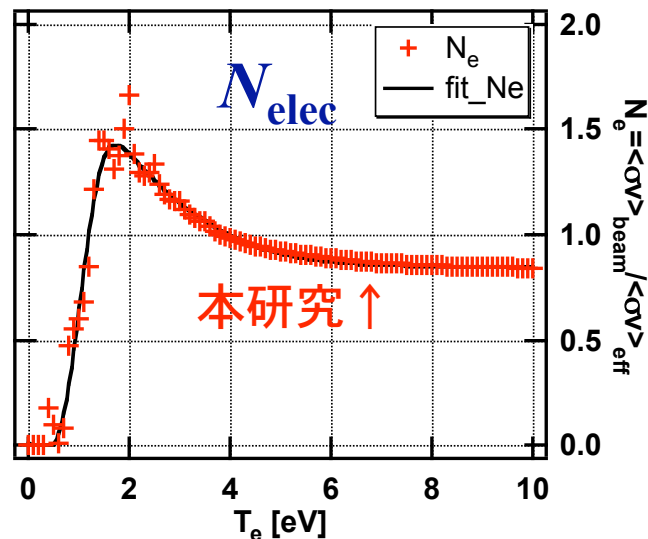
= 実験で規格化 (本研究)

→ 絶対値の誤差を補償

振動準位依存性を保持

理論 →

従来 →

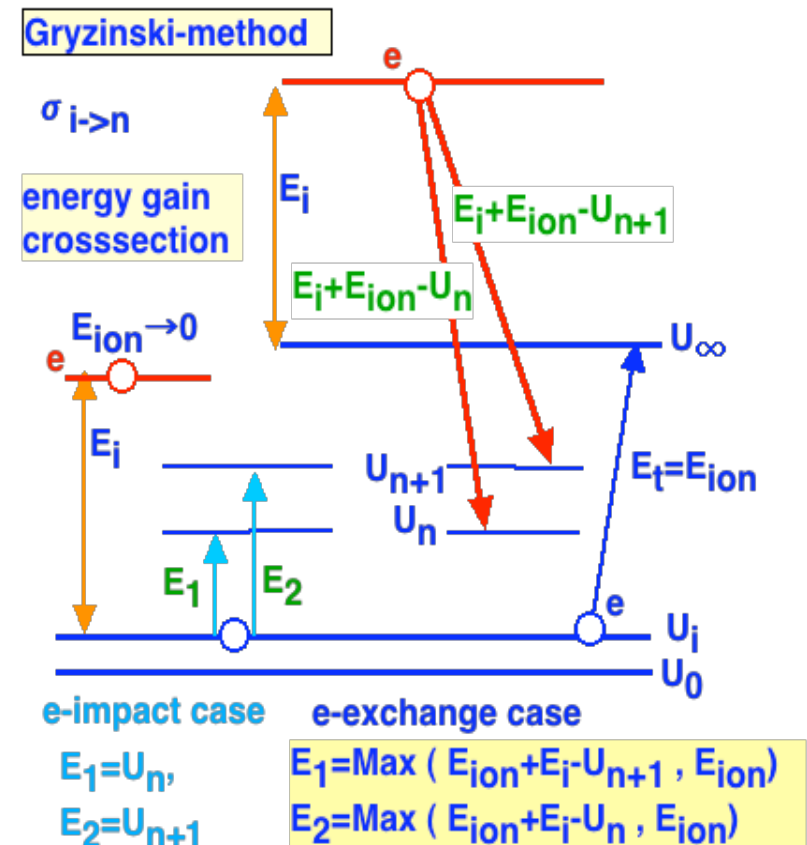


導出法 ↓

$$E_1 = \max(E_i + E_{ion} - U_{n+1}, E_{ion})$$

$$E_2 = \max(E_i + E_{ion} - U_n, E_{ion})$$

$$E_t = U_{\infty} - U_n \quad (U_{\infty} = 15.4 \text{ eV}) = E_{ion}$$



Fulcher- $\alpha(d^3\Pi^{-/+}_u - a^3\Sigma_g^+)$ for the $X^1\Sigma_g^+(v, J)$ measurement

10

Radiative transition ratio

Vibrational structure: Franck-Condon factor

- 対角遷移($v=0-0, 1-1, 2-2, 3-3$)ではBO近似が成立
- $v>4$ で前期解離 → 寿命が減る → 補正法提案

Rotational structure: Hönl-London factor

$$S_{J'J''}^Q = \frac{2J'+1}{2},$$

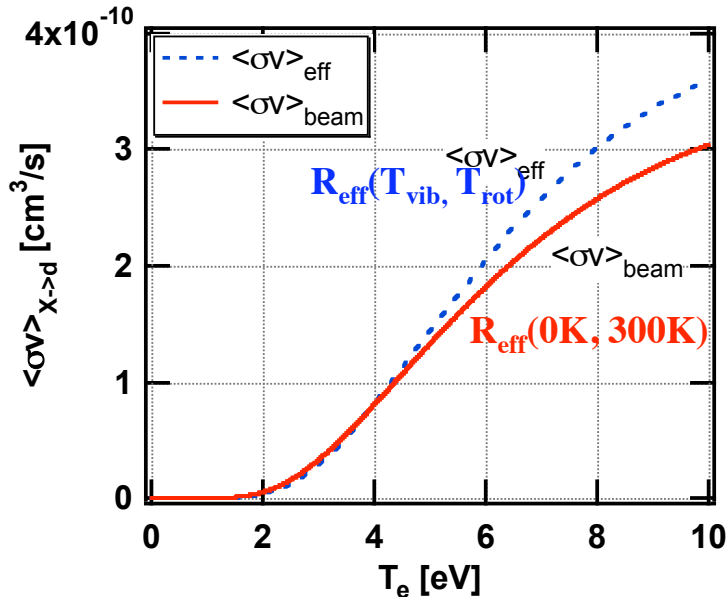
$$S_{J'J''}^P + S_{J'J''}^R = \frac{J'}{2} + \frac{J'+1}{2} = \frac{2J'+1}{2}$$

Excitation rate

Vibrational structure: Gryzinski 法

$$R_{XvJ}^{dv'J'} = q_{Xv}^{dv'} < Q_{v' \leftarrow v}^{Gryzinski} v_e > a_{0J}^{1J'} \delta_{g_{as}}^{g'_{as}}$$

$T_{vib}=0$ の実験(ビーム)で校正したRの値で有限 T_{vib} の R_{eff} を導出



Rotational structure: ビーム実験

$$\sum_{K'} a_{\Lambda K}^{\Lambda' K'} = \sum_{K'} \sum_r \bar{Q}_r (2K'+1) \begin{pmatrix} K' & r & K \\ \Lambda' & \Lambda - \Lambda' & -\Lambda \end{pmatrix}^2 = 1$$

Multi-polar $Q'_{r=1-4} : \{0.76, 0.122, 0.1, 0.014\}$.

$r = 1$ ---> dipolar = Hönl-London factor

$$I_{av''J''}^{dv'J'} = \frac{hc}{\lambda_{av''J''}^{dv'J'}} \frac{N_{d^-v'J'} A_{av''J''}^{d^-v'J'}}{\sum_{v'J'} \sum_{v''J''} N_{d^-v'J'} A_{av''J''}^{d^-v'J'}} n_e N_{H_2} \langle R_X^d \rangle_{eff}$$

$$N_{H_2} \langle R_X^d \rangle_{eff} = \sum_v \sum_J \{ N_{vJ}^X R_{X,vJ}^d \} \left(= \sum_{J'} N_{v'J'}^d A_{d,v'J'}^{a,v''J''} \right)$$

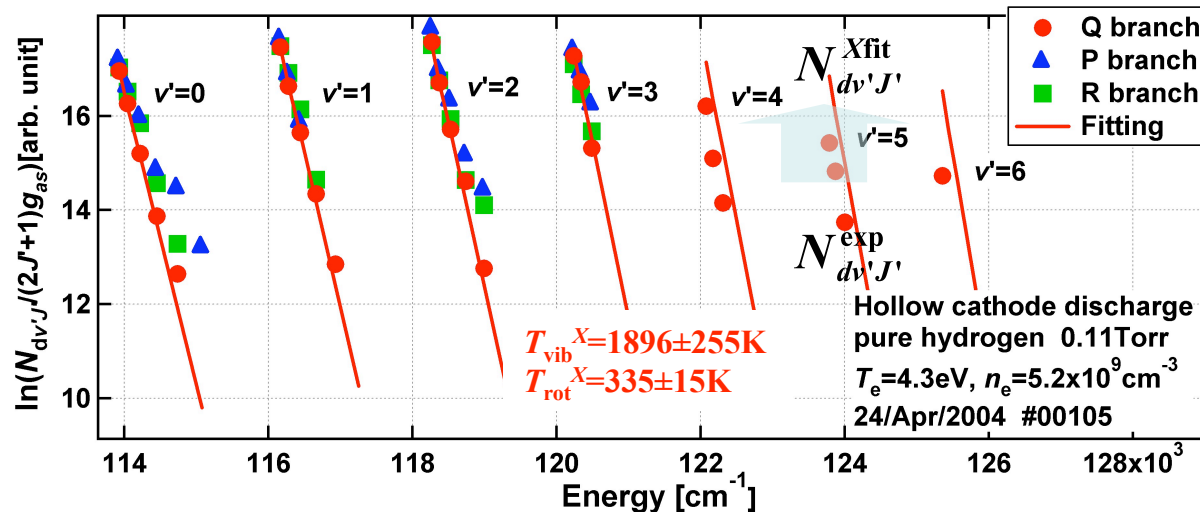
(2) 実測寿命による補正

電子ビーム実験による準位寿命[ns]計測

	J'	$v'=0$	$v'=1$	$v'=2$	$v'=3$	$v'=4$	$v'=5$
* $d^3\Pi_u^-$	1	40	38	42	40	19 ? 15	
** $d^3\Pi_u^-$	1	39	38	38	38		
$d^3\Pi_u^+$	1	39	35	38	37		
$d^3\Pi_u^+$	2	36	28	32	40		
$d^3\Pi_u^+$	3	34	17	36			

* M. L. Burshtein *et al.*, *Opt. Spectros.* **68**, 166 (1990).

** T. Kiyoshima and H. Sato, *Phys. Rev. A* **48**, 4771 (1993).



自然放出係数 $A = 1/\tau$

ボルツマンプロット法

$$\ln\left(\frac{N_{dv'J'}}{(2J'+1)g_{as}^{J'}}\right) = \text{const} - \frac{F_d(J',v')}{kT_{rot}^{dv'}}$$

○ $v' \leq 3$ では

$$N_{dv'J'} = \frac{\lambda}{hc} \frac{1}{A_{av''J''}^{dv'J'}} I_{av''J''}^{dv'J'}$$

○ $v' \geq 4$ では

$$N_{dv'J'} = \frac{\lambda}{hc} \frac{1}{A_{av''J''}^{dv'J'}} I_{av''J''}^{dv'J'} \times \frac{\tau_{v'=0-3}}{\tau_{v'=4-}}$$

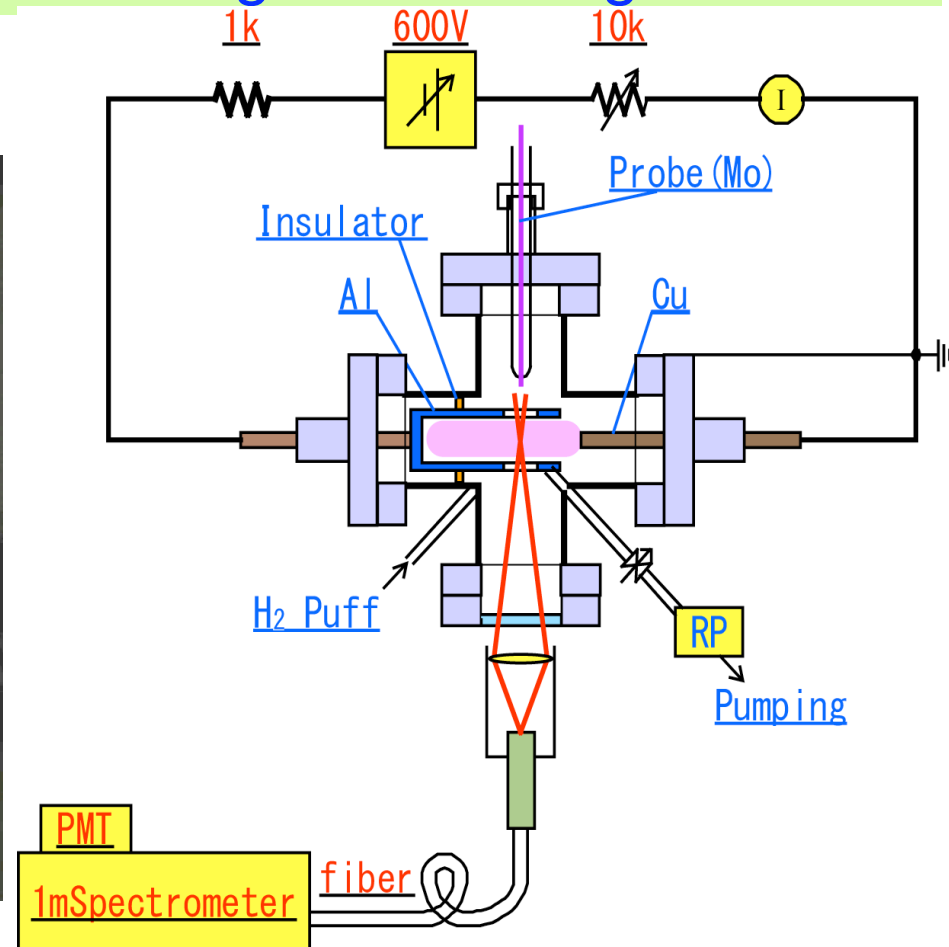
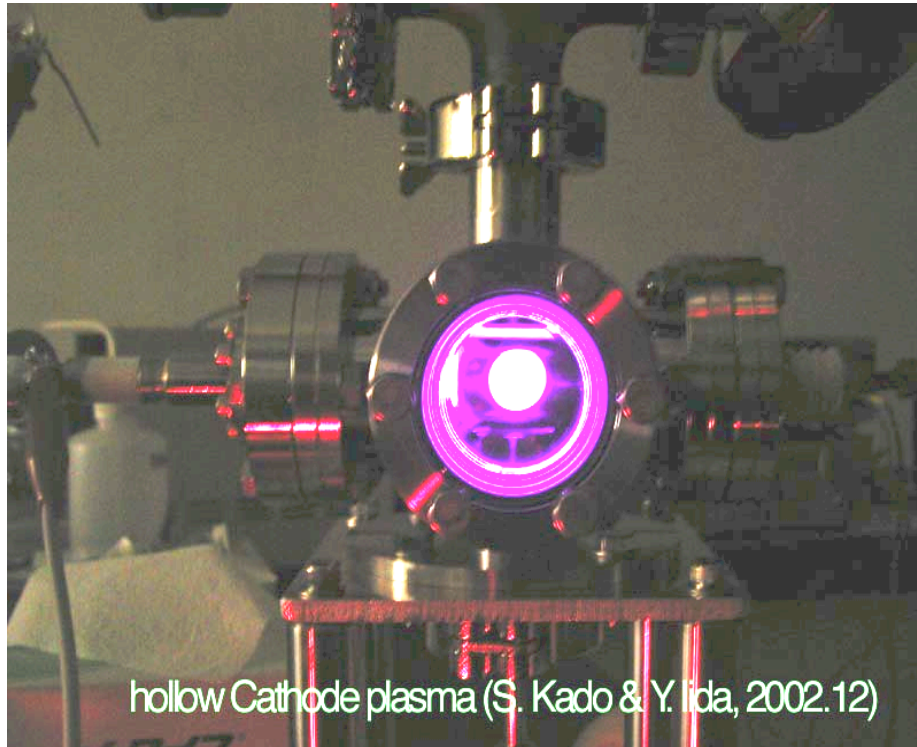
補正項

① $v'=4$ に関して実測手法を提案

② P,R枝に関しては文献値の利用を試行

Experiment: Hollow cathode glow discharge

12



パラメータ:

作動ガス: H₂: 20-3000 Pa (0.1 - 2 Torr) : → 幅広い圧力領域

放電: 230-270 V, 70 mA,

電子密度 $n_e \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$, 電子温度 $T_e = 1-5 \text{ eV}$

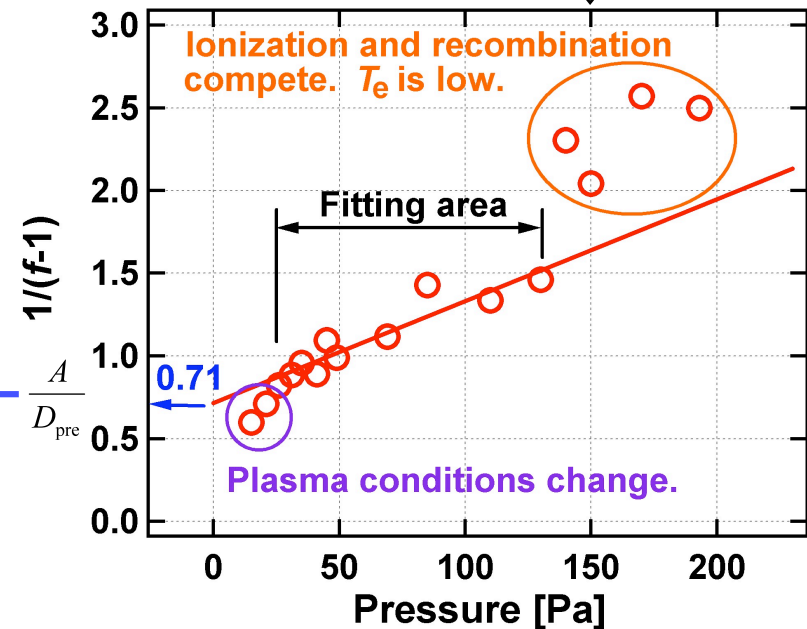
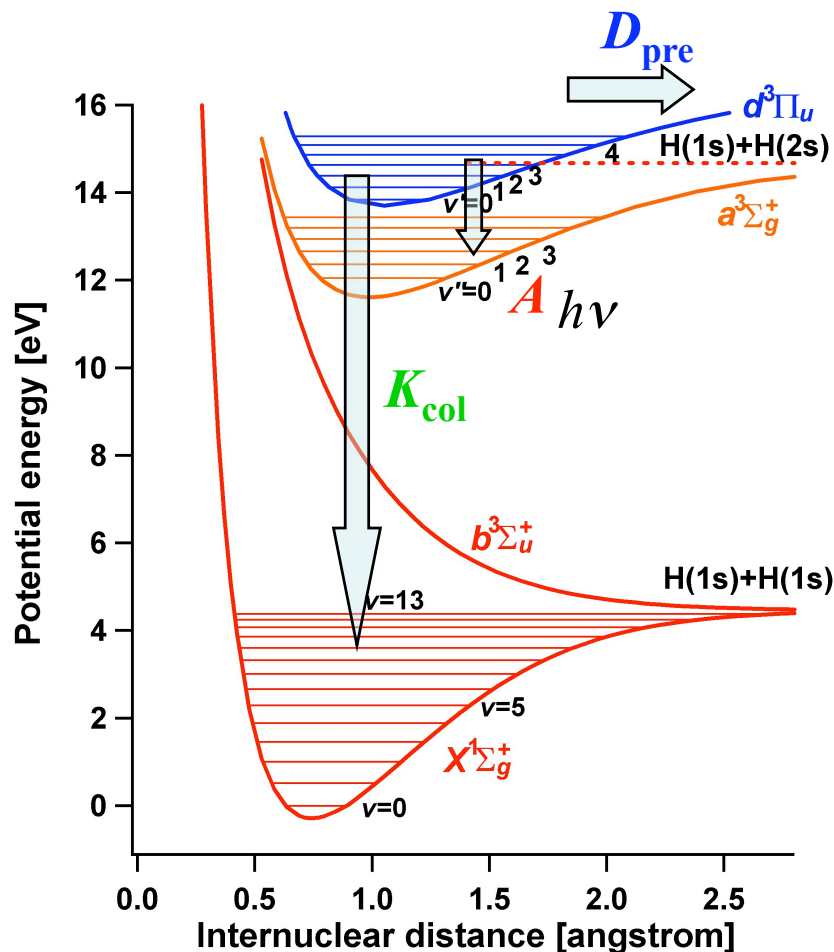
(1) 前期解離係数 D_{pre} の算出 (ホローカソードグロー放電)

$v'=4$ に関して

前期解離を考慮に入れない場合の寿命 ($v=0-3$ と同様)

補正係数 $f \equiv \frac{N^{Xfit}}{N^{exp}} = \frac{\tau_{v'=0-3}}{\tau_{v'=4}} = \frac{A + D_{pre} + K_{col}}{A + K_{col}} \rightarrow \frac{1}{f-1} = \frac{A + K_{col}}{D_{pre}}$

自然放出のみ考慮に入れた場合の寿命



衝突による脱励起が **中性粒子の密度に比例**する領域でフィッティング

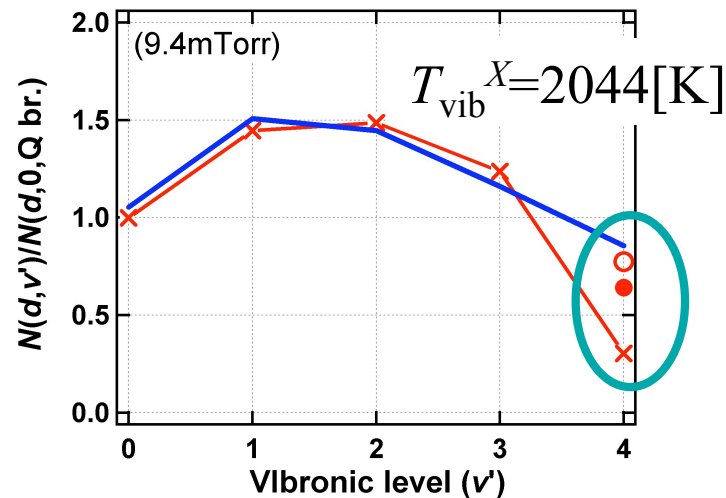
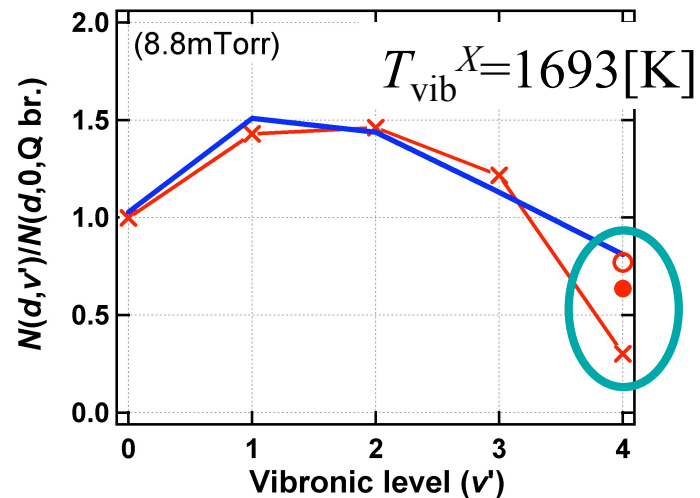
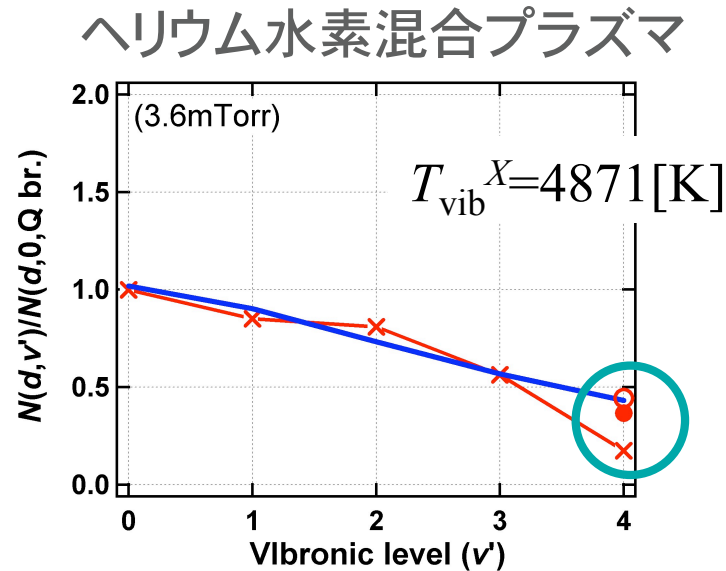
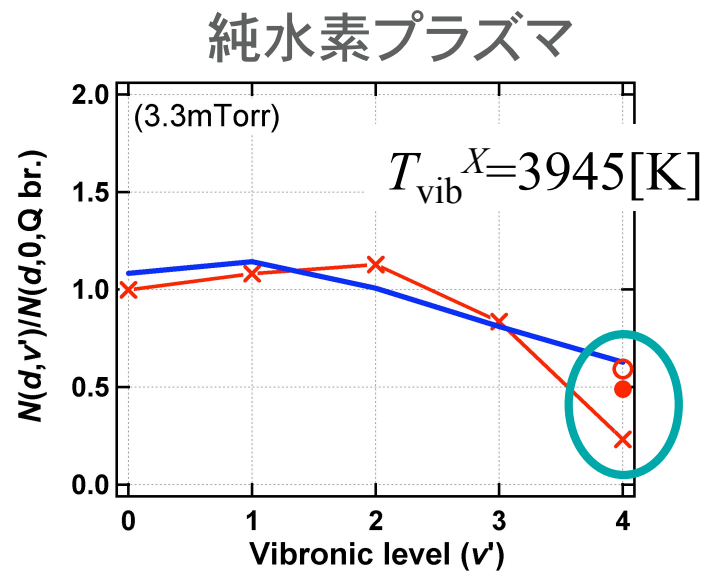
$$\frac{\tau_{v'=0-3}}{\tau_{v'=4}} = \frac{A + D_{pre}}{A} = 2.40 = \frac{40.0\text{ns}}{16.7 \pm 0.8\text{ns}}$$

16.7 < 19.0ns 電子ビーム実験

* M. L. Burshtein et al., *Opt. Spectros.* (USSR) **68**, 166 (1990).

得られた補正係数の検証

K_{col} を無視できるMAP-IIの低圧プラズマに補正係数を適用



— 電子基底状態の振動回転温度から算出

— 実験値

○ 16.7ns補正

ホローカソード実験で得られた値

● 19.0ns補正

文献値

× 補正なし

* D. Yamasaki, S. Kado *et al.*,
to be published in *J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006).

(2) P,R枝の異常性

✓ **断熱近似**においてはP,R枝から得られる値は**同じ**

➤ 励起分布も回転温度も特に $v'=1$ で特異な形状

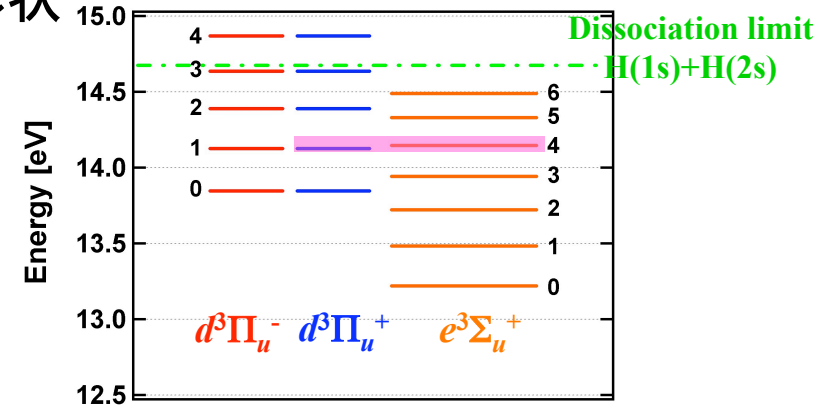
⇒ **実測寿命による補正**

... $v'=1$ だけ有意に短い

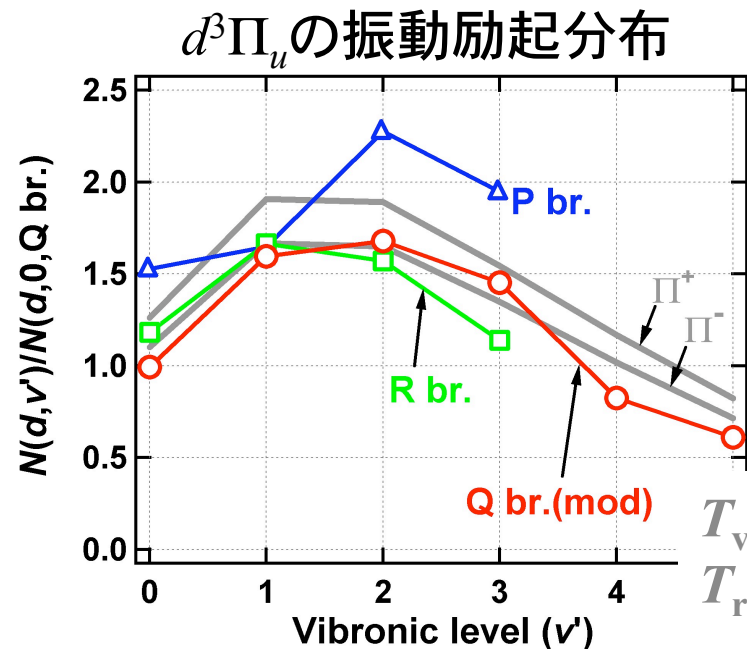
$d^3\Pi_u^{-/+} \leftarrow X^1\Sigma_g^+$ の励起係数 (**断熱近似**)

$$R_{xvJ}^{dv'J'} = \underbrace{q_{Xv}^{dv'}}_{\text{電子項, 振動項}} < Q_{v' \leftarrow v}^{Gryzinski} v_e > \underbrace{a_{0J}^{1J'} \delta_{g'as}^{g'as}}_{\text{回転項}}$$

電子項, 振動項 **回転項**

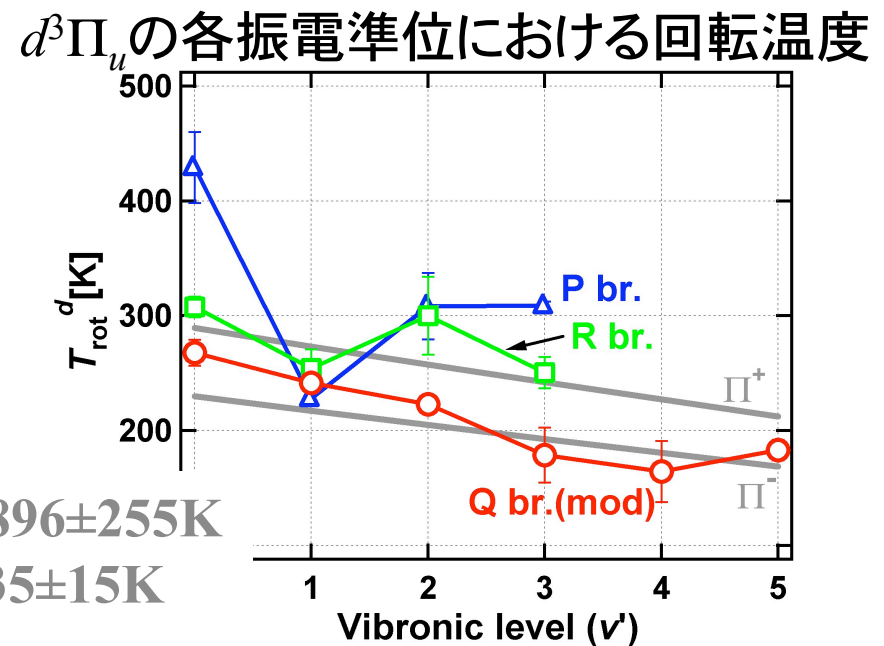


(Hollow cathode 0.11 Torr)



$$T_{\text{vib}}^X = 1896 \pm 255 \text{ K}$$

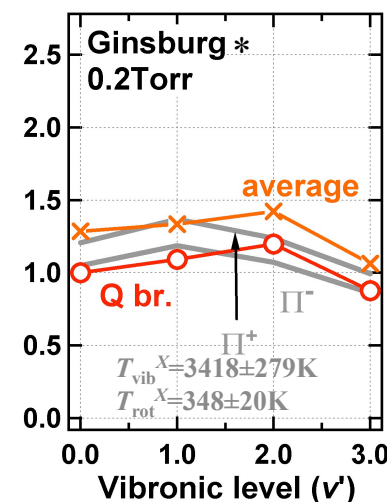
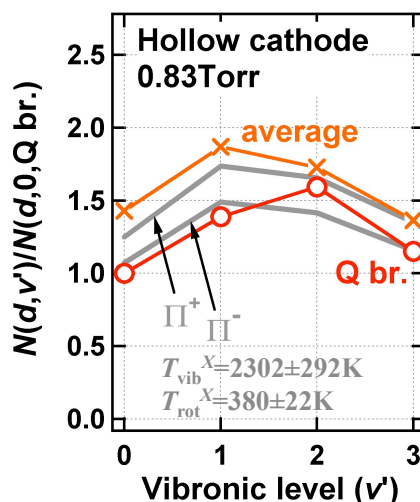
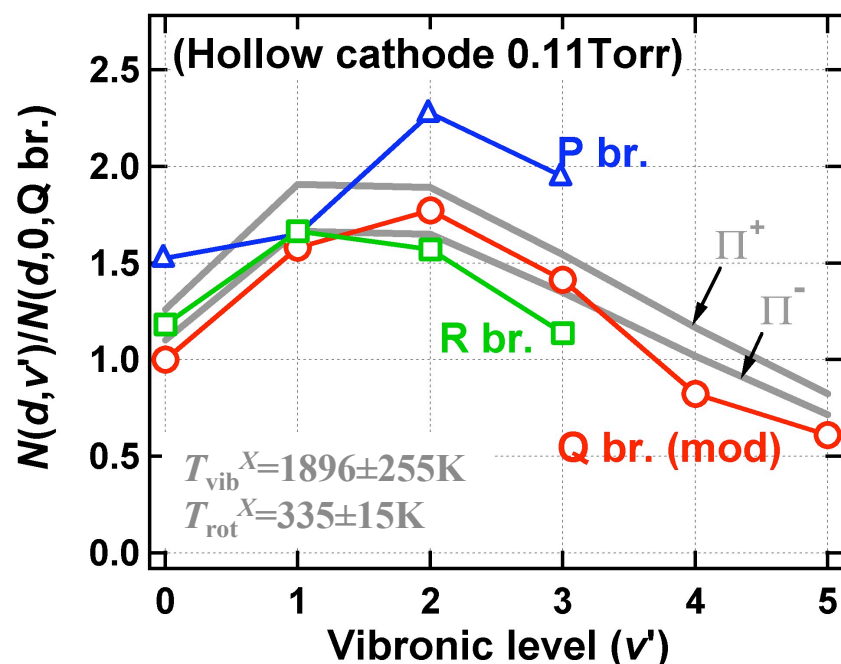
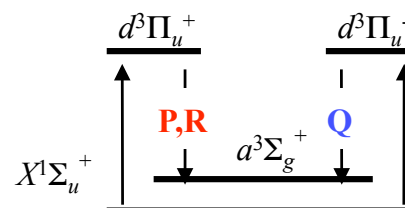
$$T_{\text{rot}}^X = 335 \pm 15 \text{ K}$$



Hönl-London因子(輻射遷移の比)

$$\left\{ \begin{array}{l} S^Q = \frac{2J'+1}{2} \\ S^P + S^R = \frac{J'}{2} + \frac{J'+1}{2} = \frac{2J'+1}{2} \end{array} \right\} \rightarrow$$

P,R枝を合計すれば輻射遷移量は
Q枝と同等(断熱近似モデル)



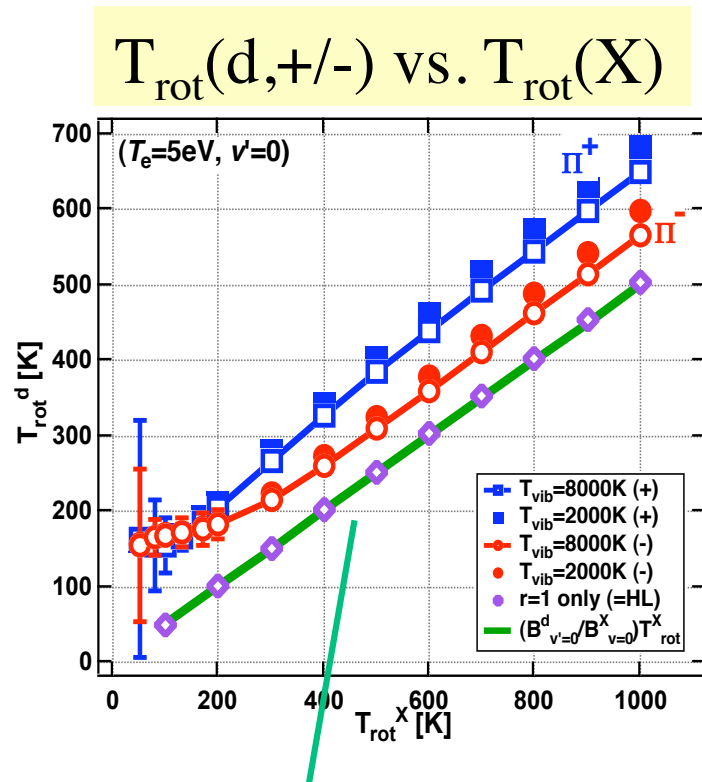
* N. Ginsburg and G. H. Dieke, *Phys. Rev.* **59**, 632 (1941).

** 門信一郎, 山崎大輔 他: プラズマ・核融合学会誌 **80**, 783 (2004).

*** S. Kado, D. Yamasaki *et al.*, *JPFR. SERIES 7* (2006) 54-58.

P,R枝の発光強度比の異常性は, $d^3\Pi_u^+$ 準位からの発光が**Hönl-London因子通り**に分配されていないことに起因している。

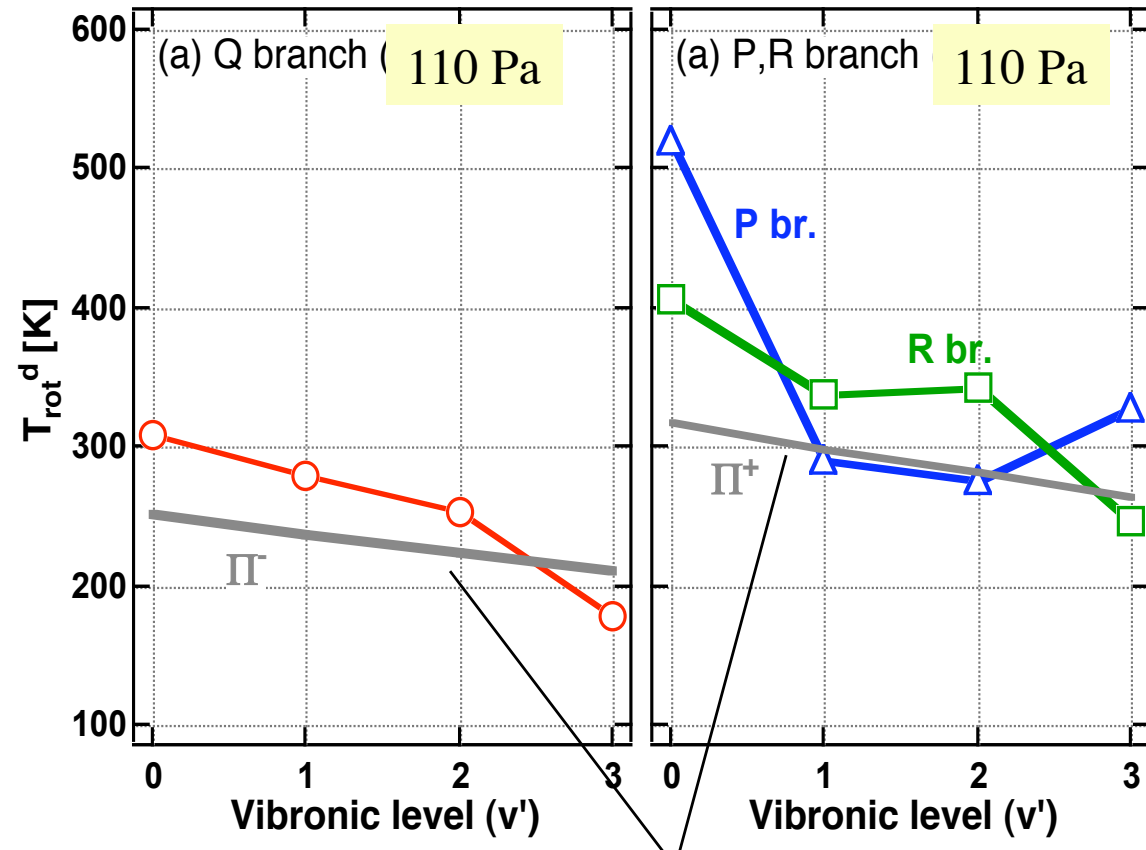
基底準位の回転温度 $T_{\text{rot}}(x)$ と励起準位の回転温度 $T_{\text{rot}}(d)$ の関係



Commonly used equation

$$\frac{T_{\text{rot}}^X(v=0)}{B_{v=0}^X} \sim \frac{T_{\text{rot}}^d(v')}{B_{v'}^d}$$

is not sufficient for
the precise analysis



Best-fit:

$$\begin{aligned} T_{\text{vib}}(X) &= 2301.7 \pm 292\text{K} \\ T_{\text{rot}}(X) &= 380.47 \pm 21.7\text{K} \end{aligned}$$

P,R branches exhibit anomaly.

$T_{\text{rot}}(P)$ should be equal to $T_{\text{rot}}(R)$.

Fulcher- α 分光のまとめ

Fulcher- α 帯分光信頼性向上

データセットの補完:

励起・・Gryzinski法(半古典近似)の振動量子数依存性を利用

絶対値(振動温度に依存)の補償としてビーム実験の値を用いる手法の提案

基底準位と励起準位の回転温度の関係を明確にした. (2006PFR Series)

解離度計測への適用(初期結果公表済み(2005 JNM), 詳細は投稿準備中)

発光:

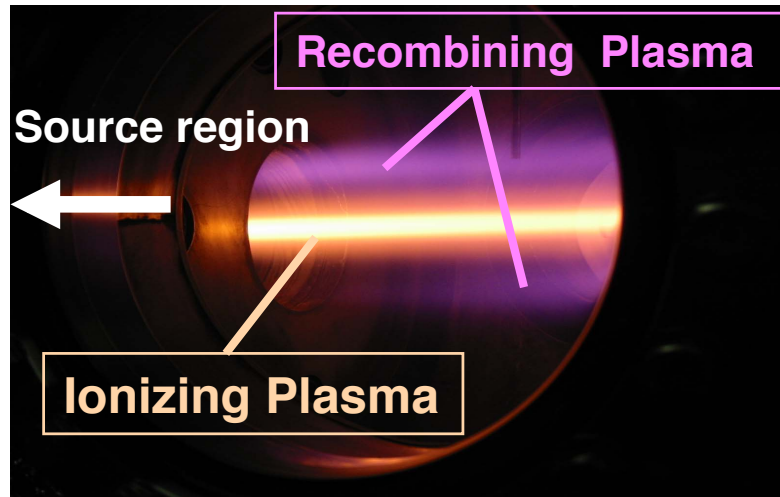
$v'=4$ における前期解離係数を算出し, それを用いた補正を行うことでFulcher- α 解析に取り入れられるようになった.

P, R枝の発光強度は回転構造の解析には取り入れられないが, $\phi\Pi_u^+$ の振動励起分布に関してはQ枝の発光強度から求めた電子基底状態の振動回転励起分布の妥当性評価に使用できる.

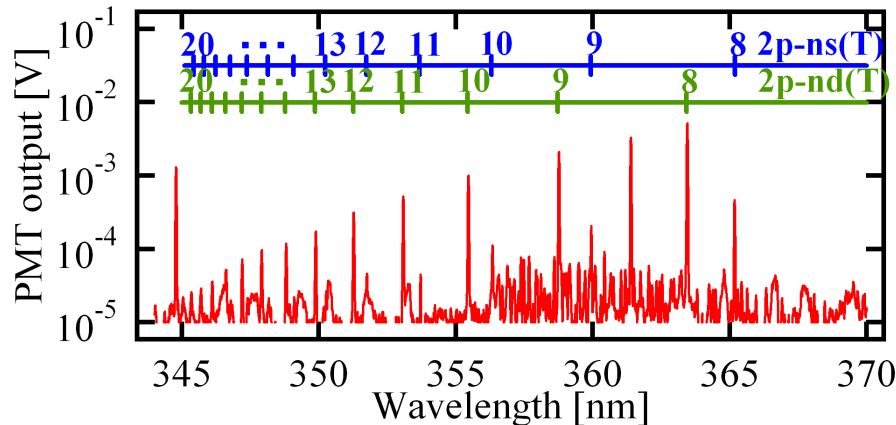
P, R枝の寿命に関する補正は, それぞれの枝から観測した寿命を用いる必要があることが示唆される. (→ 未完)

あるいは, 量子力学計算による信頼できるデータセットを待つ?

II. He-EIRプラズマ(原子ボルツマンプロット法)



ソースチャンバー周辺領域再結合スペクトル

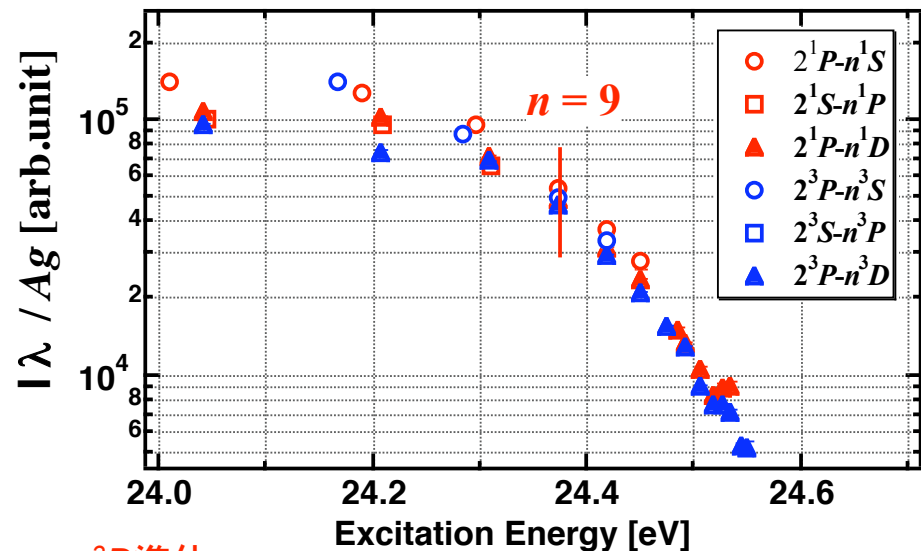


リドベルグ準位は部分的局所熱平衡状態 (p-LTE) に達しやすい。

ボルツマンプロット

$$\log\left(\frac{I_m \lambda_{mn}}{A_{mn} g_m}\right) = -\frac{\Delta E}{kT_e} + K$$

ある主量子数以上で直線に乗っていれば自由電子とp-LTEを示す。



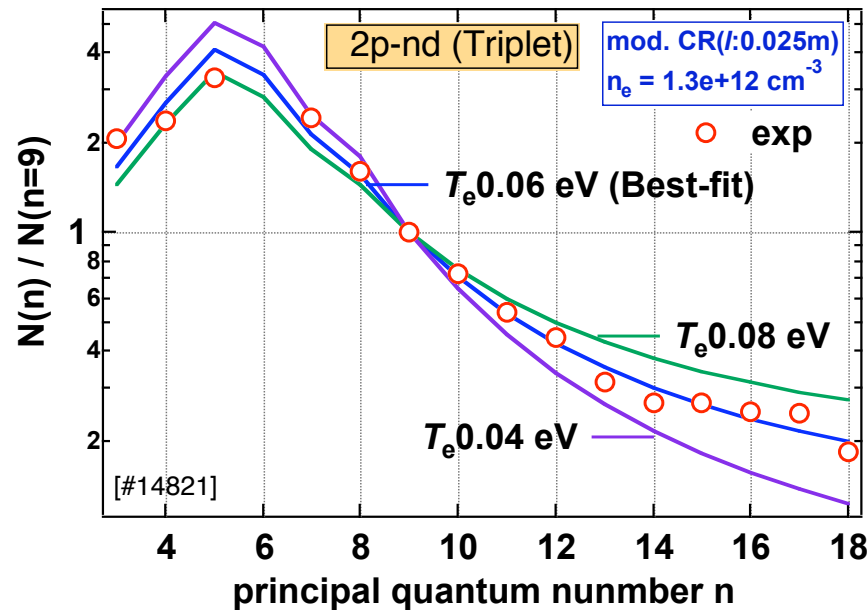
n^3D 準位

n for p-LTE	T_e [eV]	ΔT_e
9~15	0.073	± 0.003
10~15	0.068	± 0.004
11~15	0.065	± 0.006
12~15	0.062	± 0.010

p-LTEが成立するとみなせる準位はやや曖昧

再結合プラズマ～衝突輻射(CR)モデルの適用～

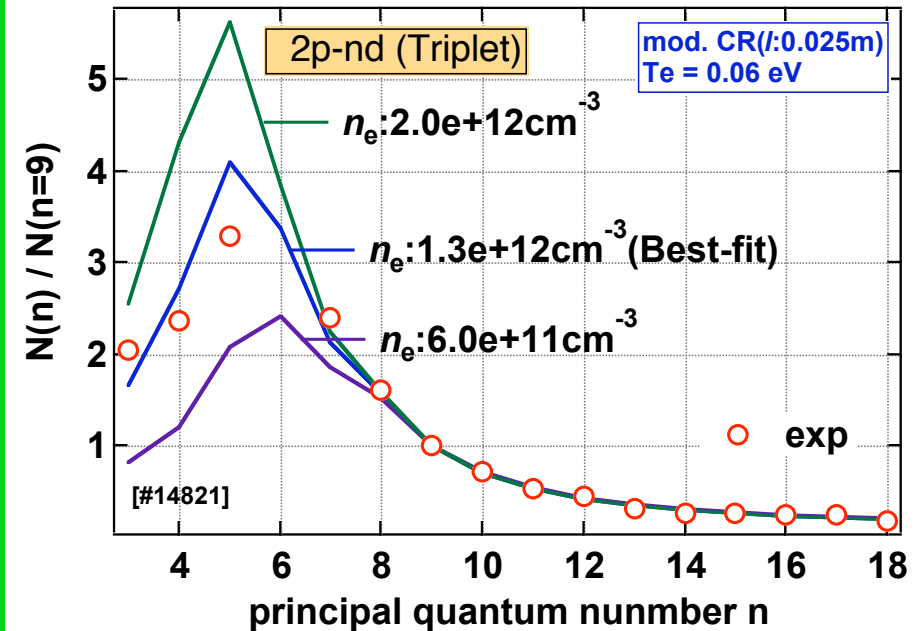
Fig. n^3D の励起分布の電子温度依存性



高励起準位は T_e への依存性が高い。

p-LTEを仮定せずに評価可能

Fig. n^3D の励起分布の電子密度依存性



低励起準位は n_e への依存性が高い。

但し、輻射捕獲特性長

2.5 cm $\rightarrow$ $1.3e+12 \text{ cm}^{-3}$ (上図)

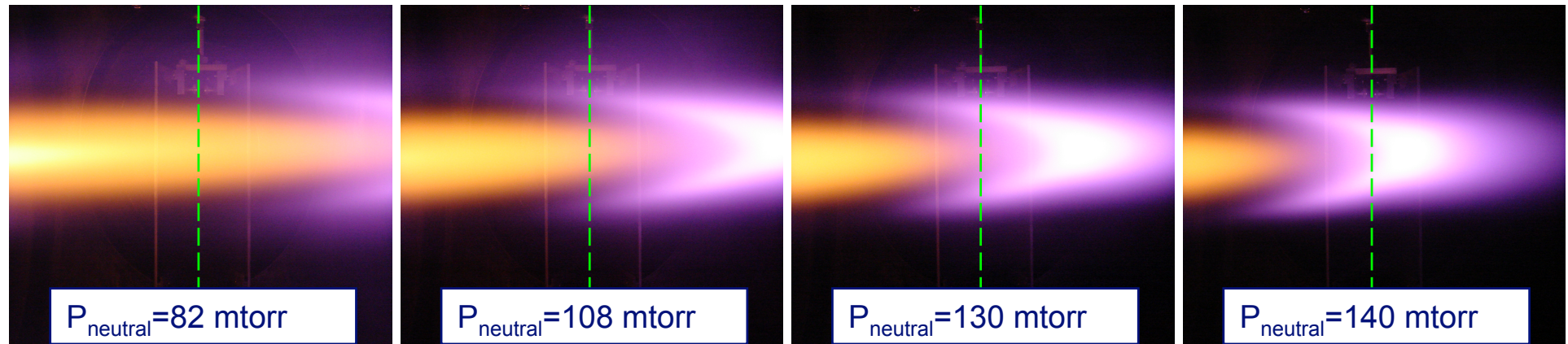
0 cm $\rightarrow$ $1.7e+12 \text{ cm}^{-3}$

25 cm $\rightarrow$ $9.0e+11 \text{ cm}^{-3}$

- 高励起準位と低励起準位からそれぞれ、 T_e と n_e が求まる。
- n_e の算出には、輻射捕獲(Radiation Trapping)を考慮する必要がある。

Behavior of the recombination front (1st chamber)

Discharge conditions: $V=65$ V, $I=30$ A. Recombination front was moved without changing its shape, by controlling the gas pressure (80-145 mTorr)



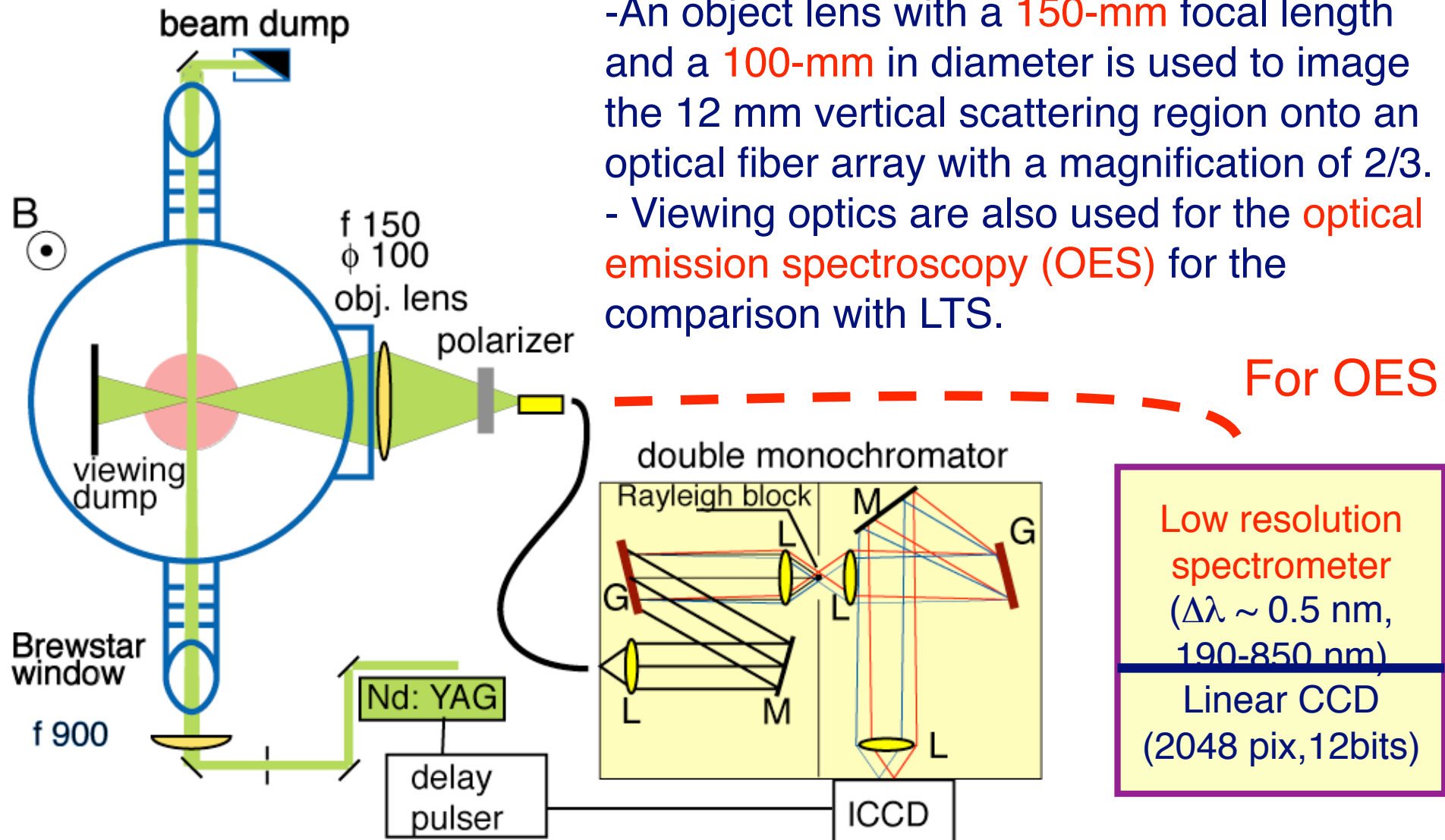
Since the position of the laser is fixed, the gas pressure can be interpreted as the spatial position along the plasma column.

Electron collisions determine the shape of the recombining front:

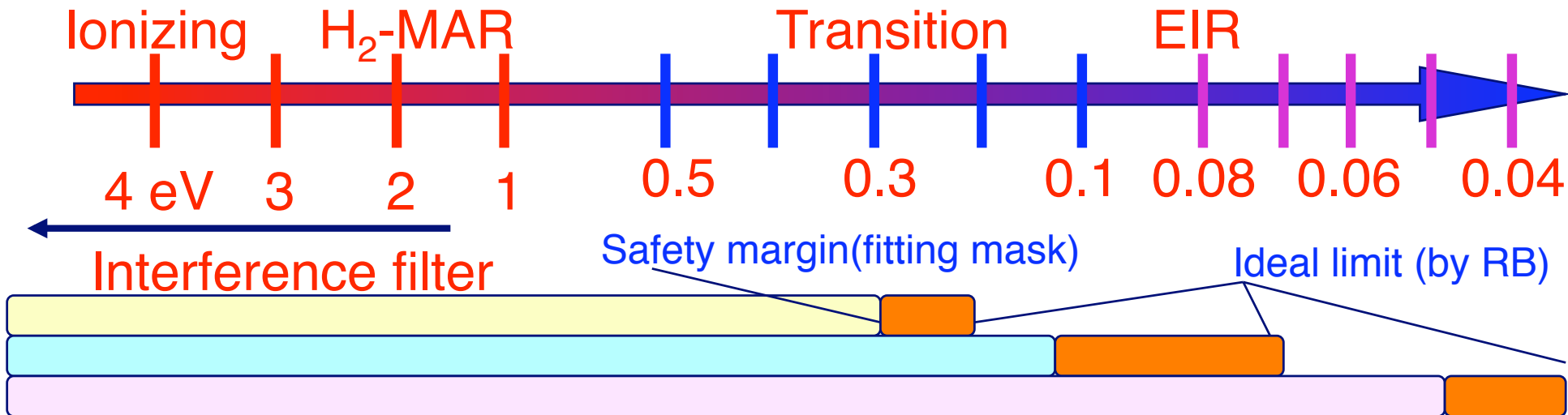
- Ionizing plasma (e-n and e-i) // Recombining plasma (e-i)
- Increasing the neutral pressure affects mainly the ionizing plasma region.
- Energy relaxation length (elastic) ~ 15 cm. --> determines the T_e profile.

再結合プラズマのリドベルグ発光から得られる電子温度(0.05eV)は信頼できるか?
→レーザートムソン散乱法で検証を試みた

- A second harmonic Nd:YAG Laser ($\leq 400\text{-}500\text{ mJ / pulse @}532\text{ nm, }7\text{ ns, }10\text{ Hz}$) is used as the probe beam.
- An object lens with a 150-mm focal length and a 100-mm in diameter is used to image the 12 mm vertical scattering region onto an optical fiber array with a magnification of $2/3$.
- Viewing optics are also used for the **optical emission spectroscopy (OES)** for the comparison with LTS.



Stages of the development of Double Monochromator (DM)



System-0 : Conventional DM (= Homo-Tandem type)

$$0.2 - 0.3 \leq T_e \leq 40 \text{ eV} \quad (2004-2005)$$

A. Okamoto, S. Kado, *et al.*, *Rev.Sci.Instrum.* **76**(2005).

System-I

$$0.07 - 0.13 \leq T_e \leq 40 \text{ eV} \quad (2006)$$

F. Scotti, S. Kado, *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **1** (2006) 054 .

System-II : Development of Hetero-Tandem DM

$$0.03 - 0.048 \leq T_e \leq 40 \text{ eV} \quad (2007, \text{ still in progress})$$

F. Scotti, Master Thesis: The University of Tokyo (2007.8) .

Rayleigh block:

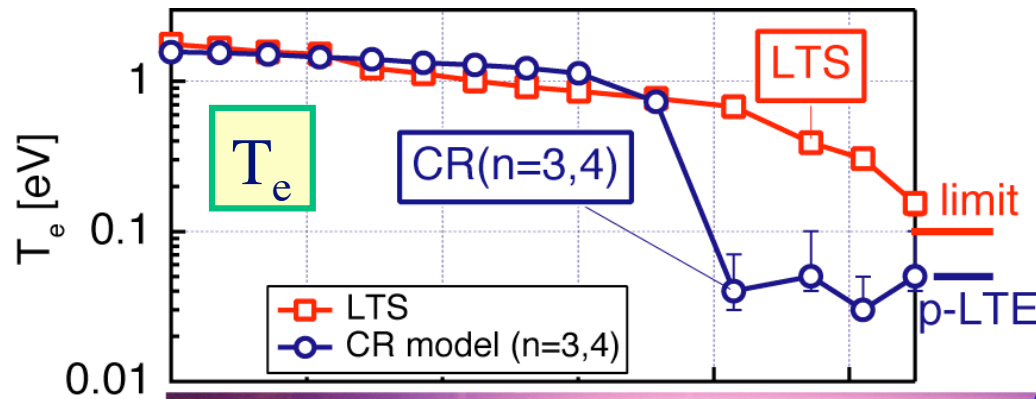
Ø~0.3mm

Ø~0.2mm

DM: focal length
135 + 135 mm
(F/2.8)

200 + 100 mm
(F/2)

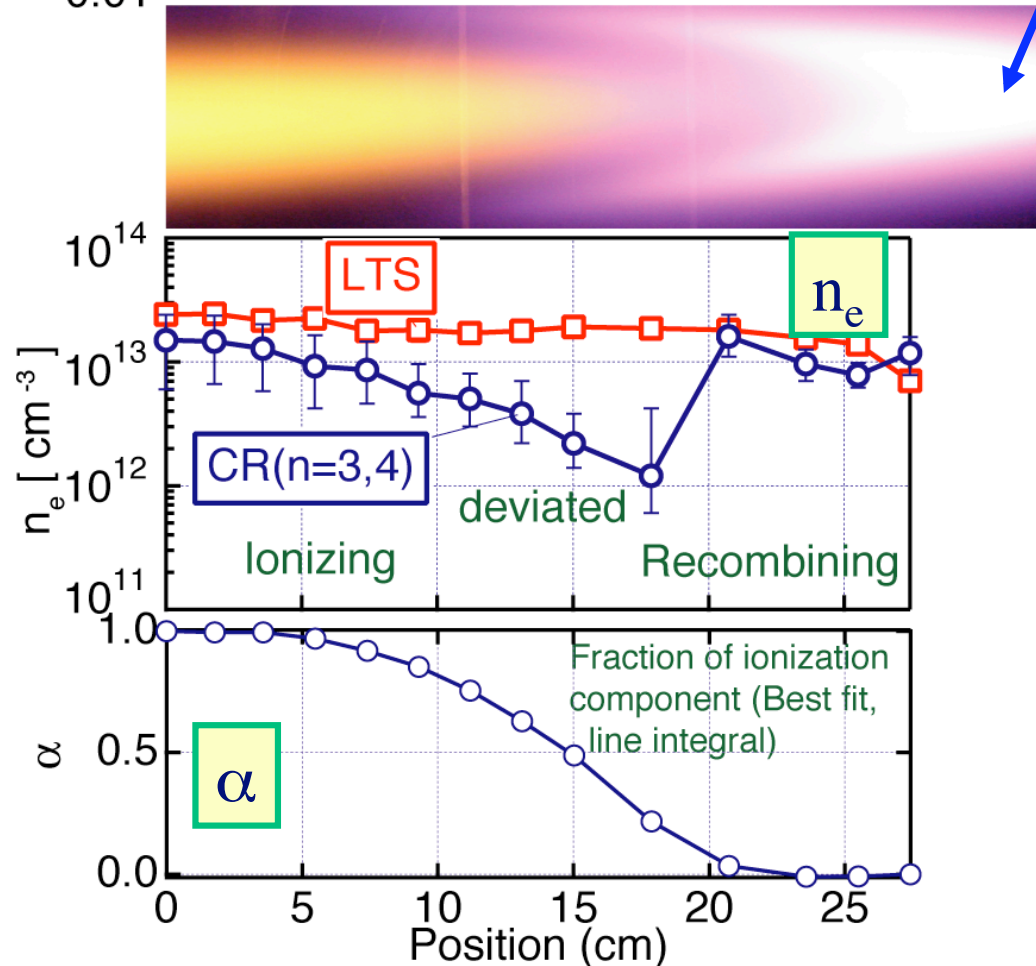
LTS vs Spectroscopy (System I $T_{e_min} \sim 0.13\text{eV}$)



T_e between LTS (local) and CR(line-integral) are consistent.

The jump in T_e (CR) is due to the bright recombining plasma surrounding the tip of the ionizing plasma.

In order to access to the brightest point in the front, further upgrade (to system II) was found to be required.



n_e (CR) exhibits deviation around the transition region.

A plausible explanation is the mixing of the ionizing and recombining components due to the averaging over the line-of sight of the measured line intensity ratios.

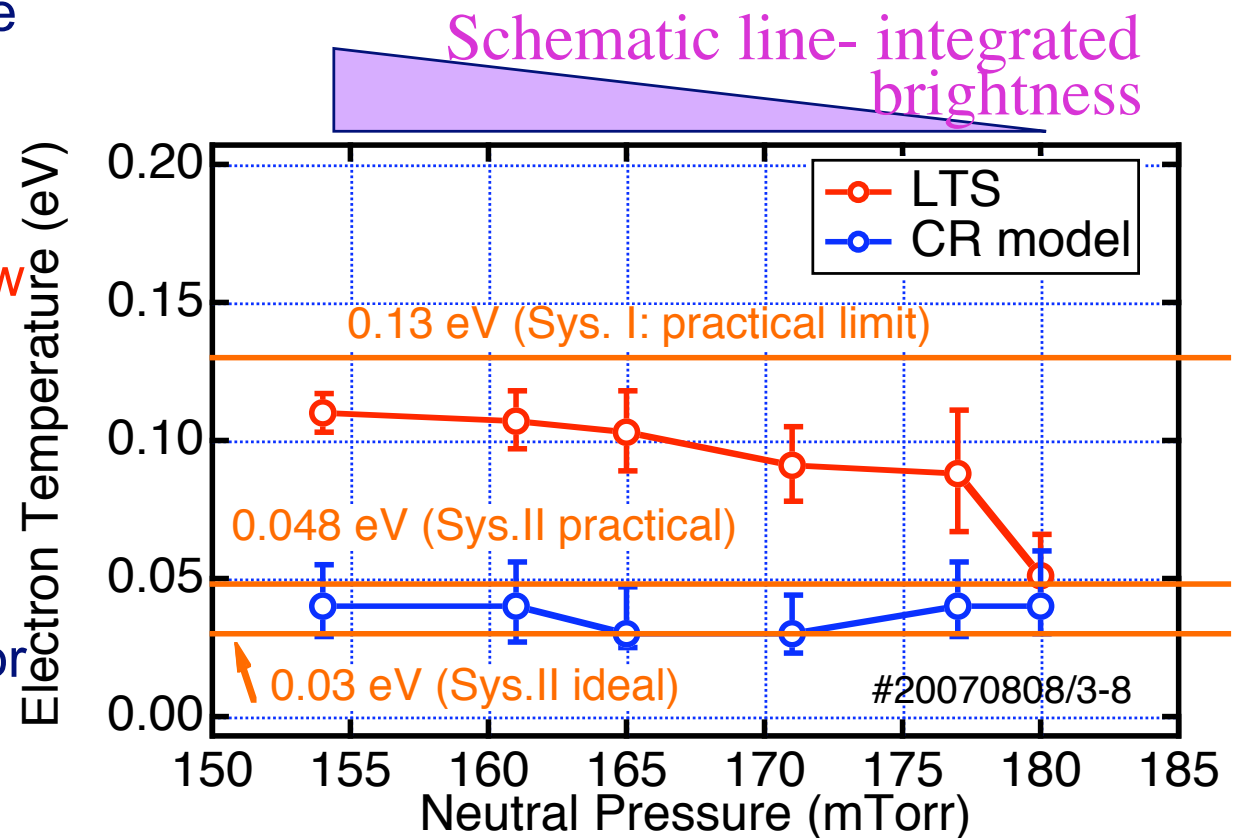
Linear combination of the two spectra:
 $r = r_{ion}(0\text{cm}) \cdot \alpha + r_{rec}(27\text{cm}) \cdot (1 - \alpha)$,
 with α as a fitting parameter to the 4 intensity ratios used in the CR model analysis, supports this hypothesis.

Preliminary results for System II ($T_{e_min} \sim 0.048$ eV)

The lower measurable T_e allowed the study of the **EIR front**. $V=59$ V, $I=30$ A.

Due to the different discharge conditions from the previous experiment, we mainly concentrated on the **measurement of the T_e as low as possible**.

T_e (LTS) monotonically decreased until 0.05 eV, which is the value usually reported by spectroscopy for the Rydberg series.

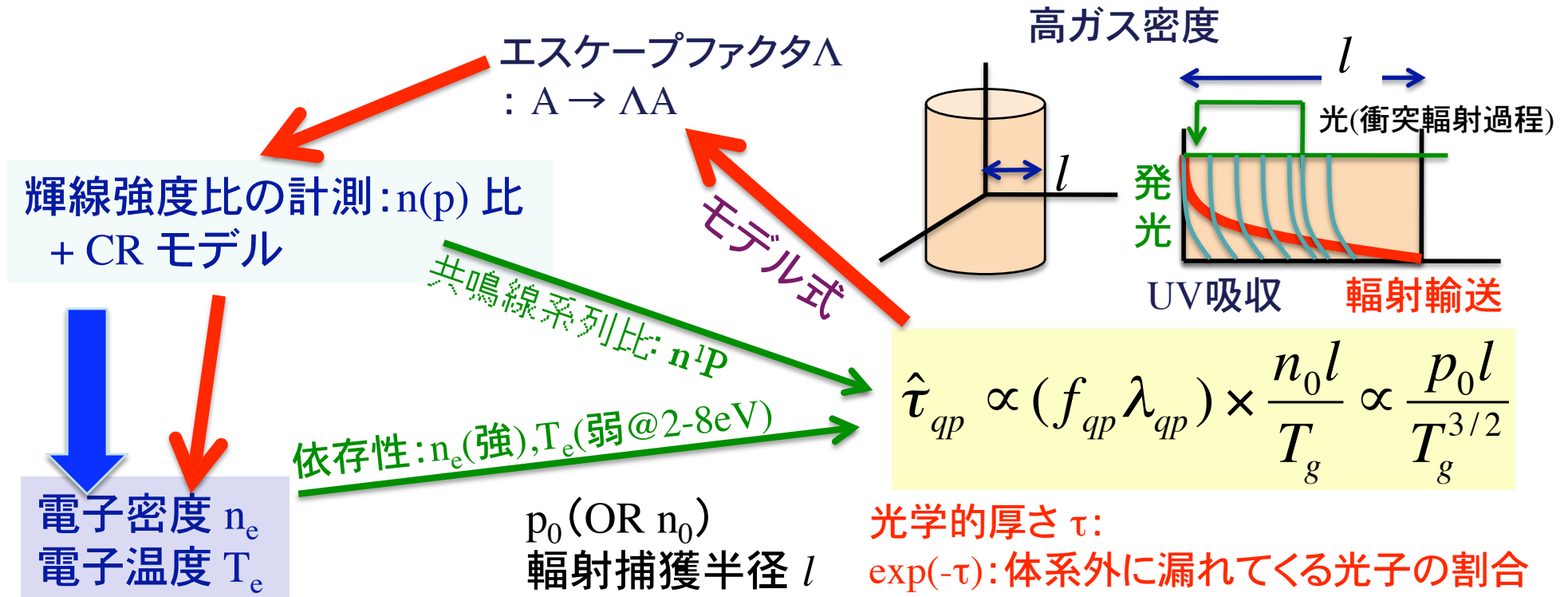


T_e based on the CR model ($n=3,4$) was found to be slightly lower, with values 0.03-0.04 eV. This deviation may be significant in this very low T_e regime. Cross-check with the **high- n Rydberg spectra** would be preferable in such a fine comparison. (Note: OES suffers the integration effect.)

背景: 輻射捕獲の考え方(衝突輻射モデルへの組み込み)

26

光子の輸送プロセスが, 発光位置(中心点)の占有密度に与える効果



輻射捕獲半径 l – 輻射輸送を適用する体系(内向き光子束0の境界条件)
 実際の系では プラズマ半径(~25mm)? 装置半径(~250 mm)? 他?
 観測領域の積分量(重み付きの平均量)が測定される。

通常, 既知圧力下で, ガス温度を仮定した場合の l (実効値) として表現される。

進行中の課題: 実効的輻射捕獲半径とガス温度

τ (光学的厚さ) $\rightarrow \Lambda$ (エスケープファクタ) への変換:

■ スペクトルが位置によらないガウス型:

■ 一様なガス温度,

■ Holsteinモデル ($n(\text{上})/n(\text{下}) = \text{放物型}$) $\rightarrow$ Fujimoto 経験式

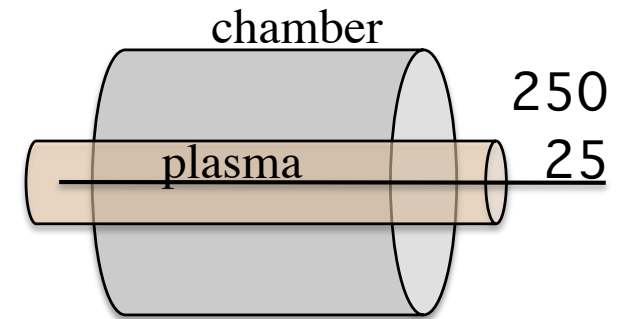
■ Otsukaモデル ($n(\text{上})/n(\text{下}) = \text{一様分布}$) $\rightarrow$ Iida 経験式

$$\Lambda_{ik}(r=0) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty dx \int_0^1 dt \exp \left[-x^2 - \frac{\hat{\tau}}{\sqrt{1-t^2}} \exp(-x^2) \right] \quad \leftarrow \text{円筒座標 (Otsuka モデル)}$$

x : ガウス型スペクトル, t : 斜め方向

圧力 $p_0 \sim p_p$ (下準位) が既知のとき

光学的厚さ $\hat{\tau}_{qp} \propto f_{qp} \lambda_{qp} \frac{n_0 l}{T_g} \propto f_{qp} \lambda_{qp} \frac{p_0 l}{T_g^{3/2}}$



実効的な l を空間1点の値に固定 $\rightarrow$ イメージング (特に軸方向): Kado et al., PFR_S1(2007)

径方向空間各点を通る視線で実測 $\rightarrow$ 輻射捕獲モデルの周辺部への拡張 投稿準備中

ガス温度 (条件によって変わる) 実測: l — 物理的意味付け 鈴木健二卒業論文(2008)

ヘリウム原子分光(主にリドベルグ系列): まとめ

■電子イオン再結合(EIR: 放射・三体再結合)では高励起準位からの**リドベルグ系列**のスペクトルが観測される.

ボルツマンプロット法ー 電子温度が観測 (~ 0.06 eV)
CR モデル: **輻射捕獲**を取り入れると電子密度も測定可能

得られる温度の検証 → **レーザートムソン散乱法**の開発
遷移領域は分光手法では測れない.
再結合領域はプローブでは測れない.

分光で得られる温度は実際の電子温度を反映していることが示された.

■輻射捕獲(略)

輻射輸送の効果を中心からの発光のエスケープファクタとして表現.
 1P 系列比から実効値を推定する手法を提案.
原子温度を測定することで物理的意味が与えられる.

(終)

文献リスト(抜粋)

■MAP-II レビュー

[-] **S. Kado**, Y. Iida, S. Kajita, D. Yamasaki, A. Okamoto, B. Xiao, T. Shikama, T. Oishi, and S. Tanaka, "Diagnostics of Recombining Plasmas in Divertor Simulator MAP-II", J. Plasma Fusion Res. **81** (2005)

■水素分子分光

[-] B. Xiao, **S. Kado**, S. Kajita and D. Yamasaki, "Rovibrational Distribution of H₂ in Low Temperature Plasmas by Fulcher-a Spectroscopy", Plasma Phys. Control. Fusion, **46**, 653-668, (2004).

[-] **S. Kado**, D. Yamasaki, Y. Iida and B. Xiao, "Anomaly in the P- and R- Branches in the Spectra of Hydrogen Fulcher Band Emission", J. Plasma Fusion Res. **80**, 783-792 (2004). [in Japanese]

[-] B. Xiao, **S. Kado**, S. Kajita, D. Yamasaki and S. Tanaka, "Rovibrational distribution of H₂ in low temperature plasma: the dependence on plasma parameters", J. Nucl. Mater. **337-339**, 1082-1086 (2005).

[-] **S. Kado**, D. Yamasaki, B. Xiao, Y. Iida, A. Okamoto, S. Kajita, T. Shikama and S. Tanaka, "On the Anomalous Characteristics in the P and R Branches in a Hydrogen Fulcher Band", J. Plasma Fusion Res. SERIES, **7**, 54 (2006) .

[-] Daisuke Yamasaki, **Shinichiro Kado**, Bingjia Xiao, Yohei Iida, Shin Kajita and Satoru Tanaka, "Experimental Evaluation of Predissociation Rate in $v = 4$ State Usable for Analysis of H₂ Fulcher- Band Emission" J. Phys. Soc. Japan, **75**, 044501 (2006).

■ヘリウム分光

[-] **S. Kado**, S. Kajita, Y. Iida, B. Xiao, D. Yamasaki, T. Oishi, T. Shikama, B. Xiao and S. Tanaka, "Experimental Study of the Atomic and Molecular Processes related to Plasma Detachment in Steady State Divertor Simulator MAP-II", Plasma Sci. Tech. **6**, 2451-2455 (2004).

[-] Y. Iida, **S. Kado**, A. Okamoto, S. Kajita, T. Shikama D. Yamasaki and S. Tanaka, "Effect of Radiation Trapping on an He I CR Model for a Divertor Simulator MAP-II" J. Plasma Fusion Res. SERIES, **7**, 123(2006).

■低温プラズマ用レーザートムソン散乱開発

[-] A. Okamoto, **S. Kado**, S. Kajita, S. Tanaka, "Laser Thomson scattering system applicable to low-temperature plasma in the divertor simulator MAP-II", Rev. Sci. Instrum. **76**, (2005)116106

[-] F. Scotti, **S. Kado**, A. Okamoto, T. Shikama and S. Tanaka. "Thomson Scattering Measurements of Helium Recombining Plasmas in the Divertor Simulator MAP-II," Plasma Fusion Res. **1**, 54-56 (2006).

[-] F. Scotti, **S. Kado**, T. Shikama, Y. Kuwahara and S. Tanaka, "Laser Thomson Scattering System Applicable to Recombining Plasmas below 0.1 eV in the Divertor Simulator MAP-II", *submitted to Rev. Sci. Instrum.*

終