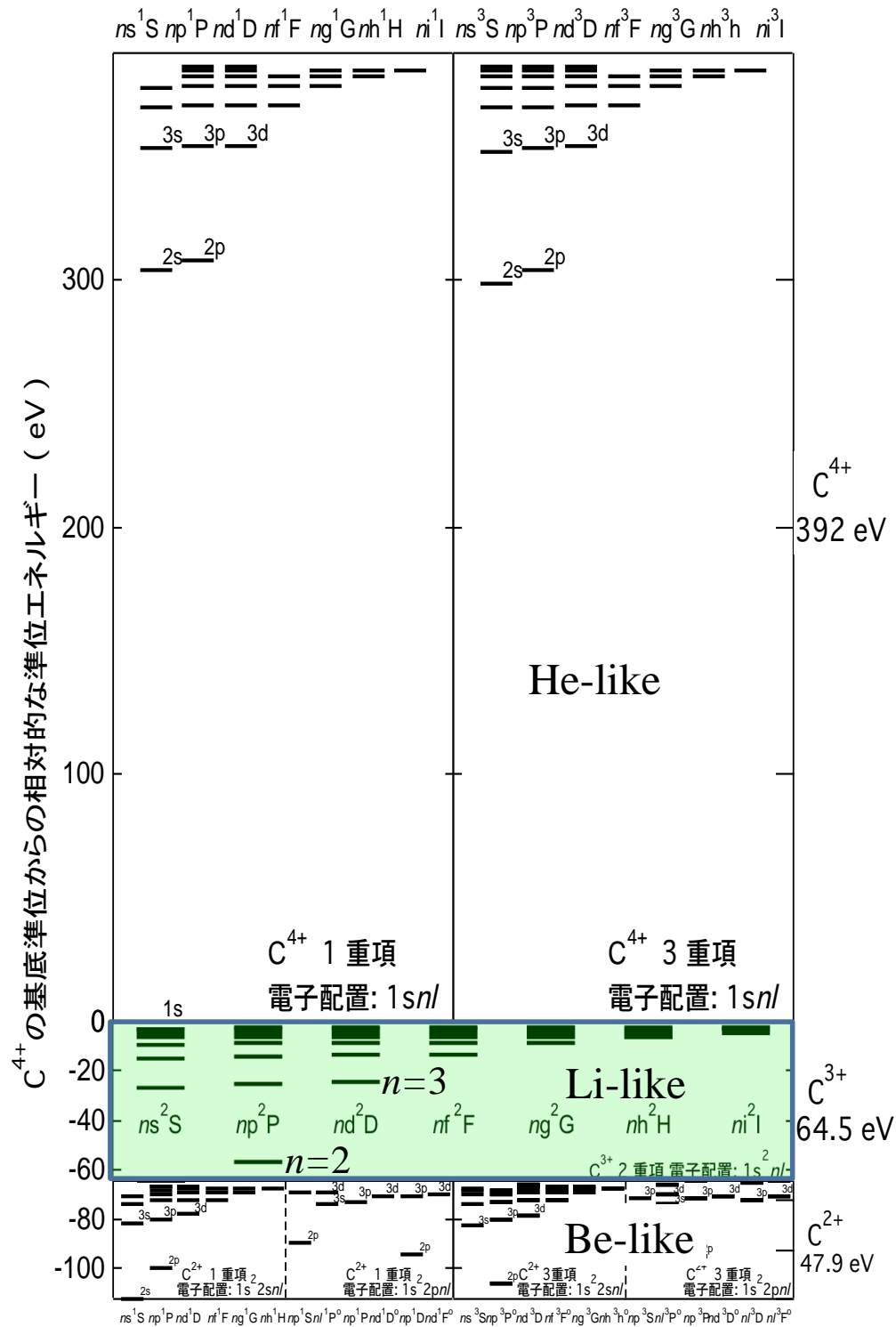
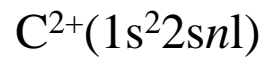
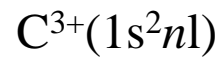
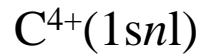
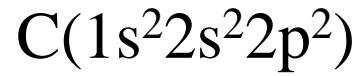


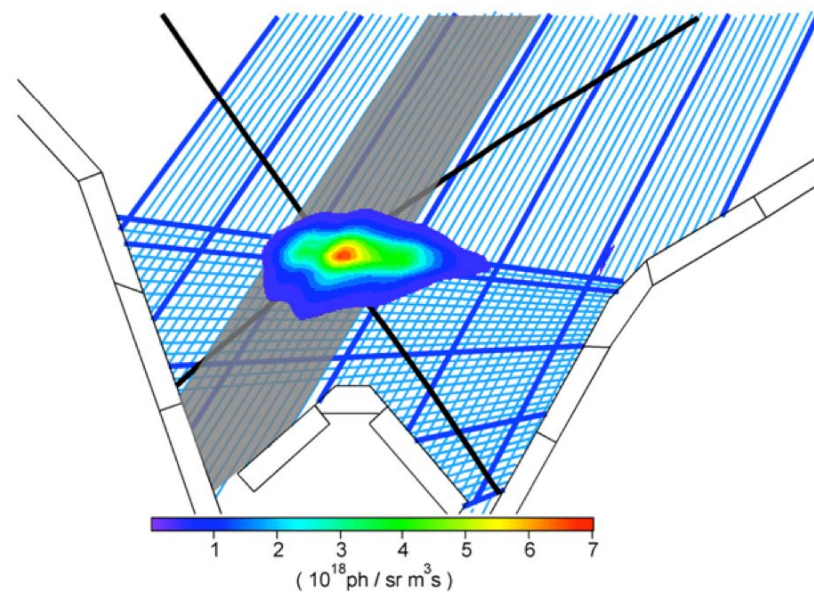
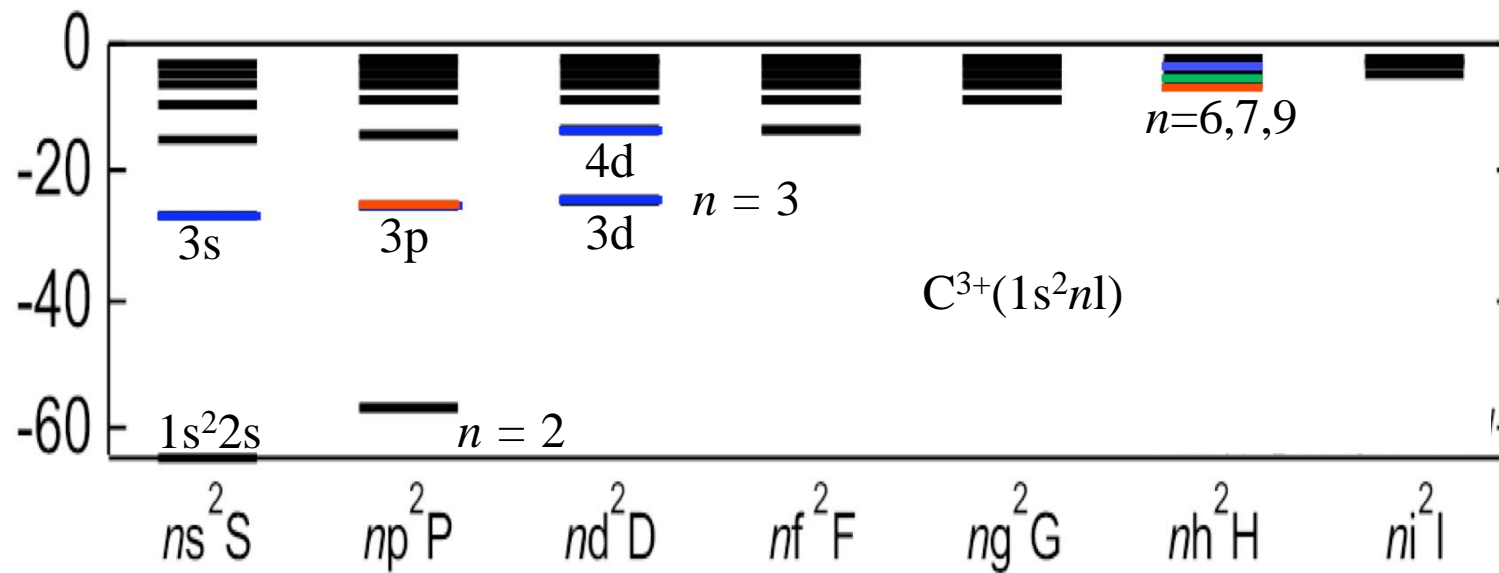
プラズマ研究における原子・分子過程

京都大学

藤本 孝

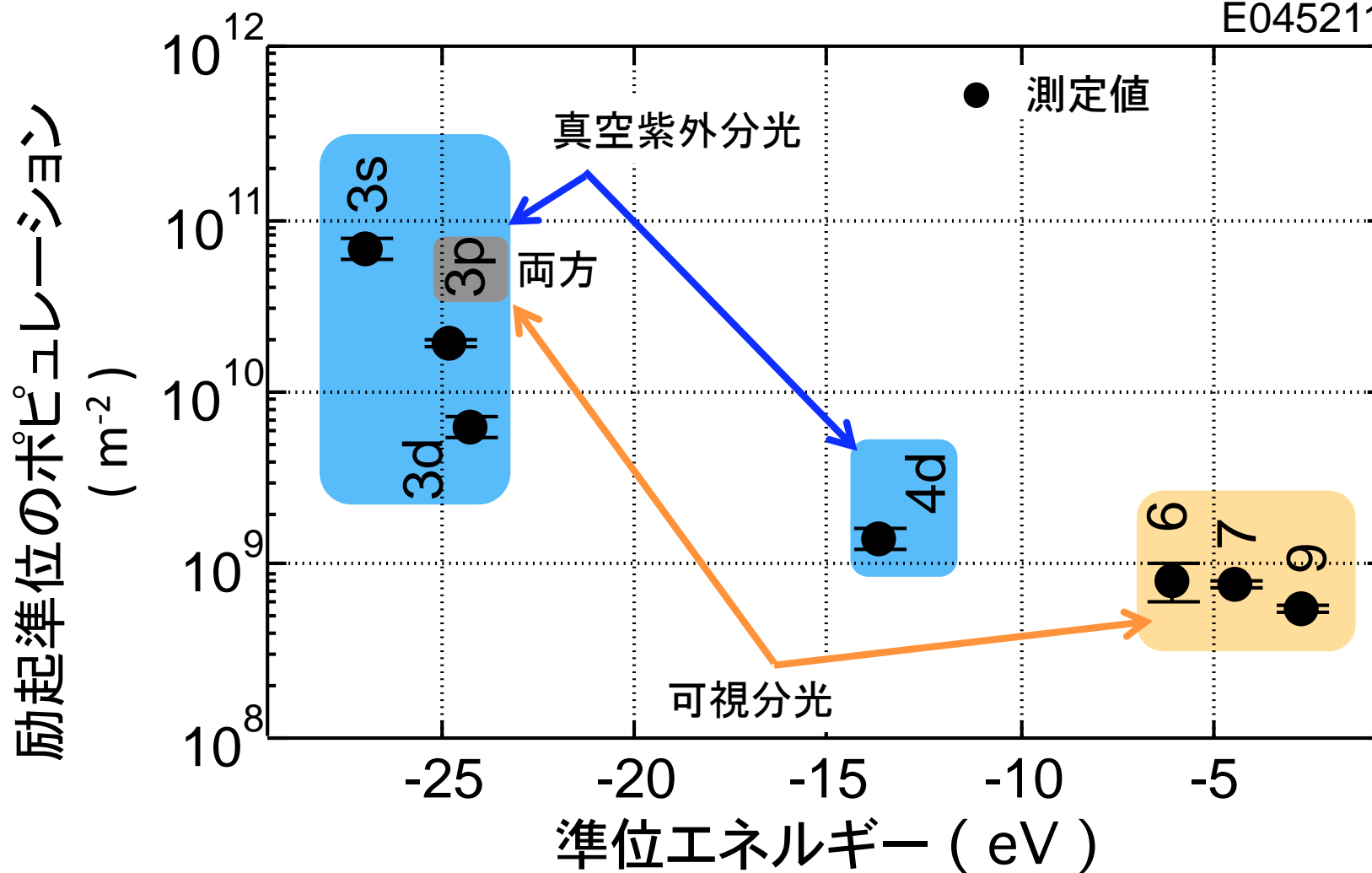
トカマクの低温ダイバータプラズマの実現
— 炭素イオンの分光 —





C IV (C³⁺) の解析結果

E045211

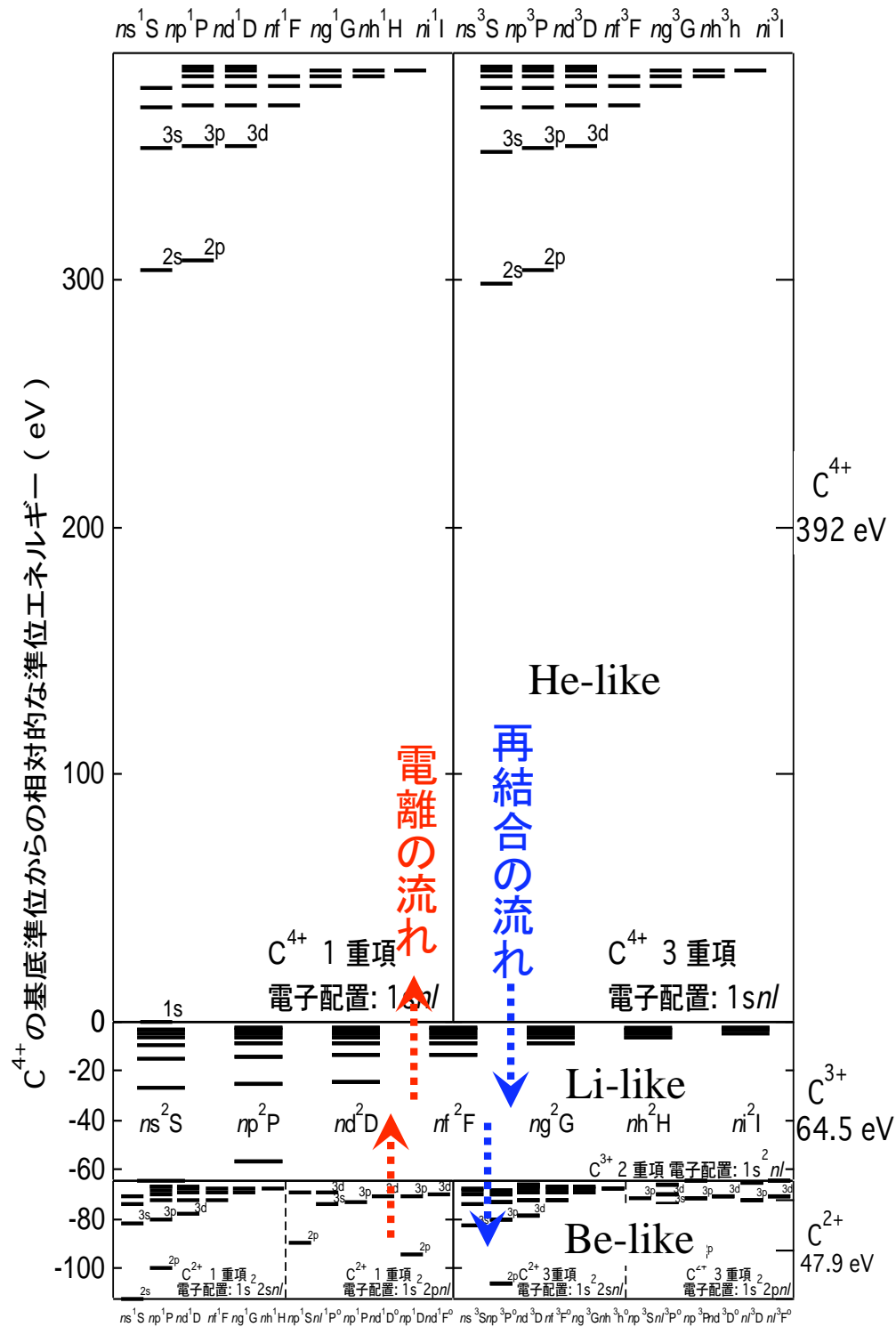


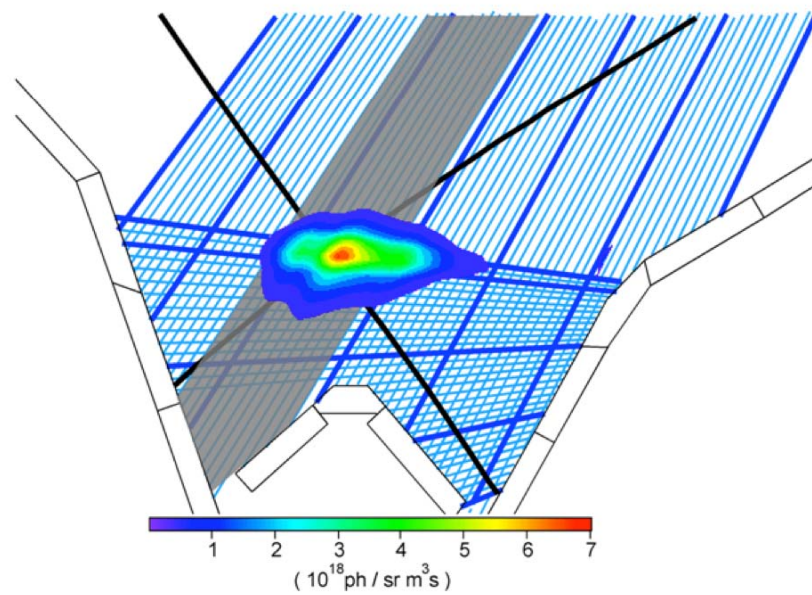
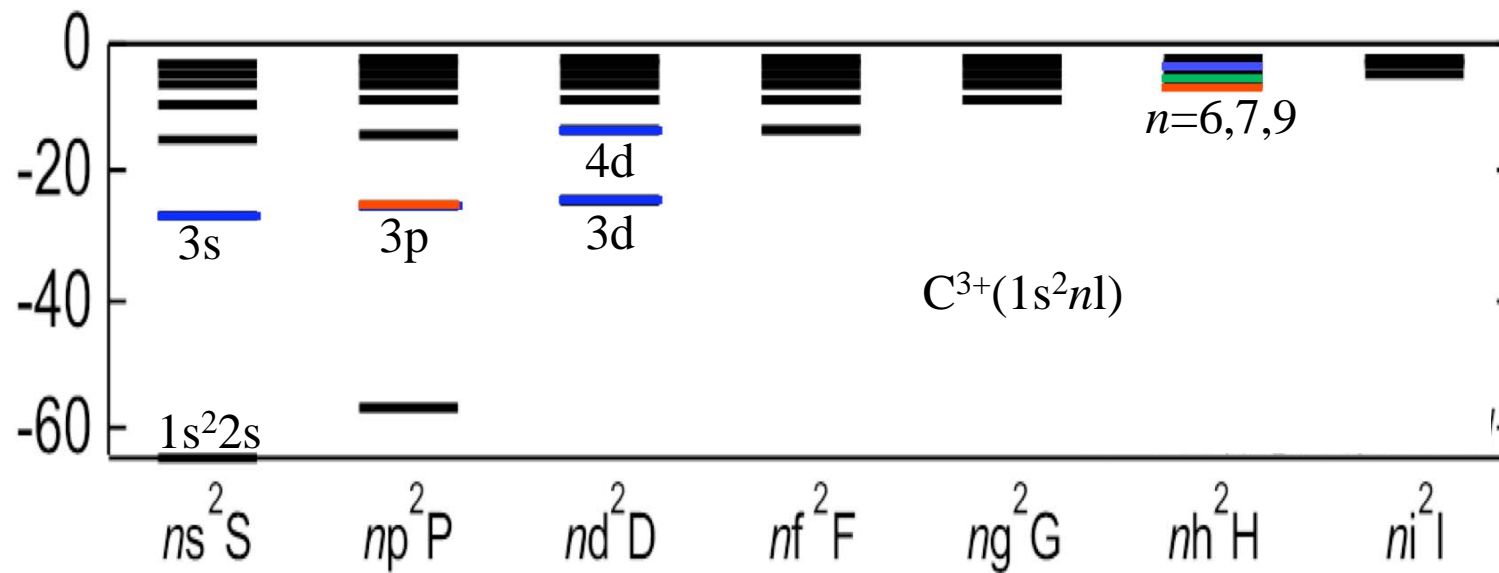
$C(1s^2 2s^2 2p^2)$

$C^{4+}(1snl)$

$C^{3+}(1s^2 nl)$

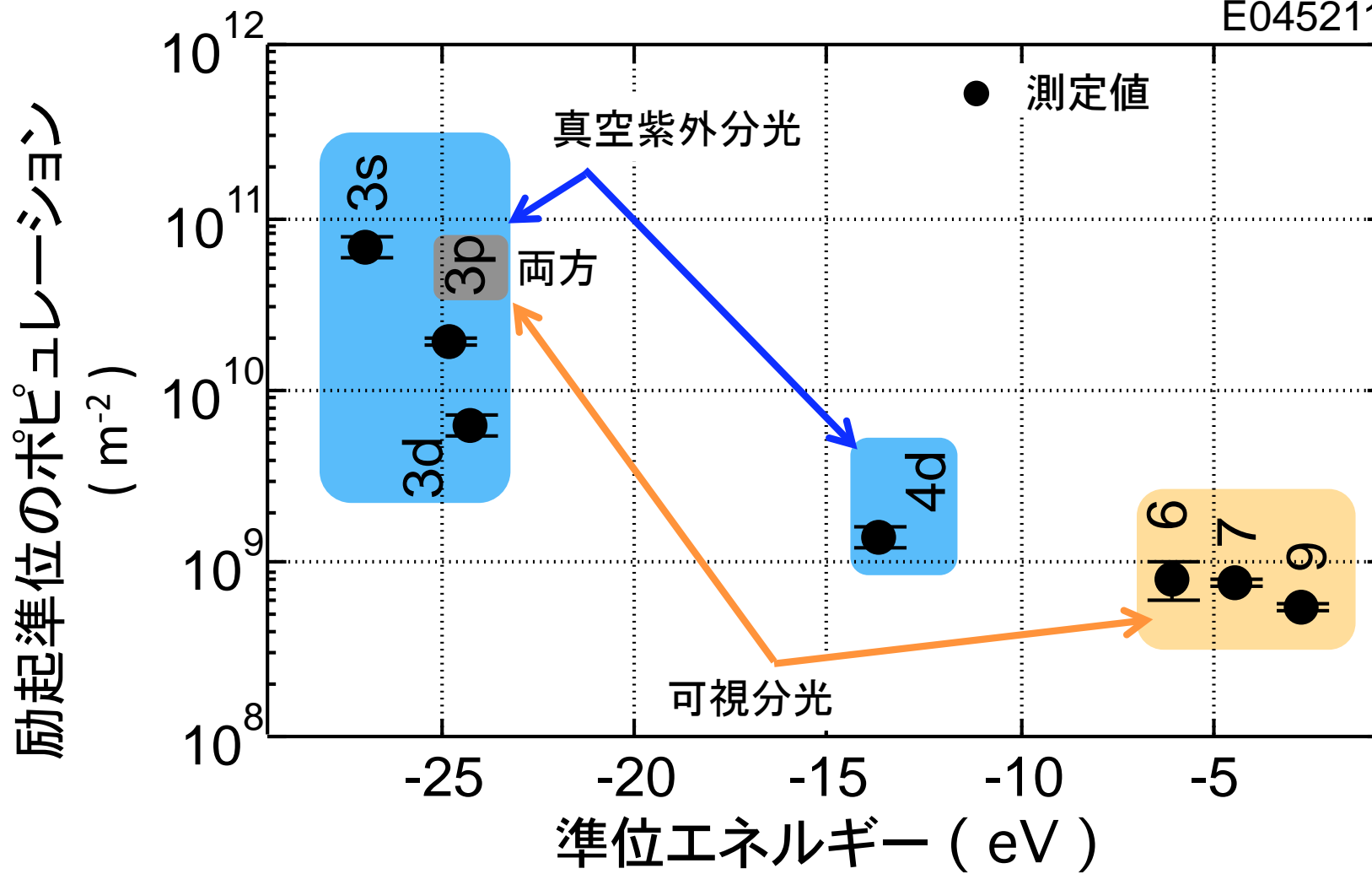
$C^{2+}(1s^2 2snl)$



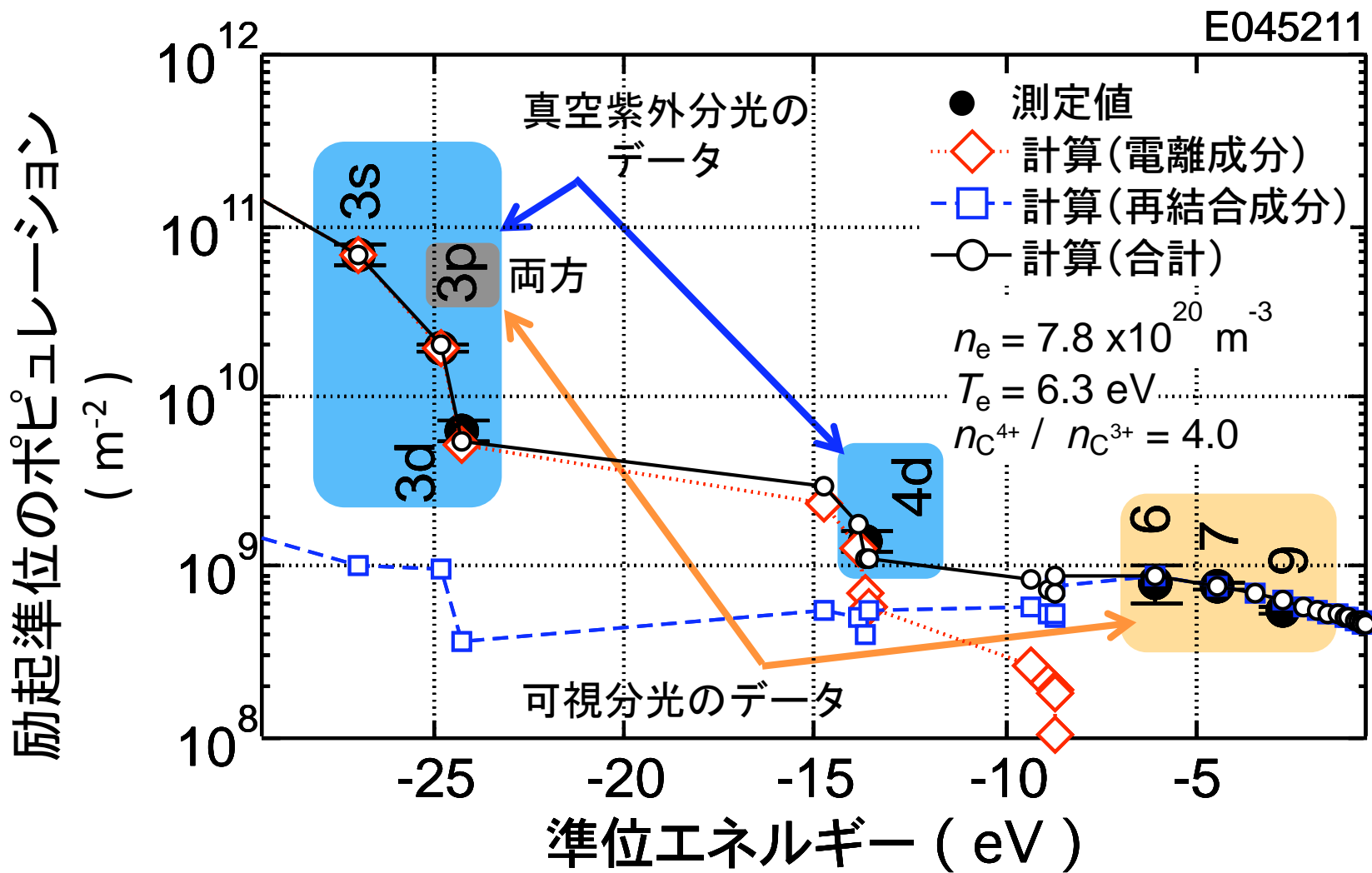


C IV (C³⁺) の解析結果

E045211



C IV (C³⁺) の解析結果



$n \leq 4$ 電離プラズマ成分

$n \geq 5$ 再結合プラズマ成分

電離・再結合の流れ

電離プラズマ成分
電離束
($10^{18} / \text{m}^2\text{s}$)

再結合プラズマ成分
再結合束
($10^{18} / \text{m}^2\text{s}$)

発光分布

C V (C^{4+})

C V (C^{4+})

C IV (C^{3+})

C IV (C^{3+})

C III (C^{2+})

C III (C^{2+})

2.4

160

220

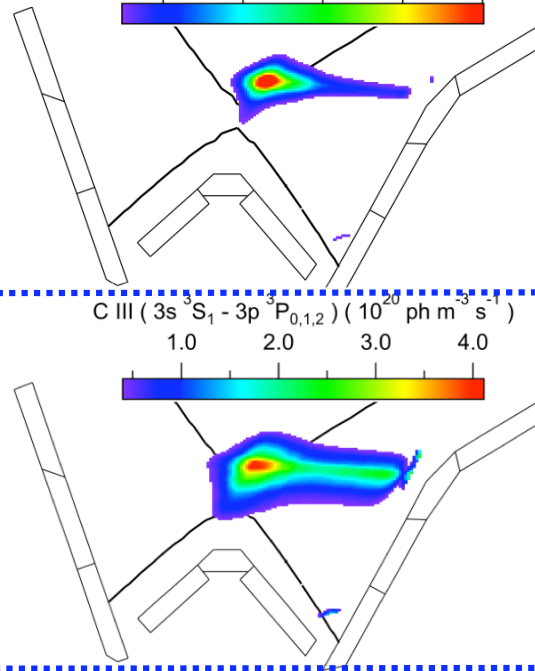
0

C IV ($3s^2S_{1/2} - 3p^2P_{3/2}$) ($10^{20} \text{ ph m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

0.2 0.4 0.6 0.8 1.0

C III ($3s^3S_1 - 3p^3P_{0,1,2}$) ($10^{20} \text{ ph m}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

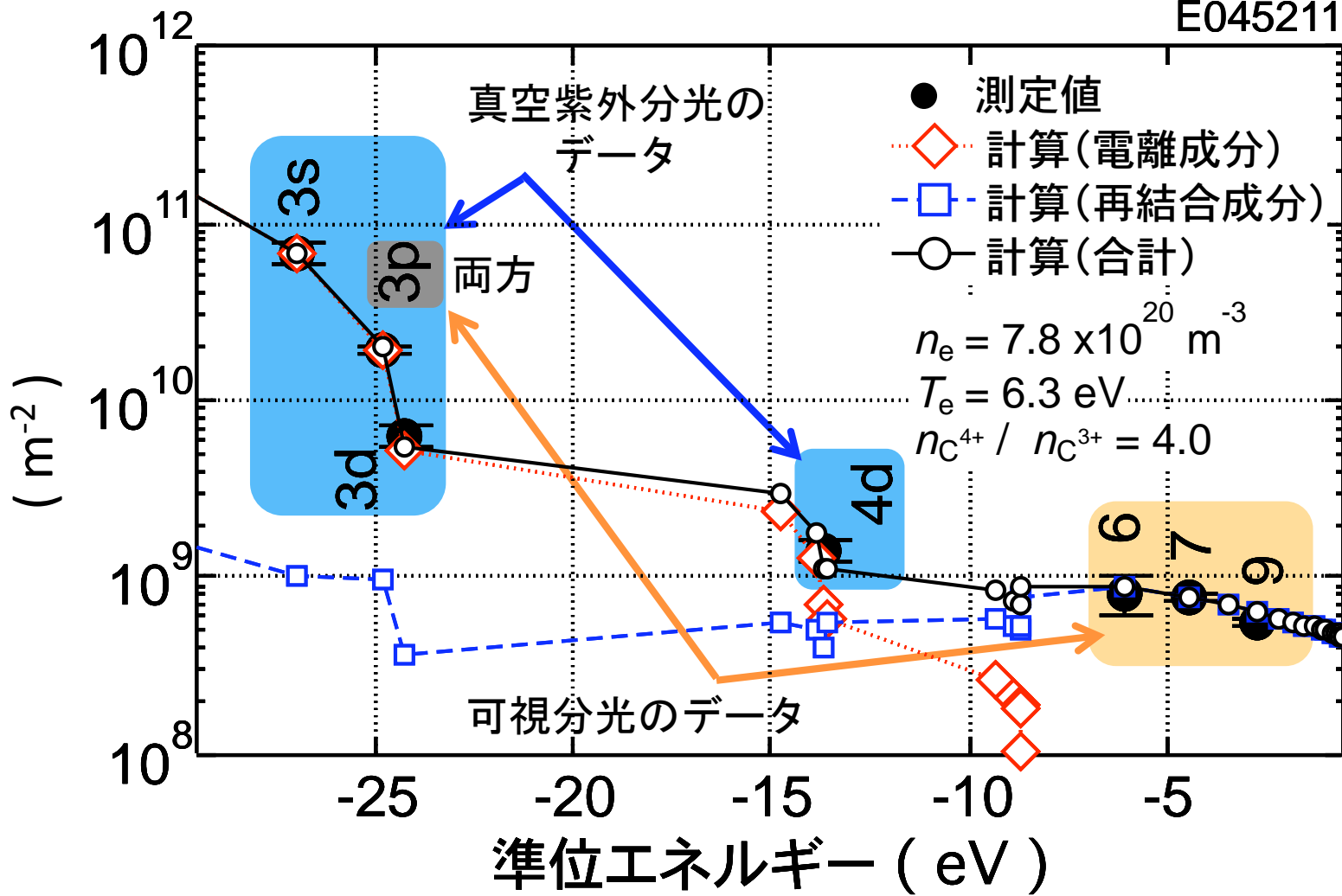
1.0 2.0 3.0 4.0



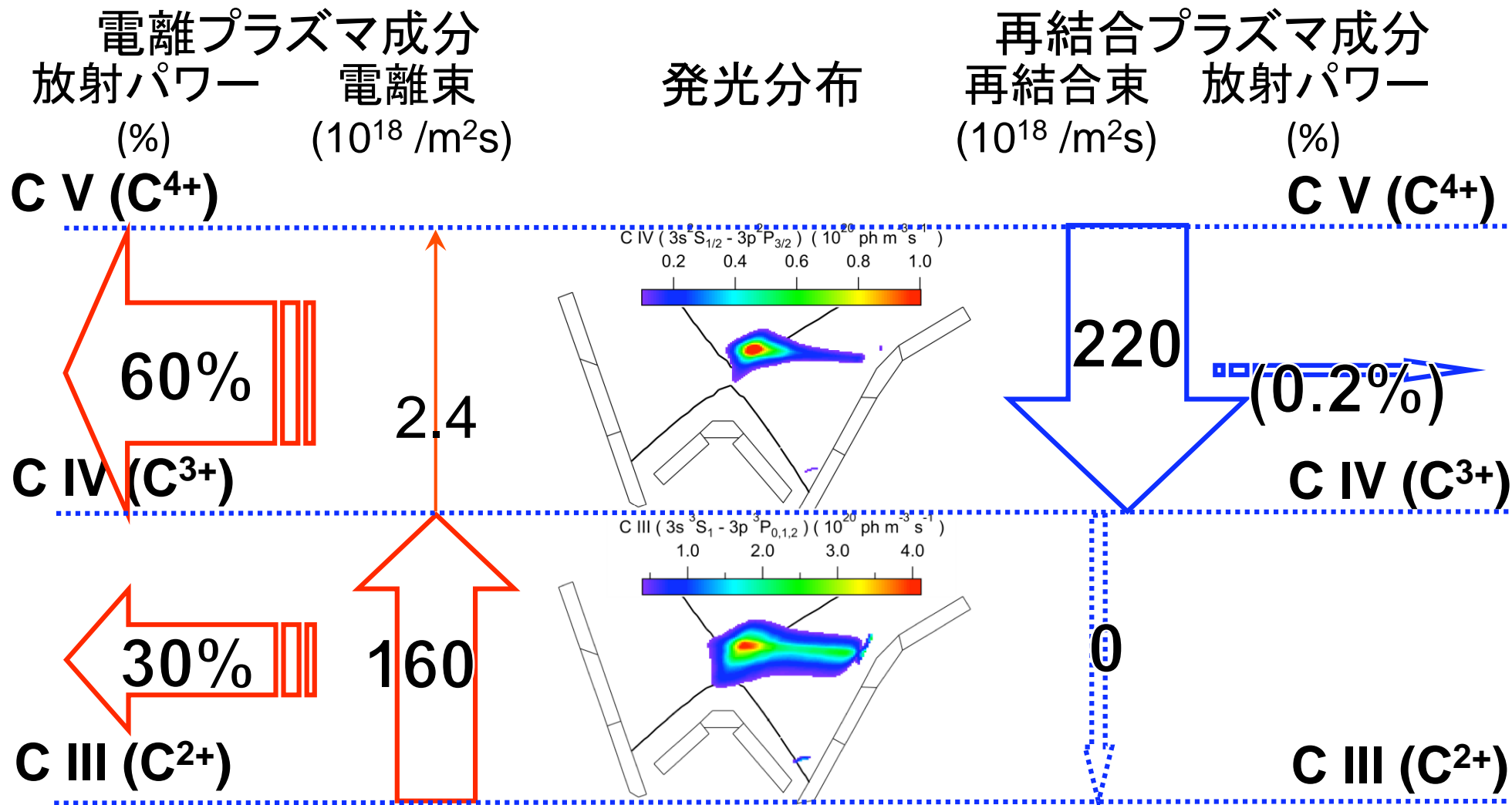
C IV (C³⁺) の解析結果

E045211

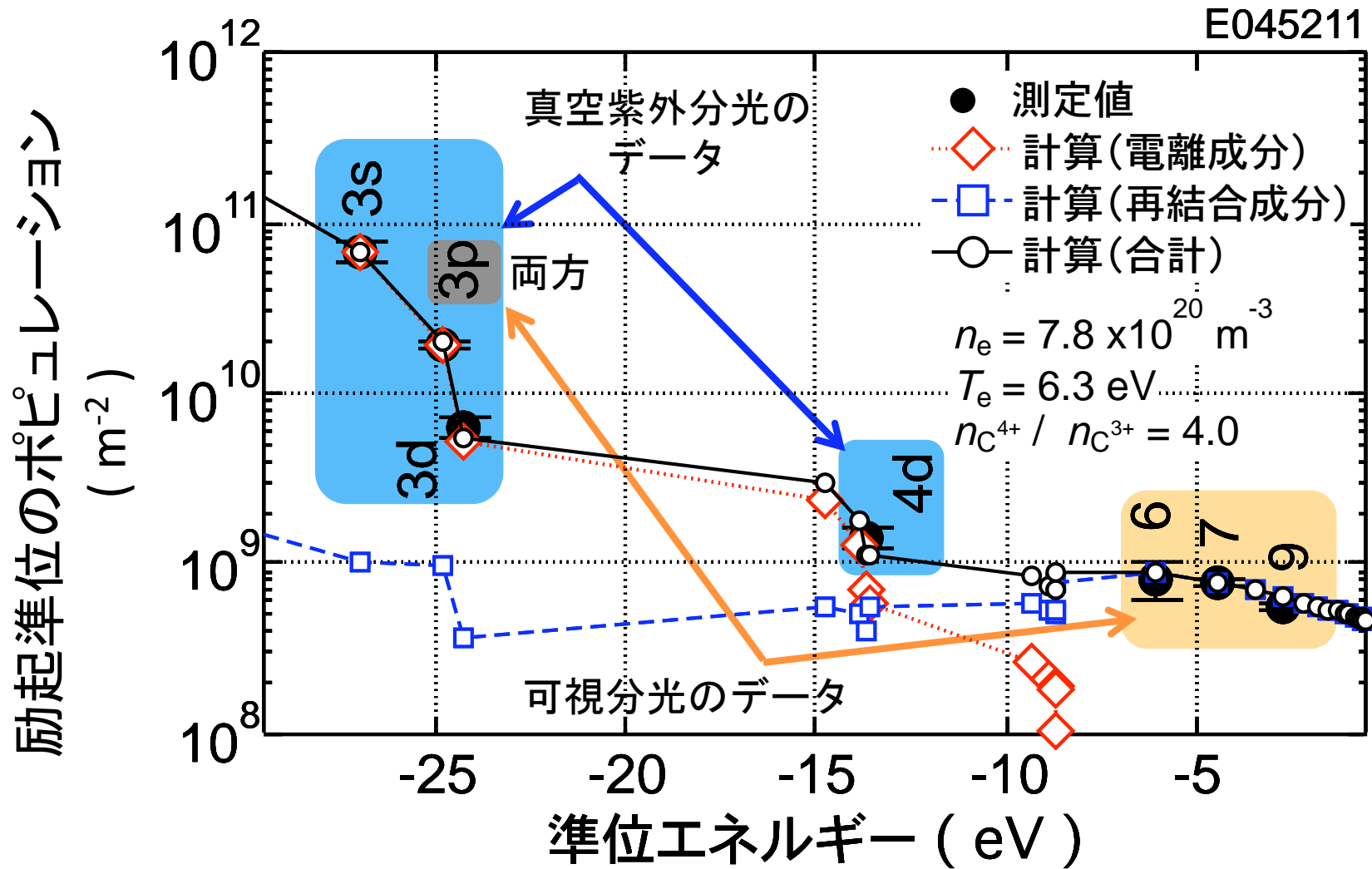
励起準位のポピュレーション
(m^{-2})



電離・再結合の流れと放射パワーのまとめ



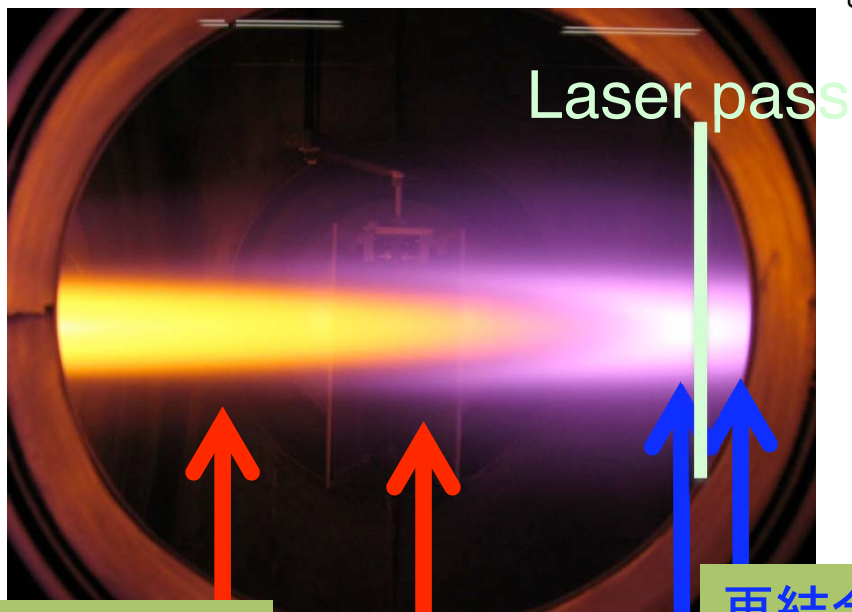
C IV (C³⁺) の解析結果



再結合プラズマ成分の $n \geq 5$ 準位は局所熱平衡にあり、それらのポピュレーションはボルツマン分布している $\rightarrow T_e$

再結合プラズマの電子温度

MAP-II における純He再結合プラズマ



電離進行
プラズマ
上流

電離進行
プラズマ
下流

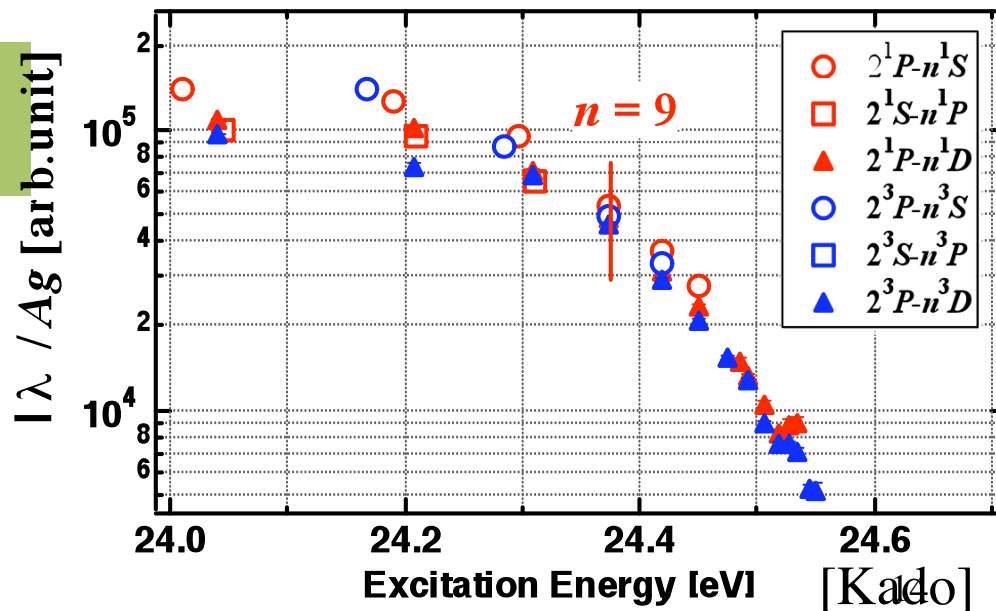
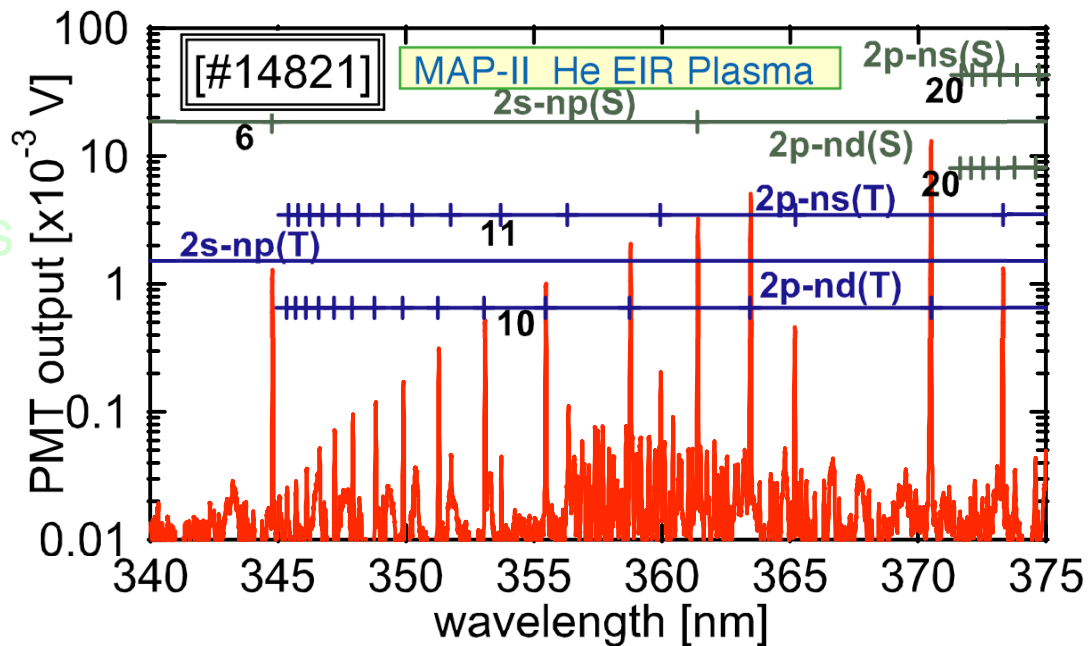
再結合プラズマ
最輝点

再結合
前線

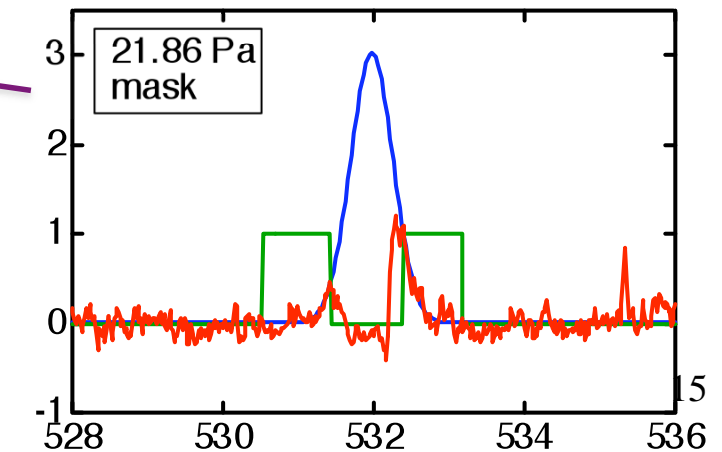
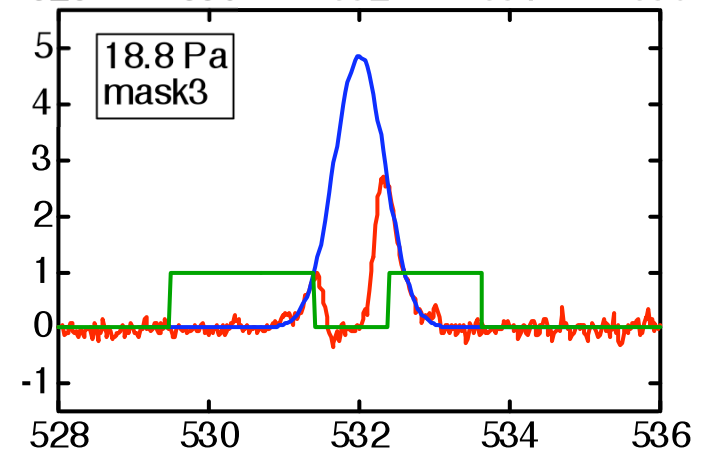
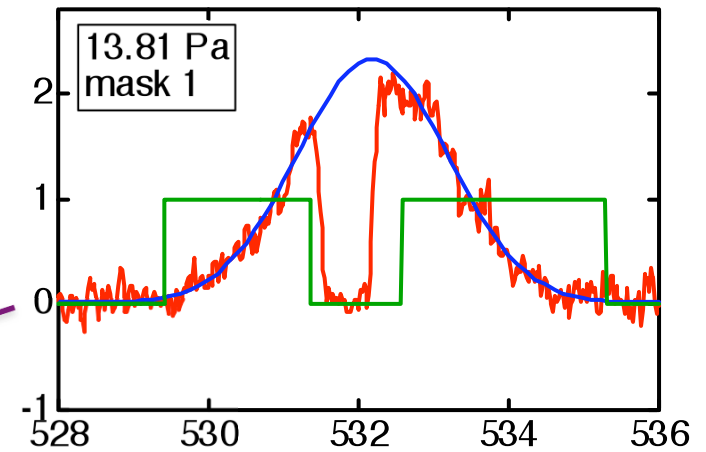
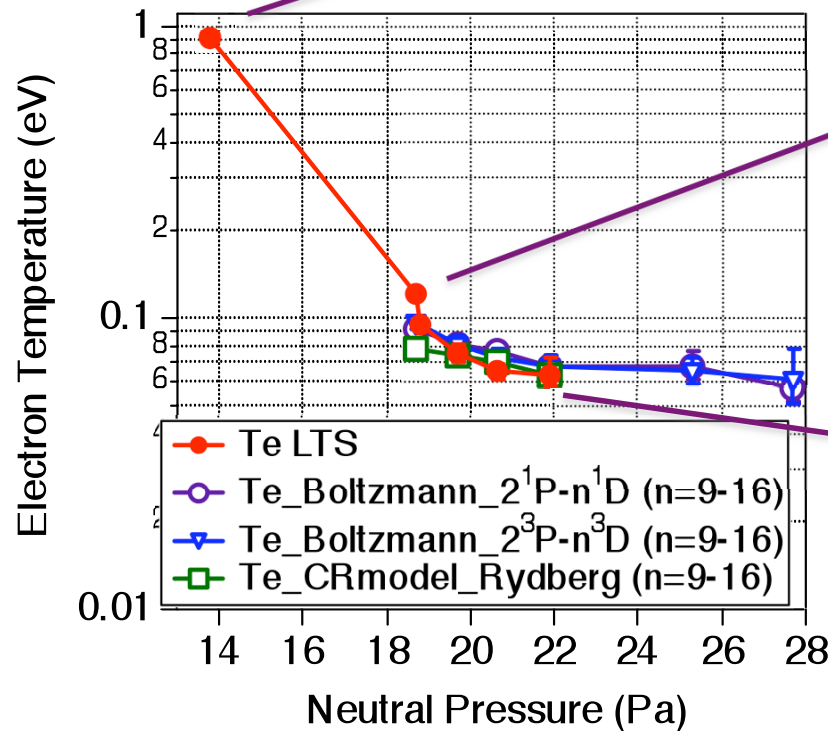
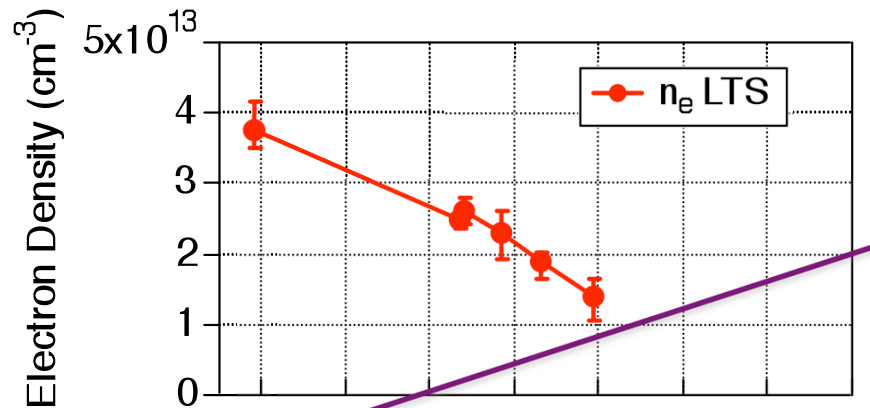
$T_e > 2 \text{ eV}$

$\sim 1 \text{ eV}$

$\sim 0.2 \text{ eV} \leq 0.1 \text{ eV}$



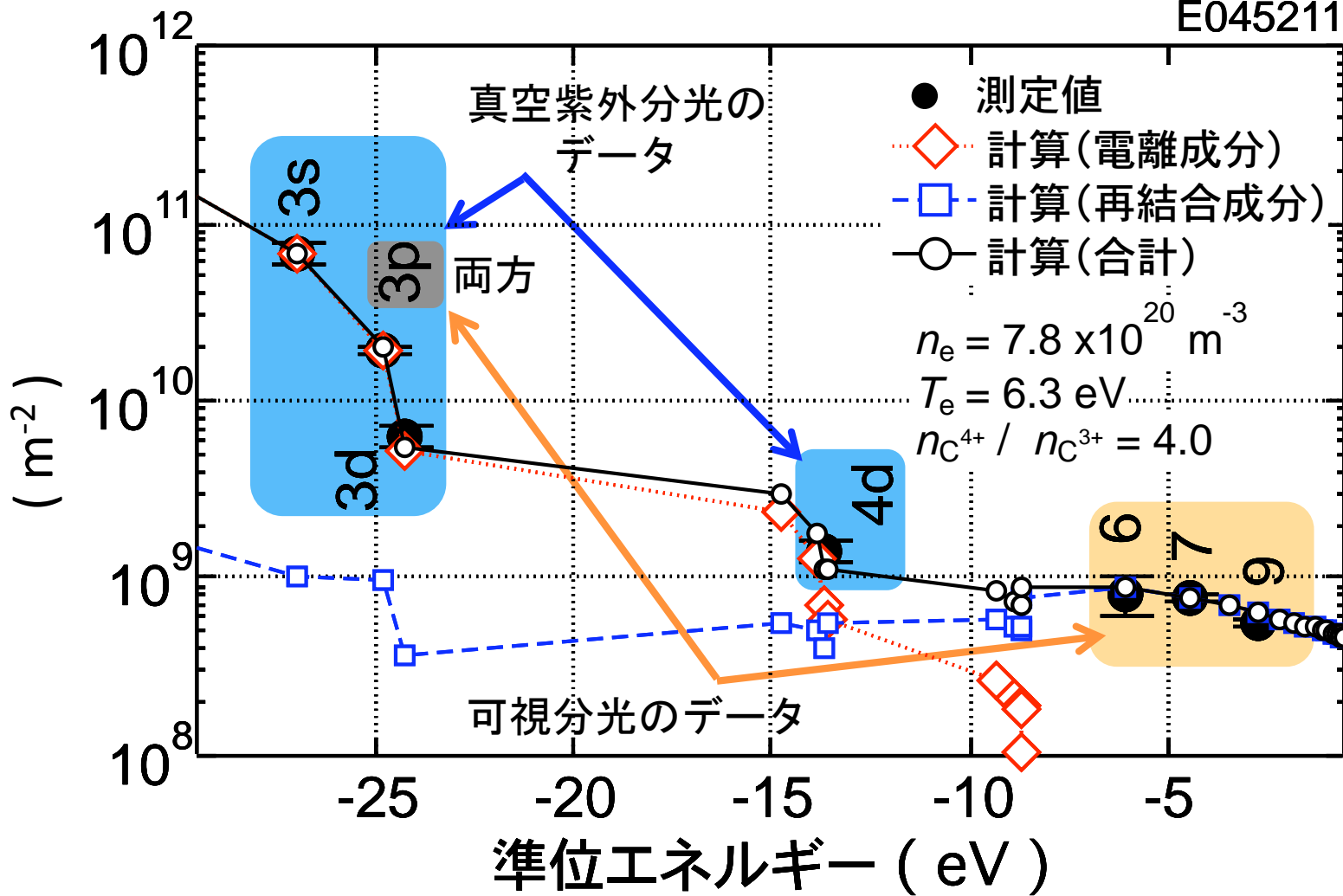
LTS スペクトル (0.065 eV ~ 低温の世界記録)

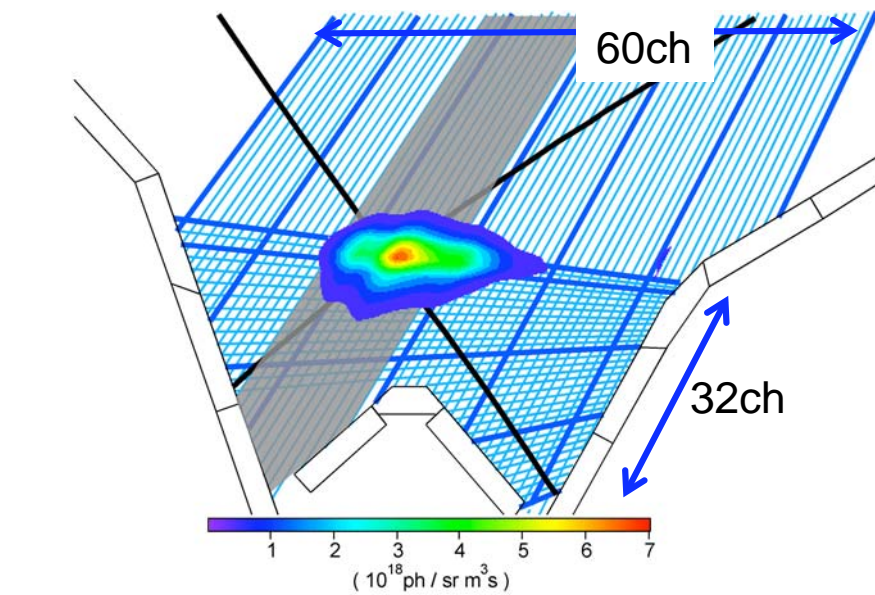
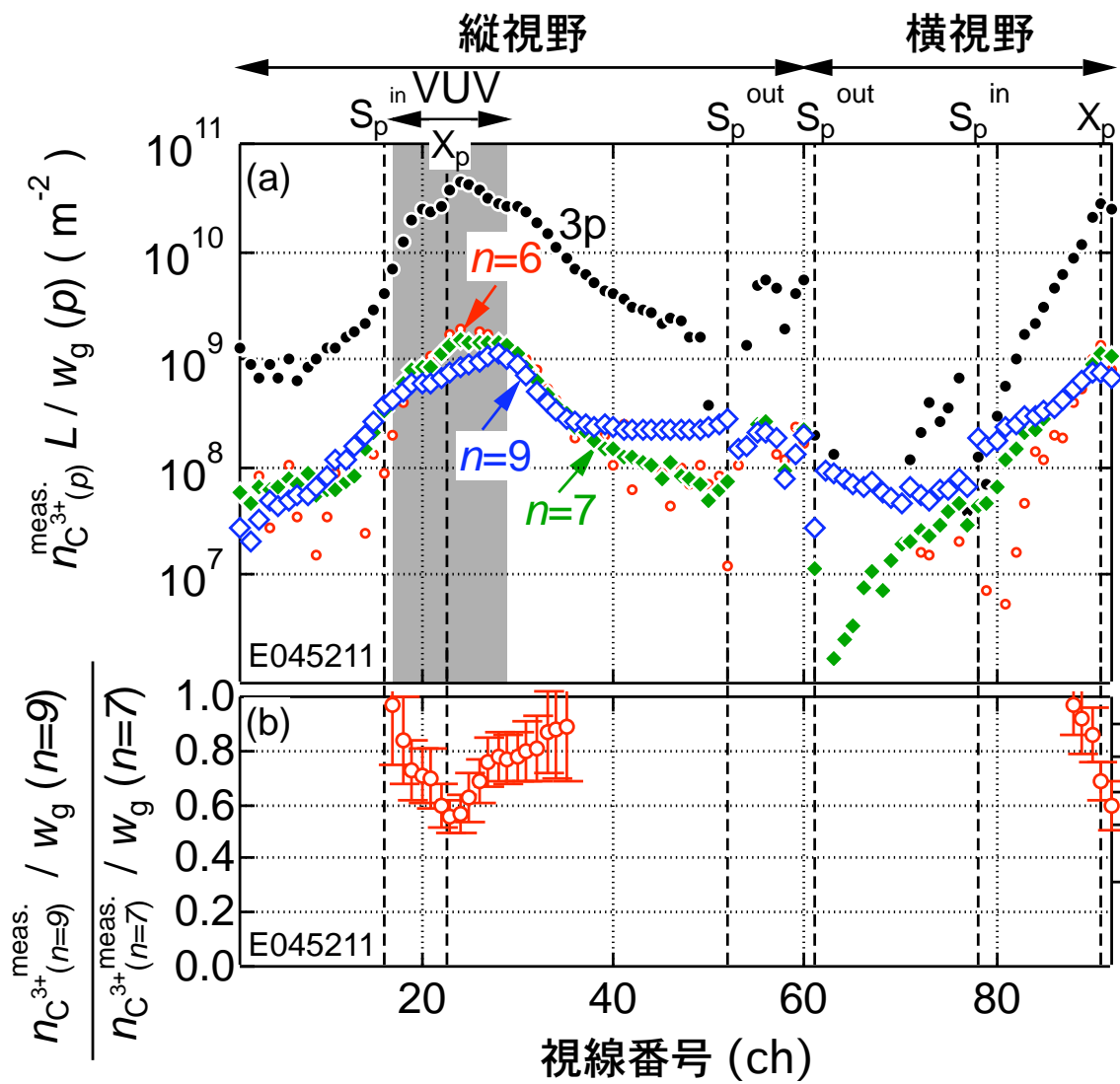


C IV (C³⁺) の解析結果

E045211

励起準位のポピュレーション
(m^{-2})



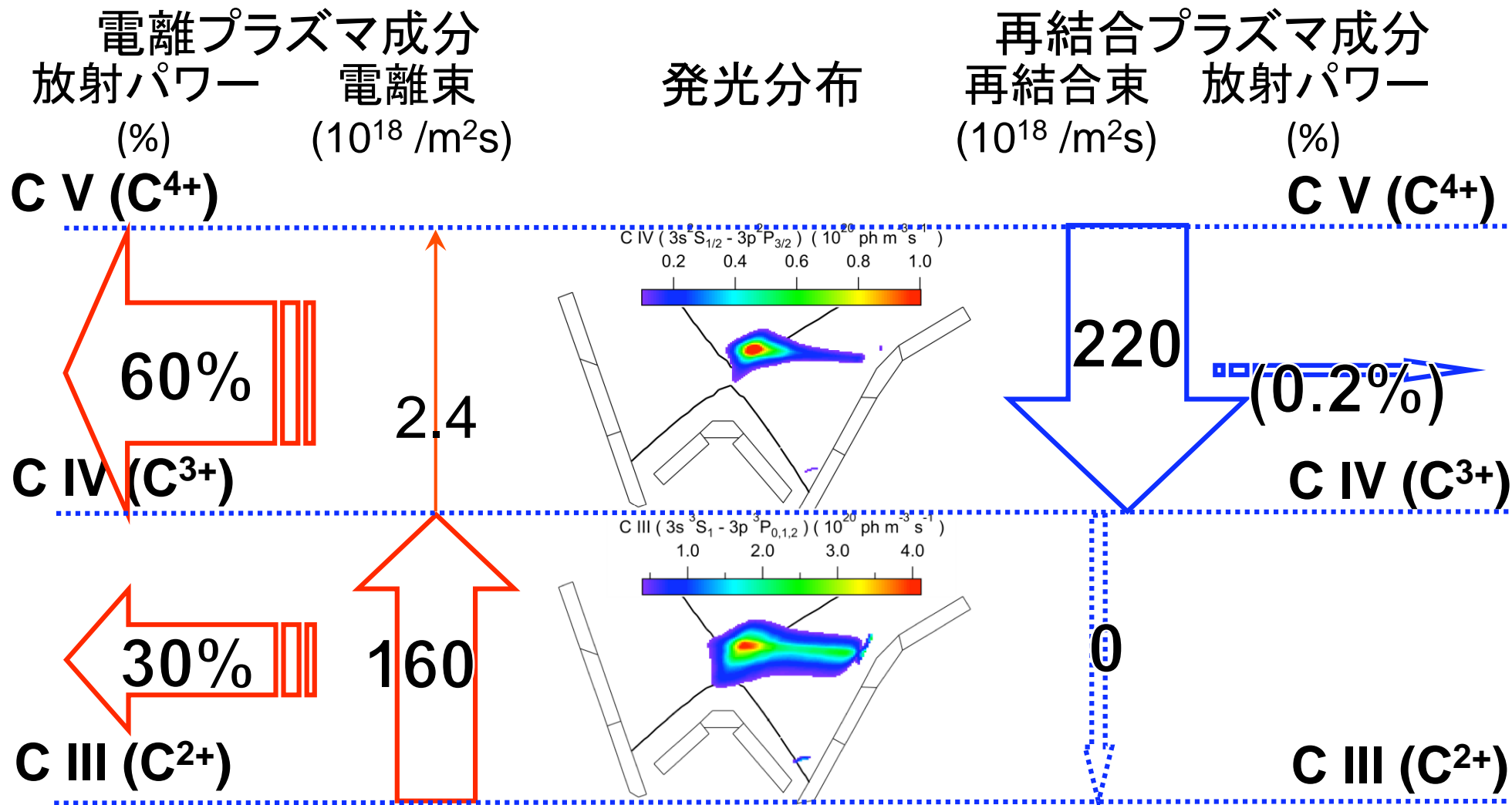


電子温度 (eV)

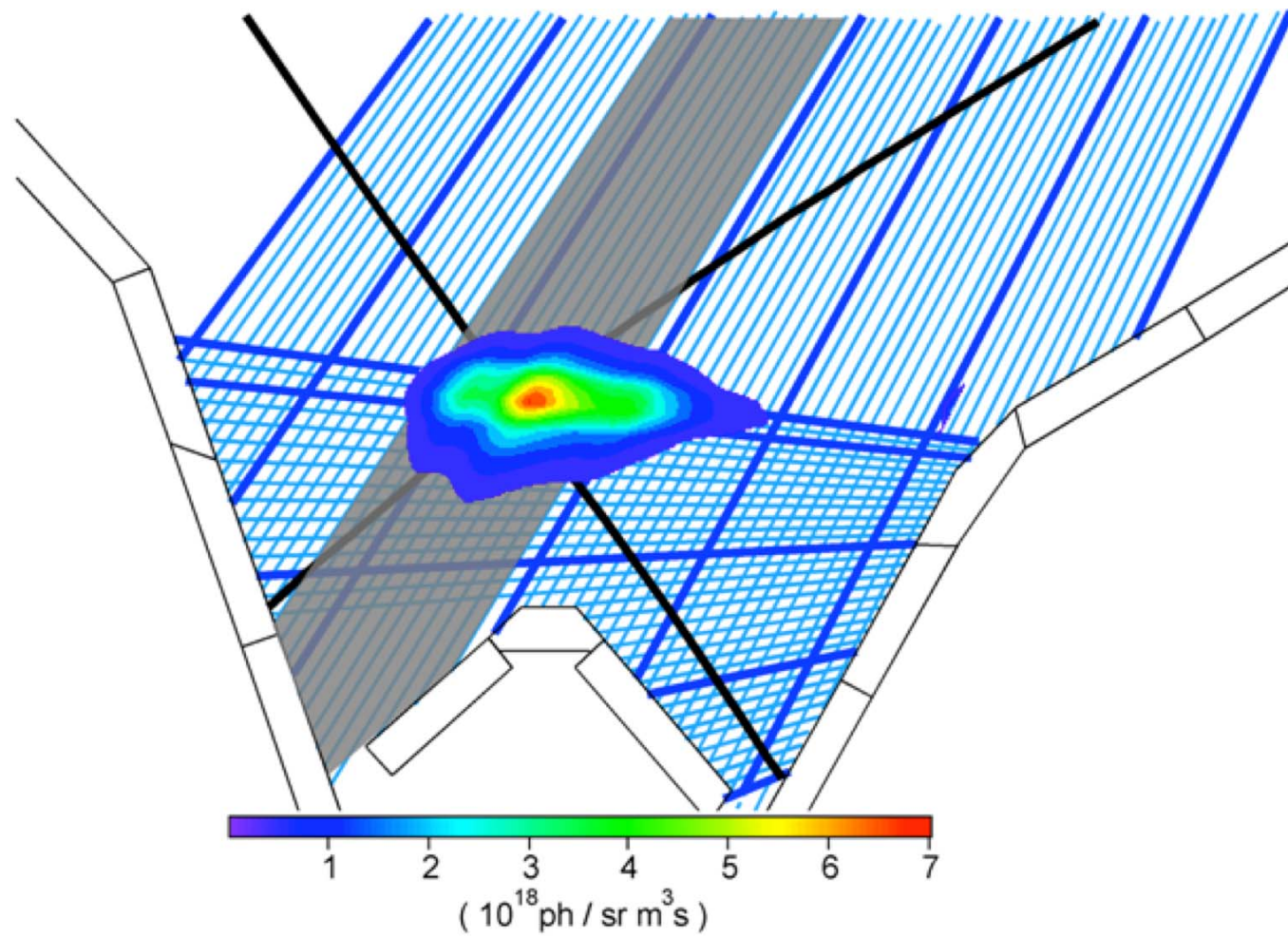
$n \geq 7$ の準位から
 $\Rightarrow T_e \sim 2.5 \text{ eV}$ (X点)

- ・周辺(数eV-keV)のプラズマのただ中で2.5eVというような低温がどうして実現しているのか？

電離・再結合の流れと放射パワーのまとめ



- 周辺 (数eV-keV) のプラズマのただ中で2.5eVというような低温がどうして実現しているのか？
- C^{3+} イオンは $C^{2+} \rightarrow C^{3+}$ の電離の流れと $C^{4+} \rightarrow C^{3+}$ の再結合の流れによって生成している。 C^{3+} はこの領域から流れ出している。

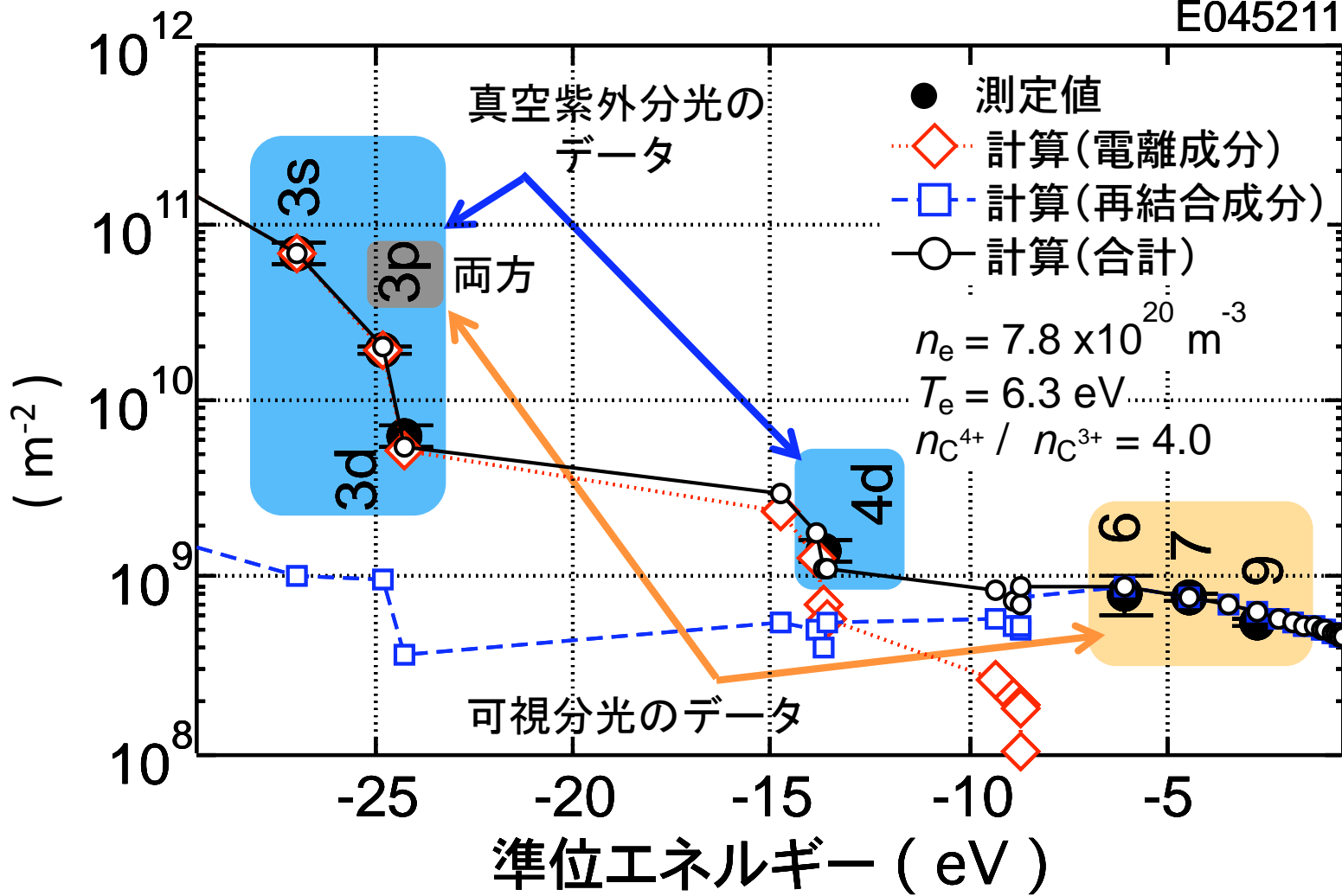


- ・周辺(数eV-keV)のプラズマのただ中で2.5eVというような低温がどうして実現しているのか？
- ・ C^{3+} イオンは $C^{2+} \rightarrow C^{3+}$ の電離の流れと $C^{4+} \rightarrow C^{3+}$ の再結合の流れによって生成している。 C^{3+} はこの領域から流れ出している。 C^{2+} はこの領域内で $C^+ \rightarrow C^{2+}$ により、 C^{4+} は $C^{5+} \rightarrow C^{4+}$ により生成、ないしその領域から流れ込んでいる。
- ・電離・再結合、熱(エネルギー)と粒子(イオン)の空間的輸送の全体的描像を描く必要がある。
- ・この現象はダイヴァータプラズマについての新発見である。ダイヴァータプラズマ制御に向かった新たな可能性を示す。
- ・この発見をもたらした実験・解析は徹頭徹尾原子・分子過程にかんする信頼できる知識に基づいている。この現象を発展させるためにも信頼性の高い原子・分子データが存在しなくてはならない。

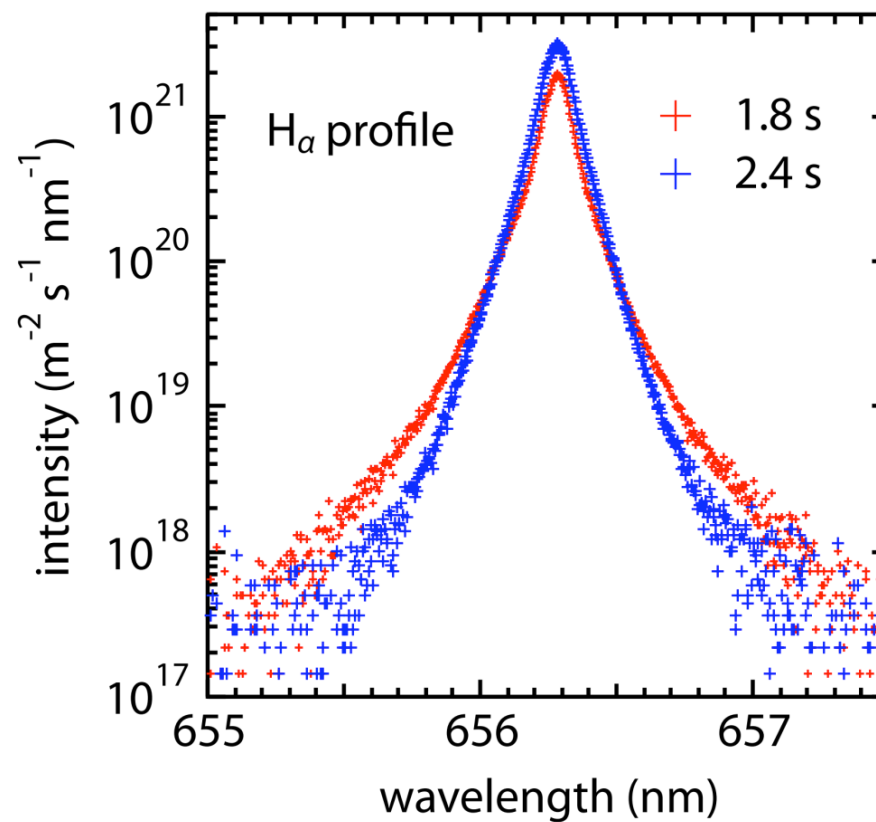
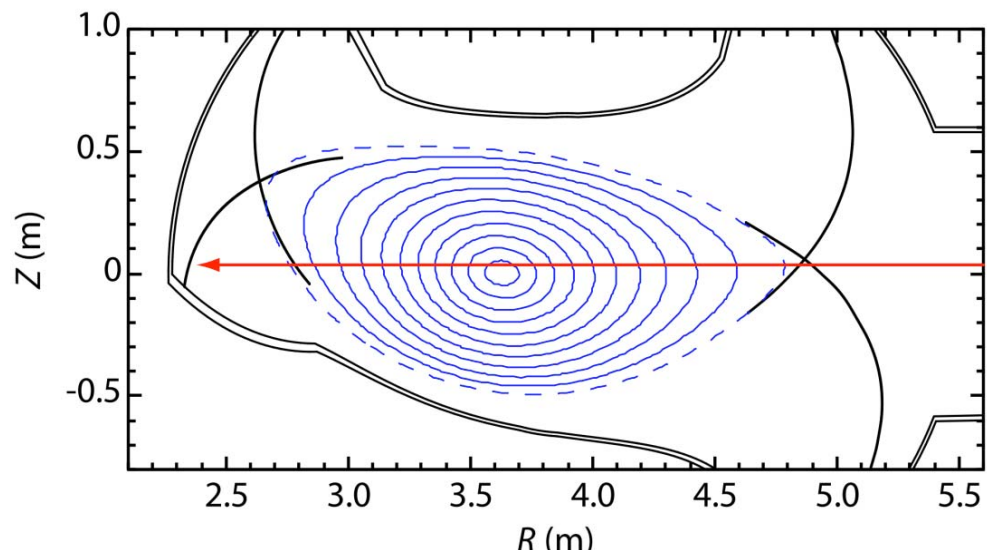
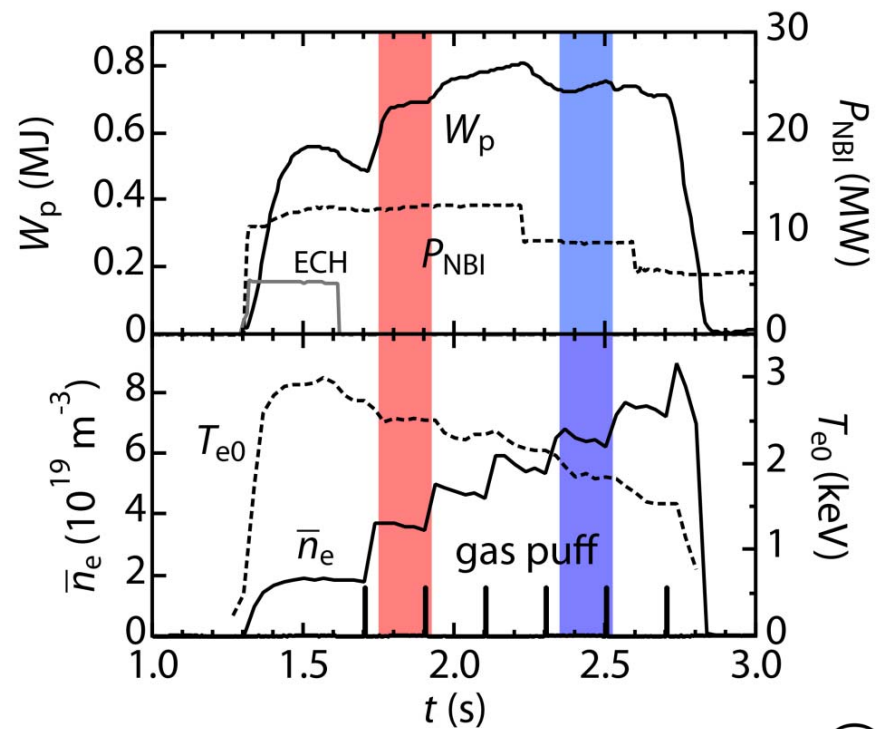
C IV (C³⁺) の解析結果

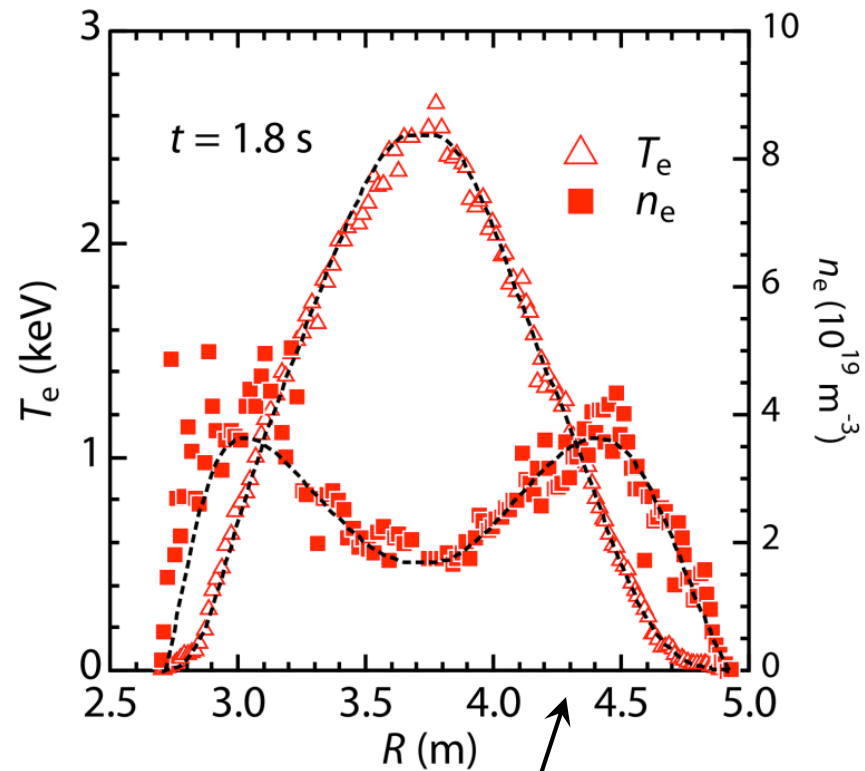
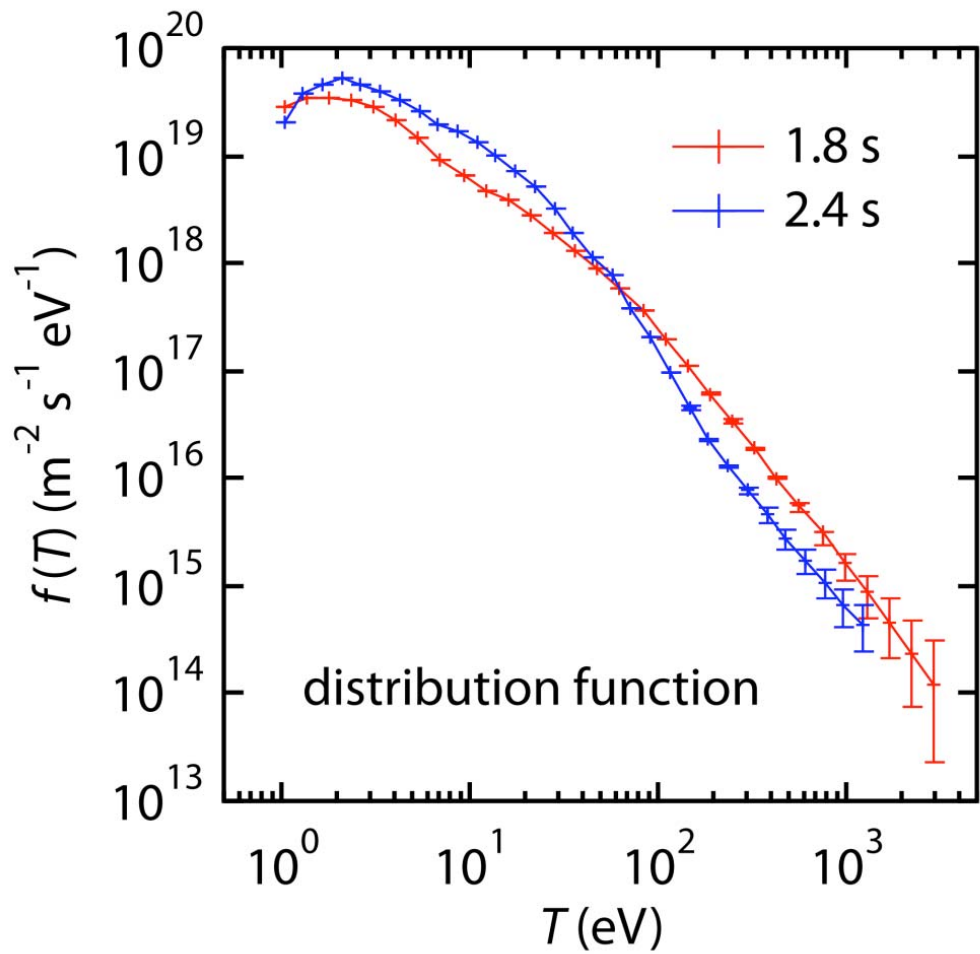
E045211

励起準位のポピュレーション
(m^{-2})

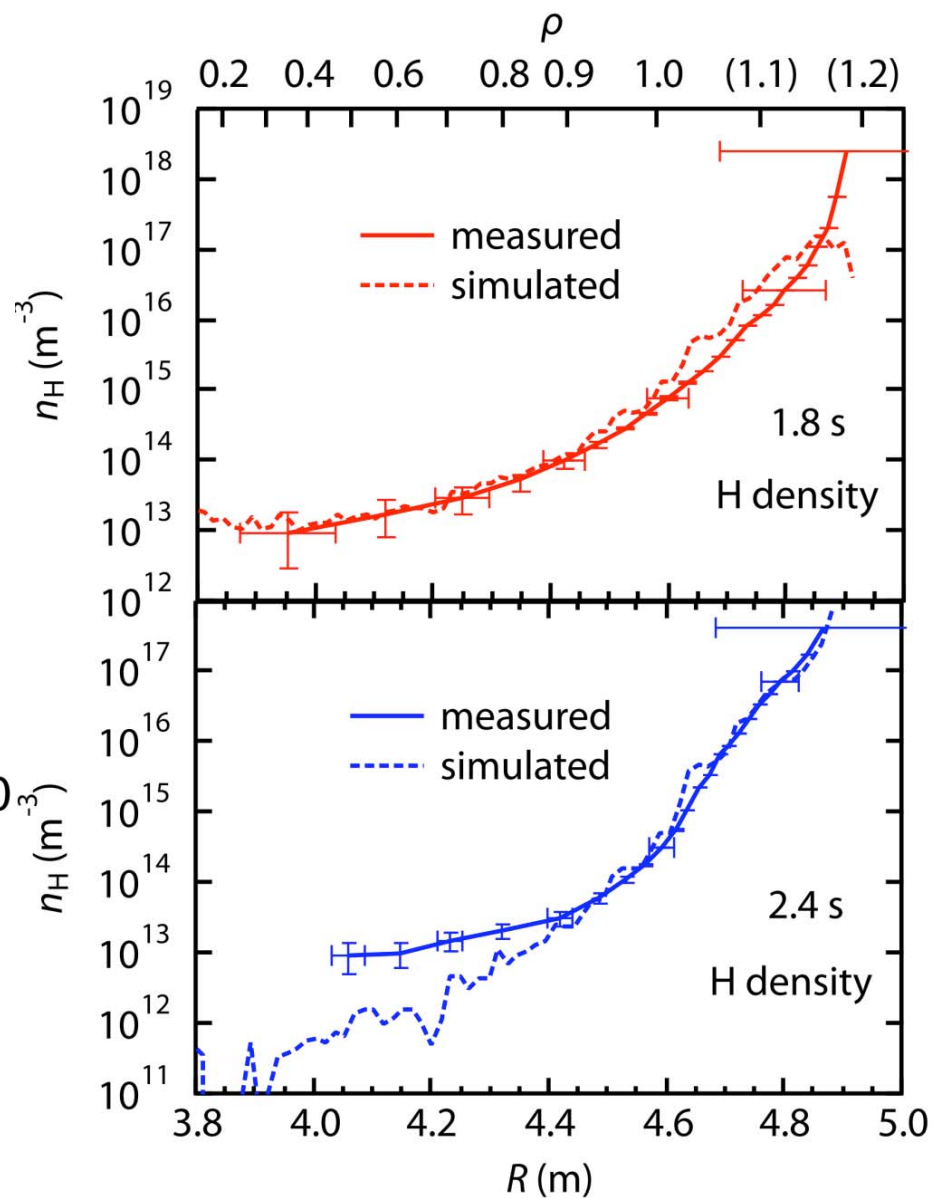
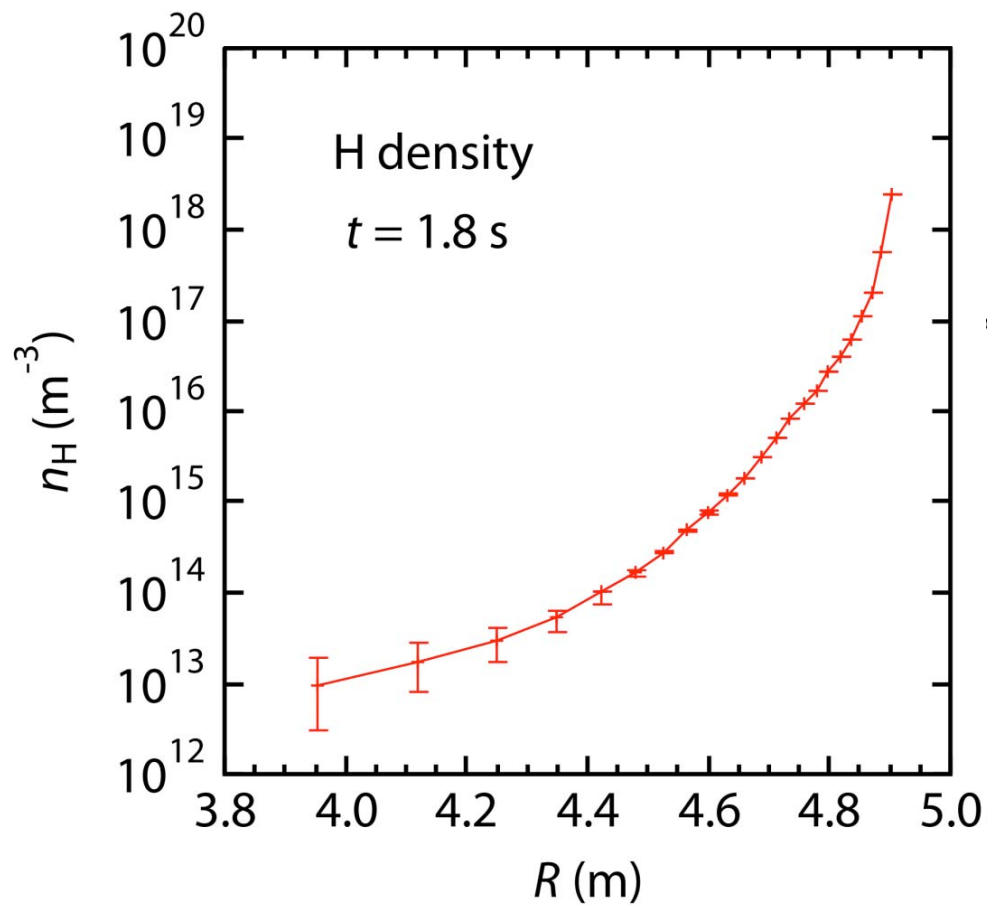


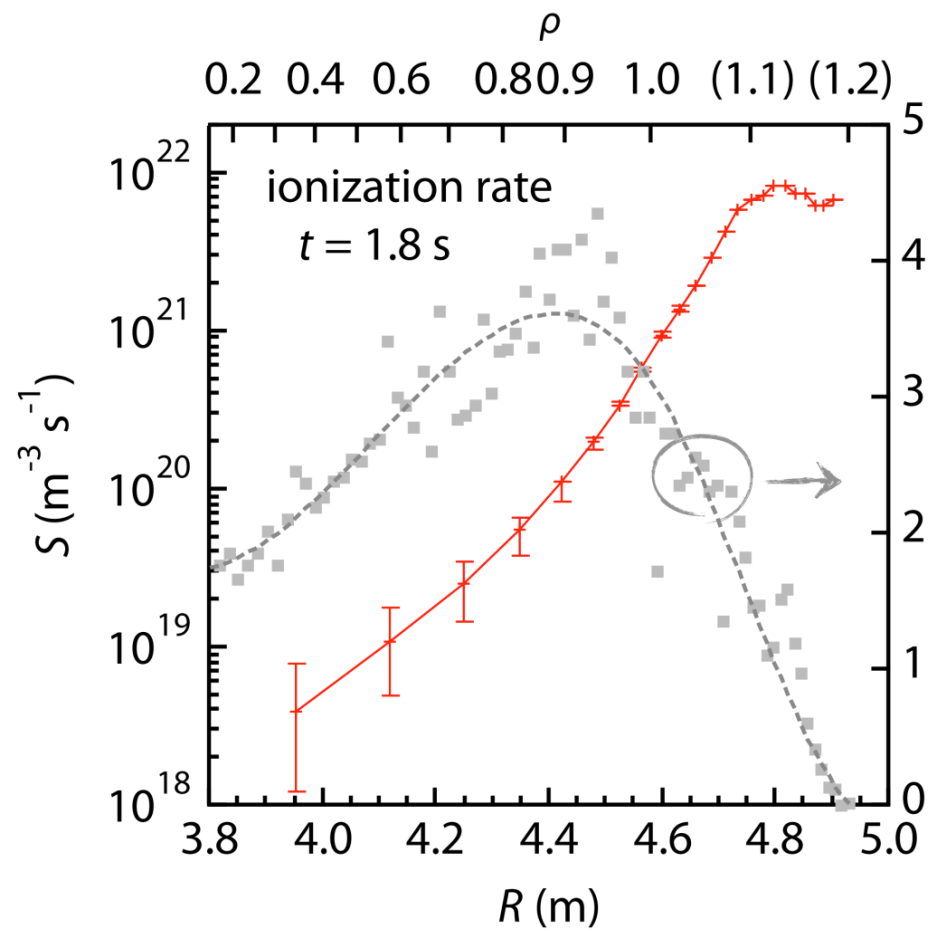
LHDプラズマ中のイオン閉じ込め



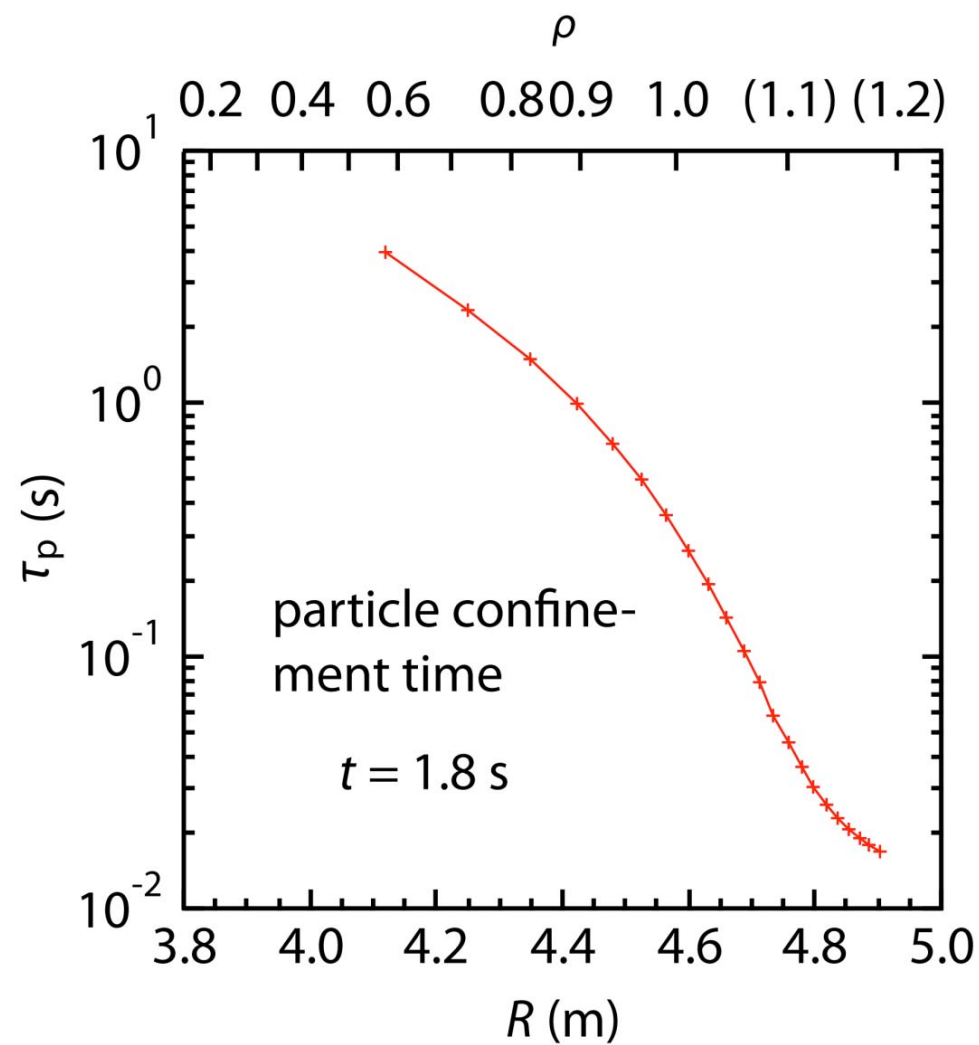


$$T_a = T_i = T_e$$





$$\tau_p(\rho) = \frac{\int_{\rho} n_e dV}{\int_{\rho} S dV}$$

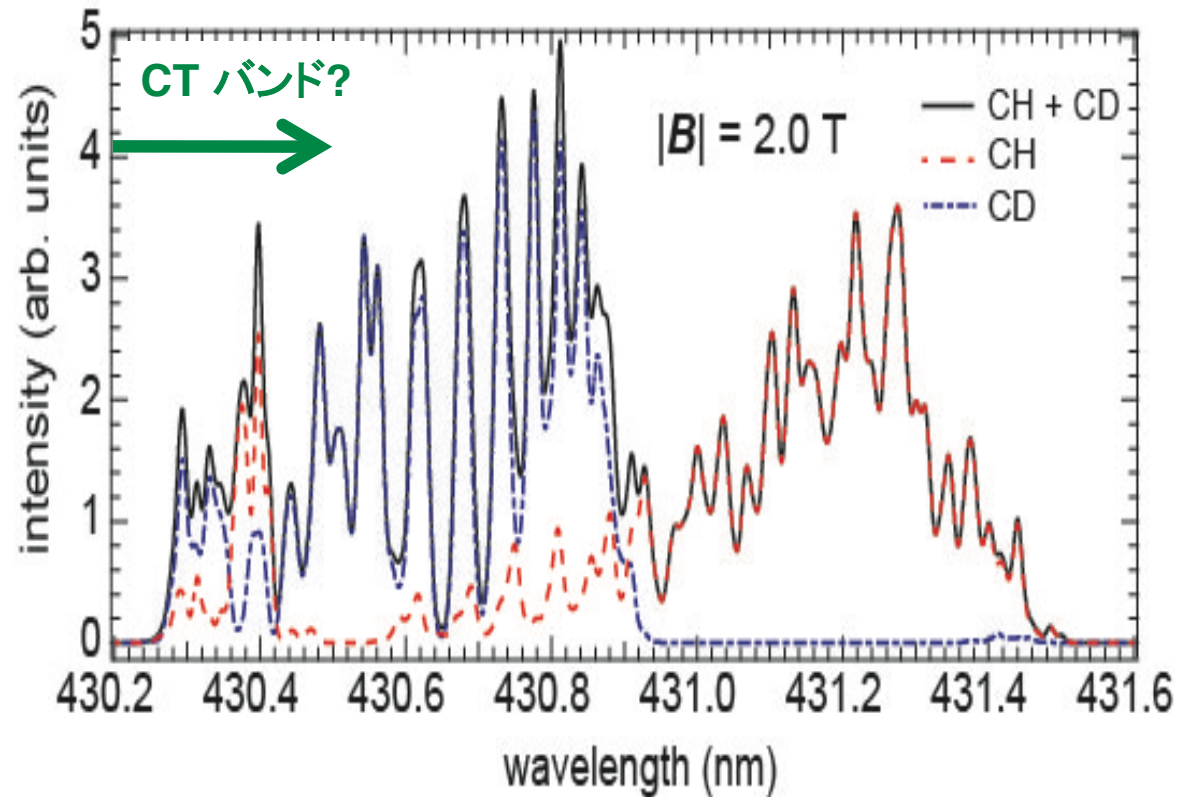


周辺プラズマ中水素・炭化水素分子

CH, CDスペクトルの分離

高分解能分光を用いることで分離できることを計算で確認した

しかし、現時点では
CD ($A^2\Delta$), CT ($X^2\Pi$, $A^2\Delta$)
の高精度な分子データが無く、データ整備が必要

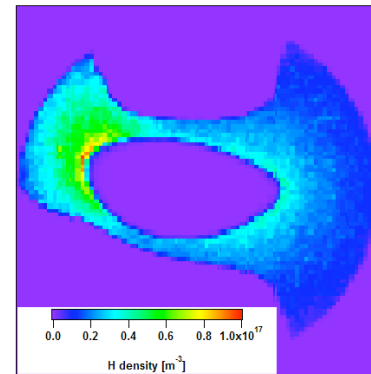
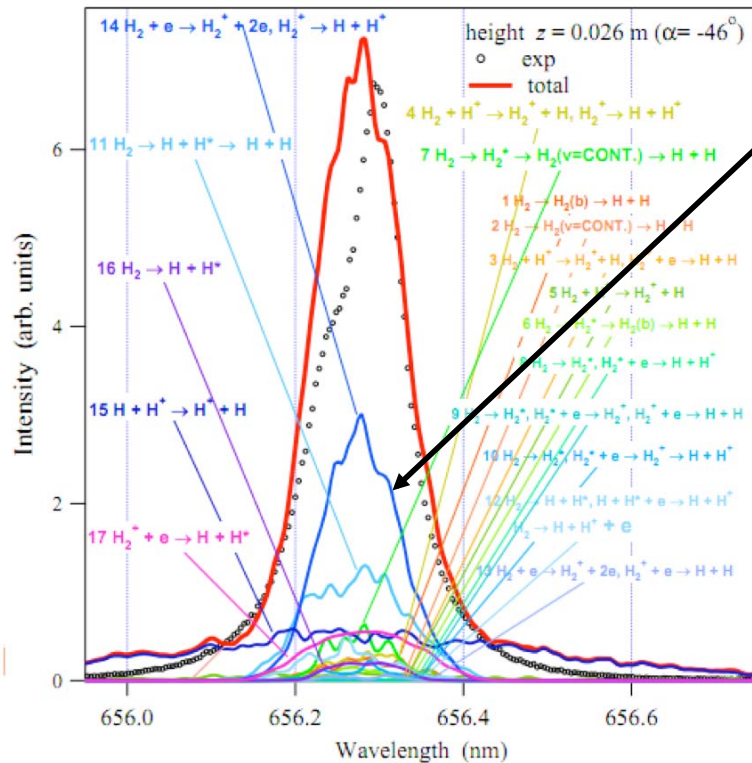


周辺領域の水素分子・原子・イオン

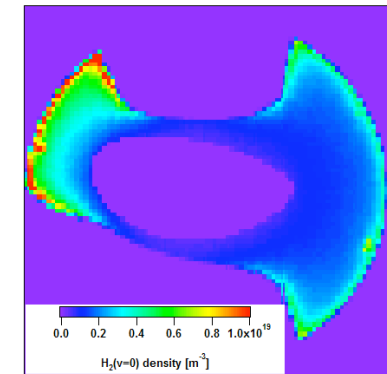


水素原子の発光に、
水素分子イオンからの解離性再結合
が大きく影響している。

Iwamae A, et. al., *Plasma and Fusion Research*, 4, 01 (2009).



水素原子



水素分子

信州大澤田グループのシミュレーション

現在も断面積の計算が精力的に行われているが、今後もその進展が必要。

Takagi H, *Physica Scripta*. T 96, 52 (2002).