

Zeeman分裂した水素分子Fulcher帯 を用いた壁近傍のガス温度計測

四竈 泰一, 栗原 公紀 ^{a)}, 門 信一郎 ^{b)}, 山崎 大輔
栗原 洋介 ^{a)}, 関子 秀樹 ^{c)}, 田中 知

東京大学大学院工学系研究科

^{a)} 東京大学工学部

^{b)} 東京大学高温プラズマ研究センター

^{c)} 九州大学応用力学研究所

発表内容

- 研究背景・目的
- 分子Zeeman効果の計算
- TRIAM-1Mトカマク (可動リミター観測視線)
- Zeeman分裂したFulcher- α 帯スペクトルの観測
- 水素分子振動・回転温度計測
- まとめ



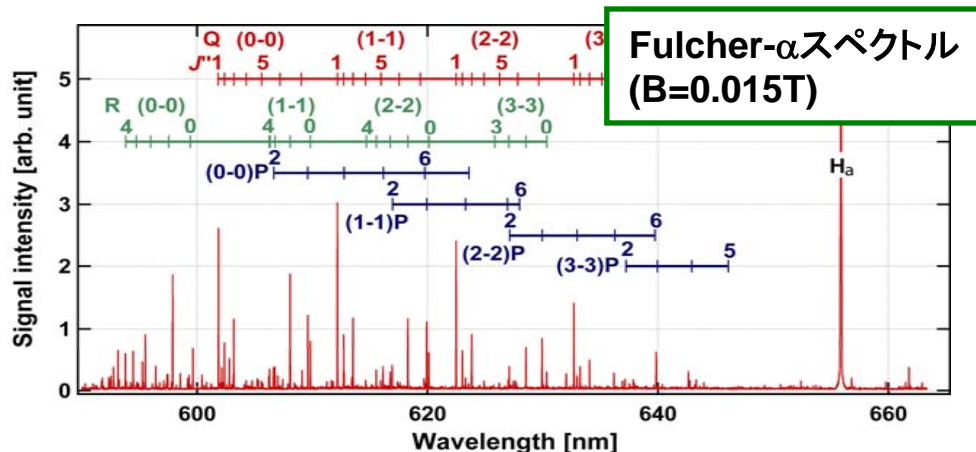
研究背景・目的

ダイバータプラズマのデタッチメントには分子活性化再結合 (MAR) の寄与が重要となる。

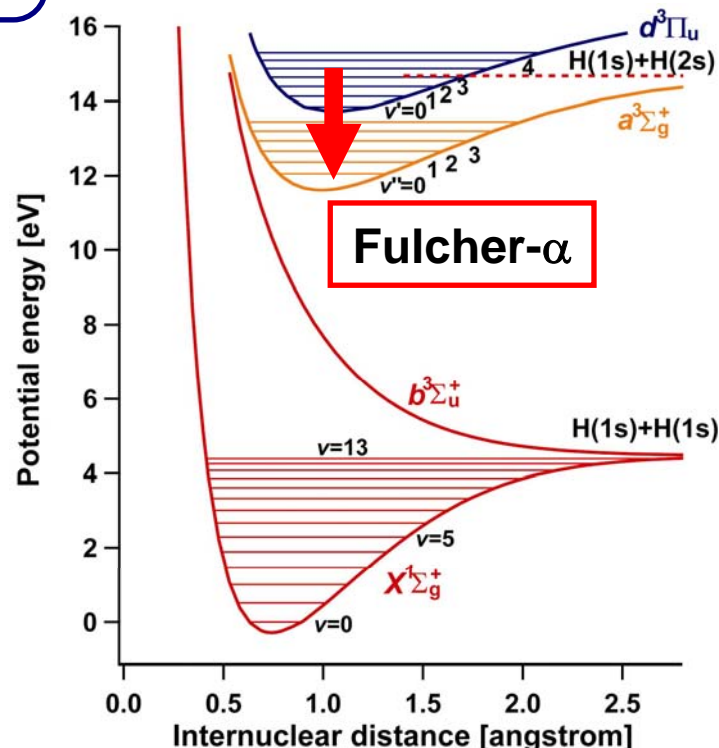
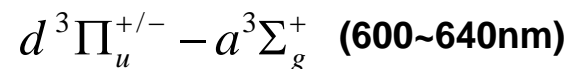
MAR processes



MARには振動励起した水素分子が関連しており、その計測に可視域に波長を持つFulcher- α 帯が利用されている。しかし、これまでスペクトル形状への磁場の影響が考慮されていない。



水素分子Fulcher- α 帯



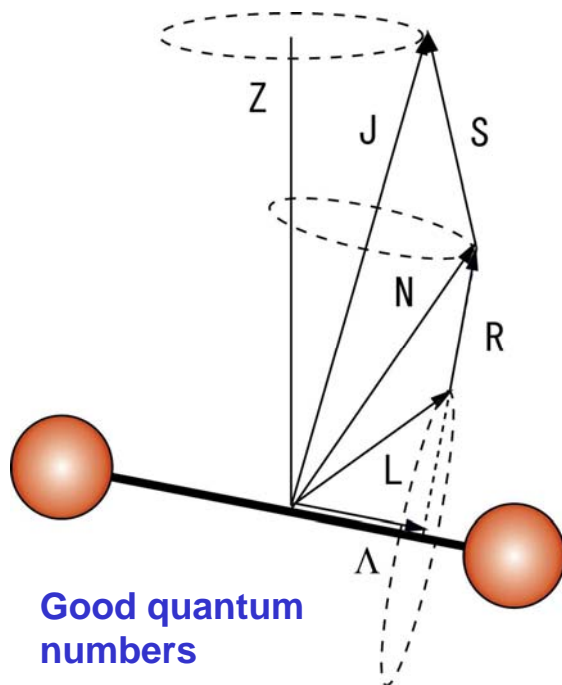
- Fulcher- α 帯スペクトルへのZeeman効果を考慮した解析を行う。
- 磁場強度の計測から発光位置と振動・回転温度を同時に計測する。



Zeeman効果の計算 (I)

Hund's case (b)

スピン軌道相互作用 << 回転定数



Good quantum numbers

Λ, S

$N = \Lambda, \Lambda + 1, \dots$

$J = |N-S|, \dots, |N+S|$

軌道電子Hamiltonian

$$H = H_{elec} + H_{vib} + H_{rot} + H_{so} + H_B$$

$$\langle \varphi | H_{elec} | \varphi' \rangle = T_e$$

電子

波動関数 (BO近似)

$$|\varphi\rangle = |elec.\rangle |v\rangle |rot.\rangle$$

$$\langle v | H_{vib} | v' \rangle = \omega_e (v + 1/2)$$

振動

$$-\omega_e x_e (v + 1/2)^2 + \omega_e y_e (v + 1/2)^3 + \dots$$

$$\langle v; N, J | H_{rot} (= BT^1(N^2)) | v'; N', J' \rangle$$

$$= \underbrace{BN(N+1)}_{\text{rotation}} - \underbrace{DN^2(N+1)^2}_{\text{centrifugal distortion}} + HN^3(N+1)^3 + \dots$$

回転 + 歪み

各定数はデータベース*より値を引用

* NIST Chemistry Webbook (<http://webbook.nist.gov/chemistry/>)



Zeeman効果の計算 (II)

$$\langle \gamma, \Lambda; N, S, J, M | AT^1(\mathbf{L}) \cdot T^1(\mathbf{S}) | \gamma, \Lambda; N, S, J', M' \rangle$$

A: スピン・軌道
相互作用定数

$$= A\Lambda^2 \frac{J(J+1) - N(N+1) - S(S+1)}{2N(N+1)}$$

スピン-軌道相互作用

$$\mu_B | B | \langle \gamma, \Lambda; N, S, J, M | \underbrace{g_L T_{p=0}^1(\mathbf{L})}_{(a)} + \underbrace{g_S T_{p=0}^1(\mathbf{S})}_{(b)} | \gamma, \Lambda; N, S, J', M' \rangle$$

$$(a) = g_L \delta_{SS'} (-1)^{2J+2N+S-M-\Lambda+1} \Lambda(2N+1) [(2J+1)(2J'+1)]^{1/2} \\ \times \begin{pmatrix} J & 1 & J' \\ -M & 0 & M' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N & 1 & N \\ -\Lambda & 0 & \Lambda \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} N & J' & S \\ J & N & 1 \end{Bmatrix}$$

$$(b) = g_S (-1)^{J+J'+S+N-M+1} [(2J+1)(2J'+1)]^{1/2} [S(S+1)(2S+1)]^{1/2} \\ \times \begin{pmatrix} J & 1 & J' \\ -M & 0 & M' \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} S & J' & N \\ J & S & 1 \end{Bmatrix}$$

Zeeman効果

$T_p^k(\mathbf{X})$: k階の球面テンソル (p: 空間固定座標系: p=0 z軸方向成分)



発光強度の計算

回転スペクトル発光強度 $I_{N'N''} = h\nu_{N'N''} \cdot n_{N'} \cdot A_{N'N''}$

$$n_{N'} = \frac{n_{v=0} \cdot g_{as} (2N'+1)}{Q_{rot}} \exp \left[-\frac{F(N, v)}{kT_{rot}} - \frac{\Delta G(v)}{kT_{vib}} \right]$$

Q_{rot} : 分配関数
 g_{as} : 核スピン多重度
 $F(N, v)$: 回転エネルギー
 $\Delta G(v)$: 振動エネルギー

A係数

$$A_{N'N''} = \frac{16\pi^3}{3h\epsilon_0 c^3} \nu_{N'N''}^3 \frac{|\langle \phi' | \mathbf{r}_q | \phi'' \rangle|^2}{2N'+1}$$

$$|\langle \phi' | \mathbf{r}_q | \phi'' \rangle|^2 = \underbrace{q_{v'v''}}_{\text{FC因子}} \cdot \underbrace{\langle R_e \rangle^2}_{\text{電子項}} \cdot \underbrace{S_{N'N''}}_{\text{HL因子}}$$

Hönl-London factor S

$$S_{N'N''} \cdot S_{M'M''} = [(2J''+1)(2J'+1)] \cdot [(2N''+1)(2N'+1)] \\ \times \begin{pmatrix} J'' & 1 & J' \\ -M'' & p & M' \end{pmatrix}^2 \begin{pmatrix} N'' & 1 & N' \\ -\Lambda'' & q & \Lambda' \end{pmatrix}^2 \begin{Bmatrix} N' & J'' & S'' \\ J'' & N'' & 1 \end{Bmatrix}^2$$

振動状態の波動関数

$$|\phi\rangle = \sum_{N,S,J,M} C |N, S, J, M\rangle$$

から発光強度を計算

Zeeman分裂した各成分の強度

$p = M'' - M'$ (0: π , ± 1 : σ)

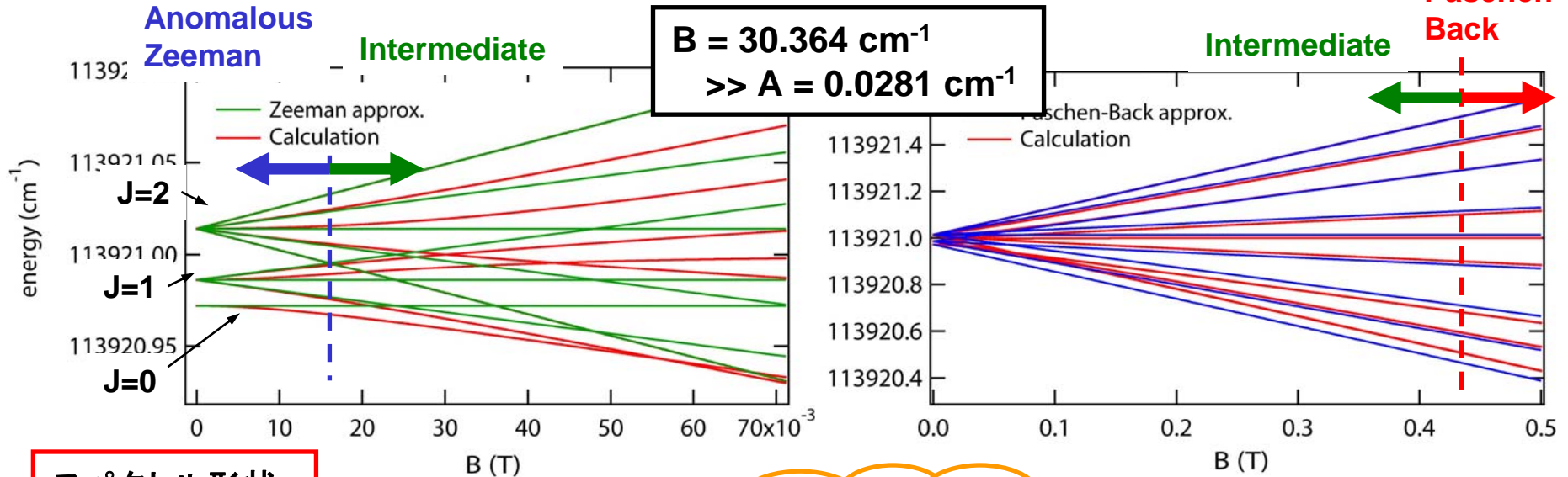
(q: 分子軸固定座標系)



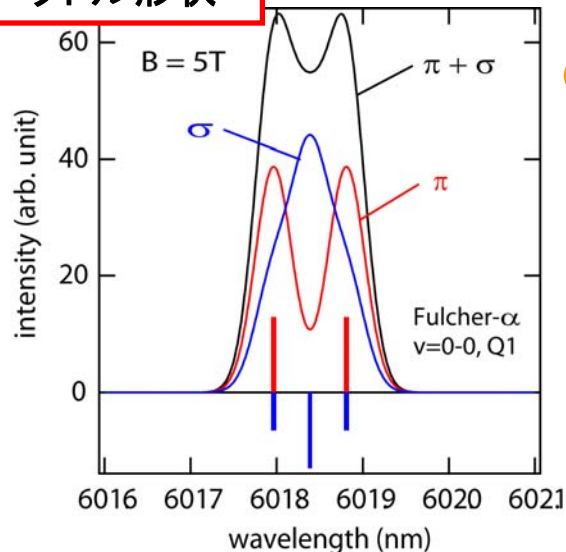
計算結果 (エネルギー準位, スペクトル形状)

エネルギー準位のZeeman分裂

$d^3\Pi_u(3p\pi)$ $S=1, \Lambda=1, N=1$ ($J=0, 1, 2$)



スペクトル形状



任意の磁場強度における
スペクトル形状を計算可能

装置幅 $\Delta \lambda_{fwhm} = 0.05 \text{ nm}$
 $B = 5.0 \text{ T}$ を仮定して計算した
 Fulcher - α スペクトル
 $v = 0-0, Q1$

$B = 0 \sim 100 \text{ Gauss}$
Anomalous Zeeman

$B = 100 \text{ Gauss} \sim 0.5 \text{ T}$
Intermediate

$B > \sim 0.5 \text{ T}$
Paschen-Back limit

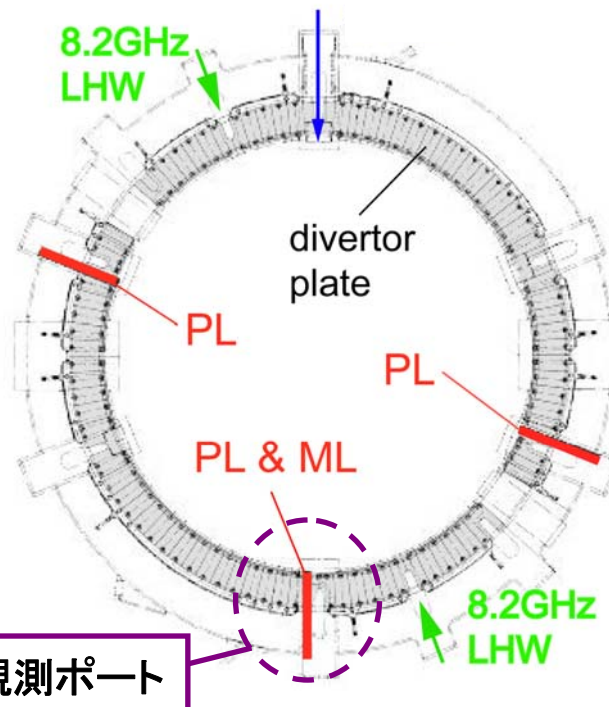


TRIAM-1M トカマク

2005年12月シャットダウン



TRIAM-1M Tokamak
@RIAM Kyushu-Univ.



PL: Poloidal
Limiter
ML: Movable
Limiter

プラズマ対向材料
モリブデン製
(リミター、ダイバータ)

Top View

Typical parameters

R = 840 mm, $a \times b = 120 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$

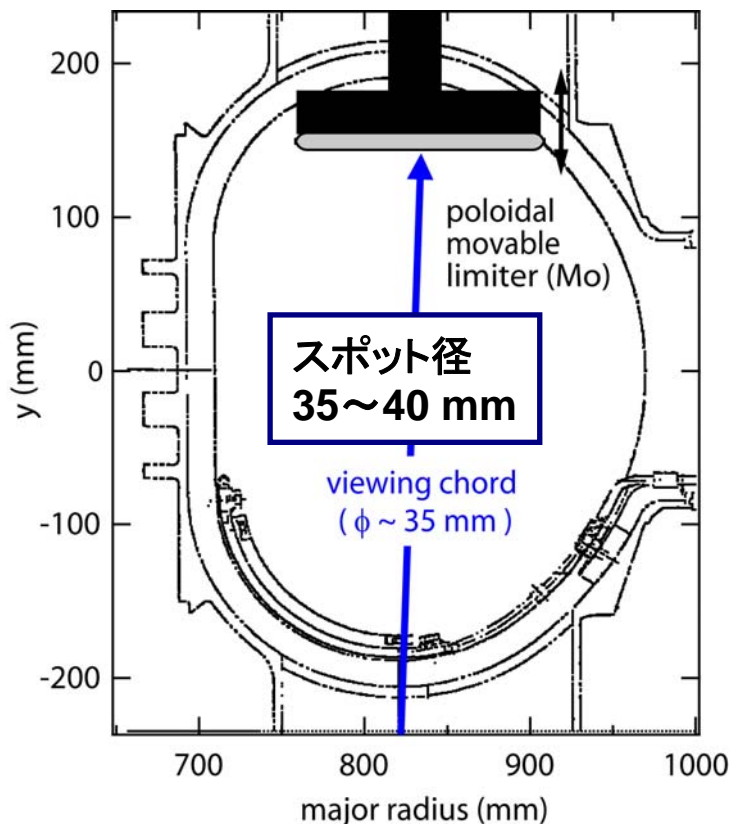
$B_T < 8 \text{ T}$

$I_p = 470 \text{ kA}$ (Ohmic), $\sim 100 \text{ kA}$ (LHCD 8.2 GHz 200 kW)

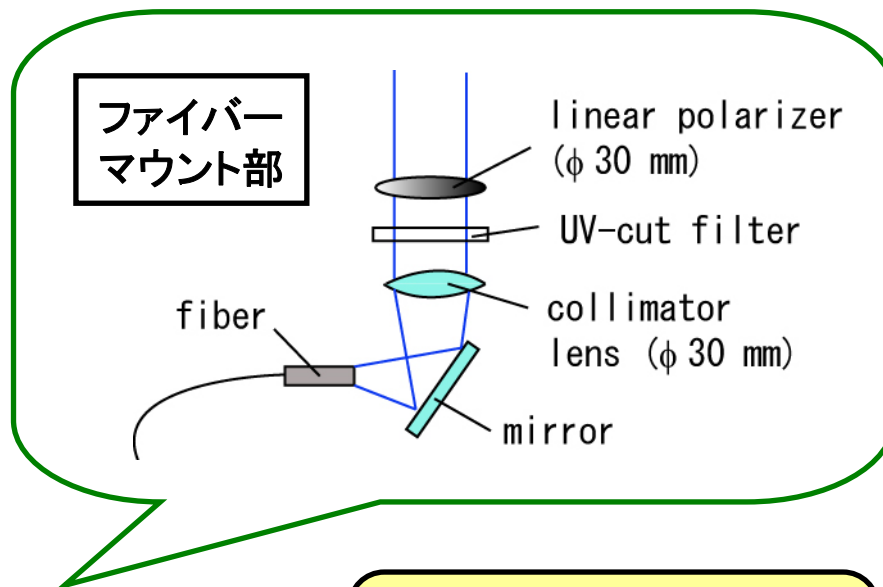
$\tau_{dis} = 500 \text{ ms}$ (Ohmic), $\sim 10 \text{ sec}$ (LHCD 8.2 GHz)

TRIAM-1M可動リミター観測視線

可動リミター観測視線 (ϕ 35 mm)



発光の π ・ σ 成分を分離して観測するために、
コリメータレンズ前段に直線偏光板を挿入



波長分解能:

$$\Delta \lambda_{\text{fwhm}} = \sim 0.035 \text{ nm}$$

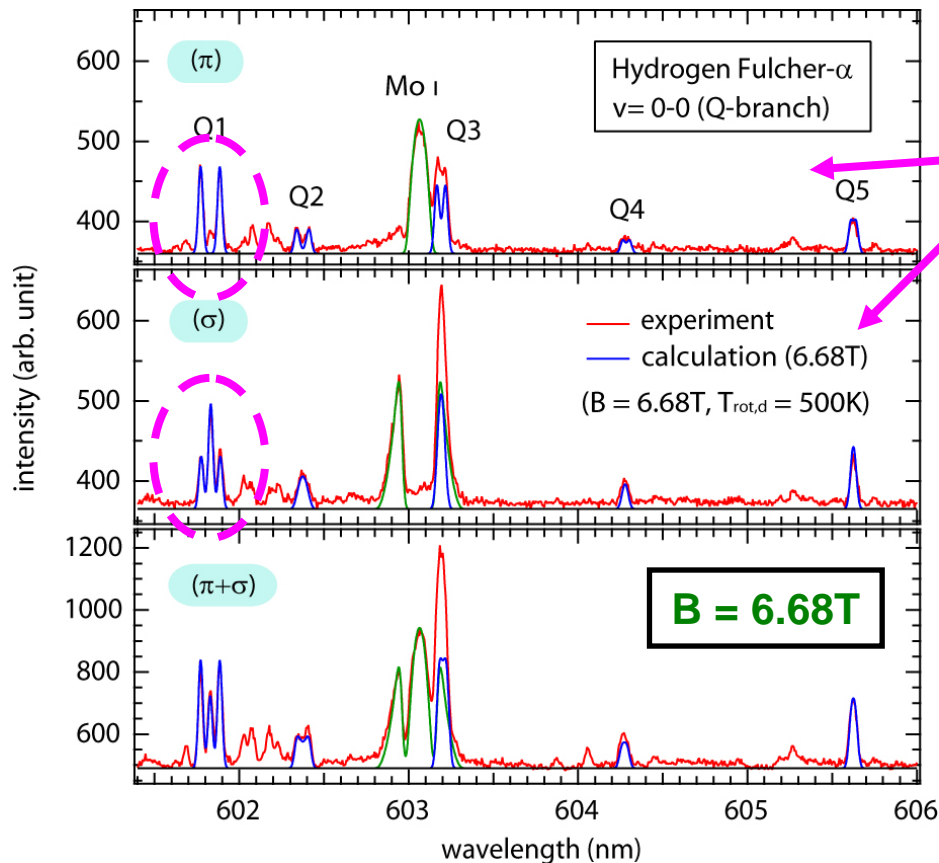
(スリット幅 80 μ m)

分光器 : Acton Research AM-510 ($f = 1.0$ m, F/8.7, 1800 G/mm)
 CCD : Andor DU440-BU2 (Back Illumination, 13.5x13.5 μ m², 2048x512 pixels)



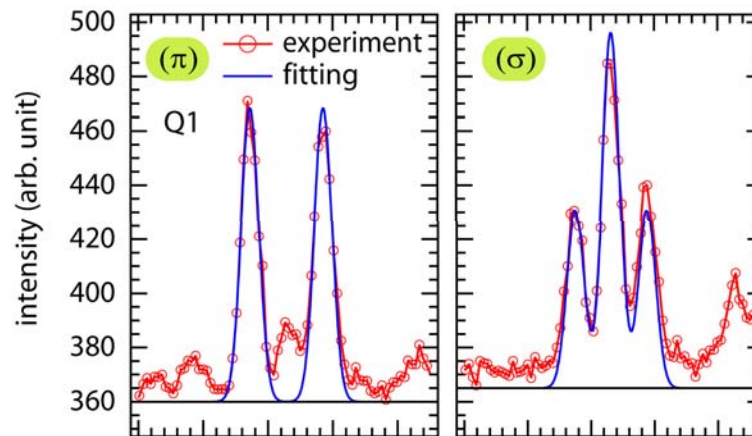
Fulcher- α 帯発光スペクトル (実験値)

TRIAM-1M 8.2GHz LHCD放電
 $B = 7T$ (@ $R = 800mm$)

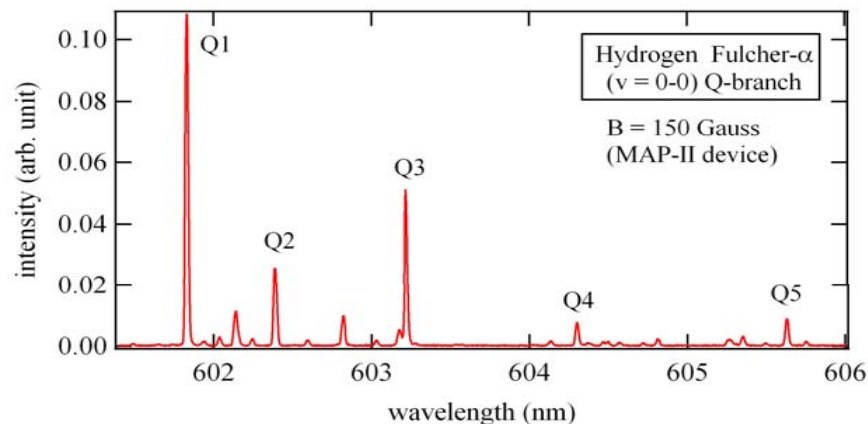


計算コードにより評価したスペクトル形状は実験結果と良く一致していることが確認できる。

実験により計測したFulcher- α Q-branch ($v=0-0$) スペクトルと計算結果の比較を行った。



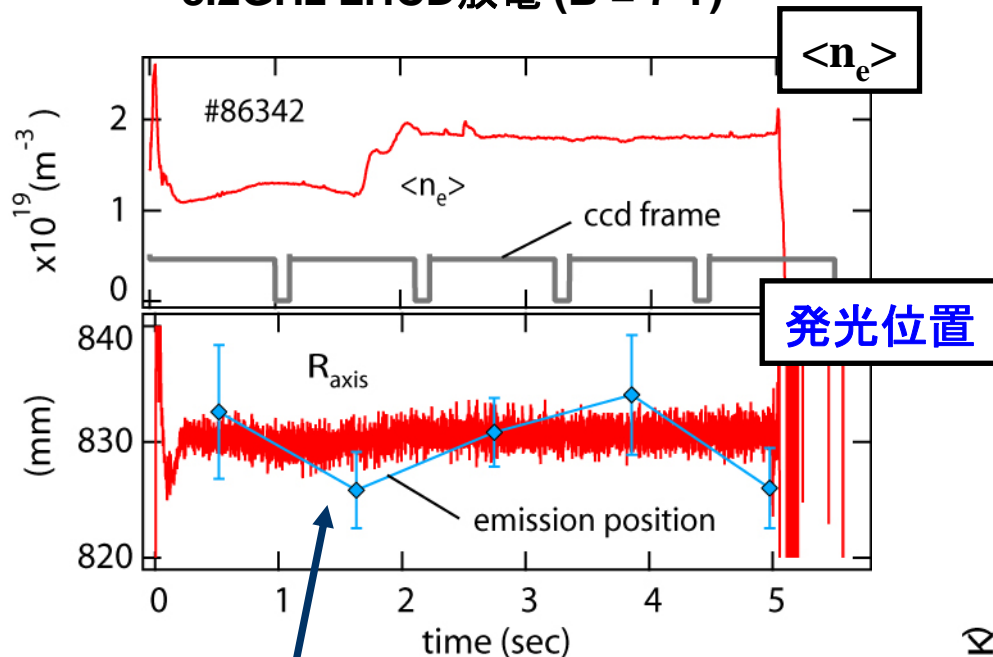
(参考) MAP-II dc-arc放電 $B = 0.015T$





発光位置, 振動・回転温度時間変化

8.2GHz LHCD放電 (B = 7 T)



Zeeman分裂の大きさから分子の
発光位置を同定

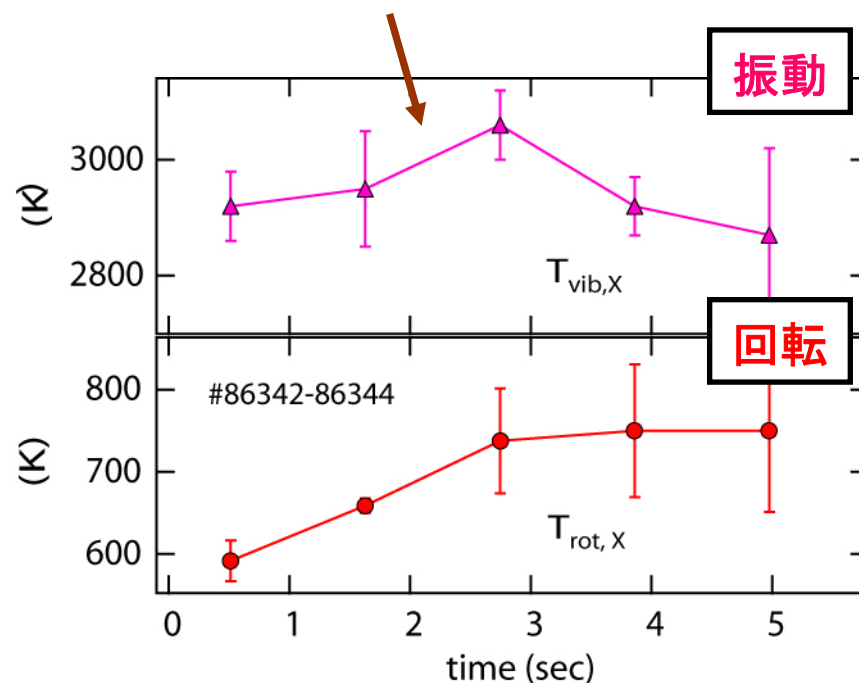
→ 磁気軸位置 (可動リミターとプラズマとの
接触位置) 近傍から発光が起こっている。

mm単位の精度で発光位置の時間変化
を計測可能。

コロナモデルを用いたBoltzmann
プロット法により, 基底準位の
振動・回転温度の時間変化を計測

電子密度 (壁への入射フラックス?) に
同期したような形で回転温度が変化。

→ 原理的に 壁温度 + 電子衝突励起に
よる温度を評価することが可能



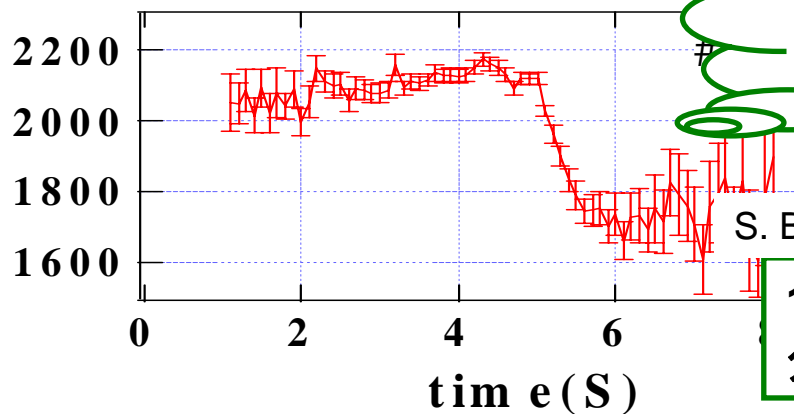


回転温度と可動リミター温度との関係

IRカメラによる計測温度 (同ポート)

(九大・図子先生グループ)

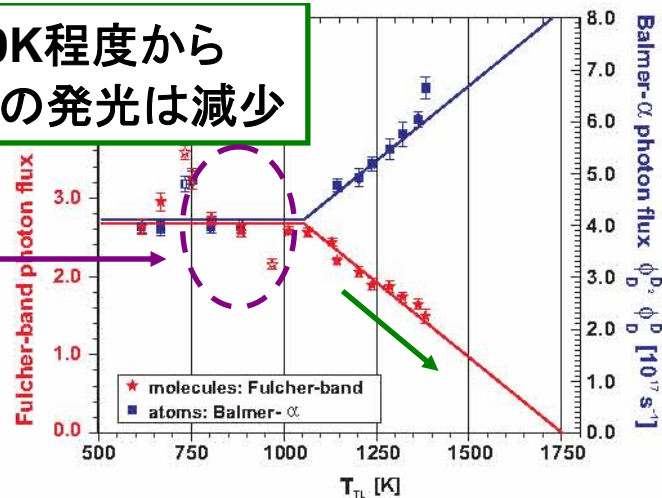
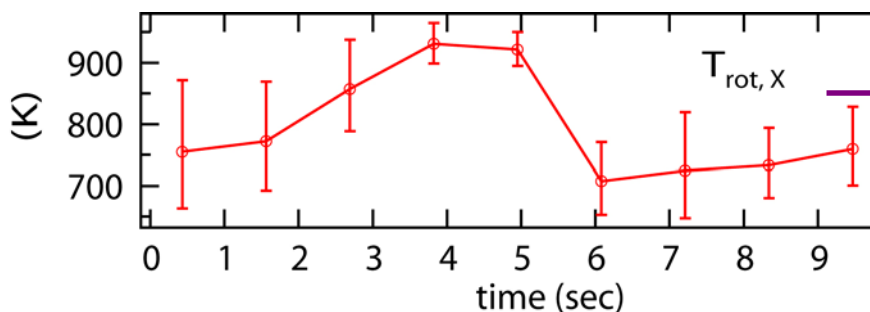
temperature [K]



Hot spotの温度を反映
~ 2000K (分子は解離してしまう)

1100K程度から
分子の発光は減少

S. Brezinsek et al. PPCF (2005)



Major radius



- IRカメラでの計測 → Hot spotからの強い発光により、hot spot位置の温度を反映?
- 分子の回転温度計測 → Hot spot周辺の分子放出が有意であるような場所におけるリミター温度の局所値を反映?



まとめ

分子スペクトルへのZeeman効果を計算により評価し、TRIAM-1Mトカマクにおいて実験的に検証した。

- 分子スペクトルのZeeman分裂から、発光位置を計測することができる。加えて、発光強度に対してBoltzmannプロット法を適用することにより、発光位置における局所的な振動・回転温度を評価することが可能である。
 - TRIAM-1Mトカマクにおいて、可動リミター観測視線を用いたFulcher帯の計測を行った。
 - 分子線の発光位置は、プラズマとリミターとの接触位置近傍に存在する。
 - 回転温度はプラズマ密度に同期したような形で変化 (700 ~ 950 K)。
- ➡ **Hot spot 周辺の分子放出が有意な部分におけるリミター温度を計測？**

** 電子密度依存性、コロナモデルの是非等に関して詳細を検討中。



コロナモデルによる振動・回転温度評価

コロナモデルを用いて $d^3\Pi_u^-$ 準位のポピュレーションを評価

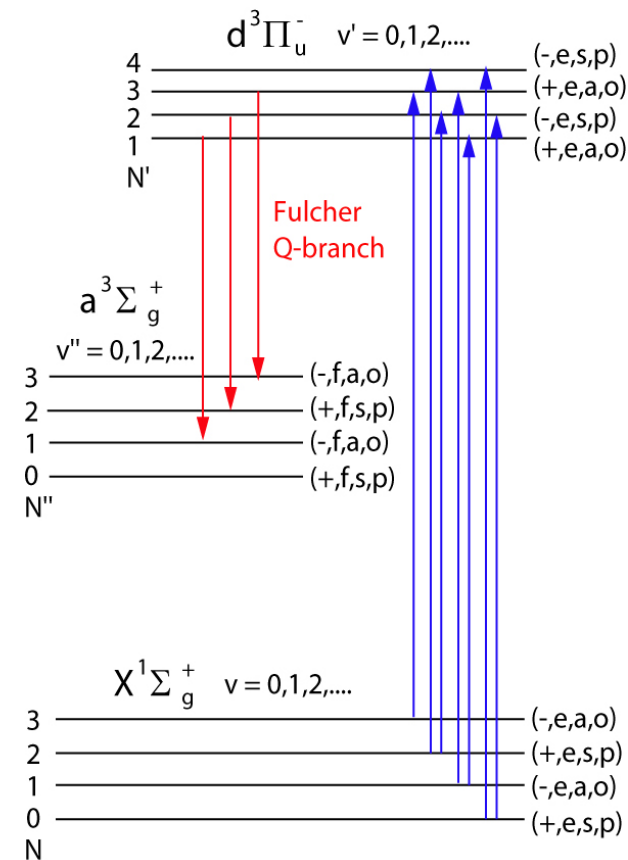
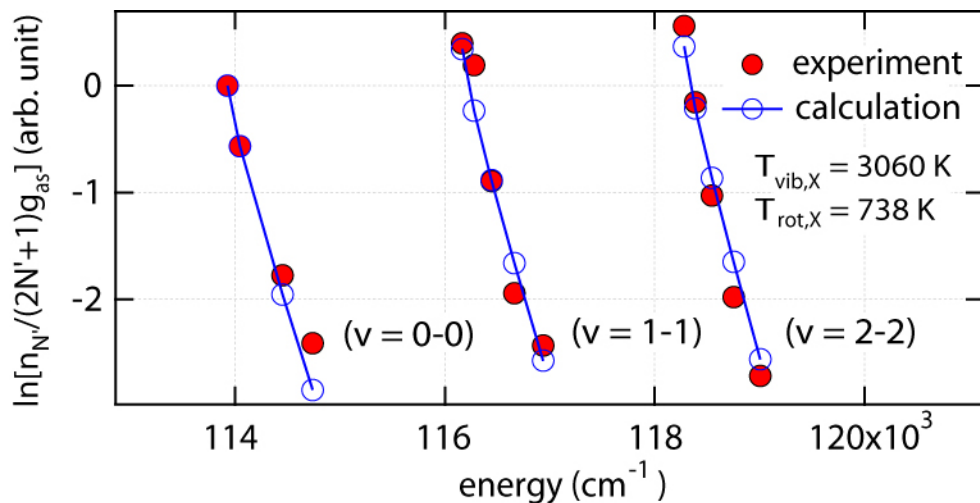
$$n_{dv'N'} = n_e \sum_{v,N} \left[n_{XvN} R_{XvN}^{dv'N'} \right] / \sum_{v''N''} A_{av''N''}^{dv'N'}$$

電子衝突励起係数

基底準位 ($X^1\Sigma_g^+$) は Boltzmann 分布を仮定

$$n_{XvN} = \frac{n_{Xv=0} \cdot g_{as} (2N+1)}{Q_{rot}} \exp \left[-\frac{F_X(N,v)}{kT_{rot,X}} - \frac{\Delta G(v)}{kT_{vib,X}} \right]$$

$T_{vib,X}$, $T_{rot,X}$ をパラメータとして、実験値とフィッティング



Boltzmannプロットした
 $d^3\Pi_u^-$ 準位のポピュレーション
 $v = (0-0), (1-1), (2-2)$



Zeeman効果を考慮しない場合の誤差

Zeeman分裂を考慮せずに単一のガウス関数でフィッティングを行った場合の誤差評価を行った。

Zeeman効果は近似的に回転量子数の2乗に反比例するため、特に、Q1~Q2に影響が大きく現れる。

$$\Delta\lambda_{Zeeman} \propto 1/N(N+1)$$

(N: 回転量子数)

→ Q1に対する相対強度比が変化してしまう

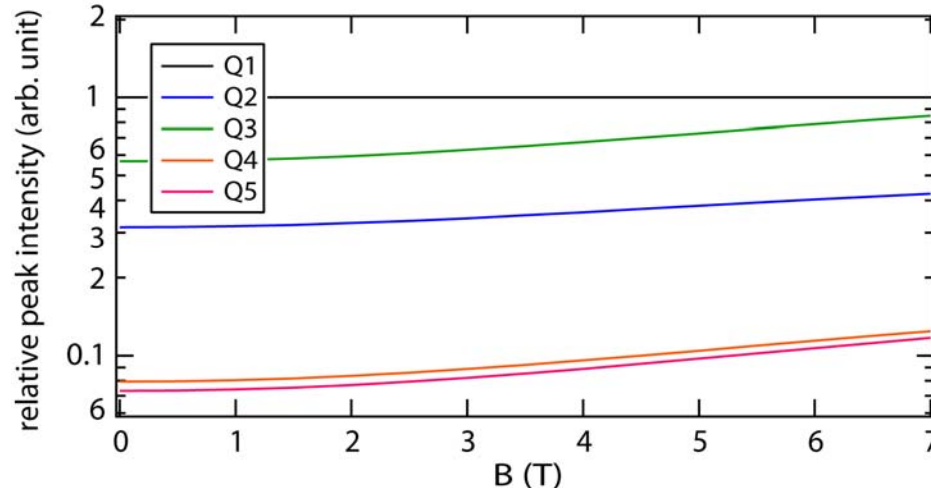
$T_{rot,d}$ 評価に与える誤差

例) B = 3.0Tの場合

装置幅 0.1 nm → 誤差 ~4%

装置幅 0.05 nm → 誤差 ~8%

磁場強度に応じた相対強度比 (Q1=1.0)



$T_{rot,d}$ の計測誤差 ($T_{rot,d} = 300K$ の場合)

