

水素混合プラズマ中における Fulcher帯発光スペクトルの観測

四竈 泰一, 門 信一郎*, 桑原 洋介, 栗原 公紀, SCOTTI Filippo, 田中 知
東京大学大学院工学系研究科, *東京大学高温プラズマ研究センター

第10回若手科学者によるプラズマ研究会
「ITERに向けたプラズマ科学の新展開」

2007年3月14-16日 @原子力機構 那珂研究所

発表内容

- 研究背景 (混合プラズマ中でのFulcher帯スペクトル計測)
- ホローカソードグロー放電管
- スペクトルの同定, 強磁場下でのZeeman分裂
- コロナモデルを用いた振動回転温度の評価
- 表面近傍での振動回転励起過程
- まとめ

研究背景

水素分子Fulcher- α 帯発光スペクトルは、可視分光で振動回転励起分布を計測するための方法として利用され、これまでは、主に純粋な水素や重水素中で計測が行われてきた。

➡ 核融合等の実用的な観点から、混合プラズマ中における分子特性の評価を行うことが重要となると考えられる。

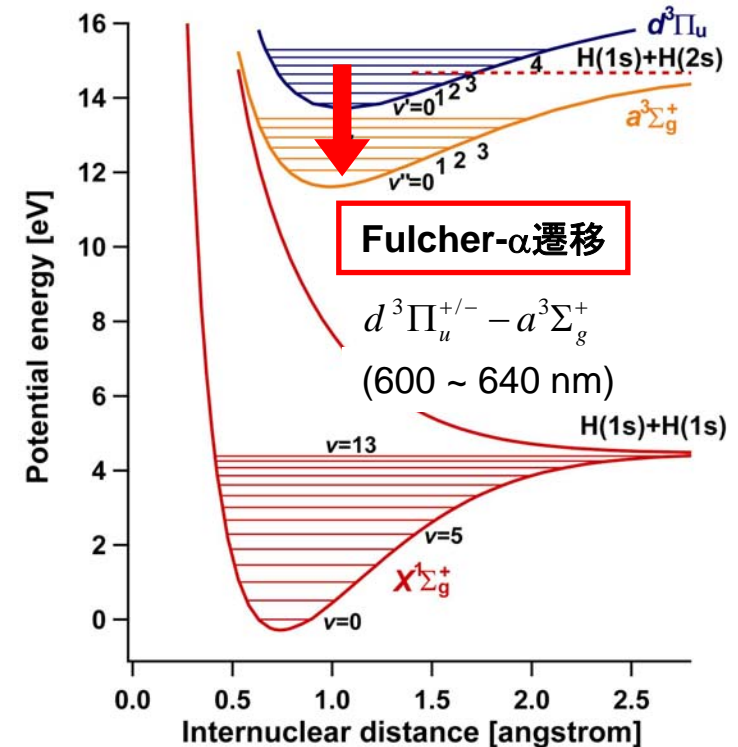
● G. H. Dieke, *et al.*
Phys. Rev. 47 (1935) 261., *Phys. Rev.* 76 (1949) 283.
J. Mol. Spec. 2 (1958) 494.

$H_2 + D_2$, $H_2 + T_2$ 条件下で HD, HT の波長を同定。
 部分的に発光線の重畳も評価。
 $D_2 + T_2$ に関してはスペクトル計測結果のみ記載。

● A. Pospieszczyk, *et al.*
to be published in J. Nucl. Mater.

JETダイバータ領域において $n_{D_2} \gg n_{T_2}$ の条件下で両者の回転温度が同程度になるとの評価。

水素分子ポテンシャル曲線



$H_2 + D_2$ 混合プラズマを用いてFulcher帯の計測を行い、混合プラズマ中の分子の動的特性を明らかにする。

ホローカソードグロー放電管

ホローカソードグロー放電プラズマを用いて
Fulcher- α 帯発光の計測を行った. ($B = 0$ T)

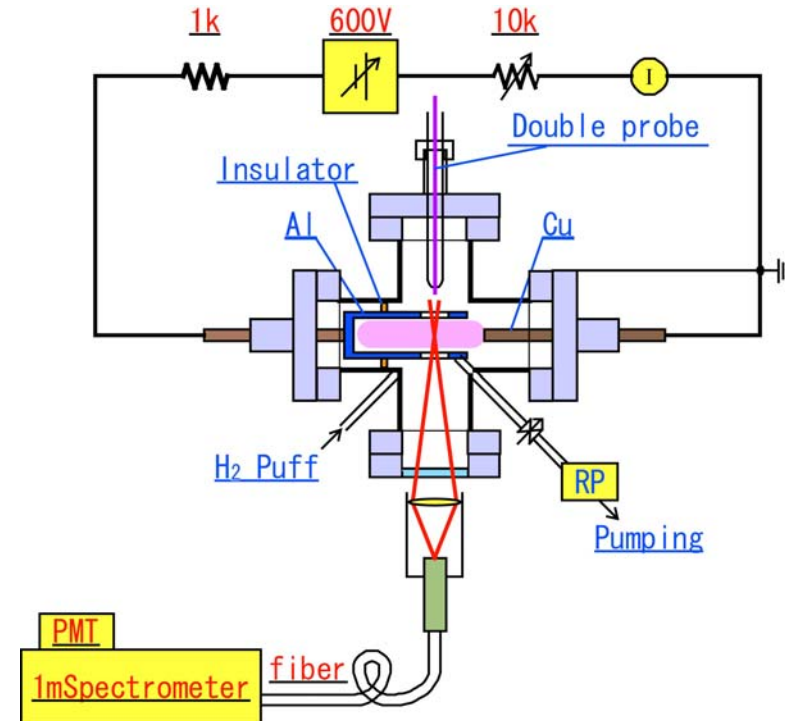
- ダブルプローブ
 ϕ 0.5 mm x 7 mm (W) (n_e, T_e)
- 分光器
 $f = 1$ m, F/8.5, 2400 Grooves/mm
- PMT (浜松ホトニクス R928)

→ 波長分解能 $\Delta\lambda_{\text{fwhm}} = \sim 0.023$ nm

プラズマパラメータ

	H ₂	D ₂	H ₂ + D ₂
V _{dis} (V)	295	314	331
I _{dis} (mA)	70	70	70
p ₀ (Pa)	13	18	22
T _e (eV)	3.1	3.7	3.1
n _e (m ⁻³)	5.4 × 10 ¹⁶	4.9 × 10 ¹⁶	5.9 × 10 ¹⁶ *

ホローカソードグロー放電管



混合プラズマ中では、シース端で各イオン種がそれぞれのBohm条件を満たすと仮定した。

*R. N. Franklin, *J. Phys. D* 33 (2000) 3186.

遷移波長の同定

● 既存のFulcher- α 帯遷移波長データ

- N. Y. Crosswhite, "The Hydrogen Molecule Wavelength Tables of G. H. Dieke" (Wiley, 1972). : (H_2)
- G. H. Dieke and R. W. Blue, *Phys. Rev.* **47** (1935) 261. : (D_2 , HD)
- R. S. Freund, *et al. J. Phys. Chem. Ref. Data* **14** (1985) 235. : (D_2)
- G. H. Dieke and F. S. Tomkins, *Phys. Rev.* **76** (1949) 283. : (T_2 , TH)
- A. F. Ruckstuhl and K. Dressler, *J. Mol. Spec.* **176** (1996) 185. : (T_2)
- *etc.*

※ TD以外はデータが存在.

● 波長データが存在しない遷移に関しては, 古典的な半経験式を用いて評価.

➡ v が大きくなると正確な値からのずれが大きくなる.

$$E_{elec} = T_e \quad \text{electronic}$$

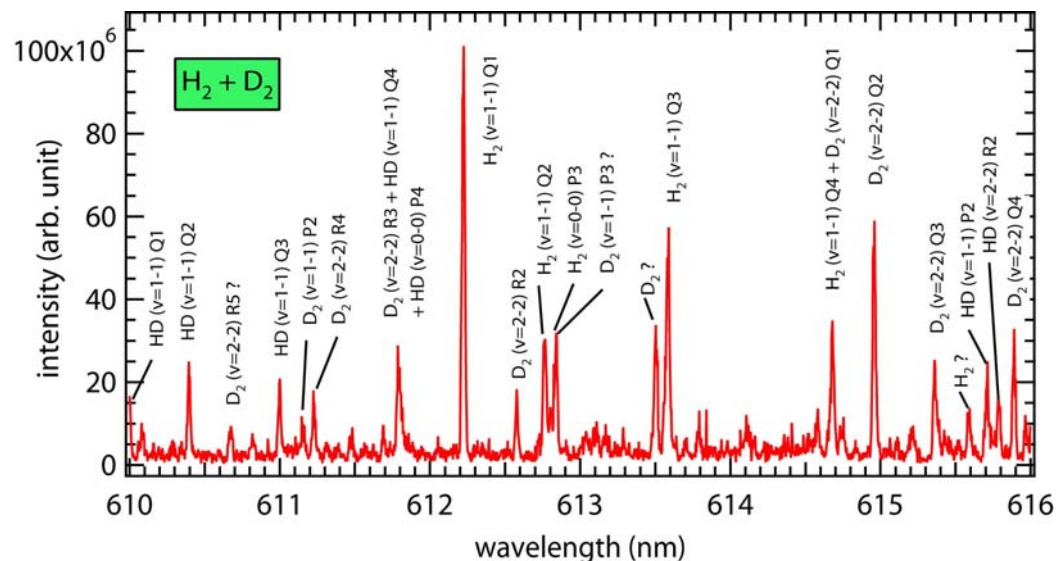
$$E_{vib} = \omega_e \left(v + 1/2 \right) - \omega_e x_e \left(v + 1/2 \right)^2 + \omega_e y_e \left(v + 1/2 \right)^3 + \dots \quad \text{vibration}$$

$$E_{rot} = BN(N+1) - DN^2(N+1)^2 + HN^3(N+1)^3 + \dots \quad \text{rotation + distortion}$$

分子定数 : NIST Chemistry Webbook (<http://webbook.nist.gov/chemistry/>)

水素・重水素混合プラズマ中のFulcher- α 帯発光スペクトル

H₂ + D₂プラズマ中のFulcher- α 帯発光スペクトル



純粋な水素や重水素放電の場合と比べて、発光線の重畳により利用可能なスペクトル数が減少している。

利用可能な
ライン数の変化

	<i>pure</i>	<i>mixture</i>
H ₂ ($v < 4$)	17	→ 12
D ₂ ($v < 5$)	20	→ 16
HD ($v < 4$)		8

利用可能な Fulcher- α 帯Q枝スペクトル
(○: 利用可能, 文字: 重畳するライン)

	H ₂	D ₂	HD
Q1 ($v=0-0$)	○	○	○
Q2	○	○	○
Q3	○	○	○
Q4	D ₂ , HD	○	D ₂ , HD
Q5	H ₂	○	
Q1 ($v=1-1$)	○	○	○
Q2	H ₂	○	○
Q3	○	○	○
Q4	D ₂ , HD	○	D ₂ , HD
Q5	H ₂	○	
Q1 ($v=2-2$)	H ₂	H ₂	○
Q2	○	○	D ₂
Q3	D ₂	○	H ₂ , D ₂
Q4	D ₂	HD	D ₂
Q5	○	○	

強磁場下でのFulcher-α帯スペクトル

核融合炉の強磁場環境では, Zeeman効果によってスペクトルの重畳が顕著になると予測される.

重水素, トリチウム混合プラズマ中で外部磁場強度 $B = 5 \text{ T}$ の場合 (ITER) のスペクトル形状を計算により評価した.

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

電子 振動 回転 スピン・軌道相互作用 Zeeman効果

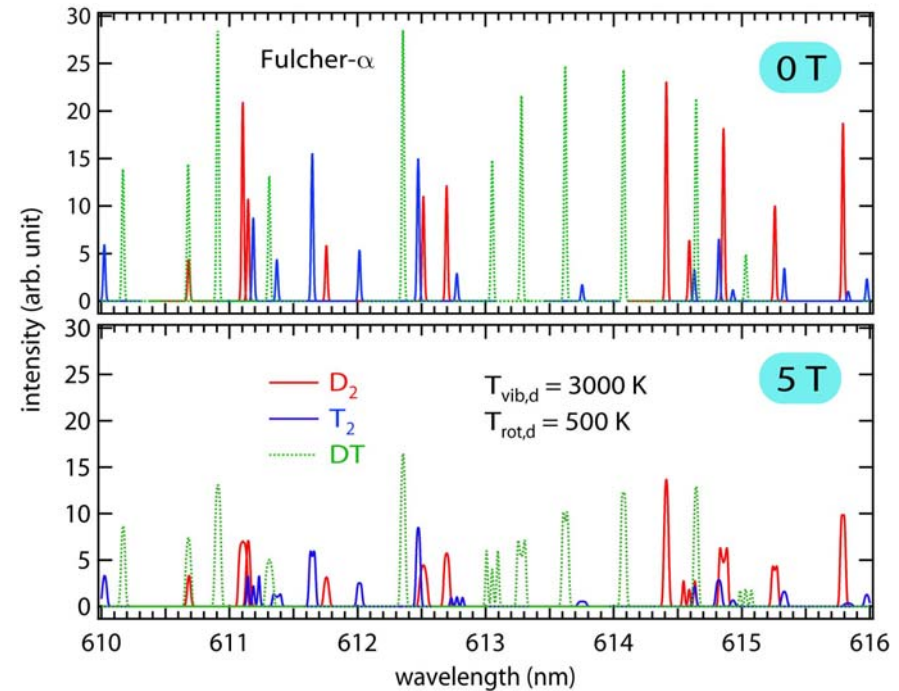
$$A_{N'N''} \propto \nu_{N'N''}^3 \left| \langle \phi' | T_q^1(\mu_e) | \phi'' \rangle \right|^2 \gamma(2N'+1)$$

FC因子 電子項 HL因子

摂動計算によりZeeman効果を評価*

* T. Shikama, et al. submitted to Phys. Plasmas.

計算により評価した $D_2 + T_2$ 混合プラズマ中のFulcher-α帯スペクトル
($T_{vib,d} = 3000 \text{ K}$, $T_{rot,d} = 500 \text{ K}$ を仮定)



→ Zeeman分裂によりスペクトルの重畳がさらに増加. 精密なスペクトルの同定が要求される.

コロナモデル

計測したスペクトル発光強度から、電子基底準位の振動回転温度の評価を行った。

低密度プラズマでは、コロナモデルを用いてFulcher上準位 ($d^3\Pi_u^-$) の占有密度を評価可能。

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

↑ 電子衝突励起レート係数 ↑ 自然放出係数

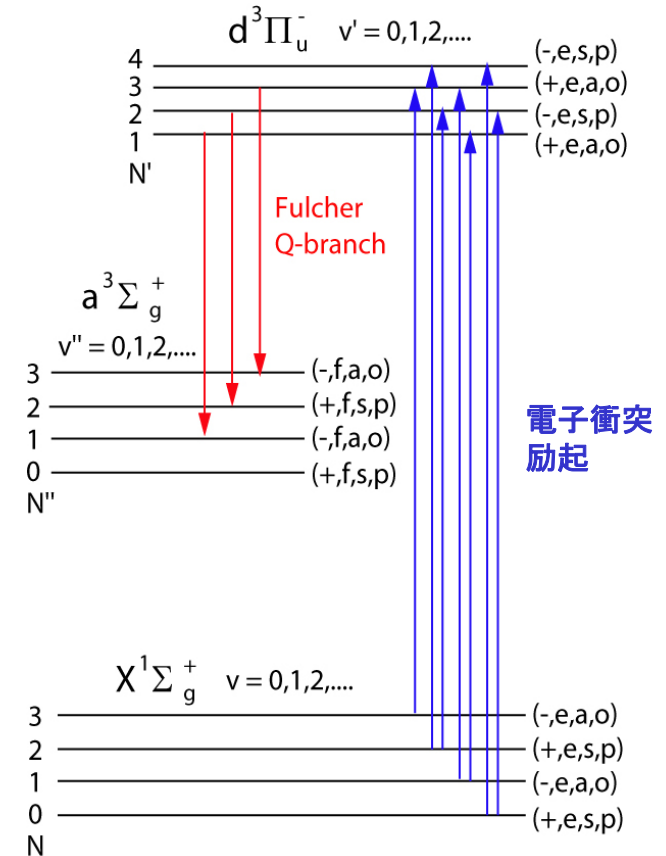
電子基底準位 ($X^1\Sigma_g^+$) に対してBoltzmann分布を仮定する。

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

g_{as} : 原子核スピンの統計重率

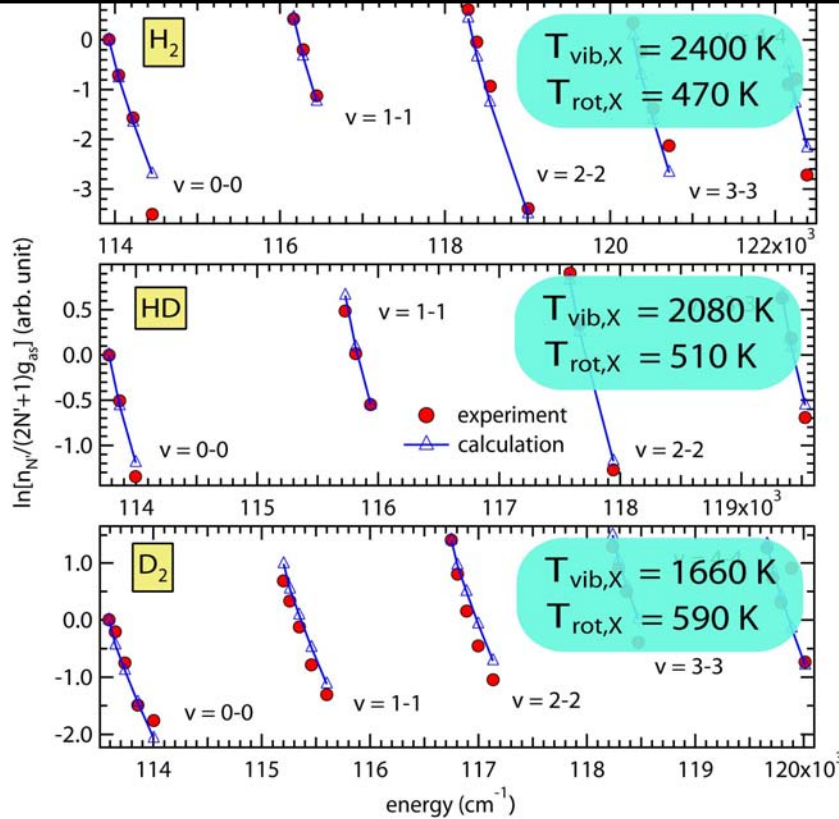
$T_{vib,X}$ 及び $T_{rot,X}$ をパラメータとして実験から求まる $n_{dv'N'}$ をフィッティングする。

Fulcher- α 遷移に関連する水素分子のエネルギー準位



Boltzmannプロット法による振動回転温度評価

全てのラインに対して χ^2 平均を最小にするフィッティング。
 → ライン数の減少による影響を受けにくい。



Pure H₂ and D₂

	H ₂	D ₂
$T_{\text{vib},X}$	2400 K	1810 K
$T_{\text{rot},X}$	410 K	660 K

分子の内部エネルギー

$$E_{\text{molecule}} \approx T_e + \underbrace{\omega_e \left(v + \frac{1}{2} \right)}_{\text{振動}} + \underbrace{B_e N(N+1)}_{\text{回転}} + \dots$$

振動(ω_e), 回転(B_e)の分子定数で規格化した振動回転温度 ↓

	H ₂	HD	D ₂
$T_{\text{vib},X}/\omega_e$ ratio	1.0	0.94	1.0
$T_{\text{rot},X}/B_e$ ratio	1.0	1.5	2.5

● $T_{\text{vib},X}$ の差は分子質量の違いに起因。

● 一般に、分子間衝突が多い系では、並進-回転が同じ温度を持つ。

$T_{\text{rot},X} > T_{\text{trans}}$ (並進) ~ T_{surface} (壁温度)

並進-回転間が緩和に達していない可能性？

まとめ

- 水素, 重水素混合プラズマ中において Fulcher- α 帯発光を計測した.

- ホローカソードグロー放電管を用いて, H_2 , D_2 , $H_2 + D_2$ の放電条件に関して比較を行った.
- 混合プラズマ中では, 発光線の重畳により解析に利用可能なライン数が減少してしまうことが確認された.
- 核融合炉で想定される強磁場環境では, Zeeman分裂により重畳が顕著になることが計算によって示唆された.

→ ライン数の減少による影響を受けにくい解析手法を用いることが必要.
(重畳したラインのクロスチェックも可能.)

- 計測した Fulcher- α 帯スペクトルより, 振動回転温度の評価を行った.

- $T_{\text{vib},X}$ の分子種に応じた差は, 分子質量の違い (分子定数の違い) に起因している.
- $T_{\text{rot},X}$ は壁温度と比較して高い値を示しており, 回転-並進温度間が平衡に達していない可能性も考えられる (初期結果).

→ 電子衝突, 表面再結合による振動回転励起過程の詳細な検討が必要.

振動回転励起過程

振動回転励起過程としては、プラズマ中での電子衝突や表面再結合が考えられる。

振動励起過程

$$T_{\text{vib}(\text{H}_2)}/\omega_e = T_{\text{vib}(\text{HD})}/\omega_e = T_{\text{vib}(\text{D}_2)}/\omega_e$$

- 電子衝突励起： $\text{H}_2(v) + e^- \rightarrow \text{H}_2(v') + e^-$
- 解離性電子付着： $\text{H}_2(v) + e^- \rightarrow \text{H}_2^- \rightarrow \text{H}_2(v') + e^-$
- B,C準位からの再分配： $\text{H}_2(v) + e^- \rightarrow \text{H}_2(\text{B}^1\Sigma_u, \text{C}^1\Pi_u) + e^- \rightarrow \text{H}_2(v') + e^-$
→ $\text{H}_2, \text{HD}, \text{D}_2$ に対して ω_e に比例?
- Eley-Rideal反応： $\text{H}(\text{脱離}) + \text{H}(\text{脱離}) \rightarrow \text{H}_2(v')$ (壁温度の数倍程度の振動温度を生じる)
→ 分子によって得るエネルギーが異なる(影響小?)。

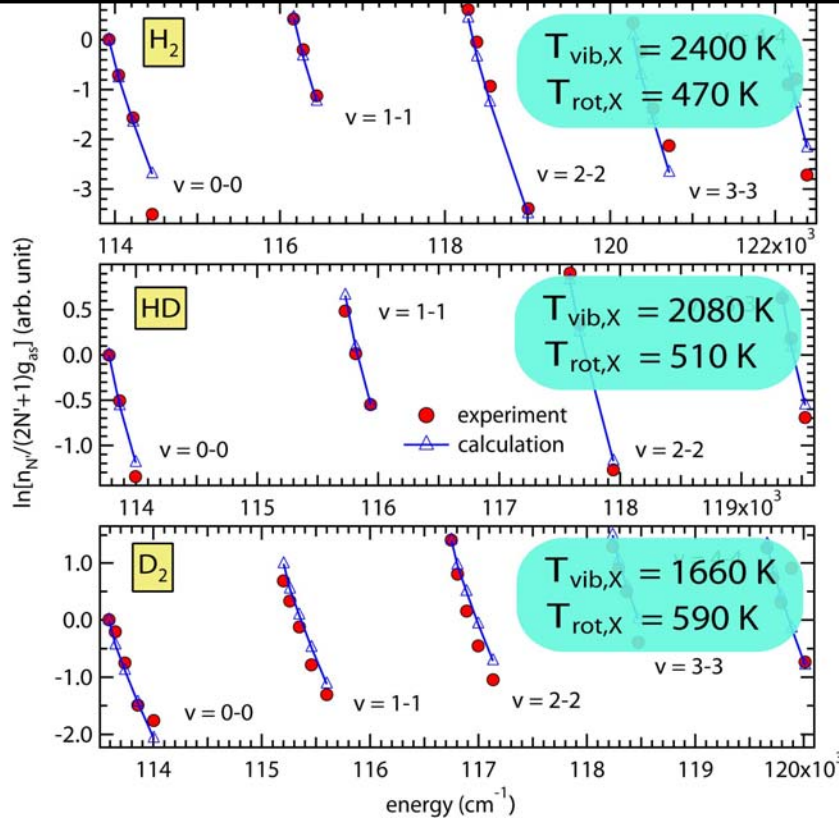
回転励起過程

$$T_{\text{rot}(\text{H}_2)}/B_e < T_{\text{rot}(\text{HD})}/B_e < T_{\text{rot}(\text{D}_2)}/B_e, \quad T_{\text{rot}} > T_{\text{trans}} \sim T_{\text{surface}}$$

- 推定される壁温度に対して有意に高い回転温度が観測されており、並進-回転温度間が緩和に達していない可能性も考えられる。

Boltzmannプロット法による振動回転温度評価

全てのラインに対して χ^2 平均を最小にするフィッティング。
 → ライン数の減少による影響を受けにくい。



Pure H₂ and D₂

	H ₂	D ₂
T _{vib,X}	2400 K	1810 K
T _{rot,X}	410 K	660 K

分子の内部エネルギー

$$E_{molecule} \approx T_e + \underbrace{\omega_e \left(v + \frac{1}{2} \right)}_{\text{振動}} + \underbrace{B_e N(N+1)}_{\text{回転}} + \dots$$

振動(ω_e), 回転(B_e)の分子定数で規格化した振動回転温度 ↓

	H ₂	HD	D ₂
T _{vib,X} / ω_e ratio	1.0	0.94	1.0
T _{rot,X} /B _e ratio	1.0	1.5	2.5

● T_{vib,X}の差は分子質量の違いに起因。

● 一般に、分子間衝突が多い系では、並進-回転が同じ温度を持つ。

T_{rot,X} > T_{trans}(並進) ~ T_{surface}(壁温度)

並進-回転間が緩和に達していない可能性？