

ダイバータから放出する水素分子の振動・回転状態を 発光分光から推定できるか

石原啓基¹, Kuzmin Arseniy¹, 小林政弘², 澤田圭司³, 四竈泰一¹, 蓮尾昌裕¹,
齋藤誠紀⁴, 中村浩章², 門信一郎⁵

¹京大院工, ²核融合研, ³信州大工, ⁴山形大院理工, ⁵京大エネ研

LHDのダイバータを見込む視線で複数の水素放電プラズマからの発光を、400-800 nmの波長範囲、約0.1 nmの波長分解能で分光計測した。600-640 nmの範囲に観測された水素分子Fulcher- α 帯の各振動・回転状態の発光線の中で、信号ノイズ比が大きく、スペクトル分離が可能なものに対して、ガウス関数によるフィットを行い、発光強度（スペクトルの面積）を求めた。解析に使用した中でスペクトル分離が出来た例と最も信号ノイズ比が小さい例をそれぞれ図1 (a) (b) に示す。

求めた発光強度からその自然放出係数と光子エネルギーを用いて発光上準位の相対密度分布を求めた。統計重率で除して得られる回転状態密度の回転エネルギー依存性を図2に示す。なお、縦軸は対数にとり、ボルツマンプロットとした。図2から約0.05 eVを境に傾きの変化が見られたので、二つの傾きすなわち二つの回転温度のボルツマン分布の和を仮定してフィッティングを行った。その結果を図2中の点線を示す。

二温度ボルツマンフィッティングから求まる発光上準位の二つの回転温度を二倍したものを基底状態の回転温度とし、振動温度は基底準位の振動状態密度はボルツマン分布に従うとして ($v < 3$), 基底準位から発光上準位への振動遷移確率と発光上準位の振動状態密度から求めた。基底水素分子の振動・回転状態の相対密度分布を表す式は

$$\frac{n_{XvN}}{(2N+1)g_{as}^N} = \left\{ (1-a^v) \exp\left(-\frac{E_{\text{rot}}^{Xv}(N)}{kT_{\text{rot},1}^{Xv}}\right) + a^v \exp\left(-\frac{E_{\text{rot}}^{Xv}(N)}{kT_{\text{rot},2}^{Xv}}\right) \right\} \exp\left(-\frac{E_{\text{vib}}^X(v)}{kT_{\text{vib}}^X}\right) \quad (1)$$

と書ける。ここで、 k はボルツマン定数、 $E_{\text{vib}}^X(v)$ は振動量子数 v の振動エネルギー、 $T_{\text{vib}}^X = 8000 \pm 300$ Kは振動温度、 $E_{\text{rot}}^{Xv}(N)$ は振動量子数が v のときの回転量子数 N の回転エネルギー、 $T_{\text{rot},1}^{Xv=0} = 460 \pm 40$ Kは低回転温度、 $T_{\text{rot},2}^{Xv=0} = 3000 \pm 100$ Kは高回転温度、 $a^{v=0,1} = 0.10 \pm 0.01$, $a^{v=2} = 0.21 \pm 0.02$ である。電子温度15 eV, 電子密度 10^{19} m^{-3} とし、電子と基底水素分子の速度分布がマクスウェル速度分布に従うと仮定すると、水素分子の電子衝突による $N=0 \rightarrow 2$ 回転励起の平均自由行程は約 $8 \times 10^{-3} \text{ m}$ となり、電子衝突による回転励起を無視できないためダイバータから放出される水素分子の振動・回転状態の推定は難しい。

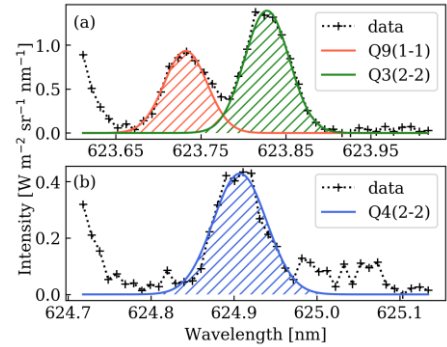


図1 解析に使用した発光スペクトルの例。(a) 振動遷移(1-1)におけるQ枝 $N=9$ の発光線と振動遷移(2-2)におけるQ枝 $N=3$ の発光線, (b) 振動遷移(2-2)におけるQ枝 $N=4$ の発光線。

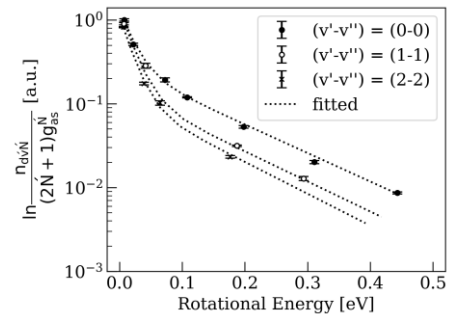


図2 発光上準位の振動・回転状態密度分布とその二温度ボルツマン分布の和によるフィッティング結果