

28 GHz ジャイロトロンを用いた ミリ波大気放電実験



○田畑邦佳，中村友祐，小紫公也 (東京大学)
假家強，南龍太郎 (筑波大学)



概要

1. 研究背景 – マイクロ波ロケット

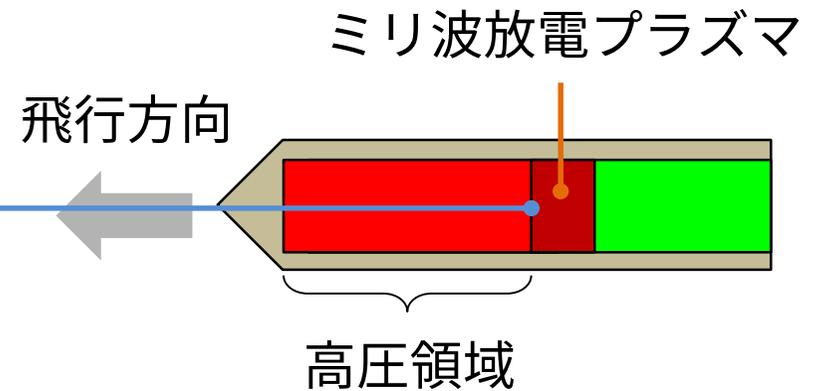
機体設計や軌道解析
を行うには

← 推力を正しく再現できるモデルが必要

推進器内部での圧力上昇

放電面背後の状態の詳細な調査が必要

ミリ波放電プラズマにより
吸い込んだ空気を加熱





概要

1. 研究背景 – マイクロ波ロケット

機体設計や軌道解析
を行うには

← 推力を正しく再現できるモデルが必要

推進器内部での圧力上昇

放電面背後の状態の詳細な調査が必要

ミリ波放電プラズマにより
吸い込んだ空気を加熱

2. 実験

筑波大学の大型電力ミリ波発振器ジャイロトロンを用いてプラズマを生成。
放電面背後の中性粒子温度を測定

3. 結果

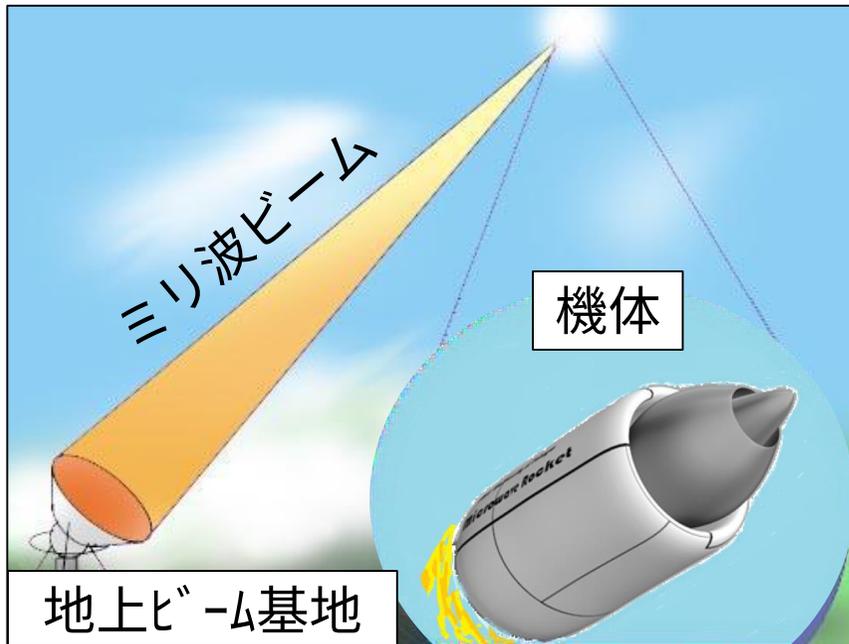
- 中性粒子温度の非平衡性
- 構造形成による非一様加熱

4. 結論

を考慮した推力の見積りが必要なのではないか



マイクロ波ロケットによるコスト削減



109 g機体の打ち上げ
デモンストレーション

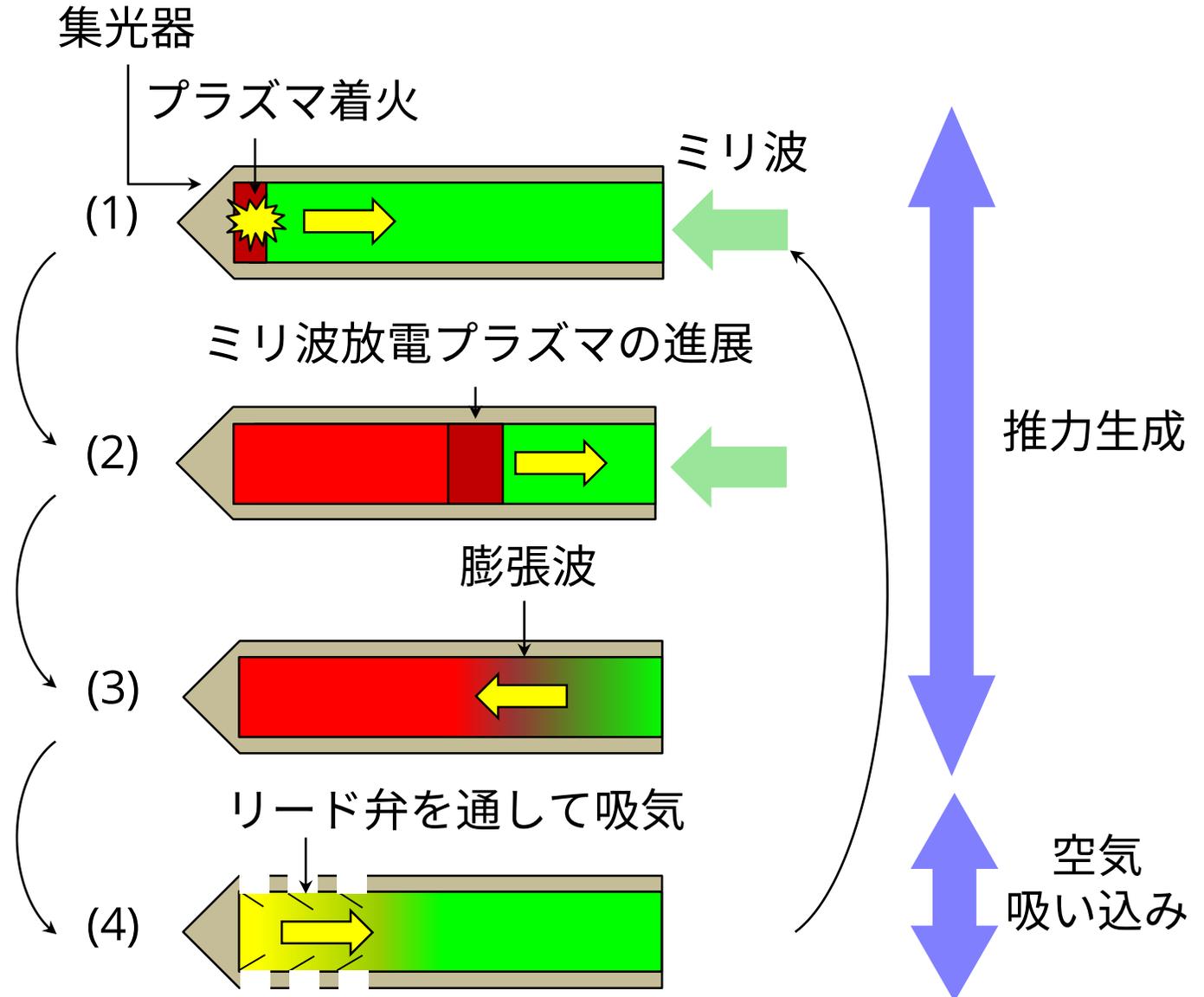
ジャイロトロン ©QST



打ち上げコスト
1/100

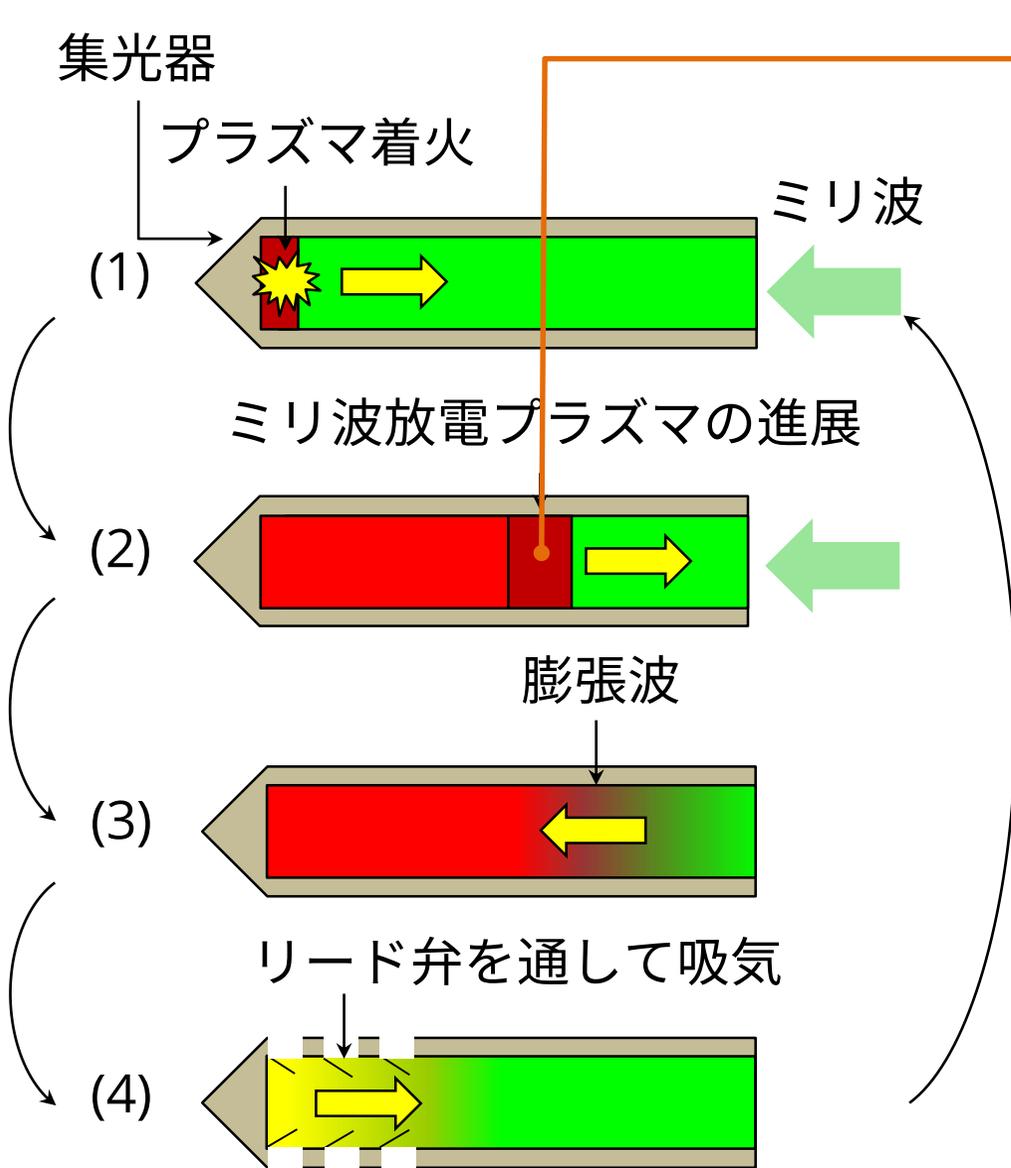


ミリ波放電による圧力上昇を用いた推力生成





ミリ波放電による圧力上昇を用いた推力生成



ミリ波放電プラズマ背後の
圧力上昇が推力に重要
~~~~~  
↑  
重粒子の並進温度に由来  
~~~~~

これまでの見積り

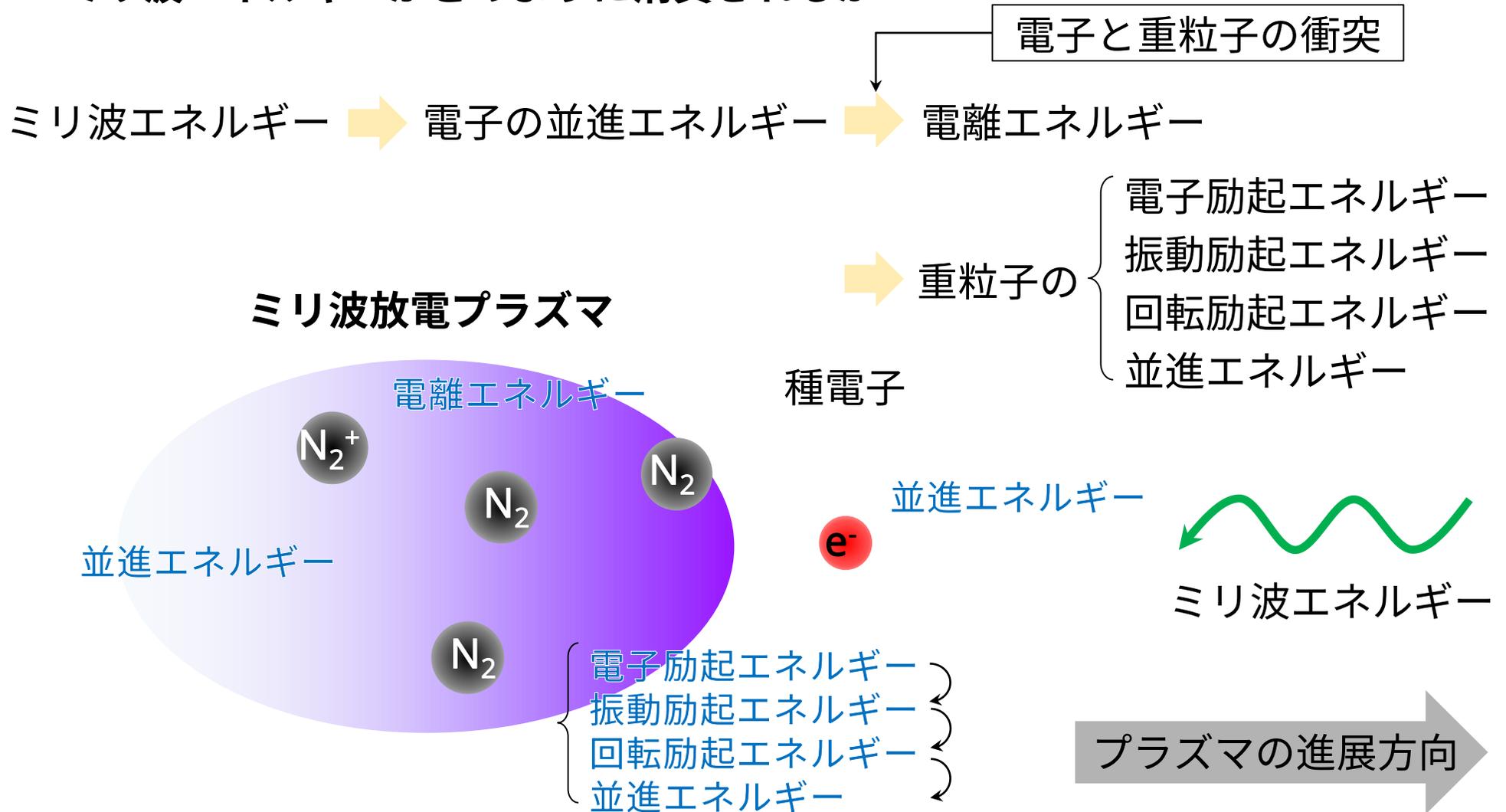
- ✓ 放電面背後で、中性粒子の振動・回転・並進温度が熱平衡を保ちながら上昇することを仮定

↓
推力見積りに誤差



実在気体における様々なエネルギーモード

■ ミリ波エネルギーがどのように消費されるか

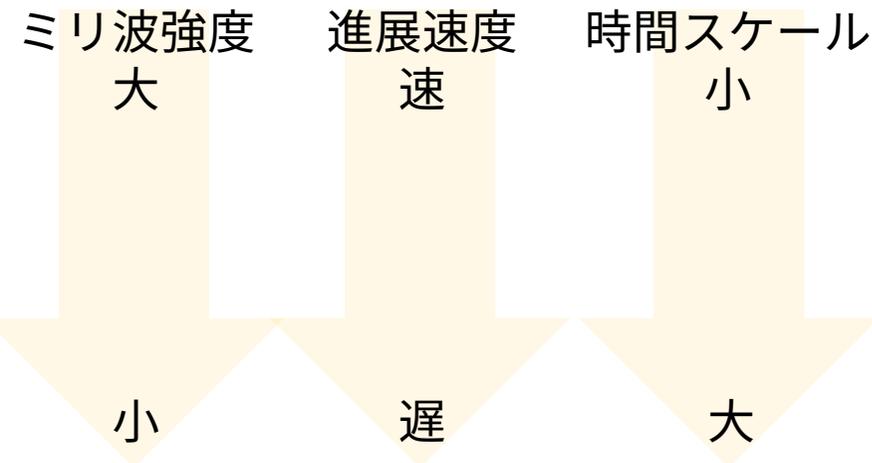




予想するプラズマの温度モデル

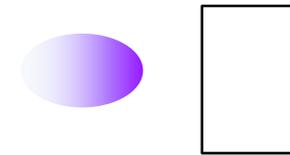
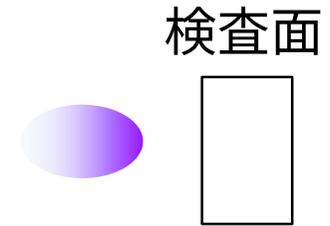
- ミリ波強度 S (W/m^2) が変化すると...

- 電離波面の進展速度 U (S) が変化
- プラズマにおける時間スケールが変化



電離波面の移動
~~~~~  
放電が進む領域のこと  
※粒子が動いているわけ  
ではない

滞在時間が短い



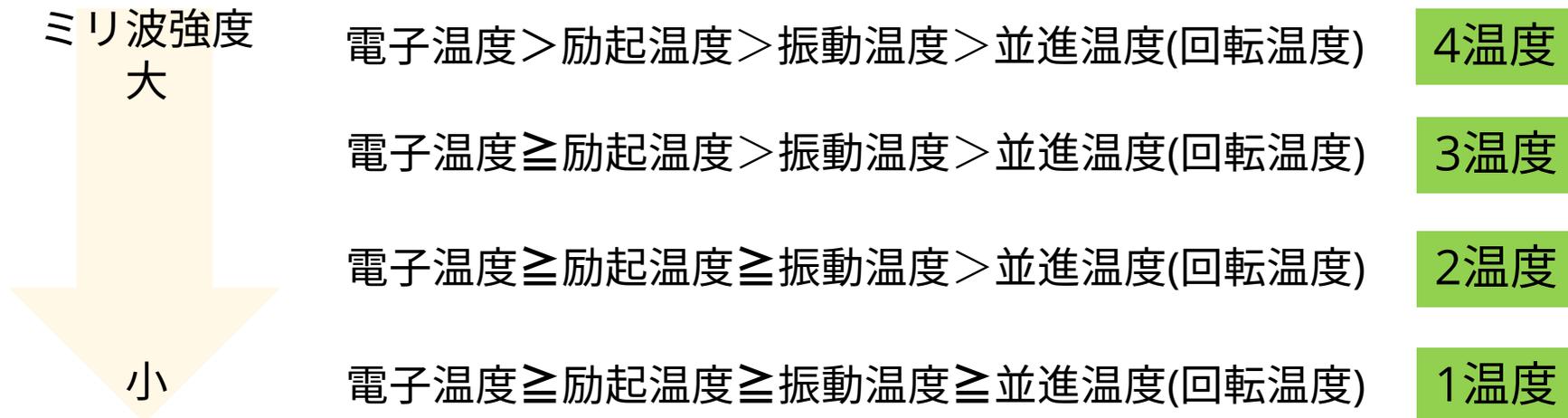
滞在時間が長い



# 予想するプラズマの温度モデル

## ● ミリ波強度 $S$ が変化すると...

- 電離波面の進展速度  $U(S)$  が変化
- プラズマ領域におけるスケール時間が変化

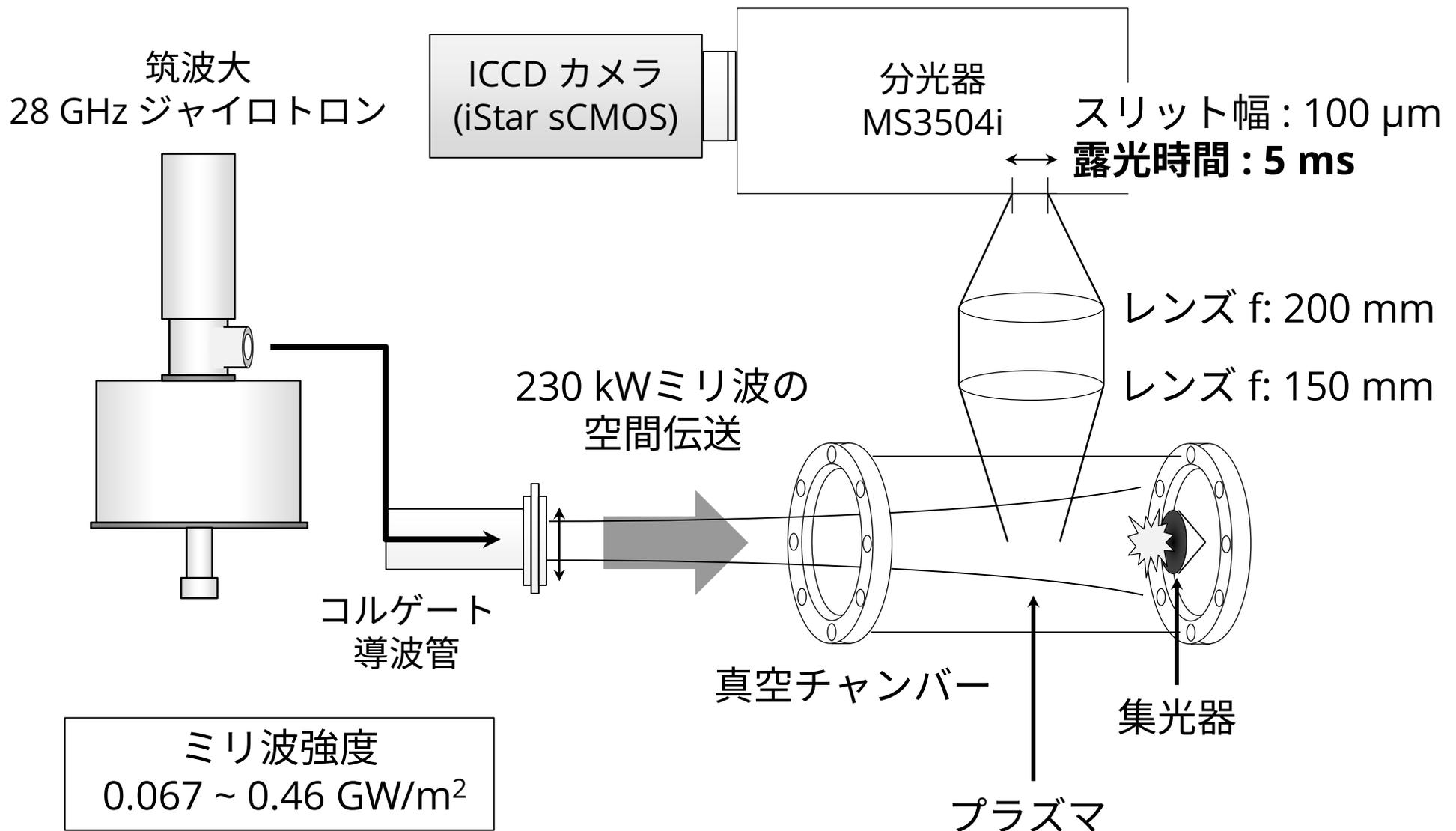


## ■ 研究目的

電子励起温度，振動励起温度，回転励起温度（ $\equiv$  並進温度）を  
発光分光法により測定し，温度モデルを検討する．

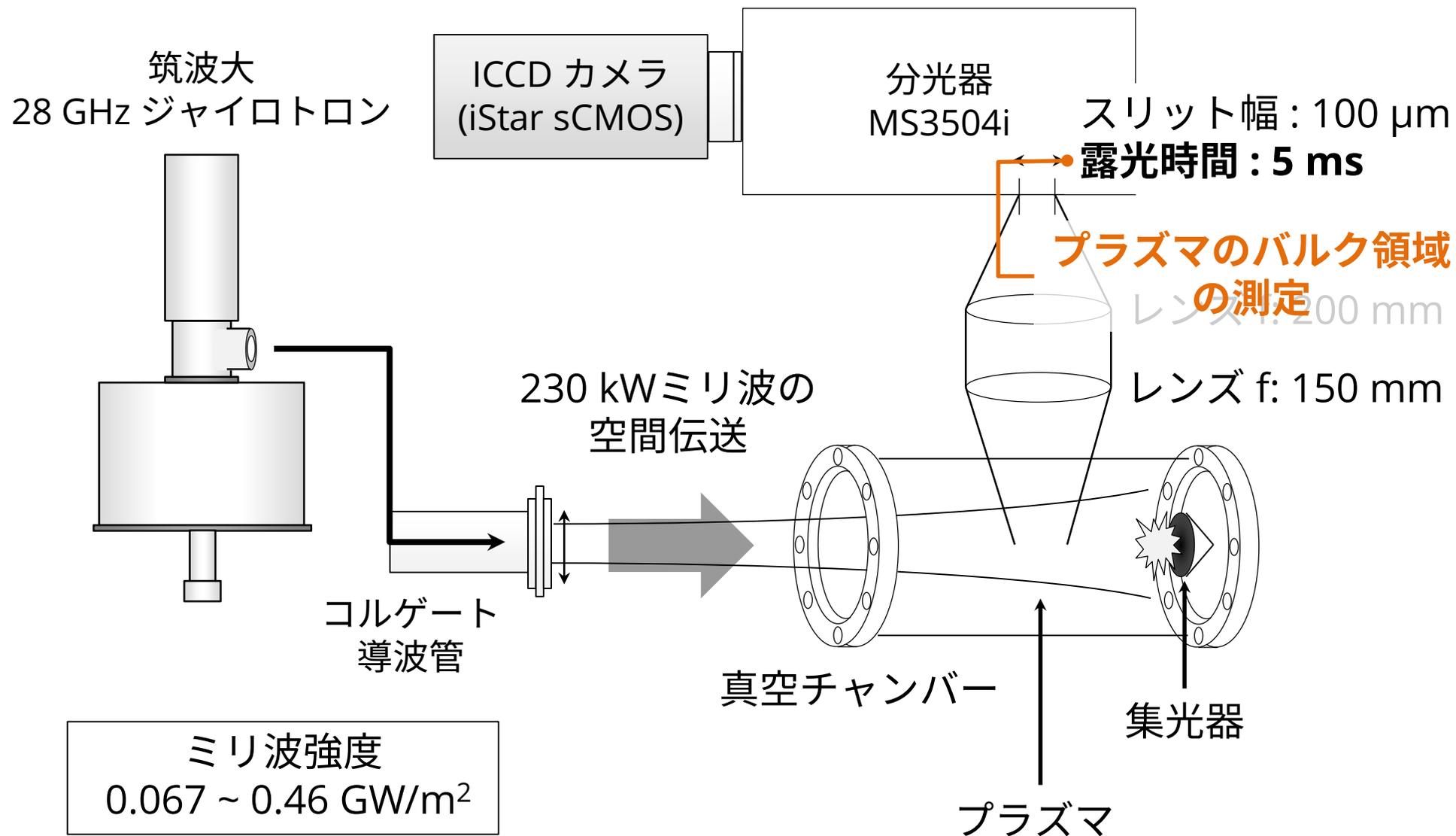


# 実験セットアップ ← 発光分光法





# 実験セットアップ ← 発光分光法





# 電子励起温度の解析 → シュタルク広がり

## ● 電子励起温度

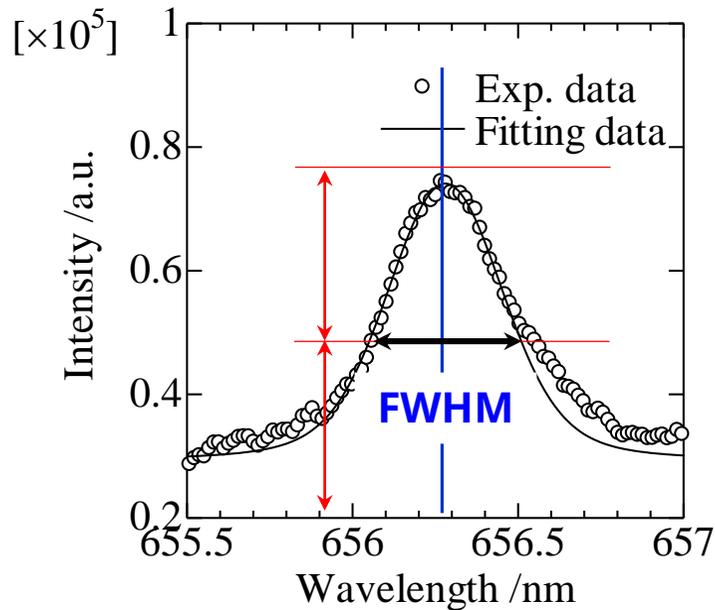
← サハの平衡式

$$\frac{n_+ n_e}{n_N} = \frac{2g_+}{g_n} \left( \frac{2\pi m_e k_B T_{exc}}{h^2} \right) \exp\left( -\frac{eV_i}{k_B T_{exc}} \right)$$

電子数密度 が必要

電子励起温度

↳ H $\alpha$  バルマーラインのシュタルク広がりより計測.



$$n_e = 10^{23} \cdot \left( \frac{\text{FWHM}}{1.098} \right)^{1.47135}$$

↳  $1.0 \times 10^{22} \sim 2.5 \times 10^{22} / \text{m}^{-3}$   
と求まった.

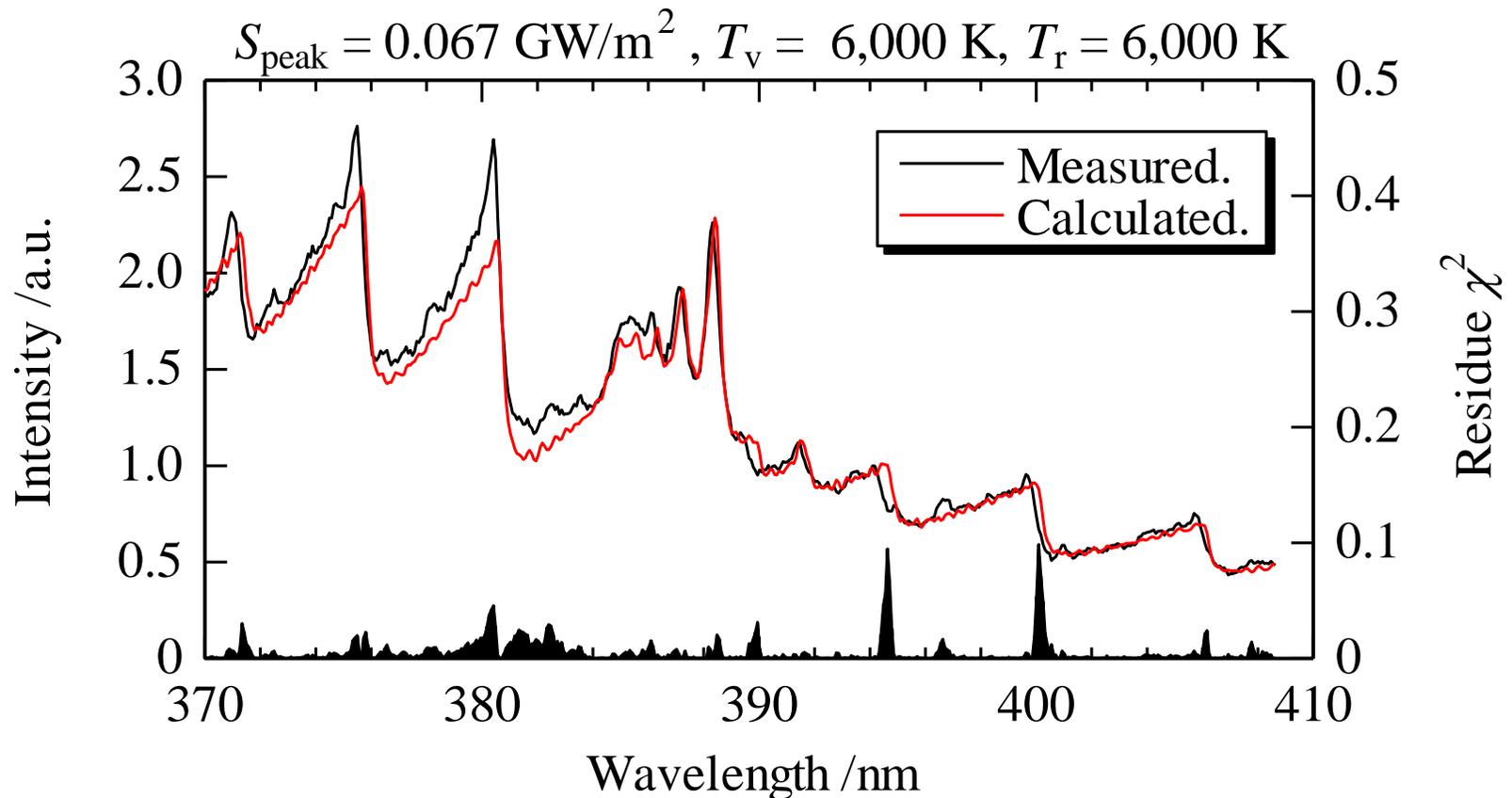


# 振動・回転温度の解析 → N<sub>2</sub>バンドスペクトル

## ● 振動温度，回転温度

測定波長域： 370 – 410 nm

解析に用いた発光： 窒素分子の励起発光バンドスペクトル



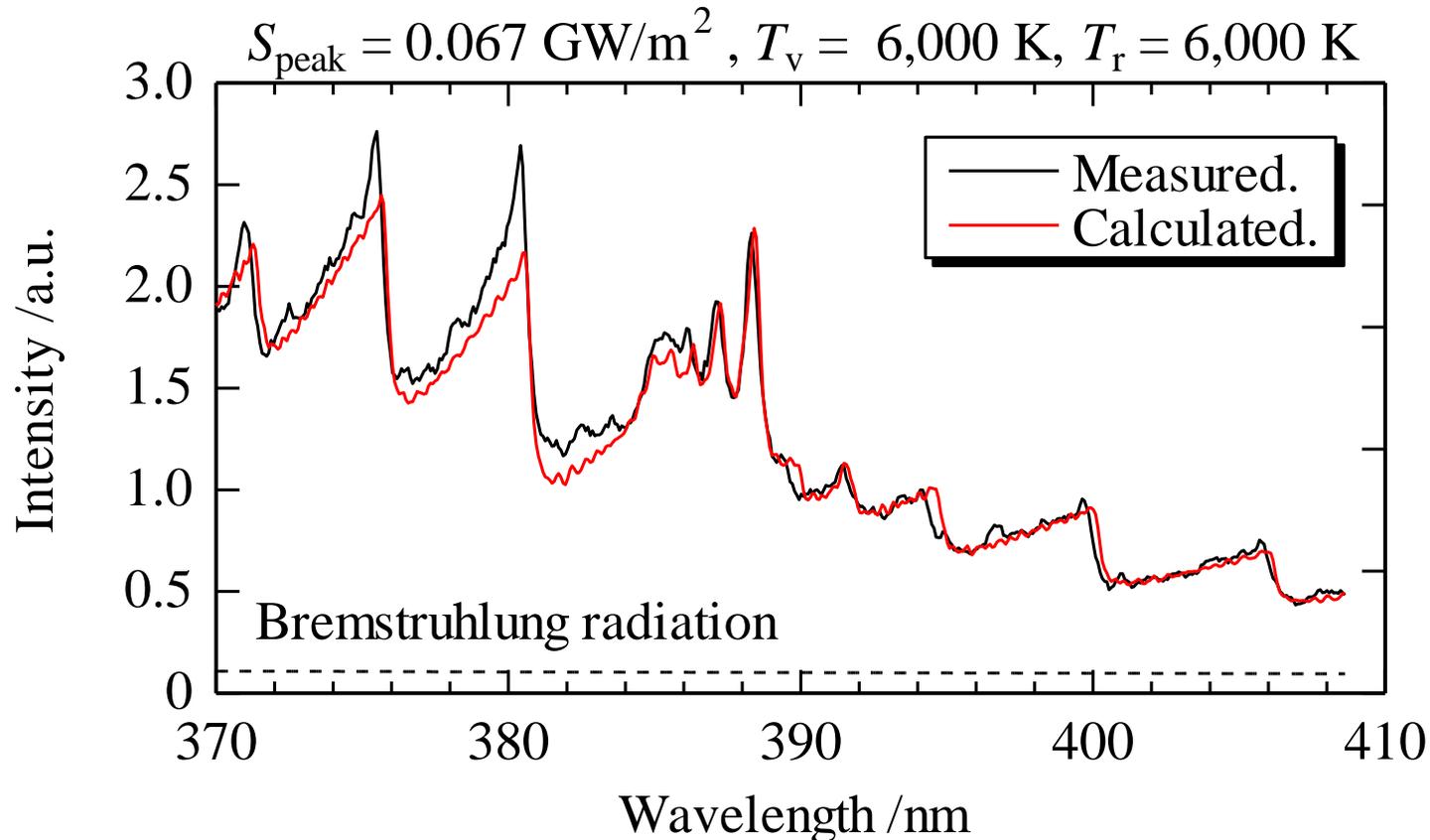


# 振動・回転温度の解析 → N<sub>2</sub>バンドスペクトル

## ● 振動温度，回転温度

測定波長域： 370 – 410 nm

解析に用いた発光： 窒素分子の励起発光バンドスペクトル



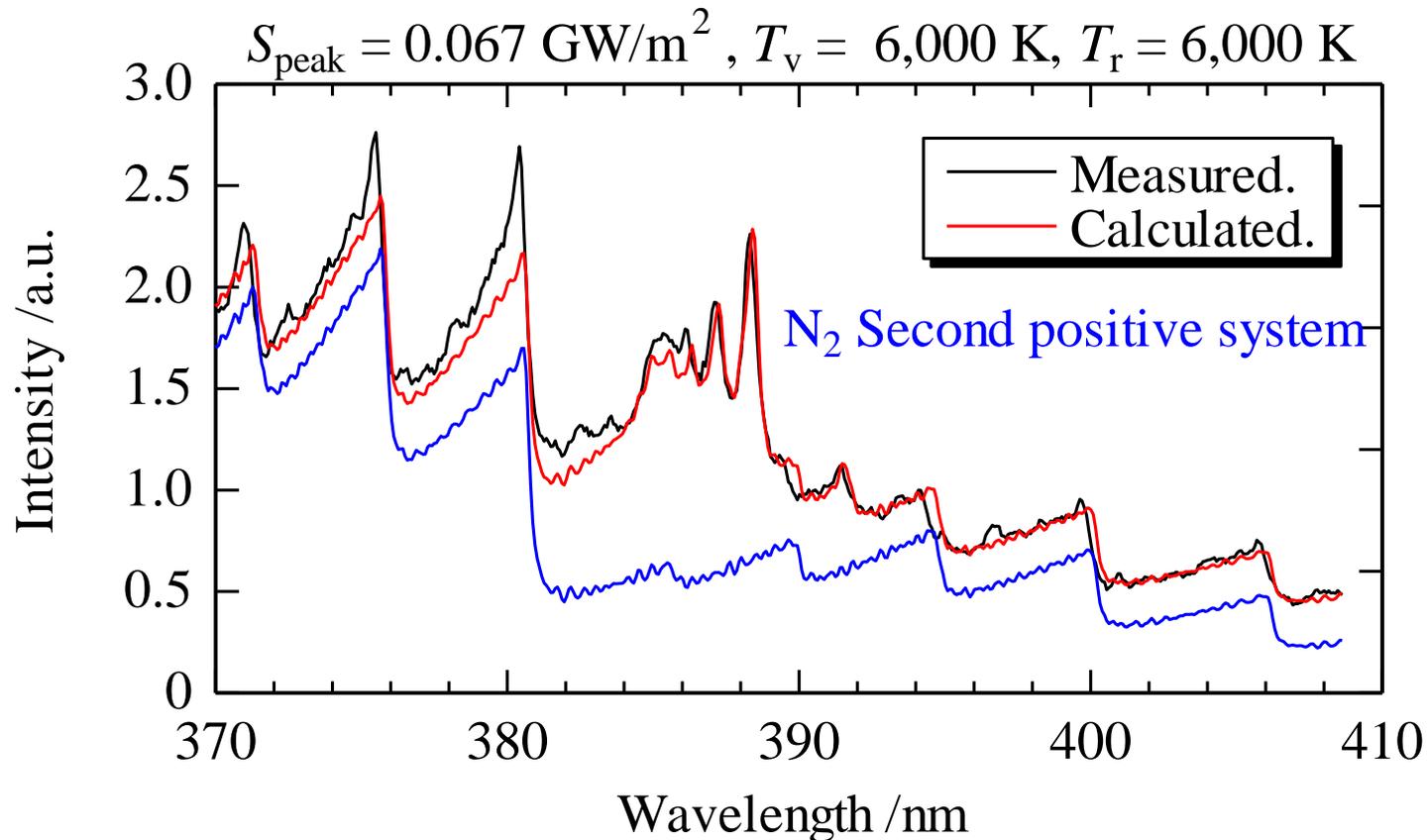


# 振動・回転温度の解析 → N<sub>2</sub>バンドスペクトル

## ● 振動温度，回転温度

測定波長域： 370 – 410 nm

解析に用いた発光： 窒素分子の励起発光バンドスペクトル



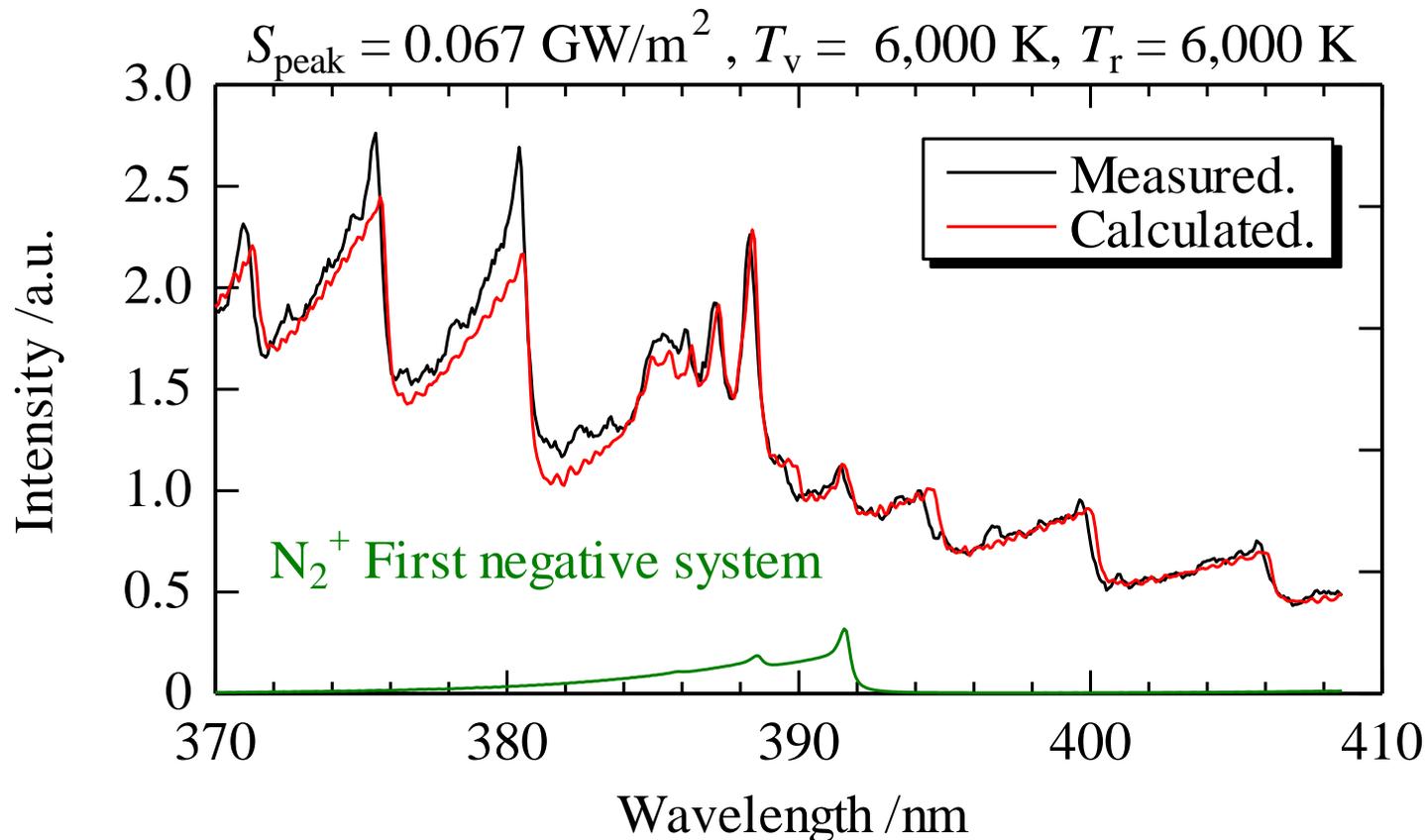


# 振動・回転温度の解析 → N<sub>2</sub>バンドスペクトル

## ● 振動温度，回転温度

測定波長域： 370 – 410 nm

解析に用いた発光： 窒素分子の励起発光バンドスペクトル



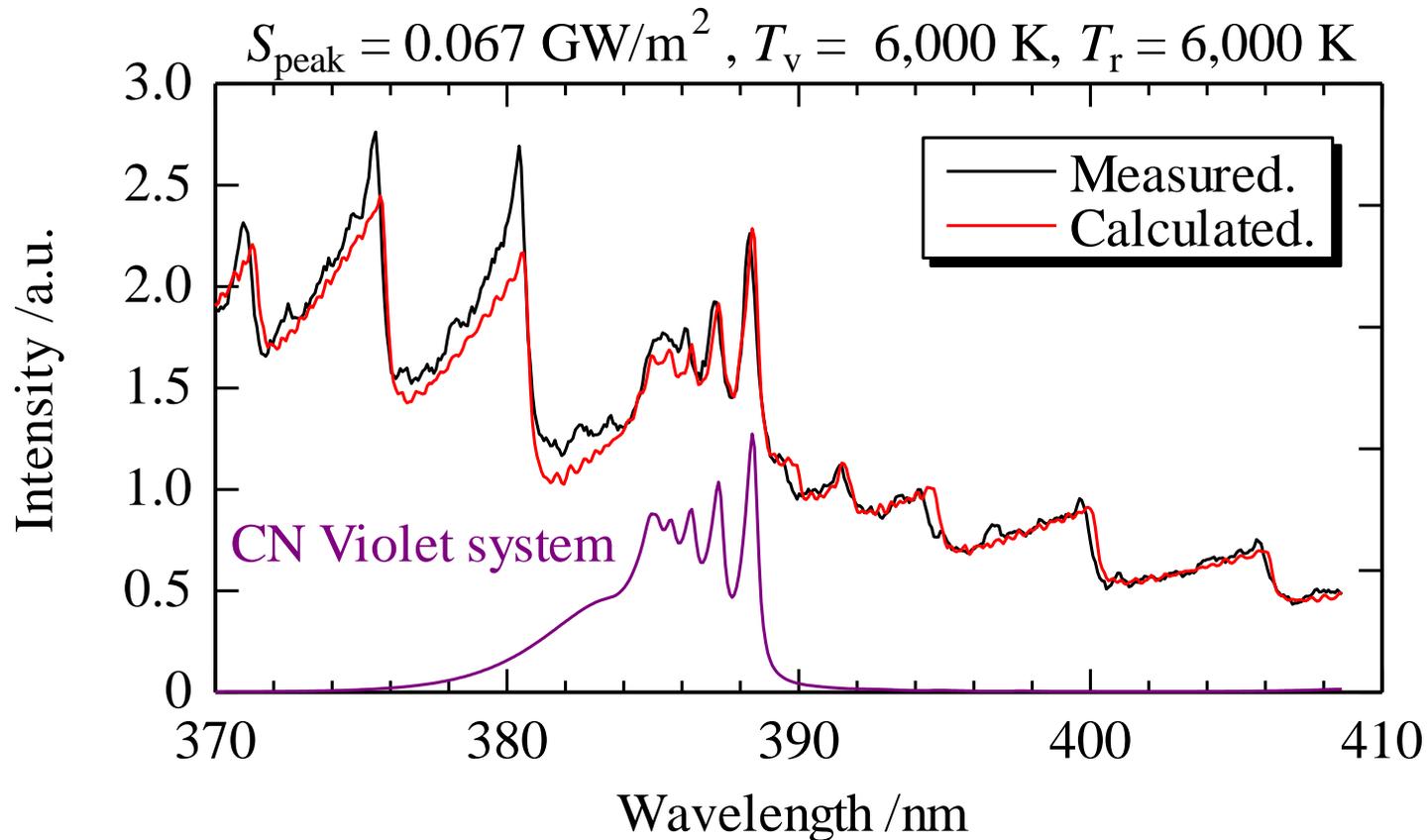


# 振動・回転温度の解析 → N<sub>2</sub>バンドスペクトル

## ● 振動温度，回転温度

測定波長域： 370 – 410 nm

解析に用いた発光： 窒素分子の励起発光バンドスペクトル

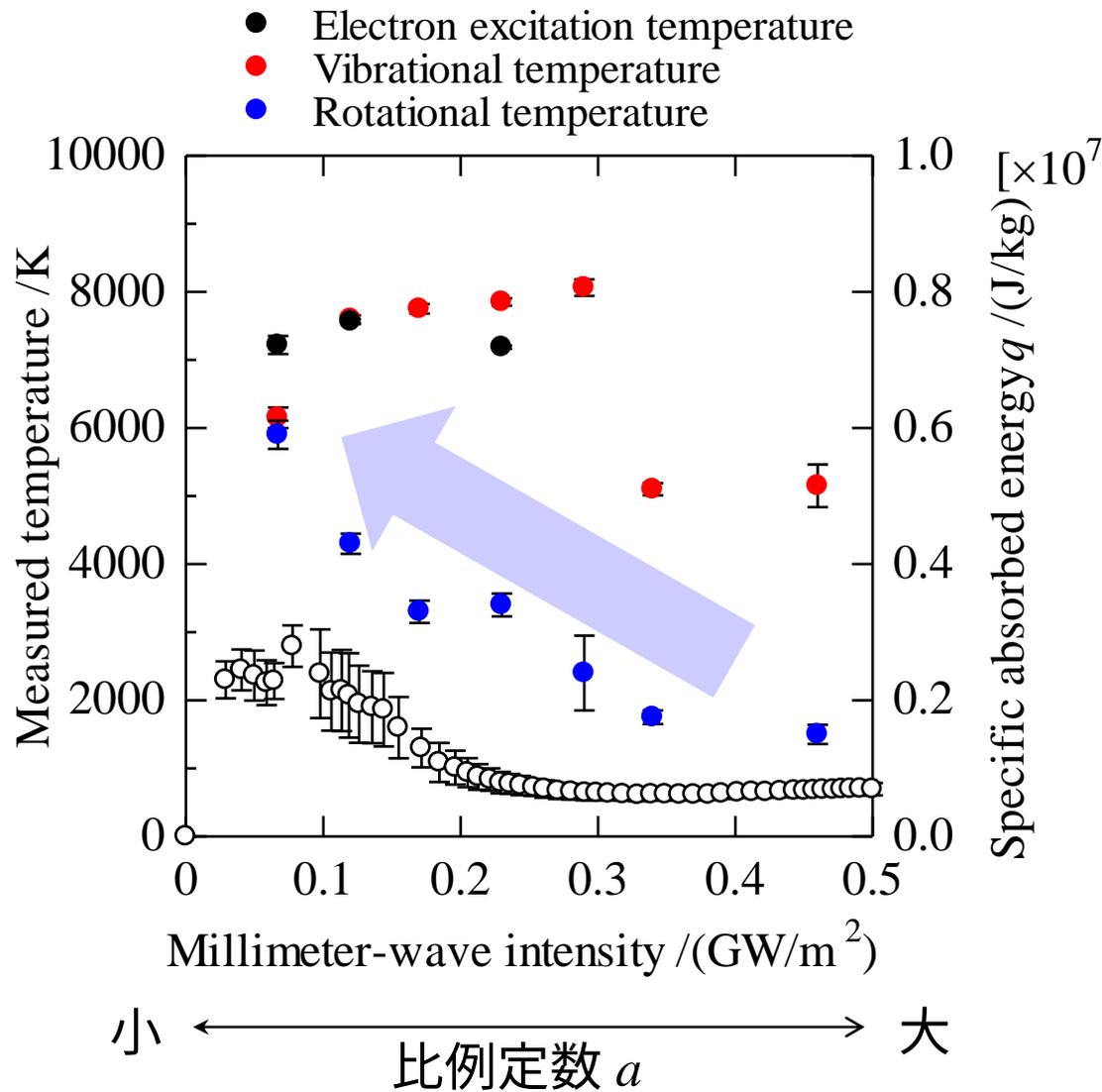


# 実験結果，考察

---



# 計測された電子励起，振動，回転温度



ミリ波投入エネルギー  
 $q$  / (J/kg)

$$q = \frac{S}{\rho \cdot U_{\text{ioniz}}(S)}$$

$S$  : ミリ波強度 (W/m<sup>2</sup>)

$\rho$  : 中性粒子密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$U_{\text{ioniz}}$  : 電離波面進展速度 (m/s)

比例定数

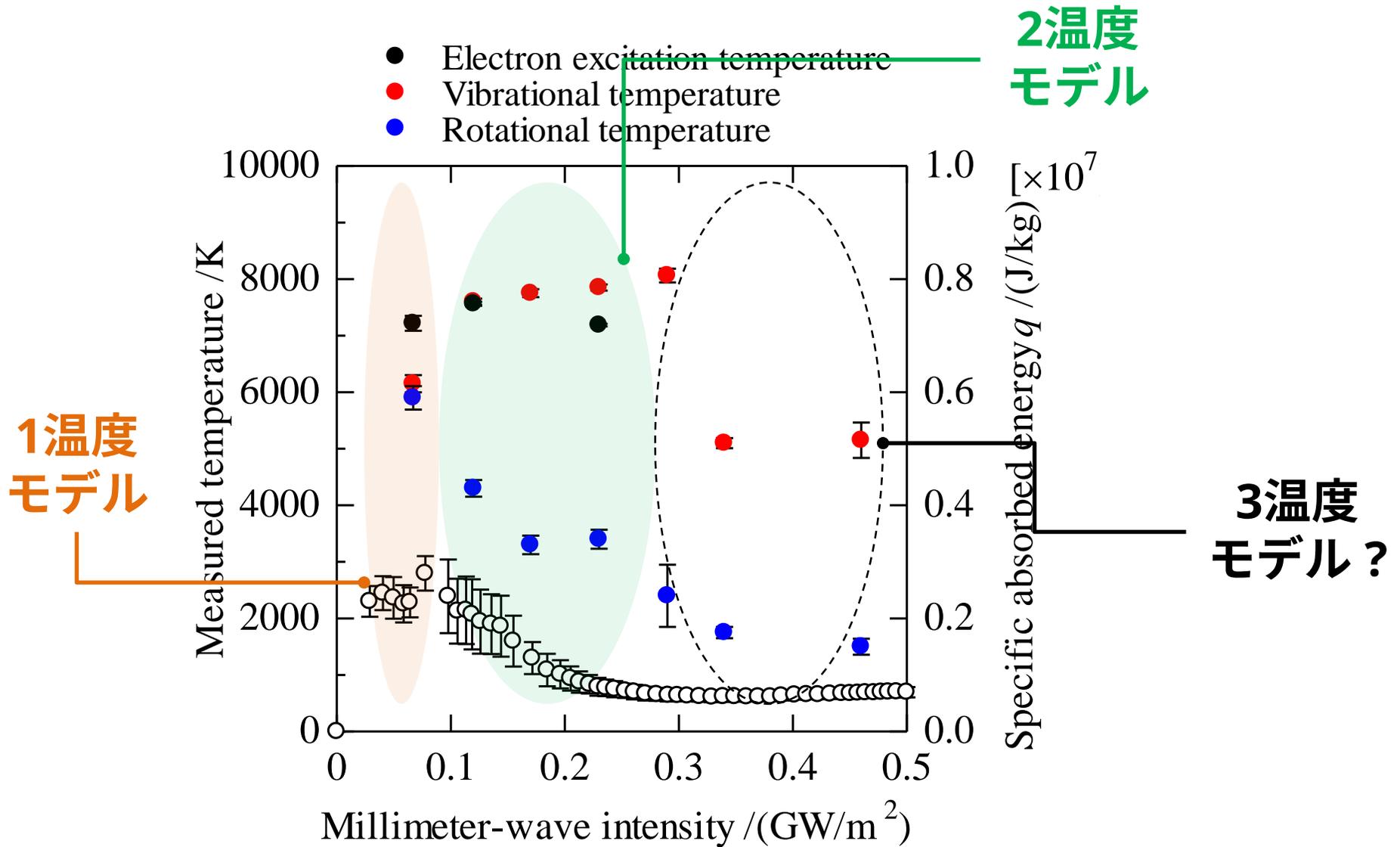
$$U_{\text{ioniz}}(S) = a \cdot S$$

$$\longrightarrow q = \frac{1}{\rho \cdot a}$$

比例定数  $a$  が小さい低強度領域で  $q$  が増加。



# 計測したミリ波強度領域における温度モデル

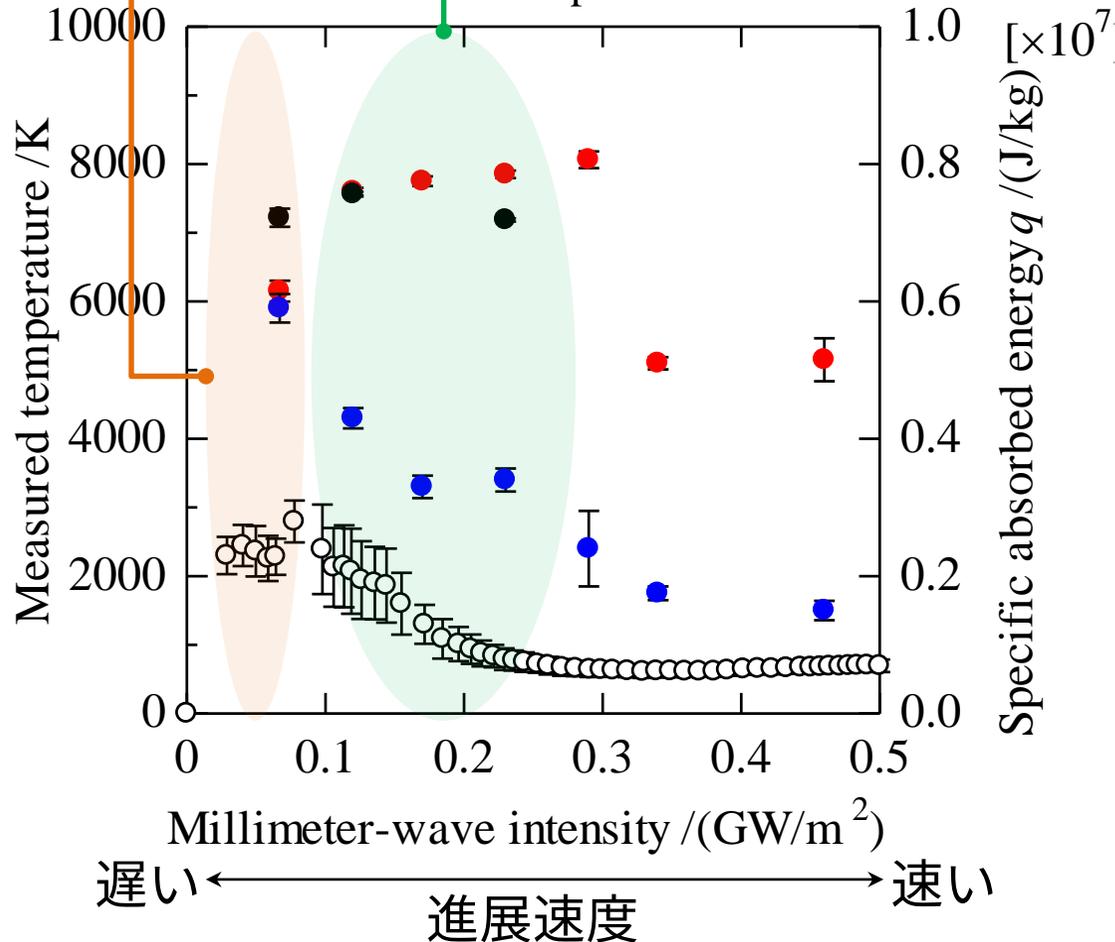




# 計測したミリ波強度領域における温度モデル

## 1温度モデル

- Electron excitation temperature
- Vibrational temperature
- Rotational temperature



## 2温度モデル

- ✓ 進展速度が速い領域で、振動 - 回転（並進）モードのエネルギー緩和が進んでいない。



ミリ波強度によって温度モデルが変化する。

今後、推力見積りに複数温度モデルを反映する



# 計測結果の妥当性評価のためエネルギー収支を考える

## 吸収したエネルギーの内訳

ミリ波強度 0.067 GW/m<sup>2</sup>の場合

| エネルギー            | 算出式                                                                              | 参考値 [MJ/kg]                   | 割合     |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------|
| 電離エネルギー          | $n_e \varepsilon_i / \rho$                                                       | 0.17                          | 3.0 %  |
| 電子の並進エネルギー       | $\frac{3}{2} n_e k_B T_e / \rho$                                                 | 0.10<br>※ $T_e = T_{exc}$ と仮定 | 0.18 % |
| 中性粒子の<br>振動エネルギー | $\frac{n_N k_B \Theta_{s,vib}}{\rho \cdot \exp(\Theta_{s,vib} / T_{s,vib}) - 1}$ | 1.4                           | 24 %   |
| 中性粒子の<br>回転エネルギー | $\frac{3}{2} n_N k_B T_{gas} / \rho$                                             | 1.7                           | 29 %   |
| 中性粒子の<br>並進エネルギー | $n_N k_B T_{rot} / \rho$                                                         | 2.6                           | 44 %   |



# 計測結果の妥当性評価のためエネルギー収支を考える

## 吸収したエネルギーの内訳

ミリ波強度 0.067 GW/m<sup>2</sup>の場合

| エネルギー            | 算出式                                                                              | 参考値 [MJ/kg]                   | 割合     |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------|
| 電離エネルギー          | $n_e \epsilon_i / \rho$<br>レーザー放電に比べ、                                            | 0.17                          | 3.0 %  |
| 電子の並進エネルギー       | $\frac{3}{2} n_e k_B T_e / \rho$<br>電離効率は低い                                      | 0.10<br>※ $T_e = T_{exc}$ と仮定 | 0.18 % |
| 中性粒子の<br>振動エネルギー | $\frac{n_N k_B \Theta_{s,vib}}{\rho \cdot \exp(\Theta_{s,vib} / T_{s,vib}) - 1}$ | 1.4                           | 24 %   |
| 中性粒子の<br>回転エネルギー | $\frac{3}{2} n_N k_B T_{gas} / \rho$                                             | 1.7                           | 29 %   |
| 中性粒子の<br>並進エネルギー | $n_N k_B T_{rot} / \rho$                                                         | 2.6                           | 44 %   |



# 計測結果の妥当性評価のためエネルギー収支を考える

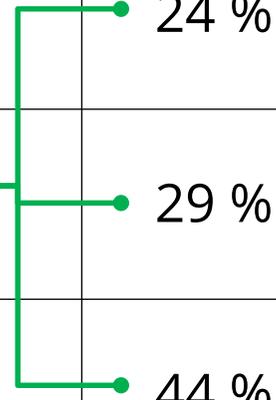
## 吸収したエネルギーの内訳

ミリ波強度 0.067 GW/m<sup>2</sup>の場合

| エネルギー               | 算出式                                                                              | 参考値 [MJ/kg] | 割合     |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------|
| 電離エネルギー             | $n_e \varepsilon_i / \rho$                                                       | 0.17        | 3.0 %  |
| 電子の並進エネルギー          | $n_e k_B T_e / \rho$                                                             | 0.40        | 0.18 % |
| <b>中性粒子の振動エネルギー</b> | $\frac{n_N k_B \Theta_{s,vib}}{\rho \cdot \exp(\Theta_{s,vib} / T_{s,vib}) - 1}$ | 1.4         | 24 %   |
| <b>中性粒子の回転エネルギー</b> | $\frac{3}{2} n_N k_B T_{gas} / \rho$                                             | 1.7         | 29 %   |
| <b>中性粒子の並進エネルギー</b> | $n_N k_B T_{rot} / \rho$                                                         | 2.6         | 44 %   |

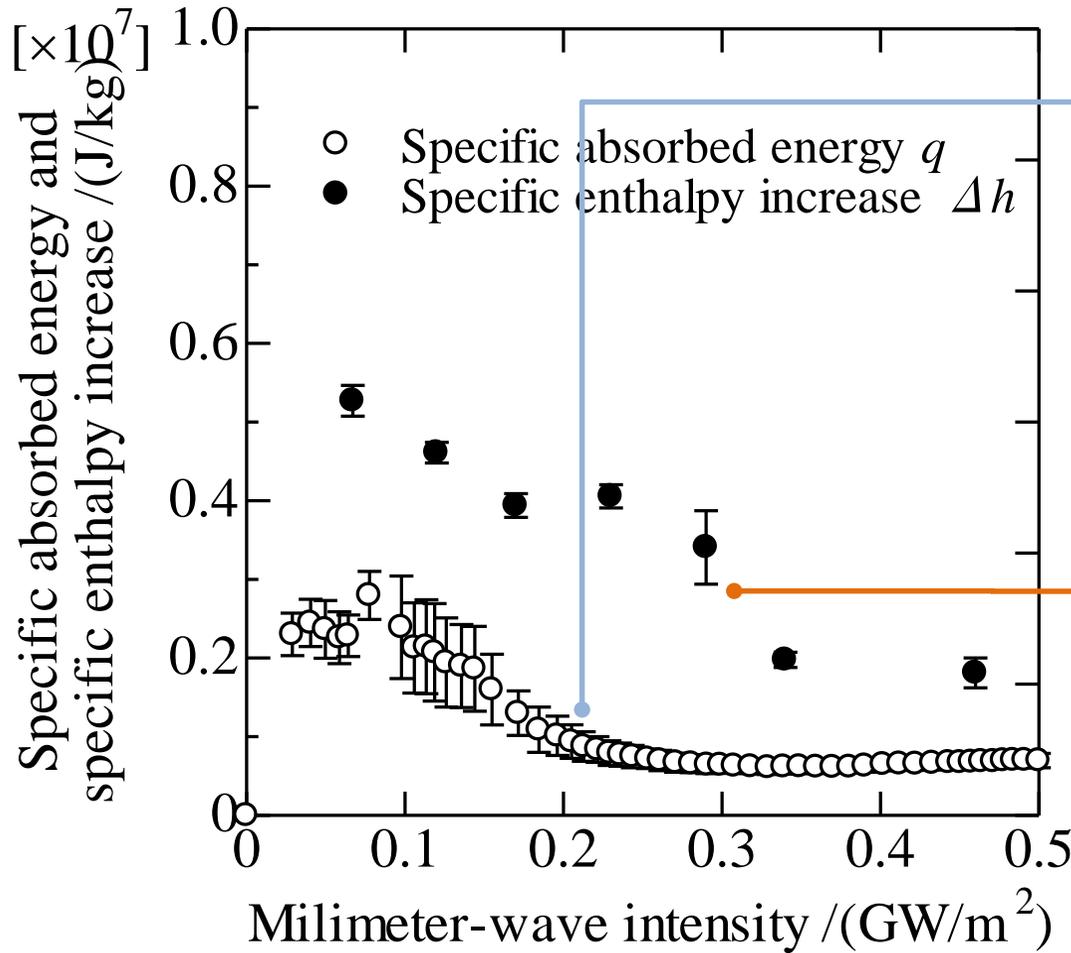
ミリ波のエネルギーが放電開始後速やかに中性粒子のエネルギーに変換される。

全体の 97 %





# ミリ波エネルギーは空間的に非一様に吸収される



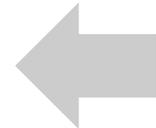
空間的に一様に加熱されるとして求まる

進展速度から計算される  
吸収エネルギー  $q$



空間的に発光の強い領域の  
温度を用いて求まる

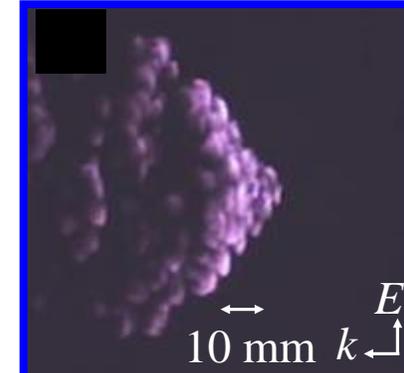
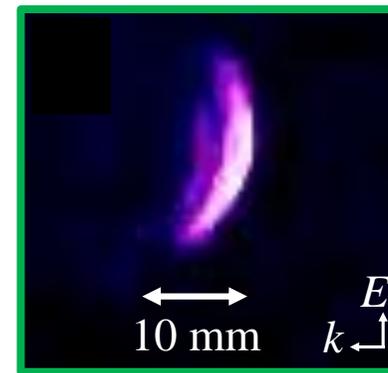
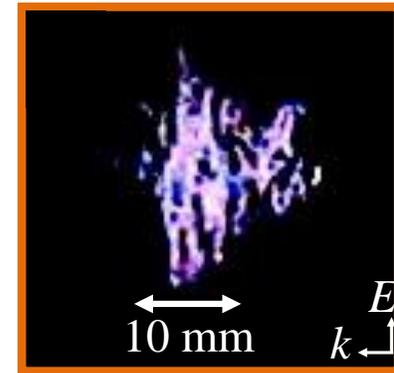
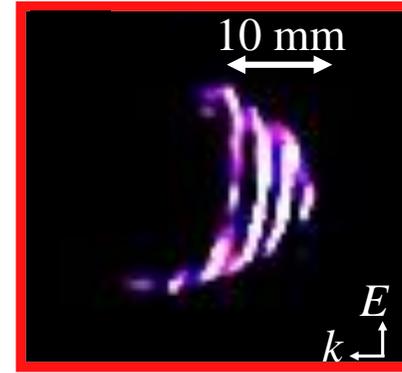
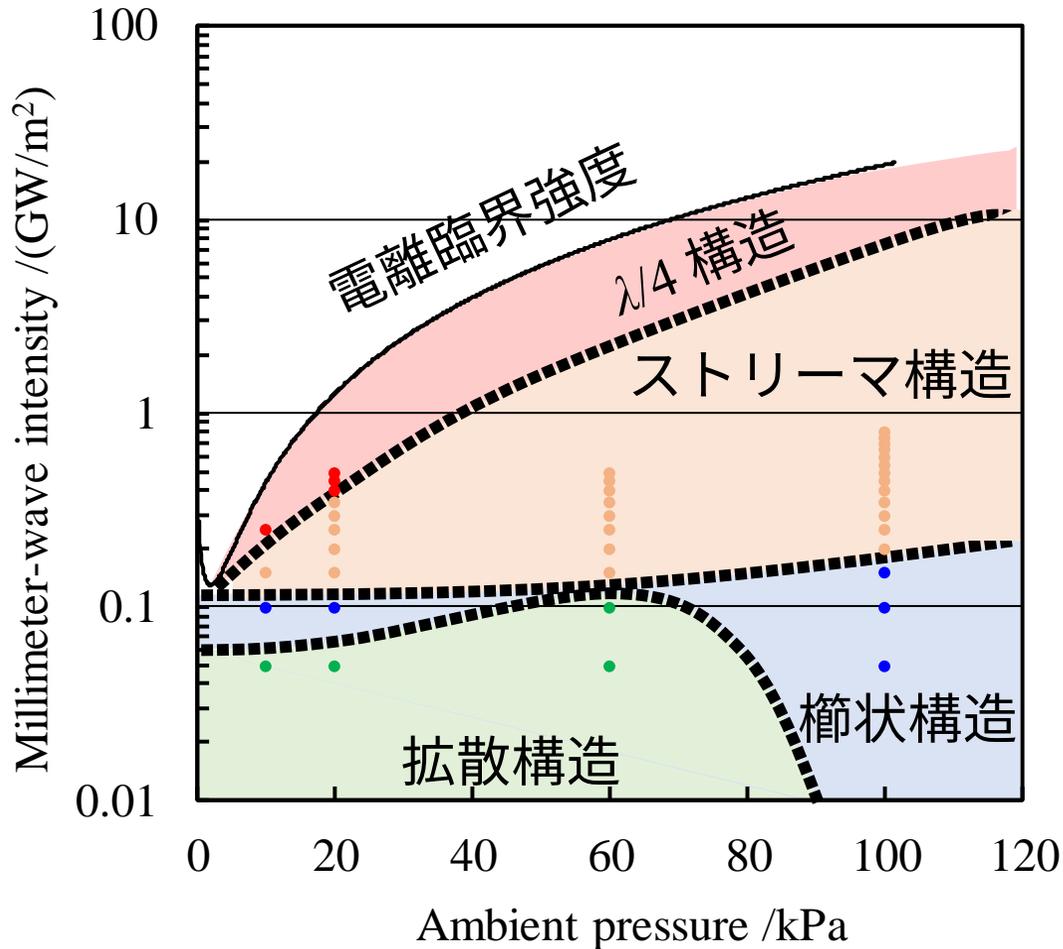
分光結果から求めた温度を  
用いて算出した  
比エンタルピー増加量



構造の形成

投入されたエネルギーと、  
プラズマ中の比エンタルピー増加量の比較

# ミリ波放電において観測されているプラズマ構造

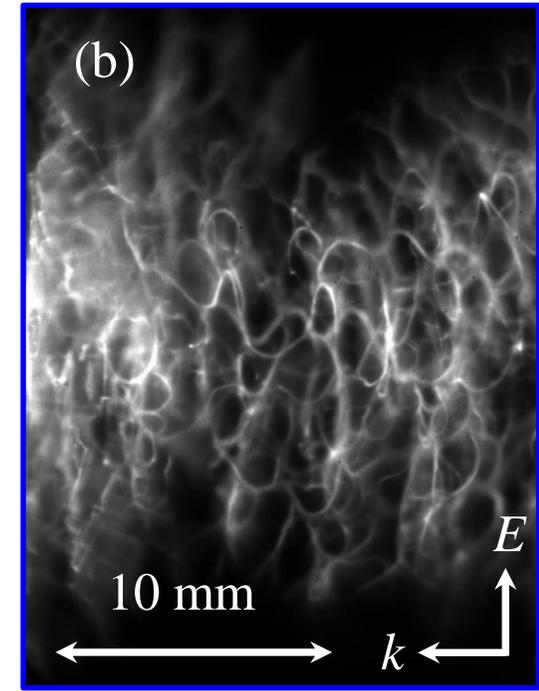
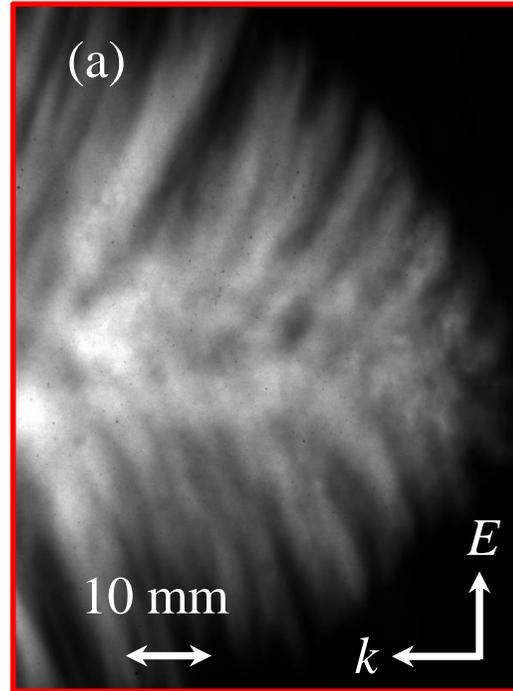
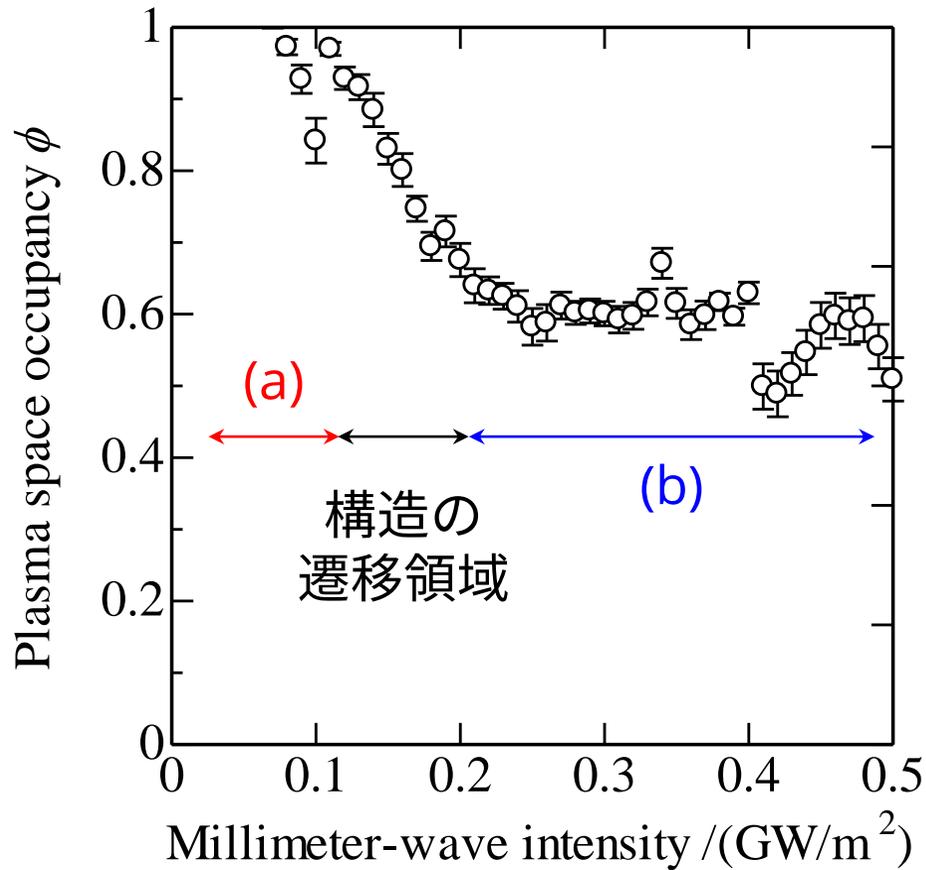


様々な雰囲気圧力，ミリ波強度に対して  
得られたプラズマ構造

今後，非一様加熱が推力に与える  
影響を考察する。



# 構造によってプラズマの空間占有率は変化する



プラズマの長露光自発光画像

自発光写真の2次元画像解析から  
求まるプラズマの空間占有率

プラズマ構造の違いを考慮した  
推力解析が必要.



# 結 論

筑波大 28 GHz, 350 kW ジャイロトロンを用いたミリ波大気放電実験を行い，放電面背後における中性粒子温度を測定した．

放電面背後では，進展速度の速い領域で振動 - 回転(並進)モードのエネルギー緩和が進んでいないため，熱平衡を仮定しない解析により推力を見積もる必要がある．

さらに，プラズマが構造を持つため，空間占有率が低い場合には空間的非一様性を考慮した推力の計算が必要である．



ご清聴ありがとうございました。