

窒素・酸素分子を含む空気プラズマ流の 衝突輻射(CR)非平衡計算

荻野 要介, 大西 直文

東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻

レーザープラズマ科学のための

最先端シミュレーションコードの共同開発・共用に関する研究会

平成29年1月10日 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

研究背景

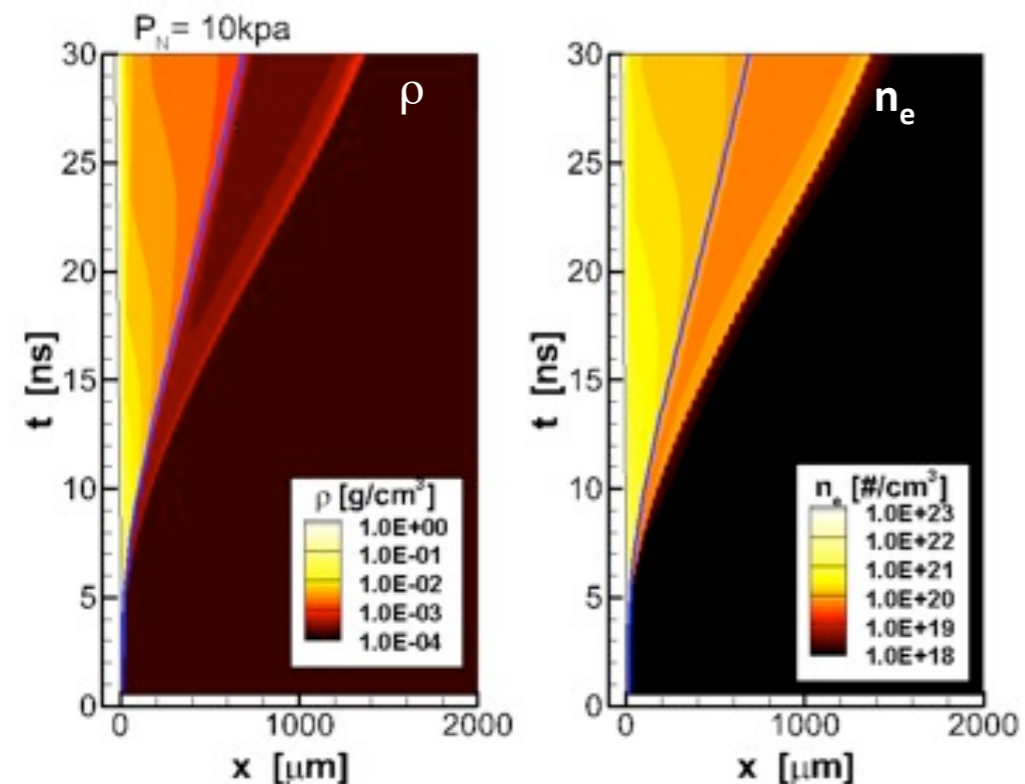
★ 主な解析対象

- 大気圏突入機まわりの極超音速流れ
- ビーム生成プラズマを利用した推進技術
- アーク放電やストリーマ放電

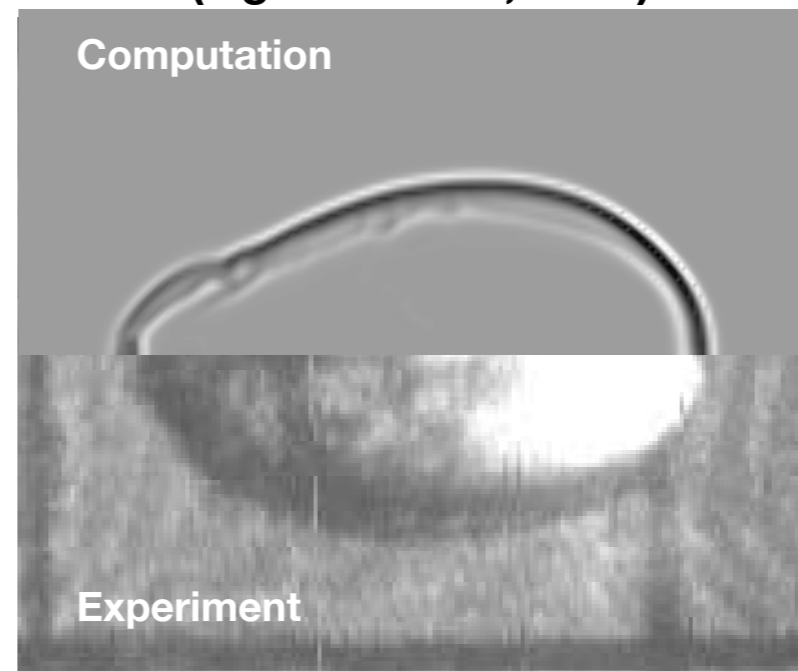
★ 短時間に変動する高温・低密度なプラズマ内部の非平衡性

★ 内部励起分布の非平衡性を詳細に考慮した解析コード開発

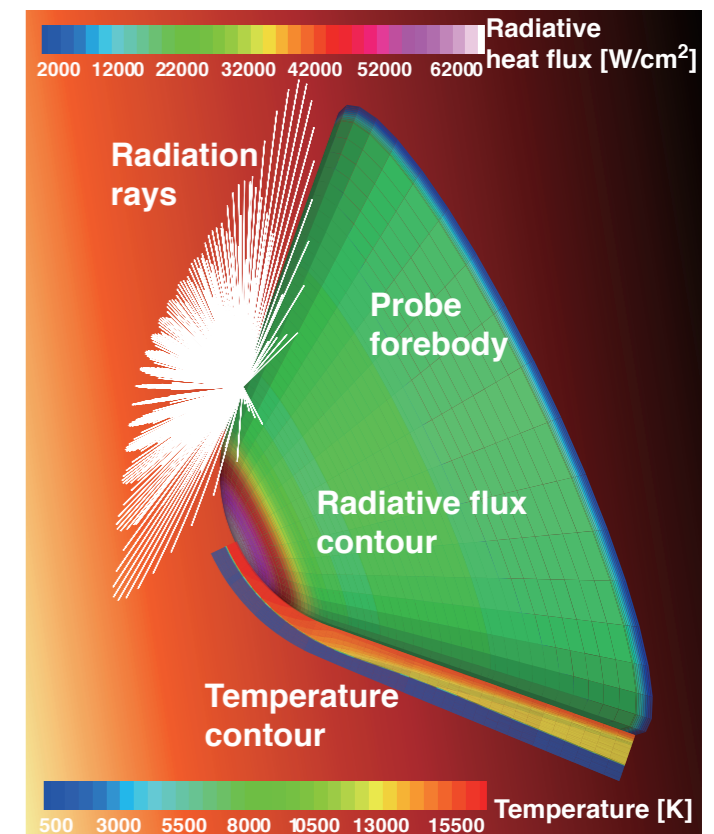
Laser ablation (Johzaki & Naya, 2014)



Laser blast
(Ogino & Mori, 2012)



Jovian atmospheric entry
(Matsuyama, 2003)



大気圏突入機の熱防御

- ★ 極超音速で大気圏へ突入
 - 過酷な空力加熱のため、熱防御設計が重要
- ★ 熱防御材の重量割合
 - はやぶさ：約50%
 - MPCV(有人カプセル)：約15%
- ★ MPCVで5%の加熱率予測誤差は50kgのペイロードに相当
- ★ 過剰な熱防御材を適切に削減するために、正確な加熱率予測手法の開発が望まれている



はやぶさ大気圏突入イメージ図

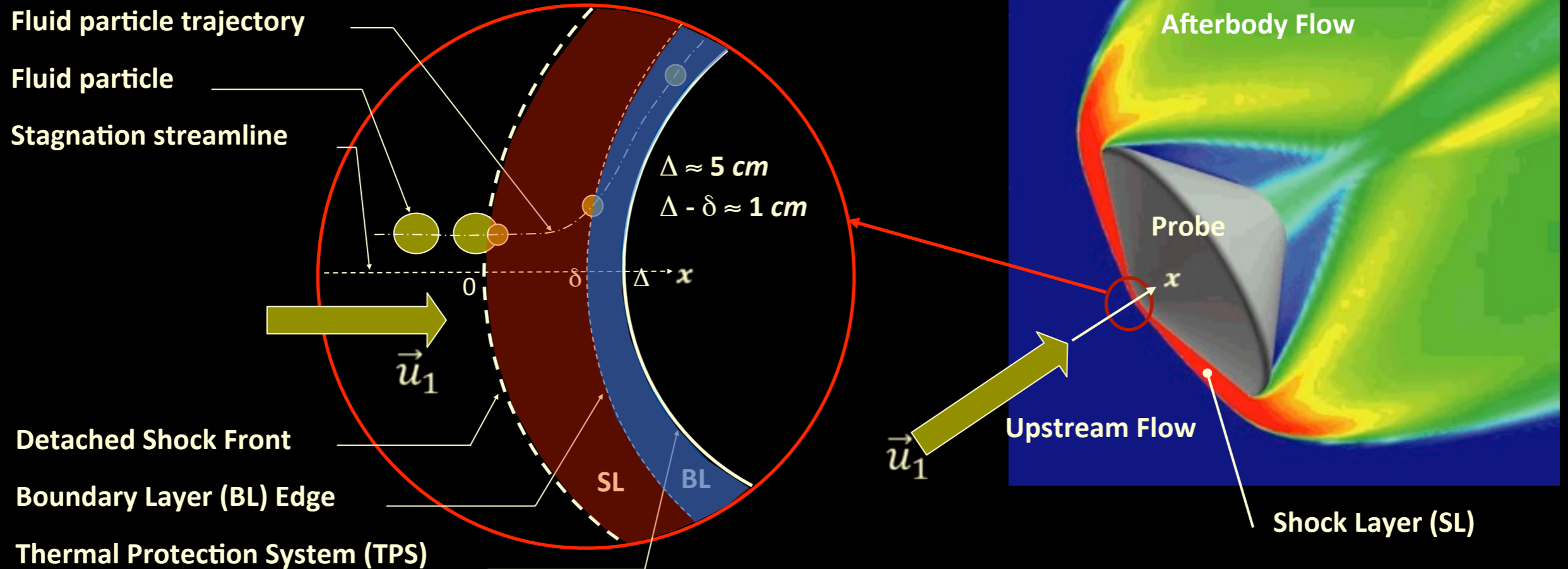


MPCV (有人地球帰還カプセル)

大気圏突入問題の代表スケール

Planetary Atmospheric Entry

(u_1 5 to 15 $km\ s^{-1}$)



- In SL*
- Pressure level..... 10^3 to $10^5\ Pa$
 - Temperature «s» levels..... 2 000 to 60 000 K
 - Dissociation degree..... $D_d \lesssim 1$
 - Ionization degree..... $D_i \lesssim 0.1$

- At TPS*
- Conduction
 - Radiation
 - Catalysis

内部励起分布の解析モデル

- ★ プラズマ内部状態に局所熱平衡 (LTE) を仮定する従来手法
 - 分子間衝突による励起・脱励起と光子の吸収・放出が平衡
 - 電子励起などの内部自由度に Boltzmann 分布を仮定
 - 温度, 密度のみで内部状態を記述する従来のLTE計算

- ★ 励起分布の非平衡性を考慮する必要がある場合
(流れ場の代表時間と衝突過程, 輻射過程の代表時間が同程度)
 - **衝突輻射 (Collisional-Radiative: CR) モデル**によって励起分布を直接計算
 - 温度, 密度に加え, 励起分布をもとに内部状態を決定
 - 輻射と流れ場の相互作用をより正確に評価

励起非平衡プラズマ流の計算コード

★ 非平衡励起分布を考慮した極超音速流コードの例

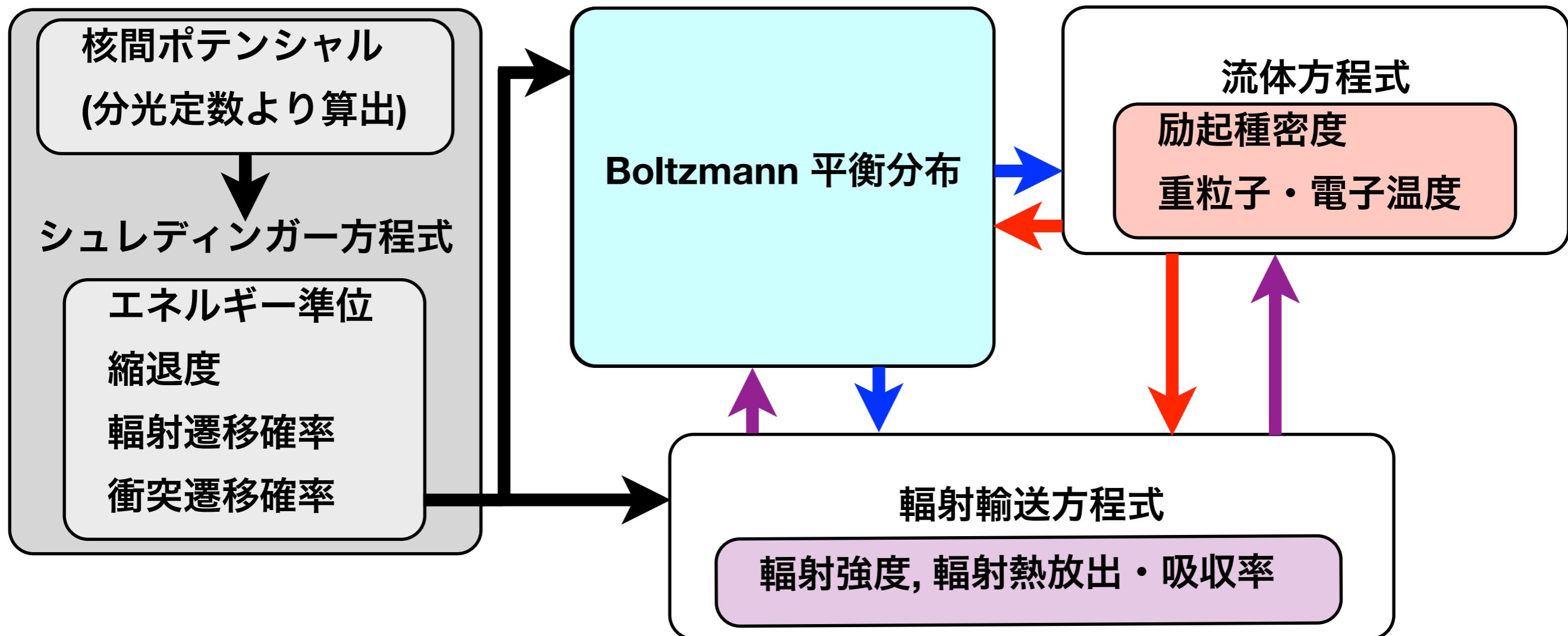
- NEQAIR: NS eqs., Line-by-line 輻射輸送 with QSS (C. Park, 1985~)
- SPARTAN: Line-by-line 輻射輸送 with QSS (M. Lino da Silva, 2004~)
- Bultel's CR model: 時間依存レート方程式計算 (A. Bultel, 2006)
- Bultel's CR model: 定常1次元Euler計算 with 1D輻射輸送 (B. Lopez, 2014)
- COOLFluid: 定常2次元NS計算 with Bultel's model (M. Panesi, 2014)

★ 他の惑星用の計算コード開発も進められている

★ レーザーやマイクロ波, 電磁場が誘起する流れ場は想定されていない

研究目的

- ★ 衝突輻射モデルと流れ場, 輻射熱輸送の結合手法の構築
 - テスト問題として, 地球大気圏突入問題を想定
 - 衝撃層内における励起分布の非平衡性を調査
 - 突入機壁面への輻射熱輸送計算



原子・分子の電子励起モデル

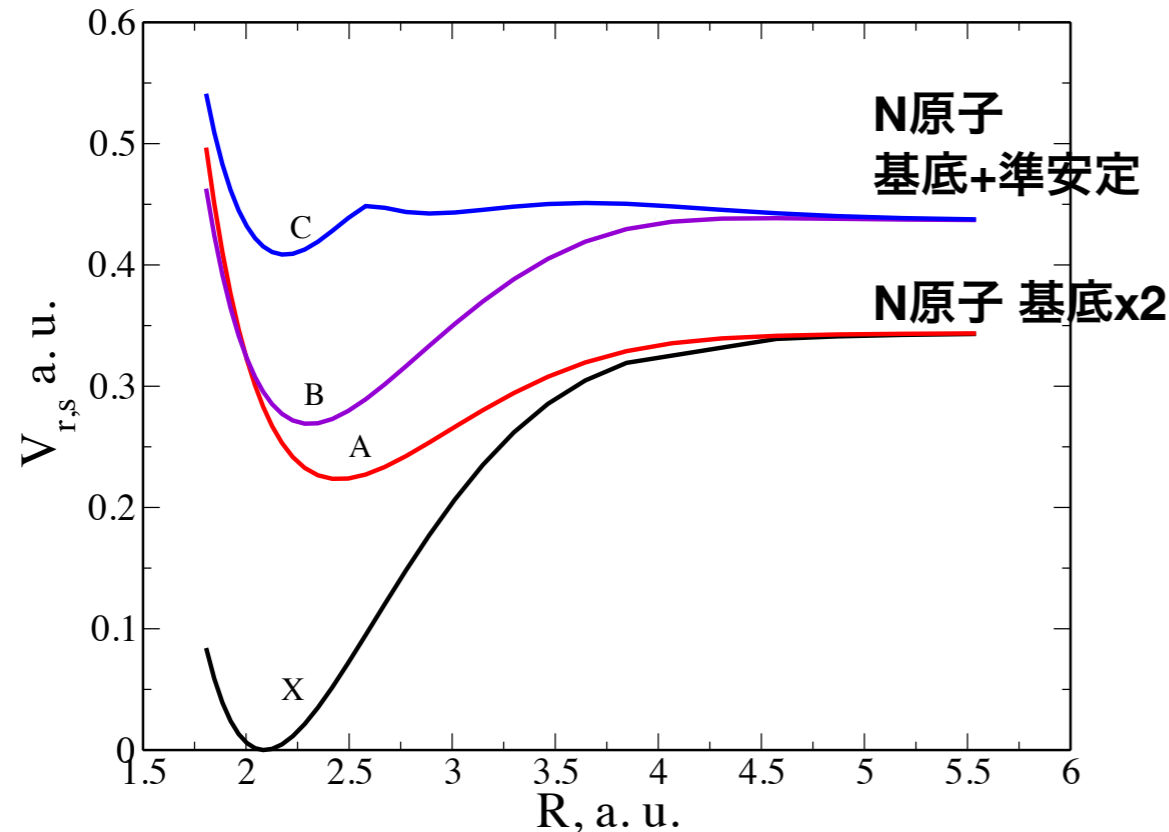
★ 11 化学種 e, N, N⁺, O, O⁺, N₂, N₂⁺, NO, NO⁺, O₂, O₂⁺

★ 原子化学種 184 状態, 分子化学種 35 状態の計 219 励起状態

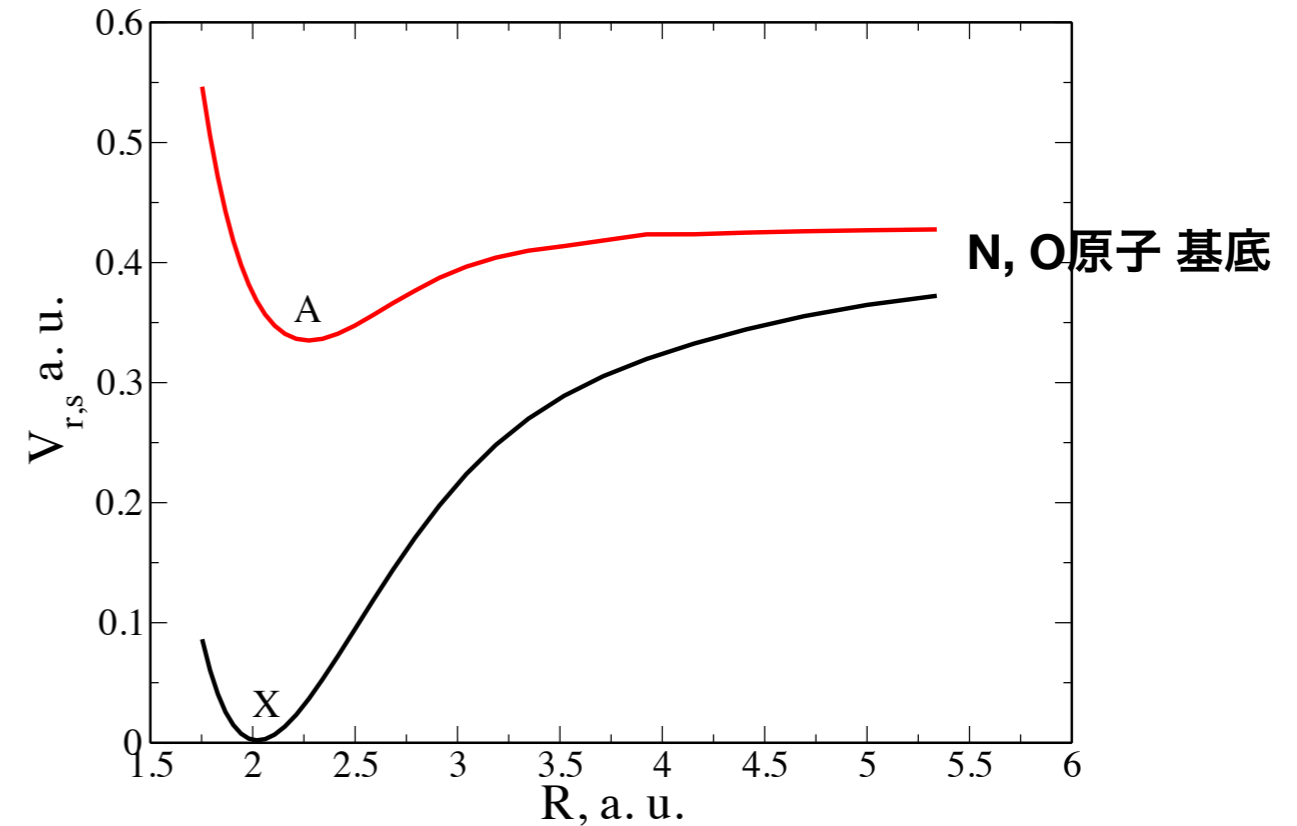
Index	Species	Electronic state representation
1 → 49	N	$2p^3 \ ^4S^*, \ ^2D^*, \ ^2P^*, \dots, \ 2p^2(^3P)9s$
50 → 95	N ⁺	$2p^2 \ ^3P, \ ^1D, \ ^1S, \dots, \ 2p(^2P^*)6f$
96 → 135	O	$2p^4 \ ^3P, \ ^1D, \ ^1S, \dots, \ 2p^3(^4S^*)10d$
136 → 184	O ⁺	$2p^3 \ ^4S^*, \ ^2D^*, \ ^2P^*, \dots, \ 2p^2(^3P)7p$
185 → 194	N ₂	$X^1\Sigma_g^+, A^3\Sigma_u^+, B^3\Pi_g, C^3\Pi_u, b^1\Pi_u, b'^1\Sigma_u^+, c^1_3\Pi_u, c'^1_4\Sigma_u^+, o^1_3\Pi_u, e'^1\Sigma_u^+$
195 → 198	N ₂ ⁺	$X^2\Sigma_g^+, A^2\Pi_u, B^2\Sigma_u^+, C^2\Sigma_u^+$
199 → 205	NO	$X^2\Pi, A^2\Sigma^+, B^2\Pi, C^2\Pi, D^2\Sigma^+, B'^2\Delta, F^2\Delta$
206 → 210	NO ⁺	$X^1\Sigma^+, a^3\Sigma^+, b^3\Pi, b^1\Sigma^-, A^1\Pi$
211 → 215	O ₂	$X^3\Sigma_g^-, a^1\Delta_g, b^1\Sigma_g^+, A^3\Sigma_u^+, B^3\Sigma_u^-$
216 → 219	O ₂ ⁺	$X^2\Pi_g, a^4\Pi_u, A^2\Pi_u, b^4\Sigma_g^-$

分子の励起状態とスペクトル

N2 核間ポテンシャル曲線



NO+ 核間ポテンシャル曲線



- ★ ポテンシャル曲線をもとに, 電子励起・振動・回転量子状態を算出
- ★ 電子励起・振動・回転状態間の衝突輻射遷移を計算
- ★ 振動・回転準位差が小さいため, 帯状の発光スペクトル
- ★ 遷移確率とEOSの整合性をとるために, 分配関数も同一ポテンシャル

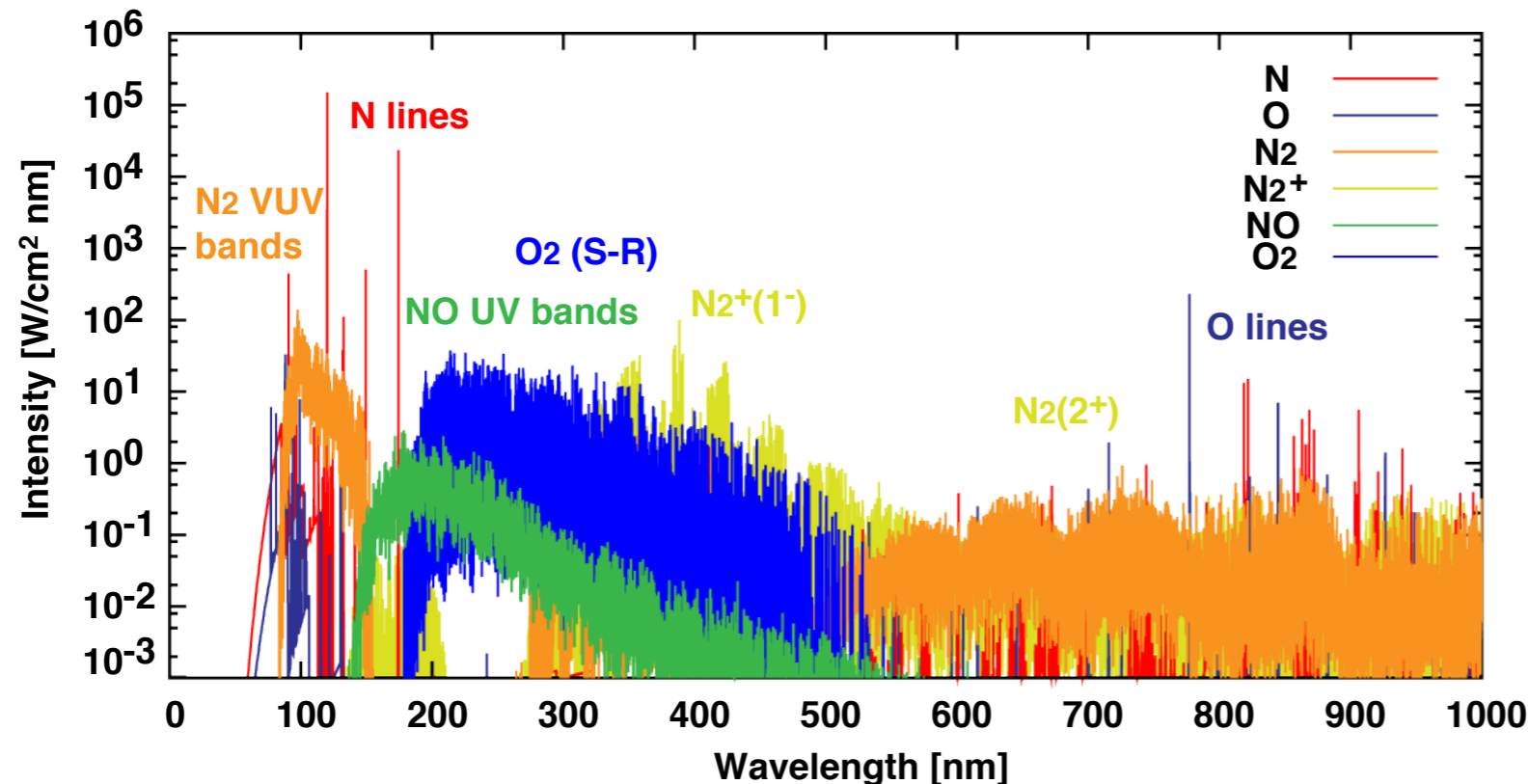
CR モデルの支配方程式

★ 遷移レート方程式 (数密度の保存式)

$$\frac{dN_{s,i}}{dt} = \sum \text{populating processes} - \sum \text{depopulating processes}$$

★ 衝突過程: 衝突励起・脱励起, 衝突電離/解離・再結合, その他の化学反応

★ 輻射過程: 線放射・吸収, 輻射再結合・光電離, 誘導放射



輻射過程のテスト計算結果

- 数密度: $10^{16} / \text{cm}^3$
- 温度: 8,000 K

CR モデルと流体方程式の結合関係 (拡散項は略記)

全質量保存式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^j)}{\partial x^j} = 0$$

s 化学種 i 状態の密度保存式 (レート方程式)

$$\frac{\partial \rho_{s,i}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{s,i} u^j)}{\partial x^j} = W_{\text{CR}}$$

運動量保存式

$$\frac{\partial(\rho u^j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^k u^j + p \delta^{kj})}{\partial x^j} = 0$$

全エネルギー保存式

$$\frac{\partial[\rho(e + \frac{1}{2}u^2)]}{\partial t} + \frac{\partial[(\rho(e + \frac{1}{2}u^2) + p)u^j]}{\partial x^j} = -Q_{\text{rad}}$$

振動・電子励起・自由電子エネルギー保存式

$$\frac{\partial[\rho(e_{\text{vib}} + e_{\text{ext}} + e_{\text{elc}})]}{\partial t} + \frac{\partial[\rho u^j (e_{\text{vib}} + e_{\text{ext}} + e_{\text{elc}})]}{\partial x^j} = Q_{\text{t-e}} + Q_{\text{t-v}} - Q_{\text{dis}} - Q_{\text{inz}} - Q_{\text{rad}}$$

輻射熱輸送の結合と計算法

- ★ CR 流体から密度・温度・励起分布を参照
- ★ 流体へは熱流束, CRへは輻射強度を還元
- ★ 立体角積分は壁面垂直方向に一次元近似
- ★ 300,000 波長点, 波長域 100 -- 1,500 nm
- ★ 線輪郭は Voigt profile

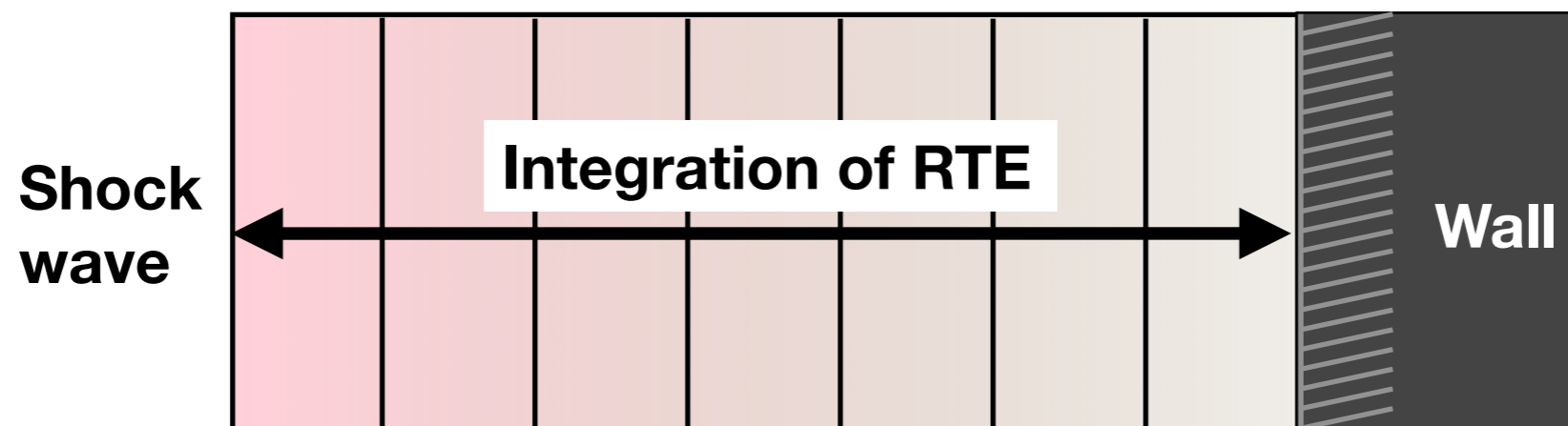
輻射輸送方程式

$$\frac{dI_\nu(x, t)}{dx} = \boxed{\varepsilon_\nu} - \boxed{\kappa_\nu} I_\nu$$

CR 遷移レート方程式

$$\frac{dN_{s,i}(x, t)}{dt} = -A_{s,i \rightarrow j} N_{s,i} + \boxed{+ (B_{s,j \rightarrow i} N_{s,j} - B_{s,i \rightarrow j} N_{s,i}) I_\nu(x, t)} + \dots$$

Tangent-slab 1D approximation



数値計算法

- ★ 軸対称 Navier-Stokes 方程式
- ★ CR 遷移レート方程式との結合
 - 流体の質量保存式・エネルギー保存式の生成項
 - LSODE (Stiff 多段階陰解法) 時間積分
 - 励起分布の移流
- ★ 接平板近似による輻射輸送計算
- ★ 有限体積法による離散化
- ★ SLAU scheme with MUSCL approach
- ★ MPI ライブラリによる並列化

計算条件 (試験機の高マッハ数・低密度条件)

★ 主流条件

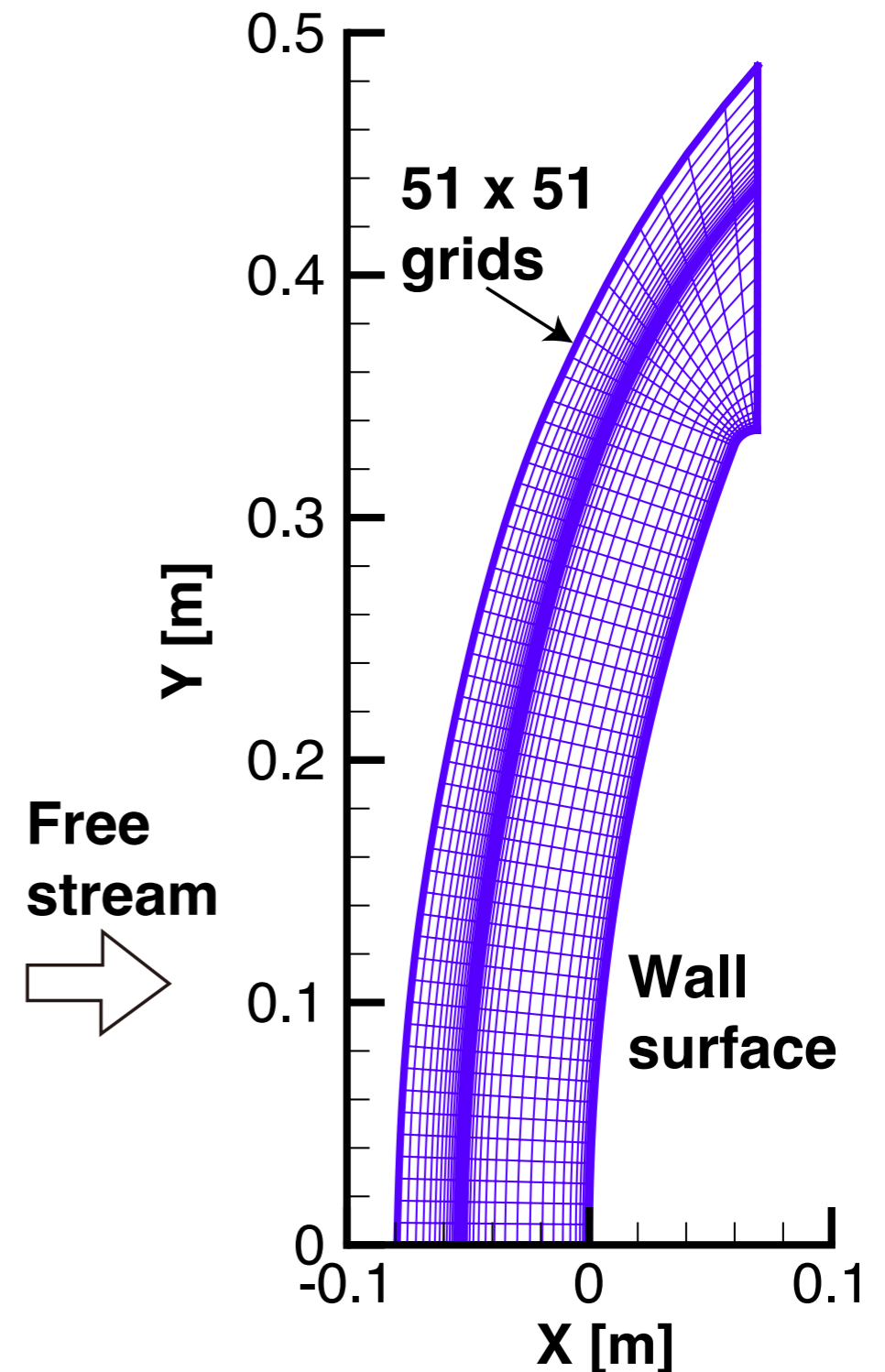
- velocity: 11.31 km/sec
- density: 8.57E-5 kg/m³
- temperature: 210 K

★ 壁面条件

- fully-catalytic wall
- temperature: 810 K

★ 解適合格子

- 51 x 51 grid points
- minimum grid width for BL: 1.6E-6 m
(convective heat flux is converged)



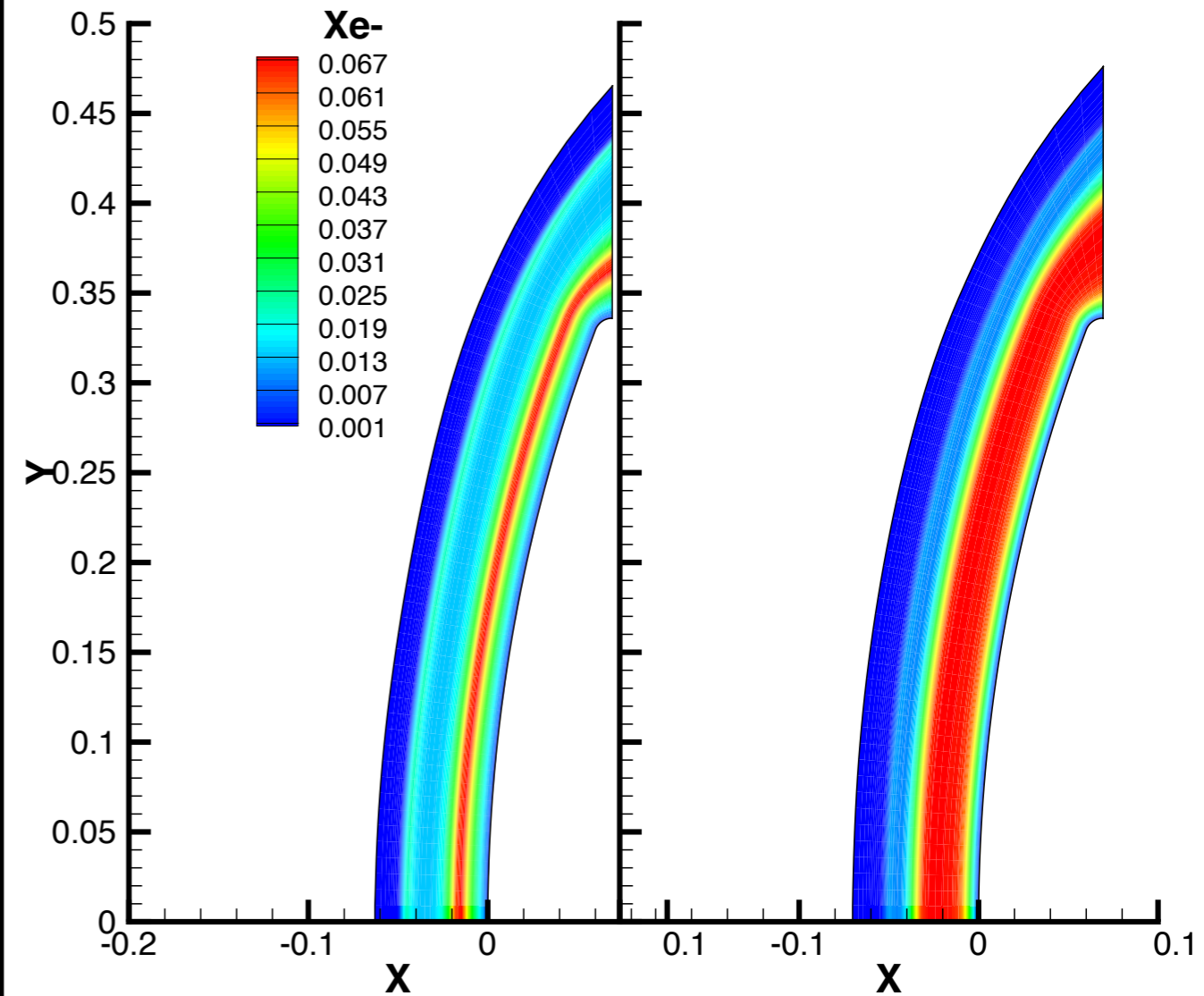
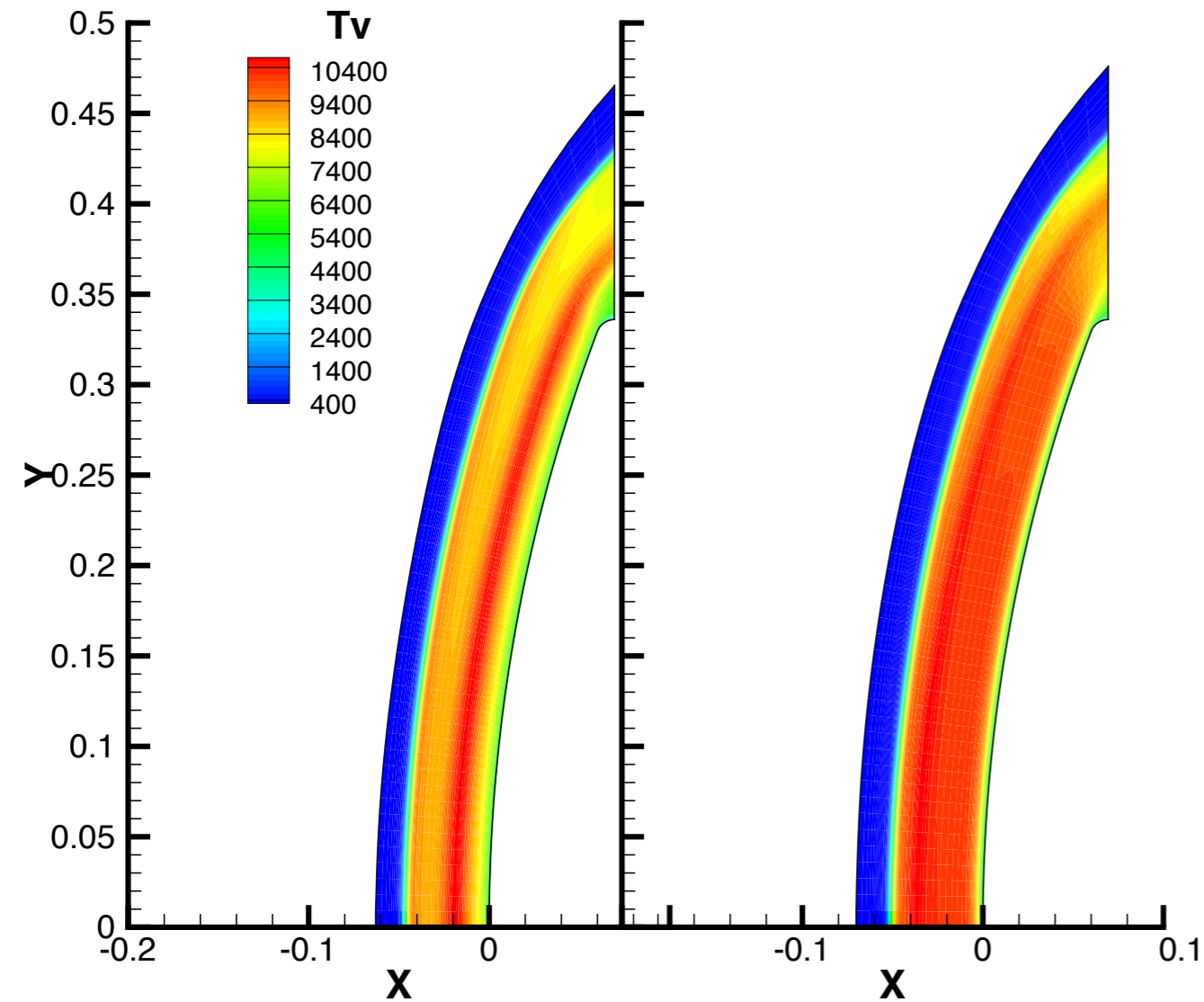
振動温度・電子モル分率分布の比較

CR coupled flow

uncoupled (LTE)

CR coupled flow

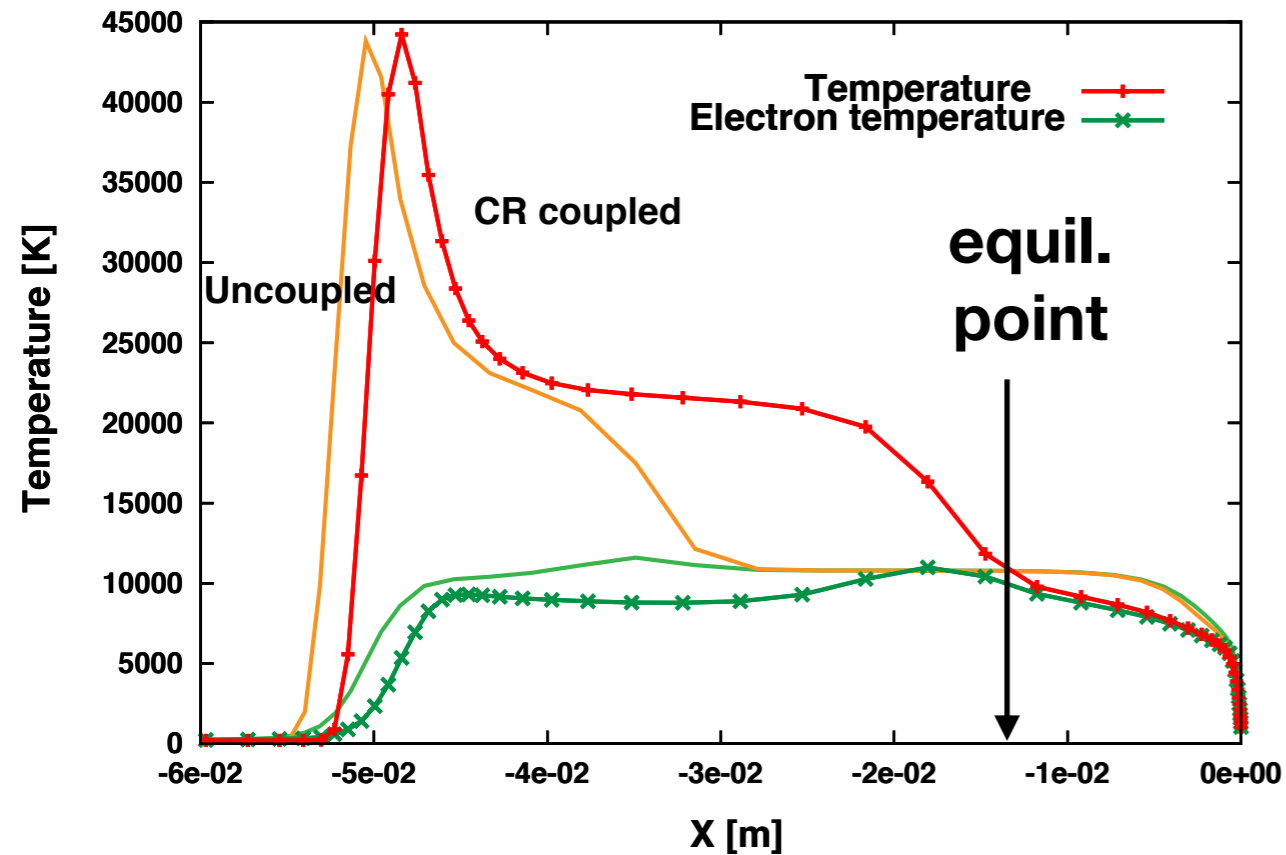
uncoupled (LTE)



★ 温度・密度のピーク位置が壁面方向へシフトする

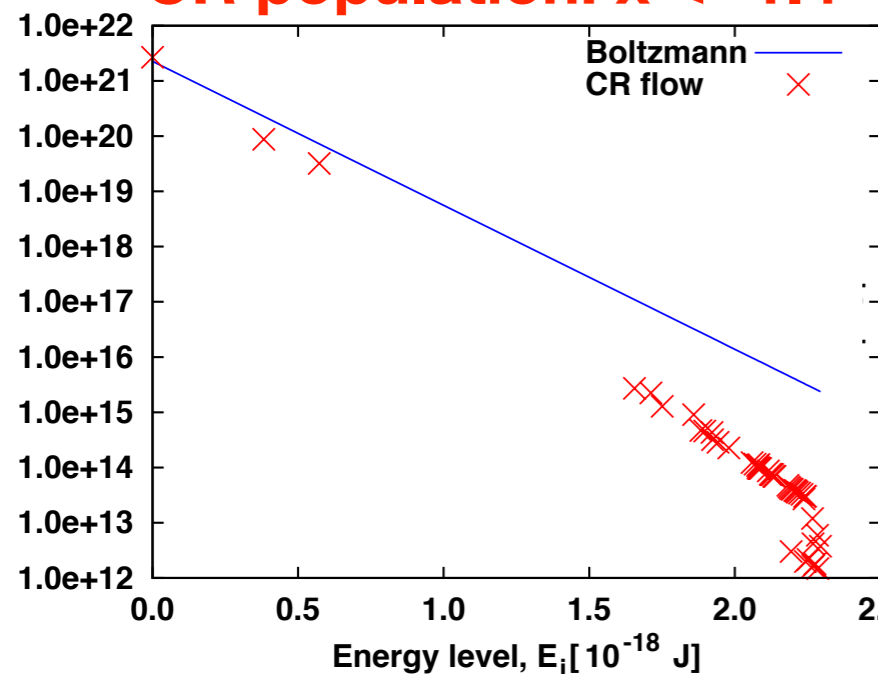
★ 自由電子が関与する遷移反応によって、プラズマ域の成長が遅れる

電子励起分布の非平衡性

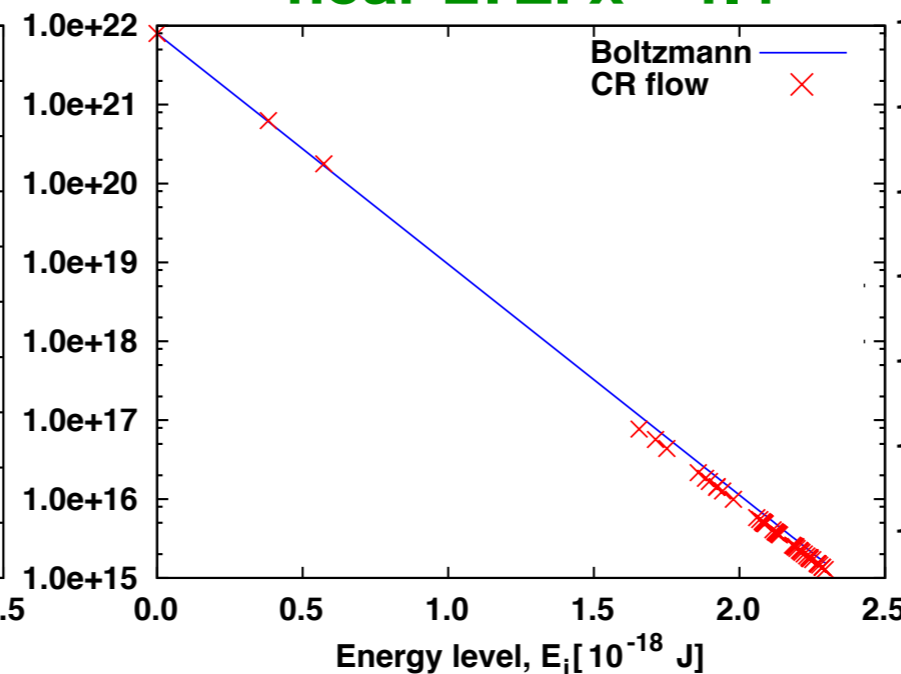


- ★ 衝撃波離脱距離が短くなる
- ★ 座標 $x = -1.4$ [m] で熱平衡に達する
- ★ 励起分布の特徴が領域ごとに異なる
 - CR: 衝撃波から平衡点 ($x = -1.4$)
 - LTE: 平衡点付近
 - over population: 平衡点から壁面

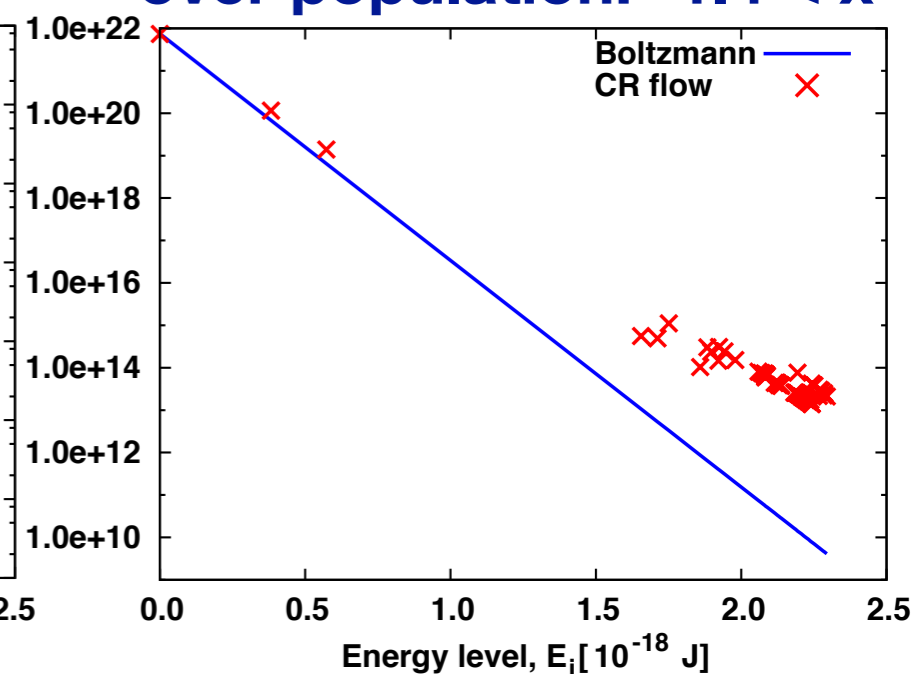
CR population: $x < -1.4$



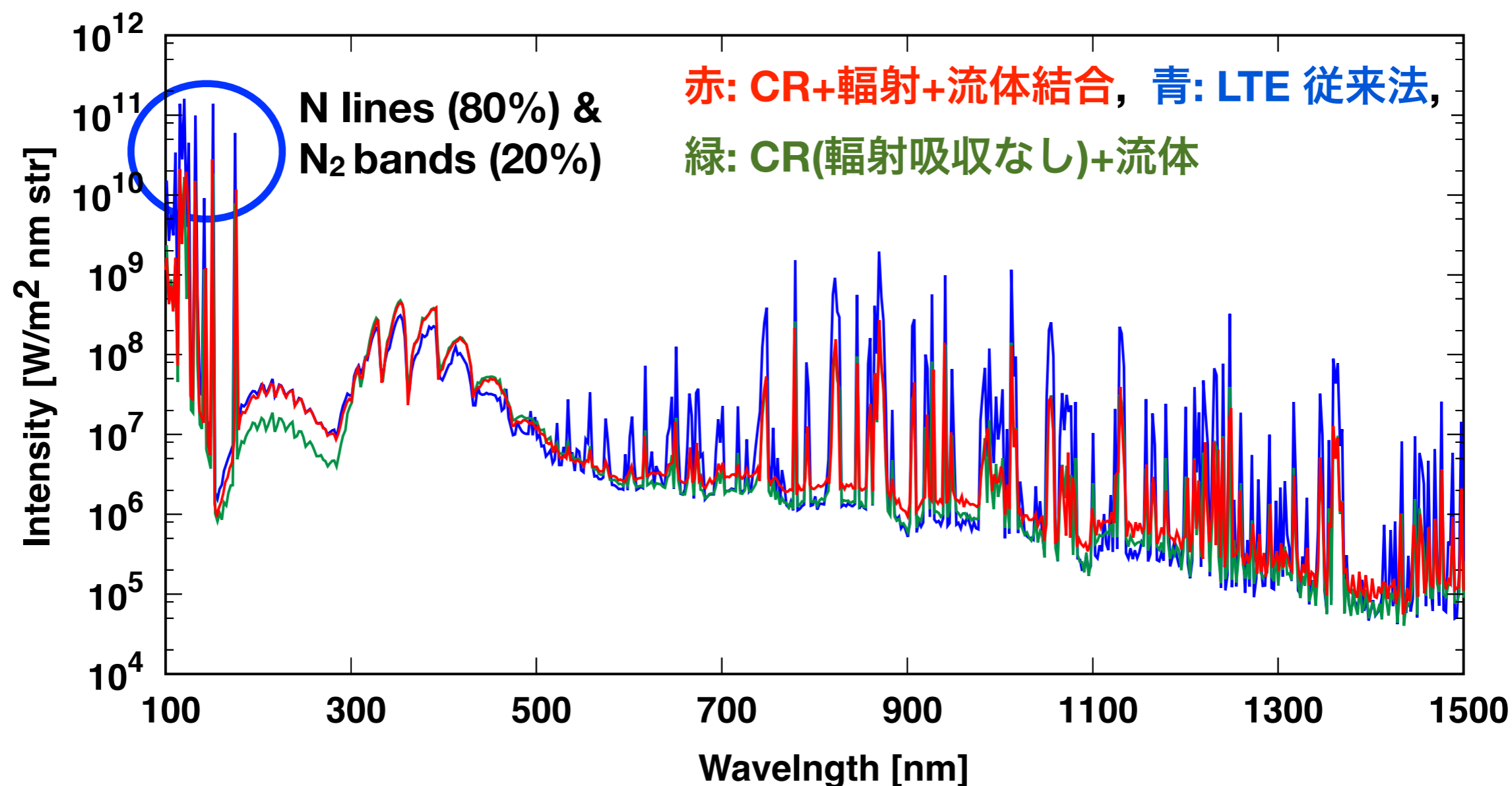
near LTE: $x = -1.4$



over population: $-1.4 < x$



壁面入射スペクトルの励起分布依存性



- ★ 波長積分値は CR : LTE : CR(abs) = 1 : 8 : 2.5
- ★ 主な差異は真空紫外のN原子系の輻射放出
- ★ LTE従来法は過大評価と言える

まとめと今後の予定

★ まとめ

- CR 流体輻射結合コードを構築した
- 輻射輸送を計算し, 壁面加熱スペクトルを調査

★ 今後の予定

- (CR 流体計算) x (輻射輸送計算) = 100 並列 2 週間程度
- 分光実験とのスペクトル比較による遷移レートの調査
- 空気プラズマを非接触で解析可能な数値分光ツールの提案