

DEMO 非接触プラズマでの 水素原子ライマン発光線輻射輸送

澤田 圭司

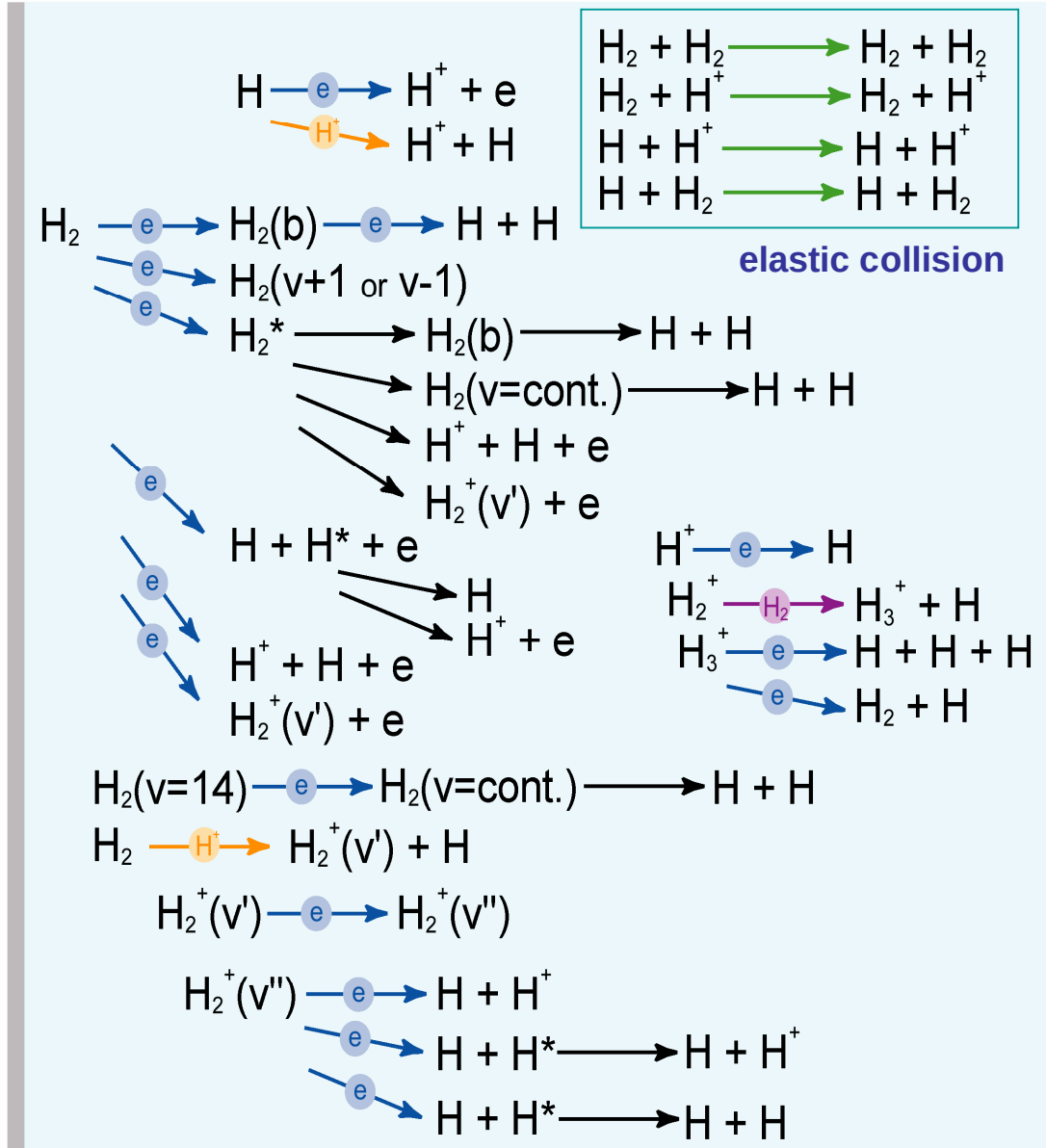
信州大学工学部

星野 一生

日本原子力研究開発機構

Our models

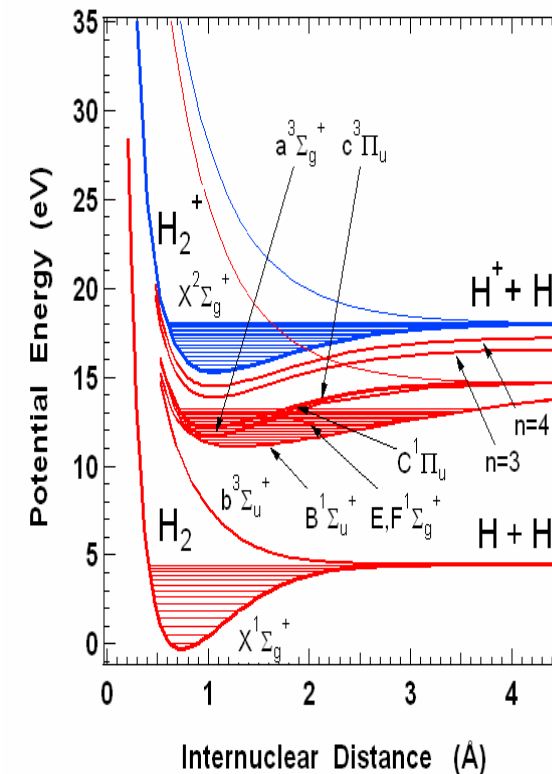
wall



Collisional–Radiative Models

Hydrogen atom
Helium atom (Goto)
Hydrogen molecule

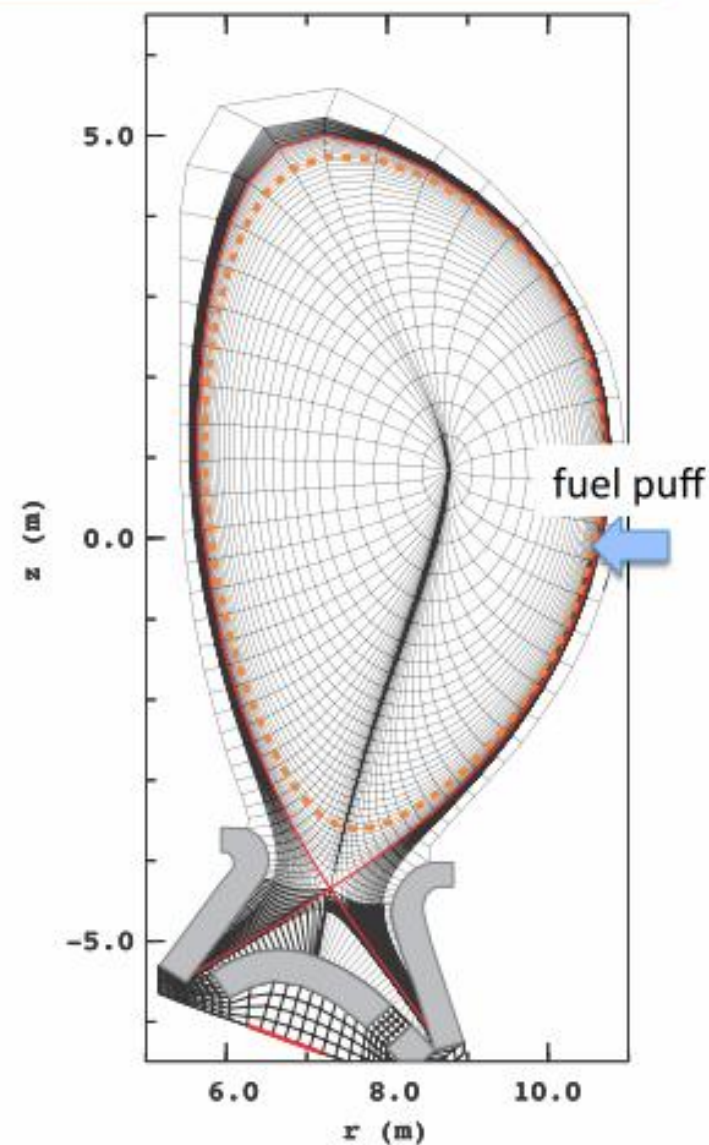
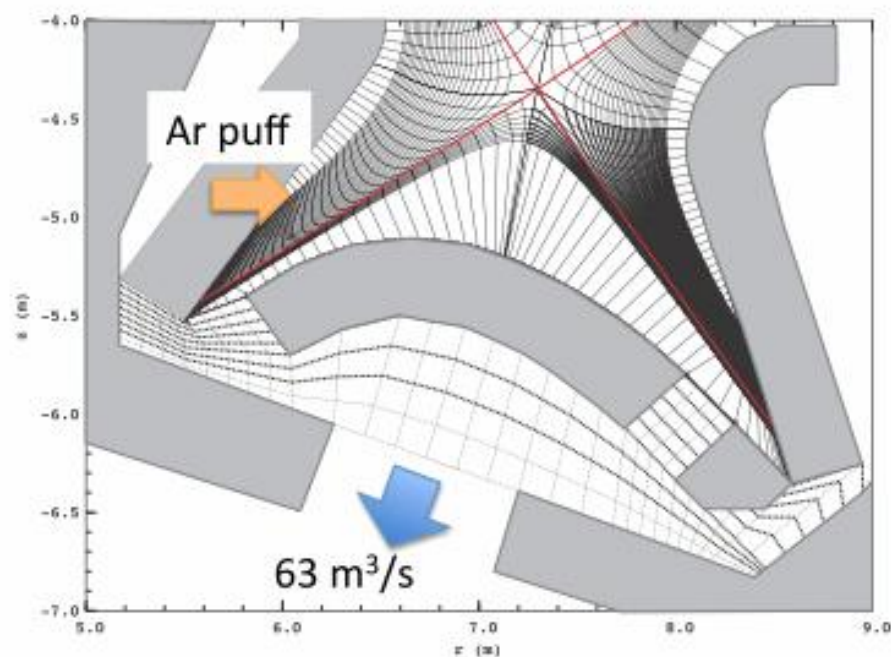
Neutral-Transport Code



Numerical setup up for 8.2m DEMO divertor

5

- At core boundary ($r/a \sim 0.95$):
 $P_{\text{out}} = 250 \text{ MW}$, $S_D^{\text{CIB}} = 1 \times 10^{22} \text{ s}^{-1}$
- pumping speed: $S_{\text{pump}} = 63 \text{ m}^3/\text{s}$
- Only D and Ar. (no W, no He, no T)
- $D = 0.3 \text{ m}^2/\text{s}$, $\chi = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$

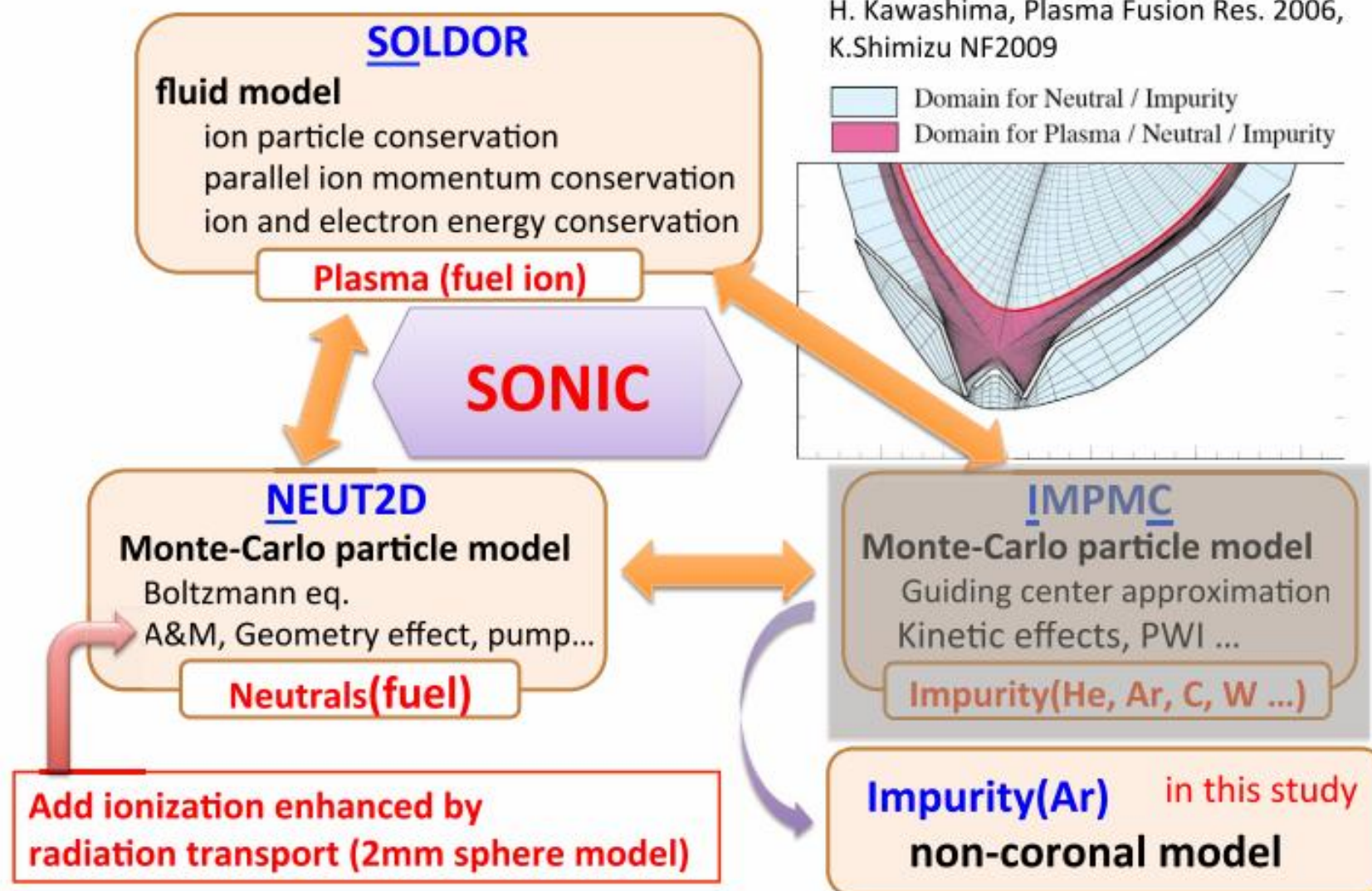


SONIC

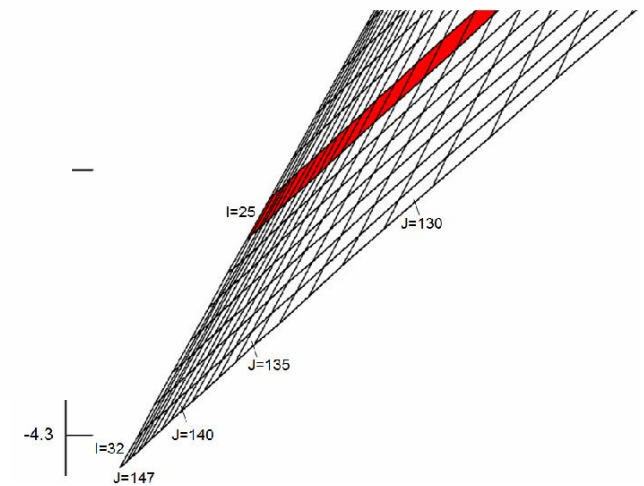
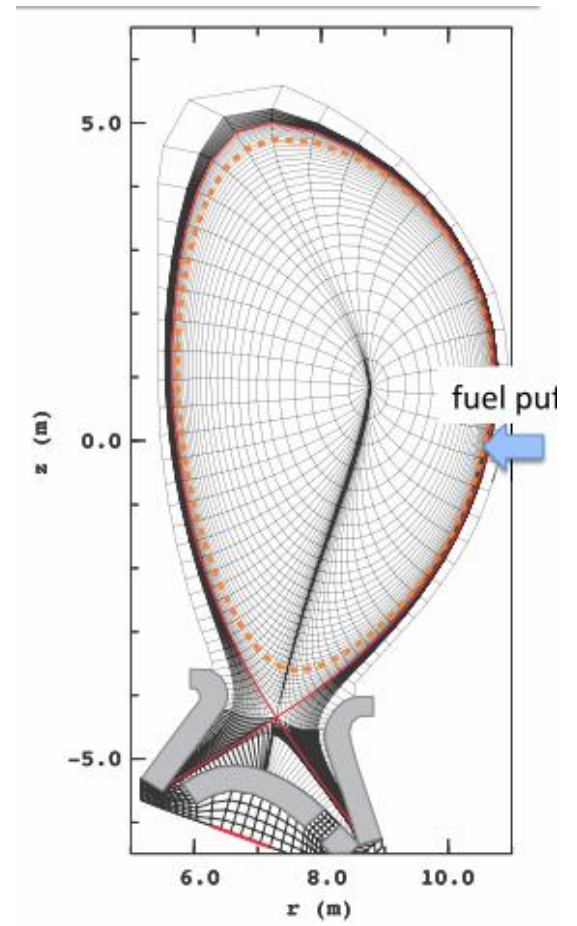
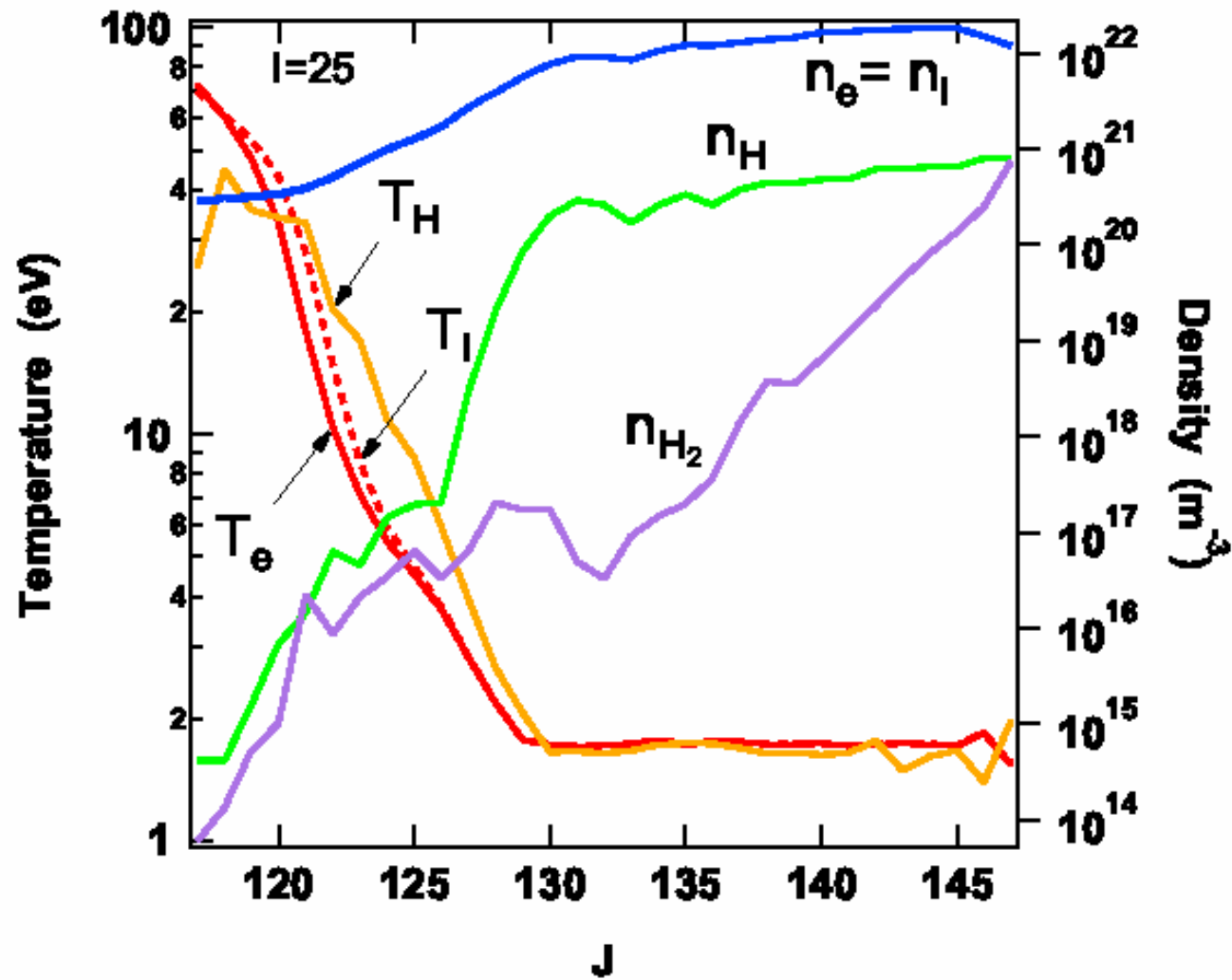
星野 一生

日本原子力研究開発機構

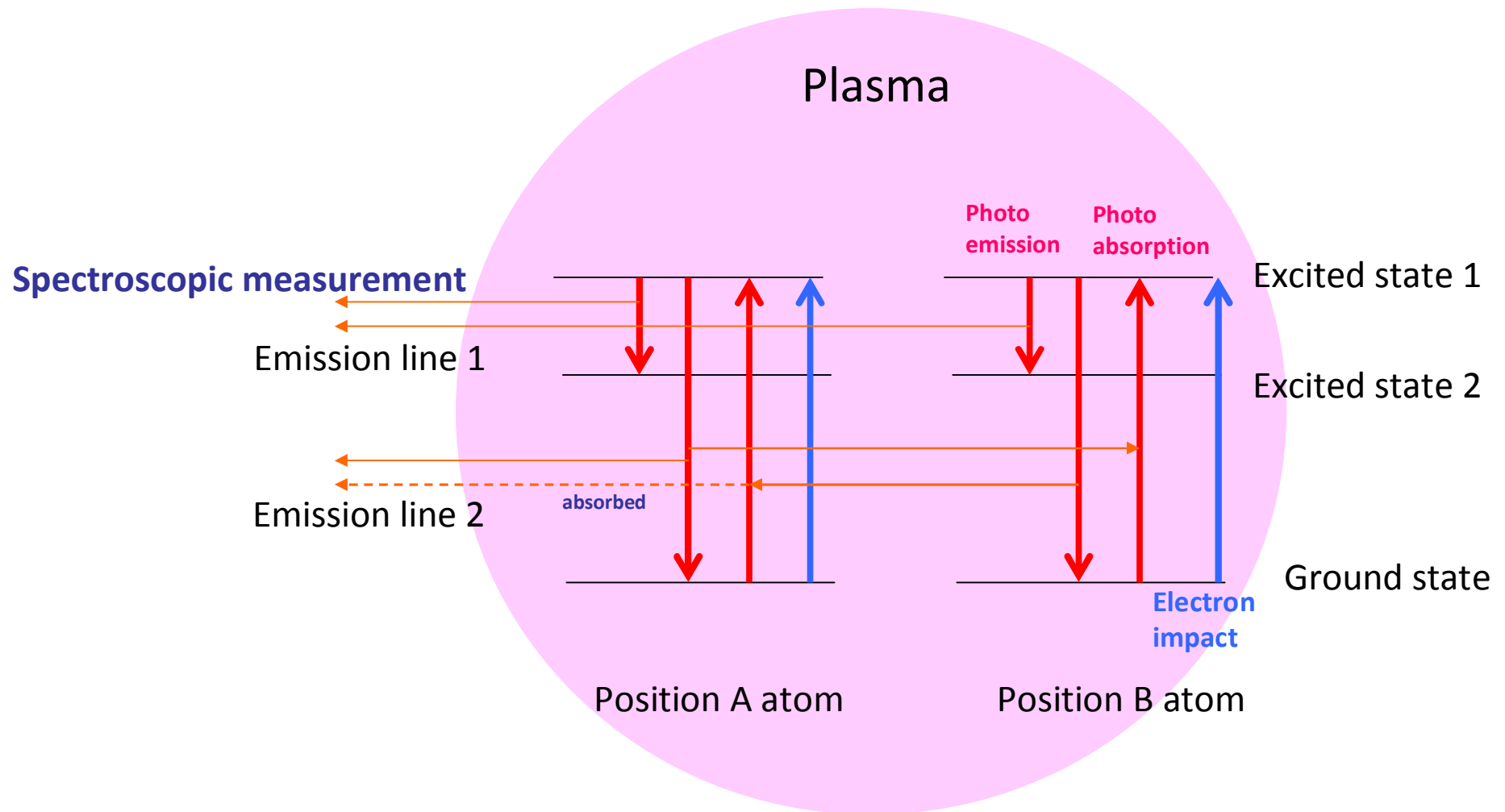
Impact on the plasma solution: iterative calculation of SONIC



非接触再結合プラズマ (SONIC出力)

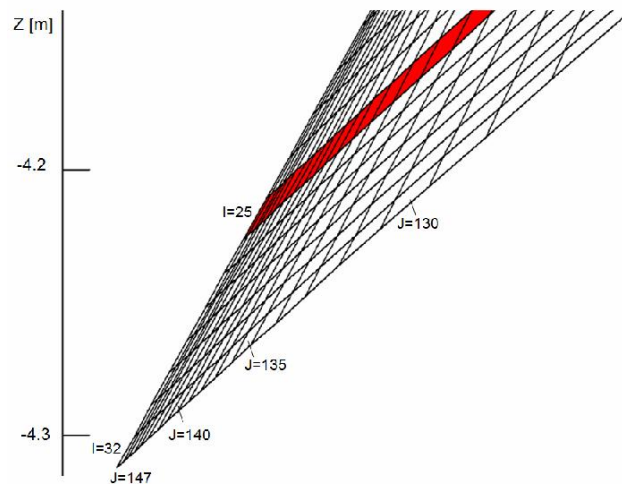
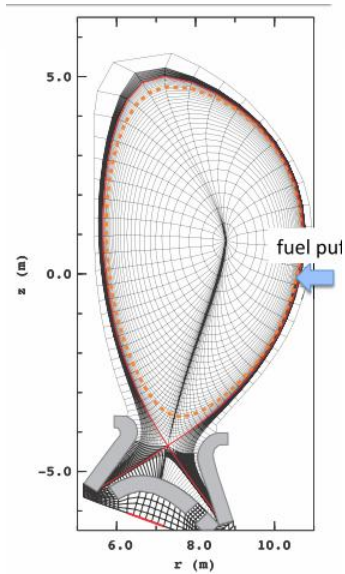
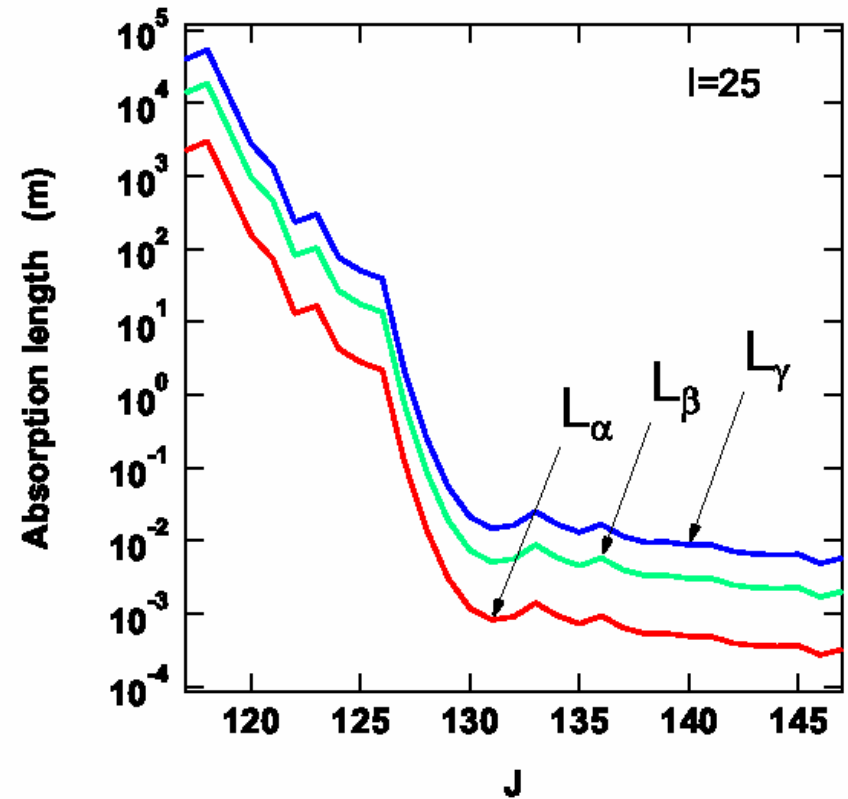
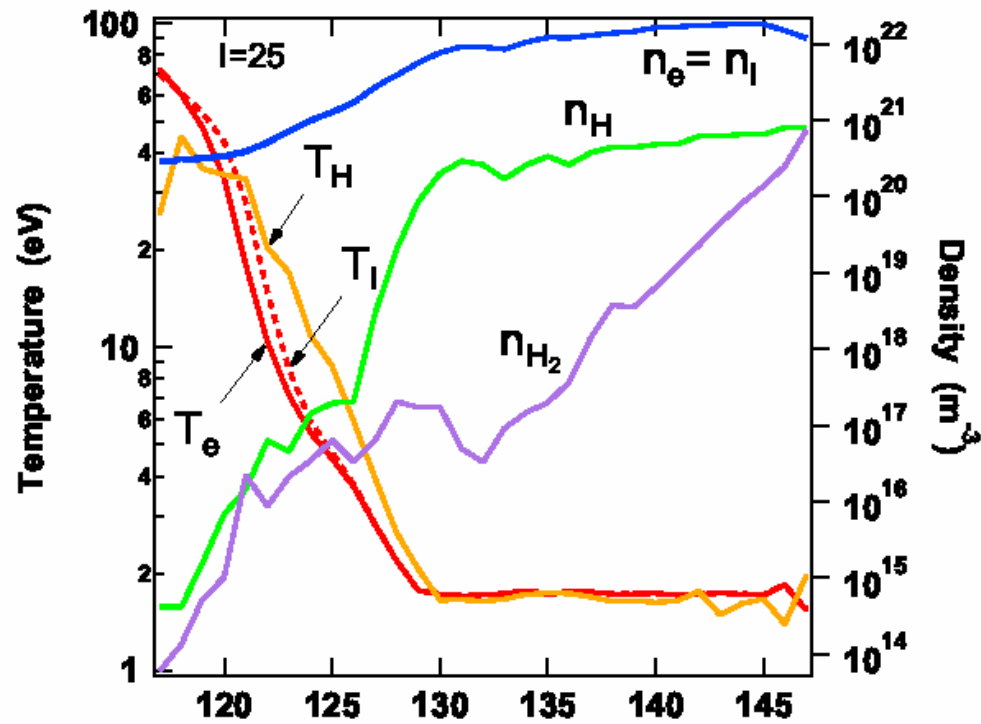


Radiation Trapping and Spectroscopic measurement



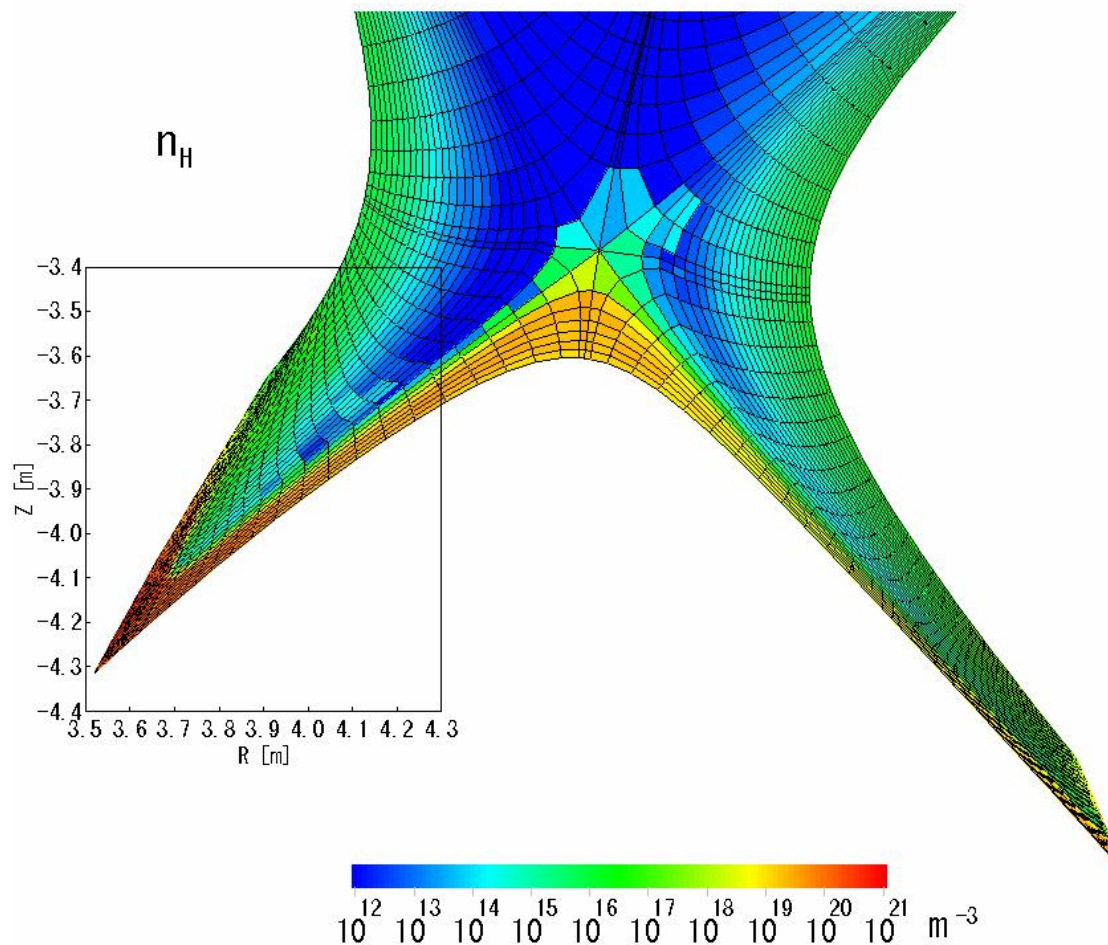
- ・励起原子の増加に伴い、励起状態からの電子衝突による電離が増加する
- ・基本的には、プラズマ全体を同時に考慮して励起原子密度を計算しなくてはならない

水素原子ライマン線の吸収長

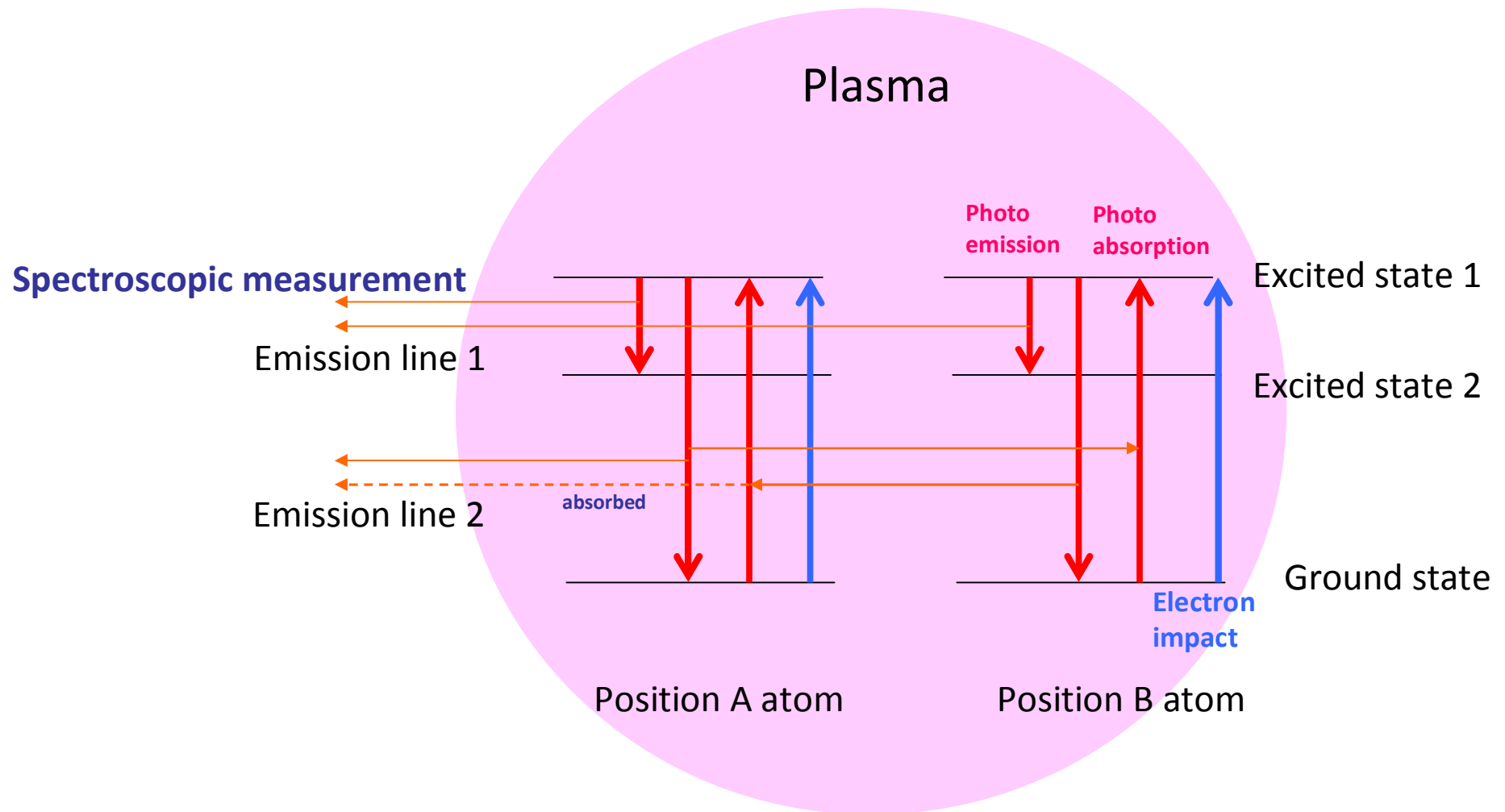


SlimCS 水素原子の輻射輸送の計算

- ・ 原型炉 SlimCS の完全非接触プラズマダイバータに適用
- ・ (n_e, T_e, n_H, n_i) はダイバータコードSONIC 出力を利用
- ・ 内側ダイバータ部のみ計算
- ・ 輻射輸送計算のメッシュはSONICのメッシュを利用



Radiation Trapping and Spectroscopic measurement



- ・励起原子の増加に伴い、励起状態からの電子衝突による電離が増加する
- ・基本的には、プラズマ全体を同時に考慮して励起原子密度を計算しなくてはならない

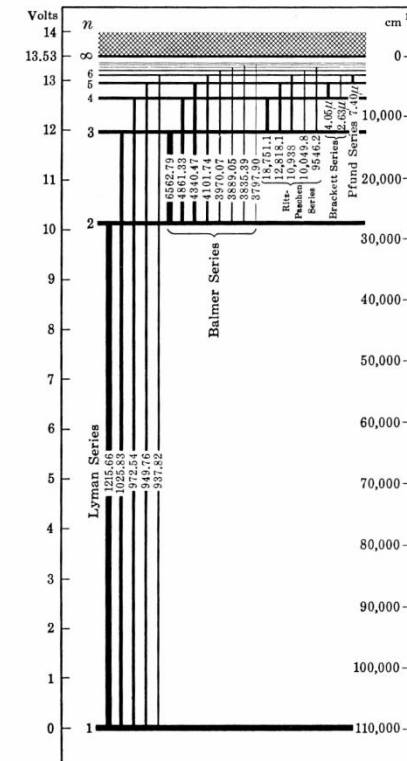
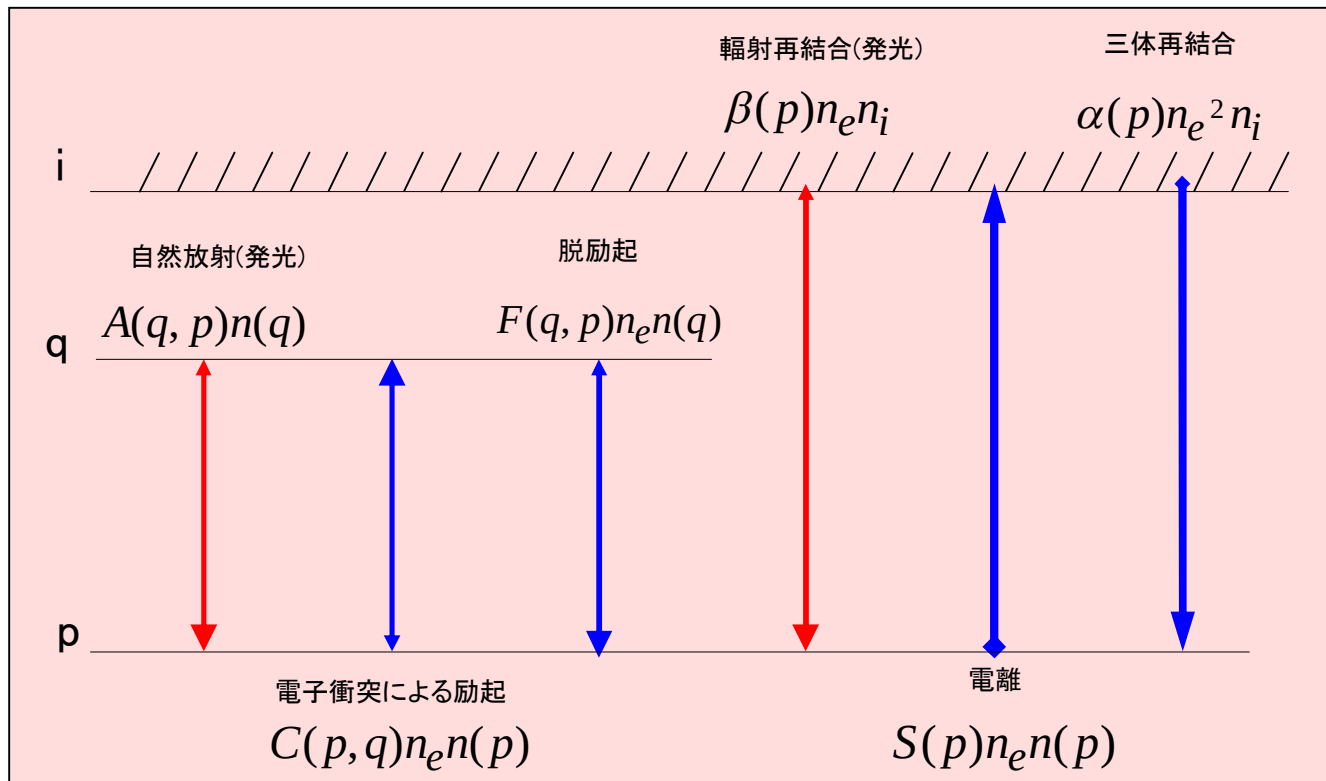
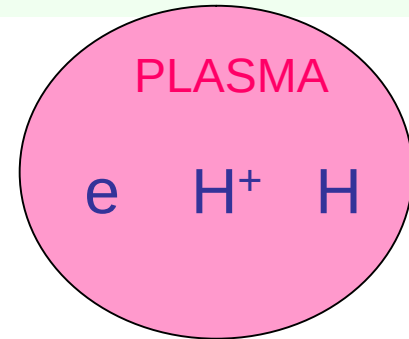
衝突輻射モデル

流入項

$$\frac{dn(p)}{dt} = \sum_{q < p} C(q, p) n_e n(q) + \sum_{q > p} \{F(q, p) n_e + A(q, p)\} n(q) + \alpha(p) n_e^2 n_i + \beta(p) n_e n_i$$

$$- [\{ \sum_{q < p} F(p, q) + \sum_{q > p} C(p, q) + S(p) \} n_e + \sum_{q < p} A(p, q)] n(p)$$

流出項



衝突輻射モデル

$$\frac{dn(p)}{dt} = \sum_{q < p} C(q, p) n_e n(q) + \sum_{q > p} \{ F(q, p) n_e + A(q, p) \} n(q) + \alpha(p) n_e^2 n_i + \beta(p) n_e n_i$$

$$- [\{ \sum_{q < p} F(p, q) + \sum_{q > p} C(p, q) + S(p) \} n_e + \sum_{q < p} A(p, q)] n(p)$$

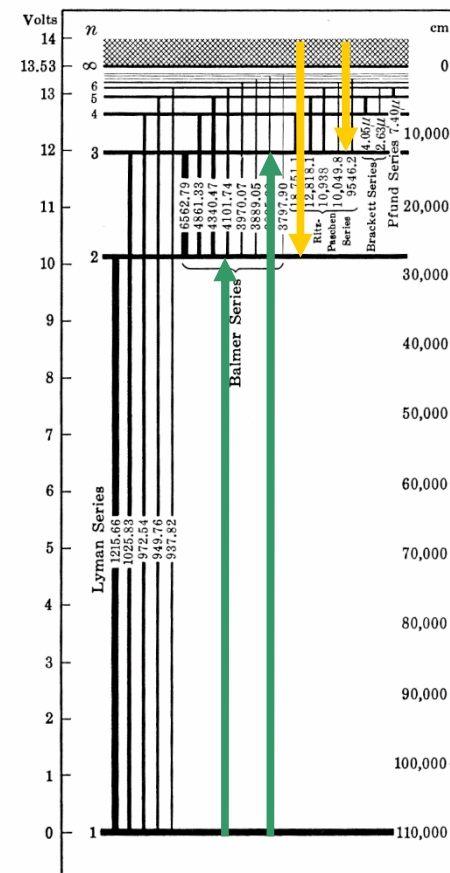
$p \geq 2$

未知数

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ n(3) \\ n(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ n(3) \\ n(2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \alpha(3)n_e + \beta(3) \\ \alpha(2)n_e + \beta(2) \end{pmatrix} n_i n_e + \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ C(1,3) \\ C(1,2) \end{pmatrix} n(1) n_e$$

0
準定常近似
(QSS)

$$n(p) = \underbrace{R_0(p) n_i n_e}_{\text{再結合プラズマ成分}} + \underbrace{R_1(p) n(1) n_e}_{\text{電離プラズマ成分}}$$



$p=1$

$$\frac{dn(1)}{dt} = -S_{CR} n(1) n_e + \alpha_{CR} n_{H^+} n_e$$

S_{CR} 実効的電離速度係数
 α_{CR} 実効的再結合速度係数

電離プラズマ成分

$T_e=10\text{eV}$ $n_e=10^{12}\text{cm}^{-3}$

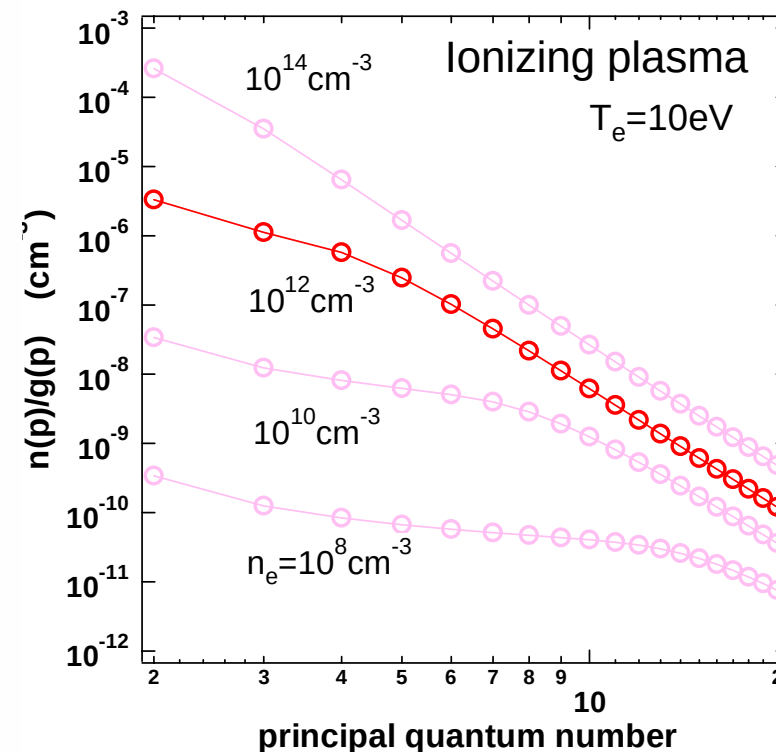
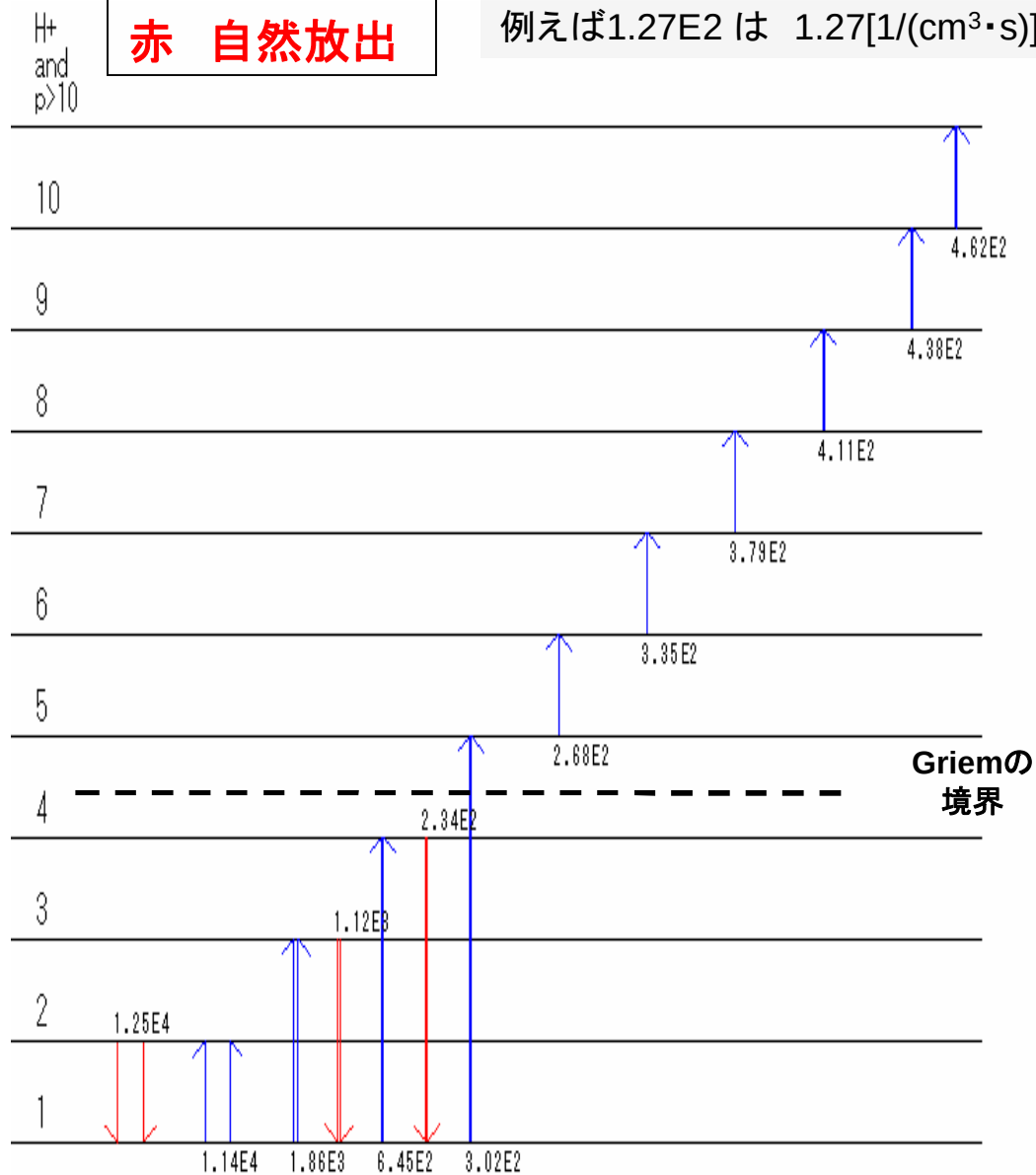
$n(1)=1\text{cm}^{-3}$

青 電子衝突

赤 自然放出

図中の数字

例えば1.27E2 は $1.27[1/(\text{cm}^3\cdot\text{s})]$



$$S(1)n(1)n_e=6.92\text{E}3 [1/(\text{cm}^3\cdot\text{s})]$$

再結合プラズマ成分

$T_e=0.1\text{eV}$ $n_e=10^{12}\text{cm}^{-3}$

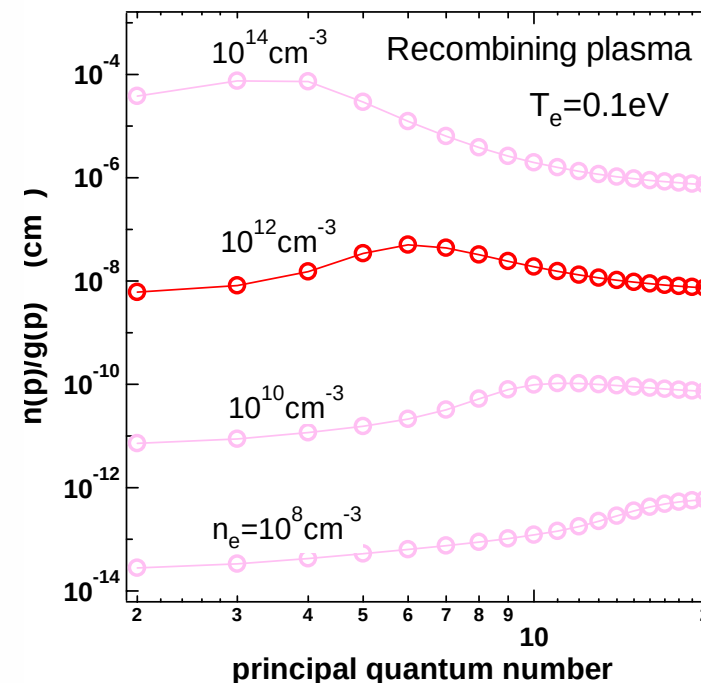
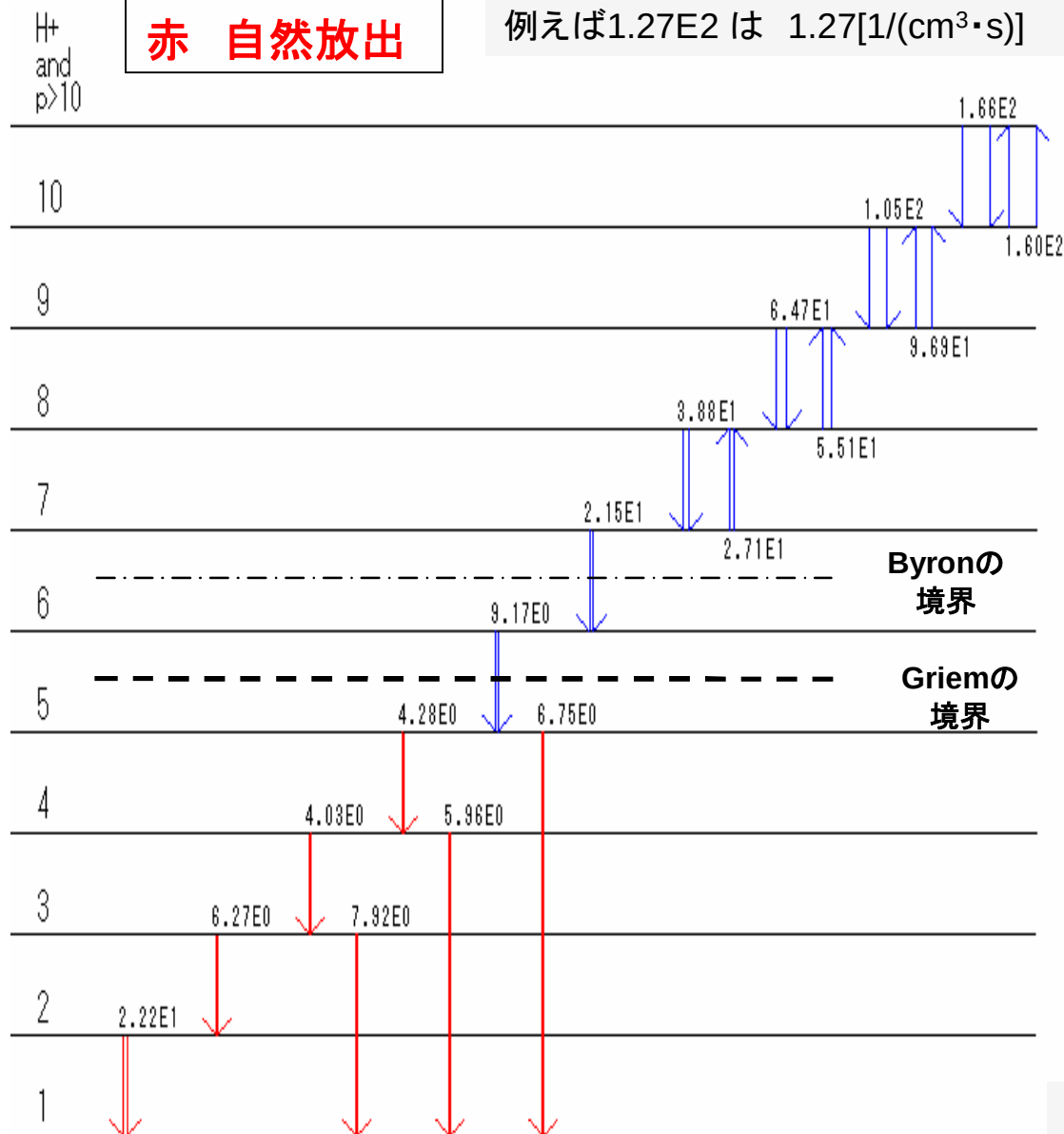
$n_i=1\text{cm}^{-3}$

青 電子衝突

赤 自然放出

図中の数字

例えば1.27E2 は $1.27[1/(\text{cm}^3\cdot\text{s})]$



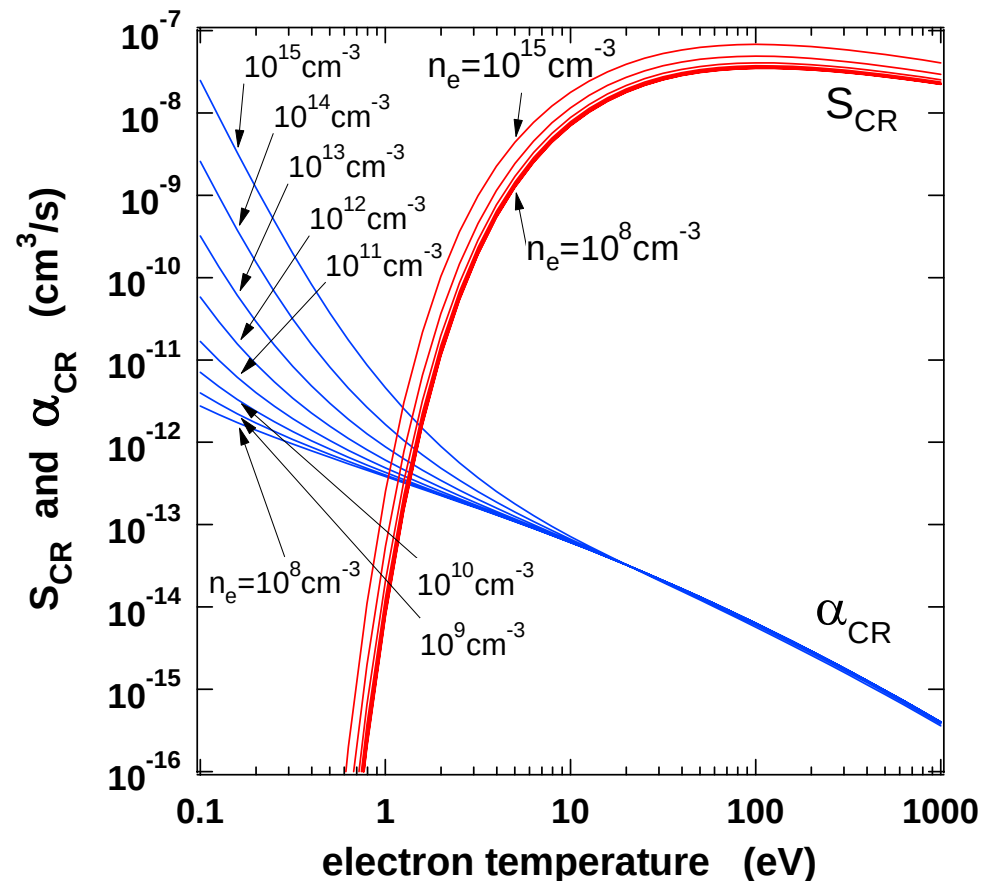
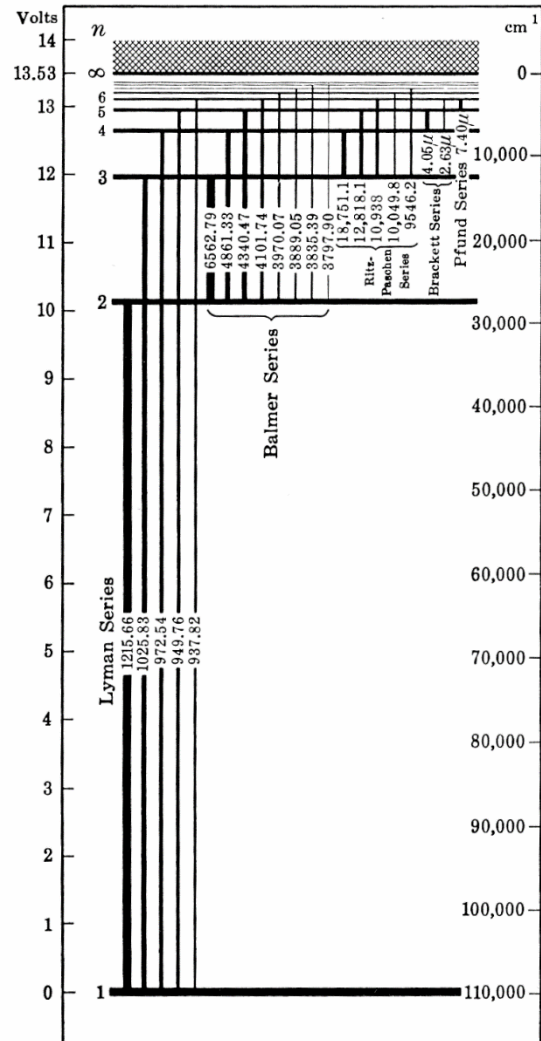
$$(\alpha(1)n_e + \beta(1)n_z n_e) = 4.69\text{E-1} \quad [1/(\text{cm}^3\cdot\text{s})]$$

Effective Ionization and Recombination Rate coefficients

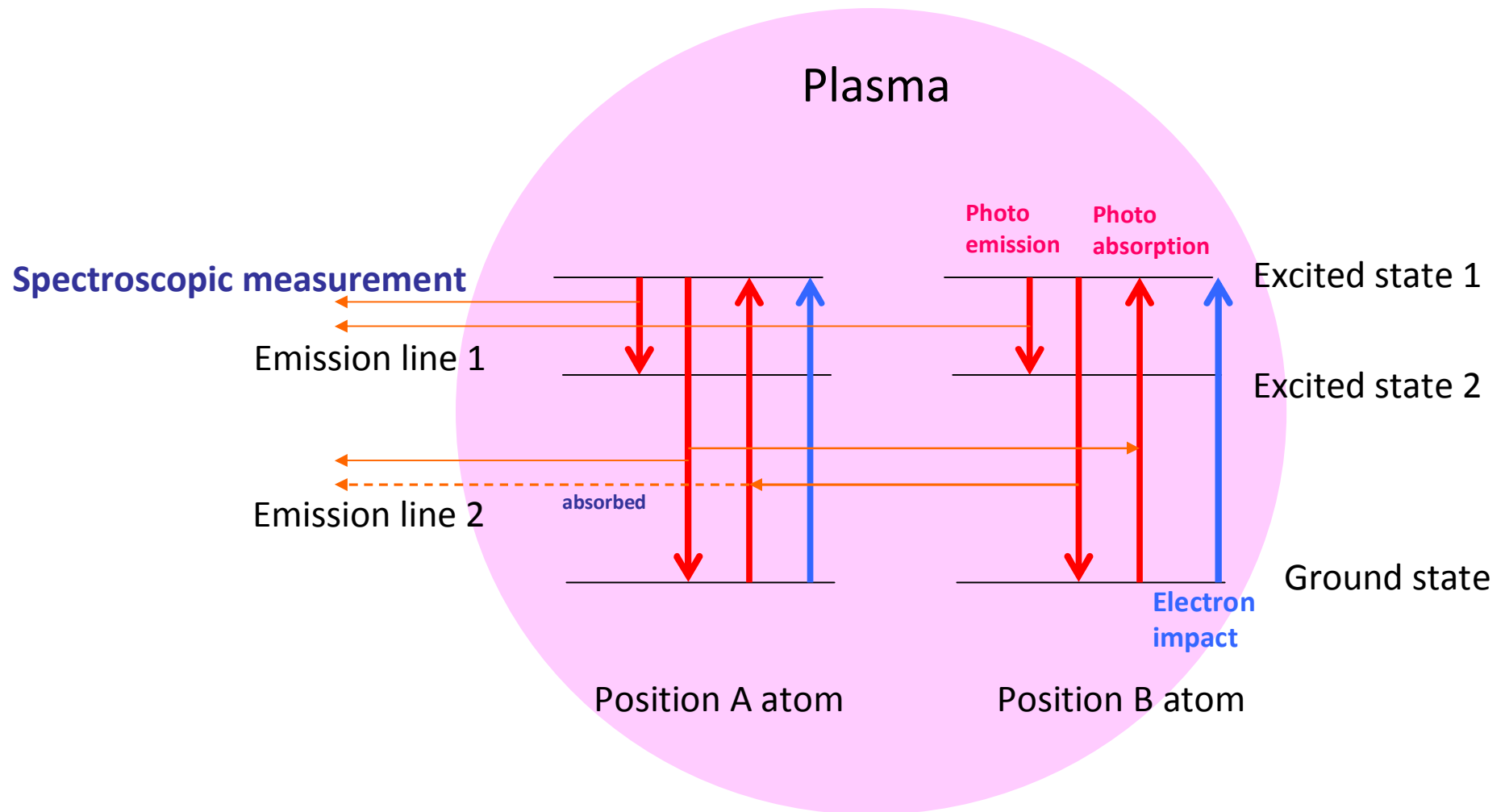
S_{CR} Effective Ionization Rate Coefficient

α_{CR} Effective Recombination Rate Coefficient

$$\frac{dn(1)}{dt} = -S_{CR} n(1)n_e + \alpha_{CR} n_H^+ n_e$$



Radiation Trapping and Spectroscopic measurement



- ・励起原子の増加に伴い、励起状態からの電子衝突による電離が増加する
- ・基本的には、プラズマ全体を同時に考慮して励起原子密度を計算しなくてはならない

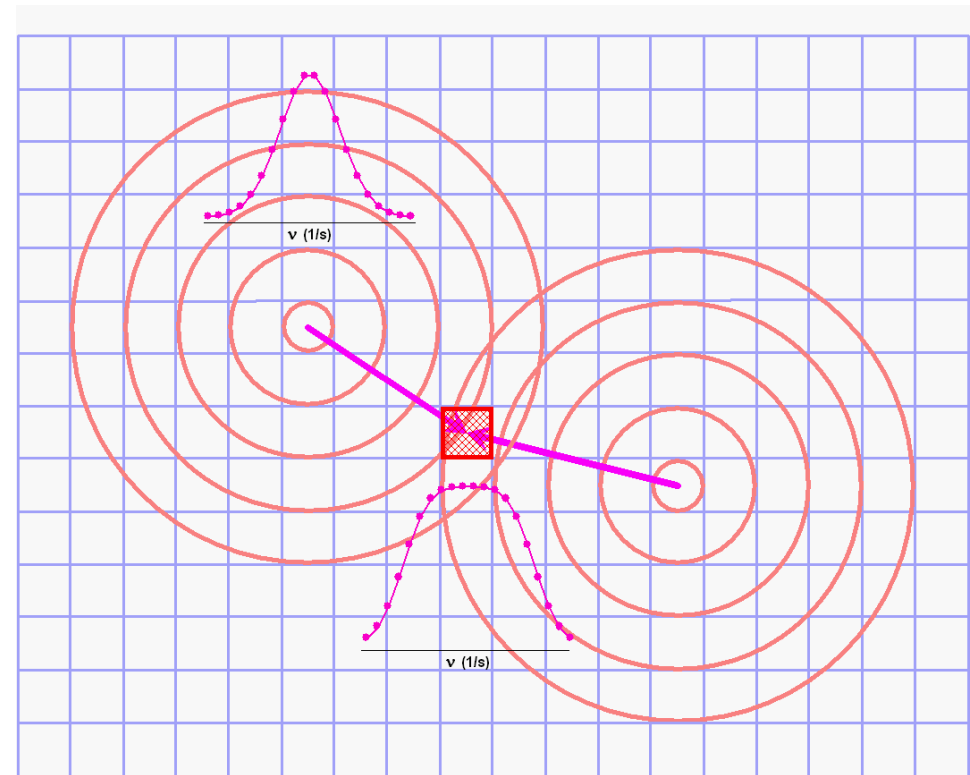
輻射輸送の計算手法

(1) 空間を微小セルに分割し、各場所に

- ・原子スペクトルプロファイル $g(\nu)$: 中性粒子輸送コード水素原子温度(ドップラー広がり)
- ・基底状態原子密度 $n(1)$: 中性粒子輸送コード
- ・電子密度 n_e
- ・電子温度 T_e

を与える。

- (2) 初めに輻射輸送を考慮せず、各場所の励起準位ポピュレーションを衝突輻射モデルにより計算する。
- (3) (2)の励起準位ポピュレーションから各場所の光の放出と吸収を計算し、光強度の空間分布を計算する。
- (4) (3)の光強度を用いて、光吸収を考慮して各場所の励起準位ポピュレーションを計算する。
- (5) このような計算を各場所の光強度と励起準位ポピュレーションの値が収束するまで繰り返す。



Iterative CR model for radiation trapping

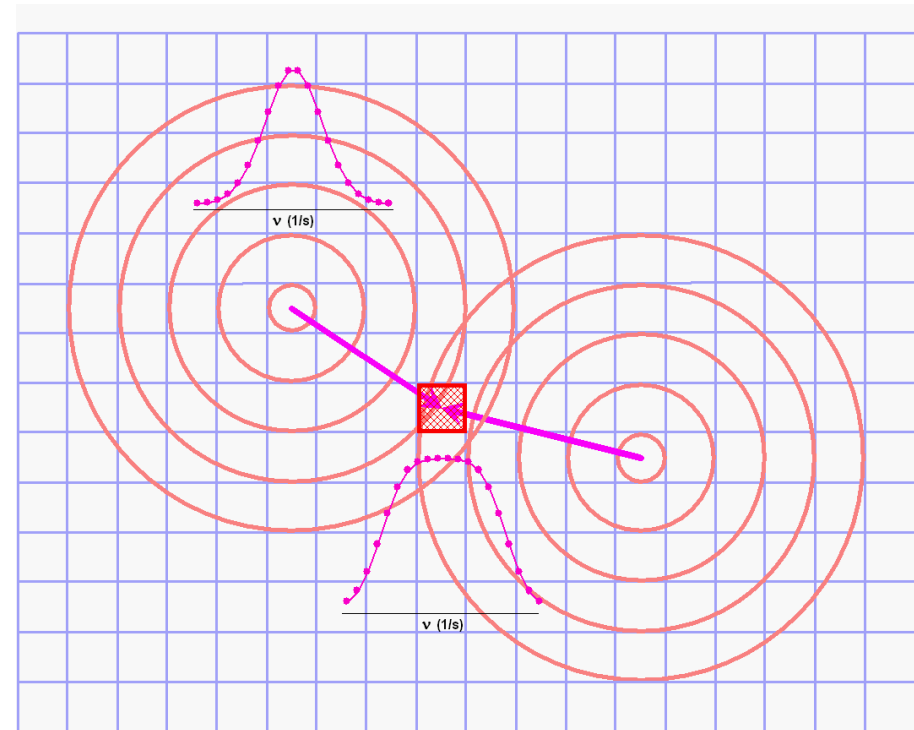
Emission

$$\varepsilon_{pq}(\nu) = A(p, q)n(p)g_{pq}(\nu)h\nu\Delta V$$

absorption

$$\rho_{pq}(\nu) = \frac{\varepsilon_{pq}(\nu)}{c} \frac{1}{4\pi R^2} \exp\left(-\int_0^R \kappa_{qp}(\nu)dr\right)$$

$$\kappa_{qp}(\nu) = \frac{(B(q, p)n(q) - B(p, q)n(p)) h\nu g_{pq}(\nu)}{c}$$



従来の電離と再結合の項に
吸収の項が追加される

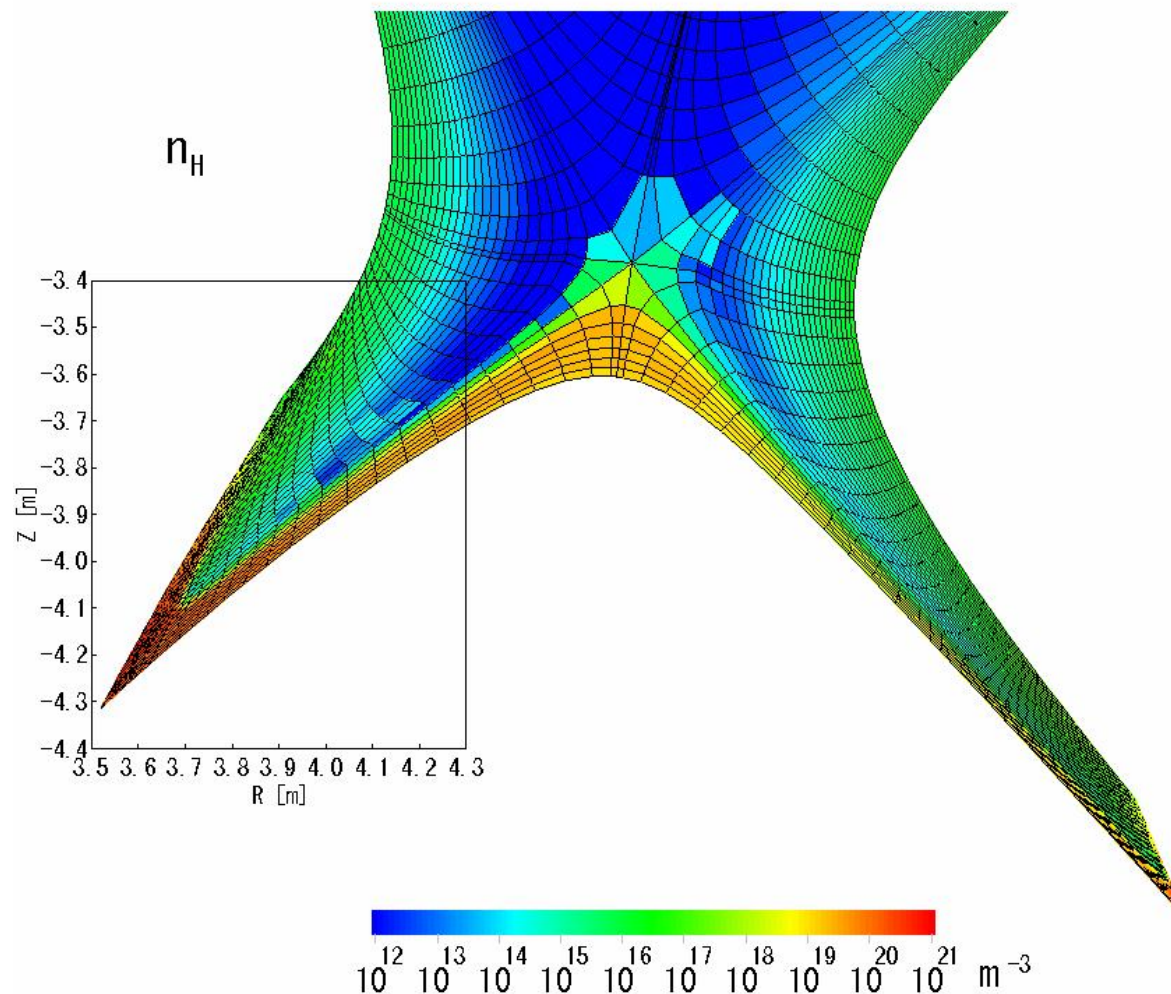
$$\left\{ \sum_{\nu} B(1, p) \rho_{p1}^{total}(\nu) g_{p1}(\nu) \Delta \nu \right\} n(1)$$

L_p

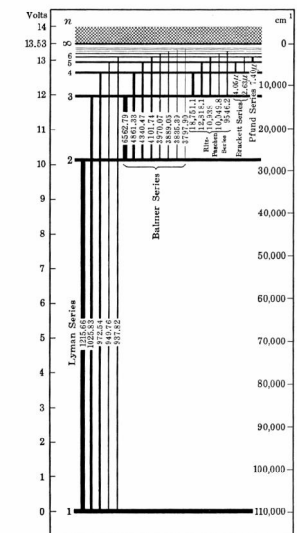
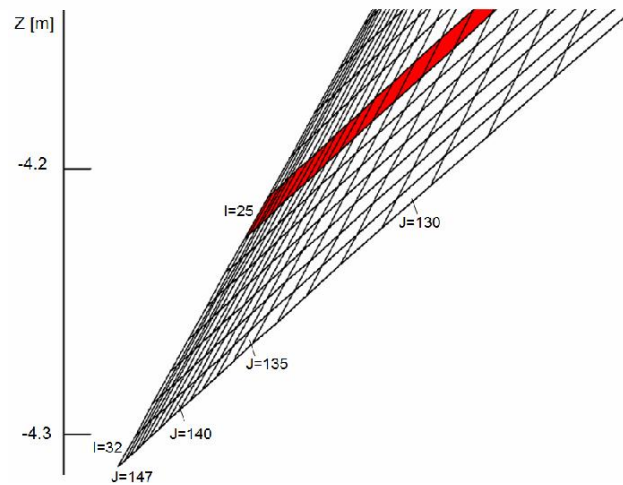
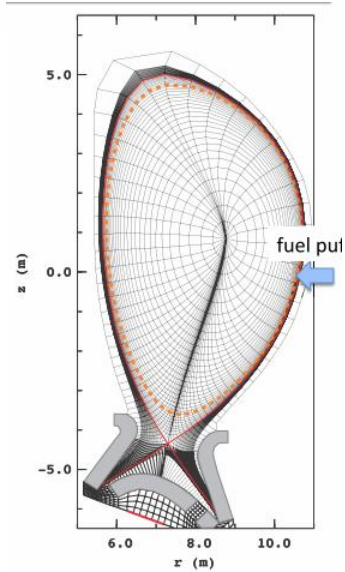
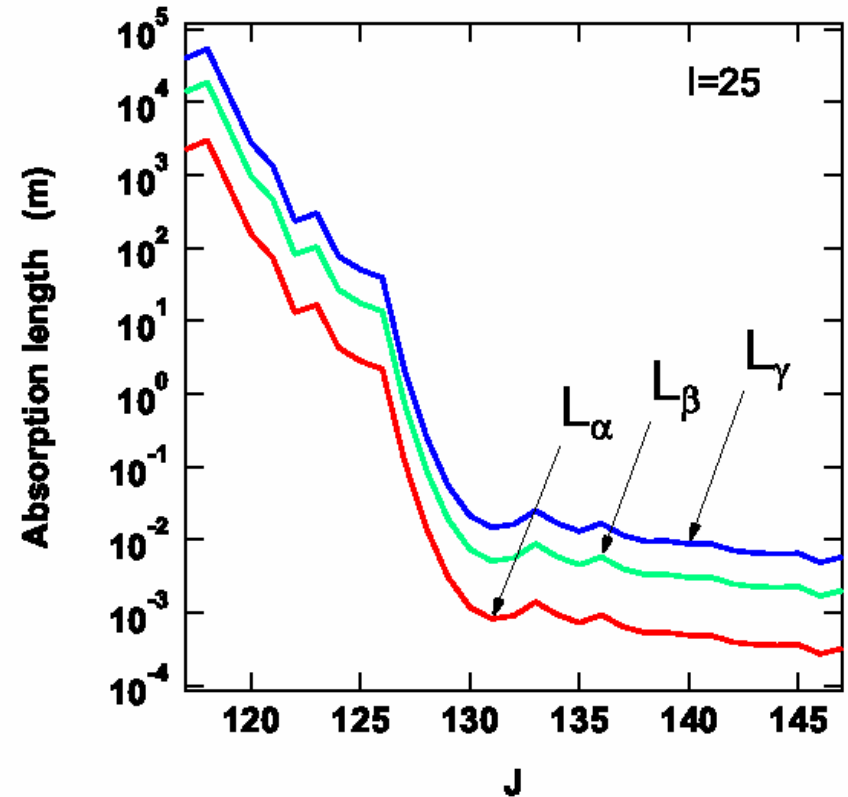
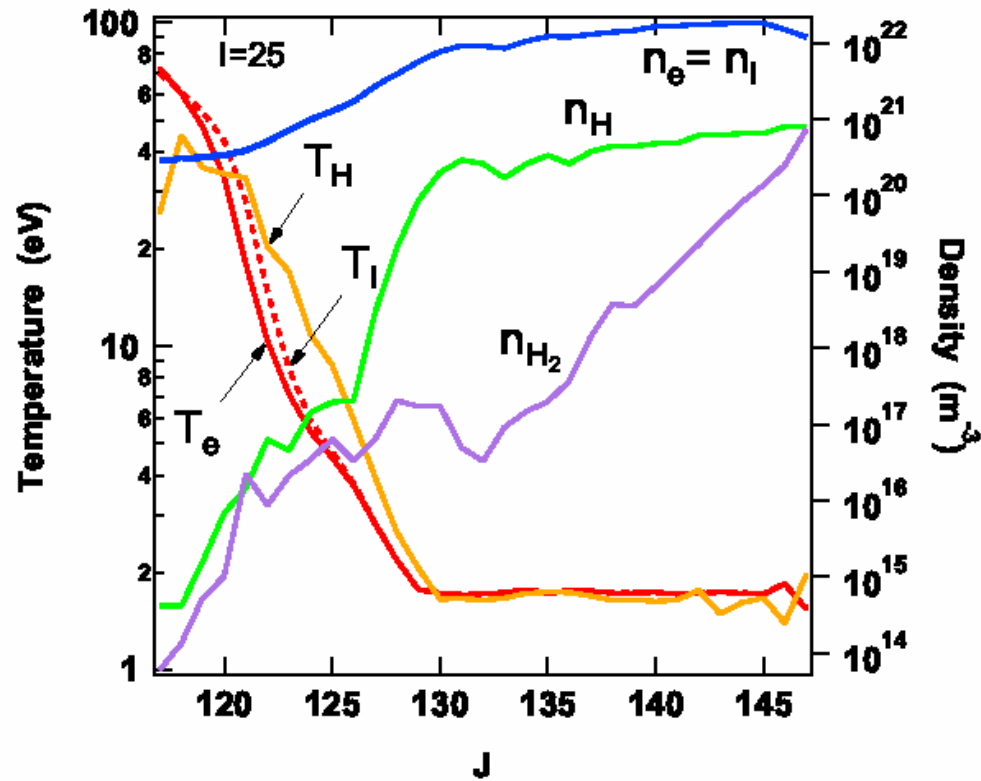
$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ n(3) \\ n(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ n(3) \\ n(2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \alpha(3)n_e + \beta(3) \\ \alpha(2)n_e + \beta(2) \end{pmatrix} n_{H^+} n_e + \begin{pmatrix} \cdot \\ \cdot \\ C(1,3) \\ C(1,2) \end{pmatrix} n_H n_e + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} n(1) L_2 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} n(1) L_3 + \dots$$

0

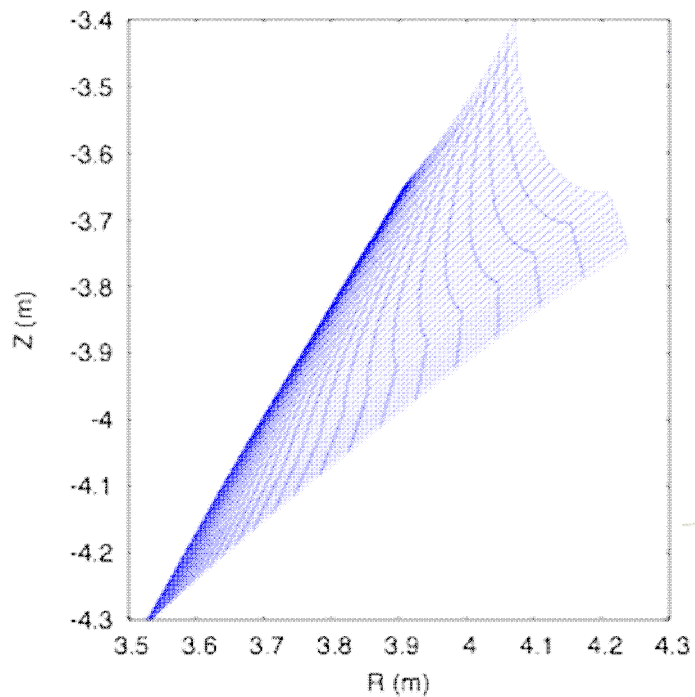
- ・ 原型炉 SlimCS の完全非接触プラズマダイバータに適用
- ・ (n_e, T_e, n_H, n_i) はダイバータコードSONIC 出力を利用
- ・ 輻射輸送計算のメッシュはSONICのメッシュを利用



水素原子ライマン線の吸収長

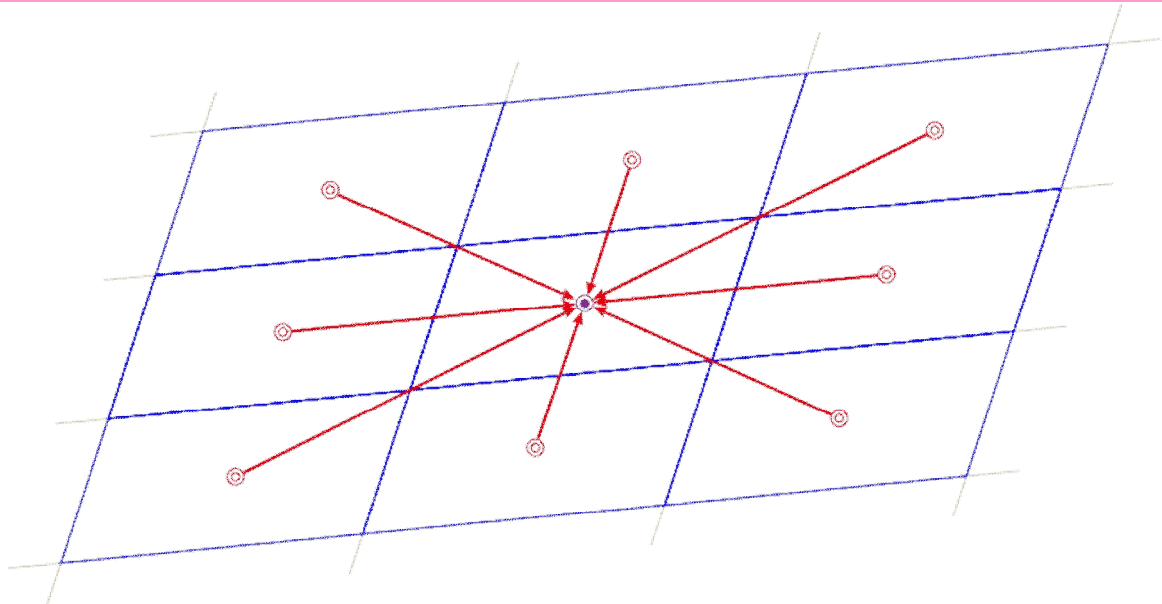


輻射輸送計算のメッシュ

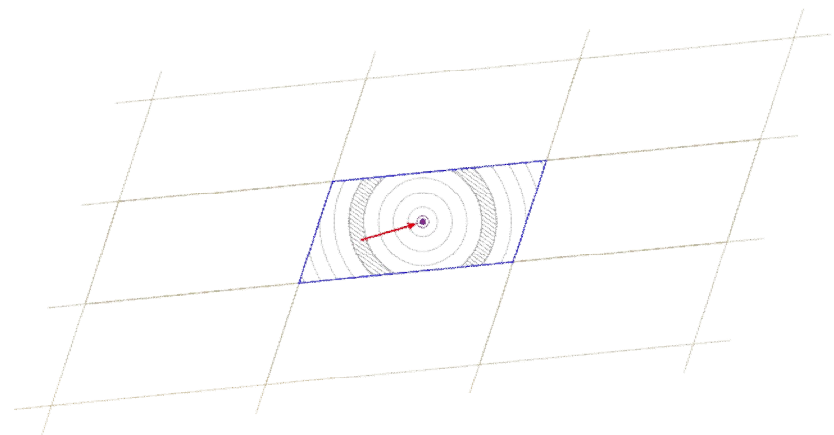


SONICのメッシュを利用

- ・ 1つのセル中ではプラズマパラメータは一定
- ・ セルの厚みは1cmで前後40層分を計算



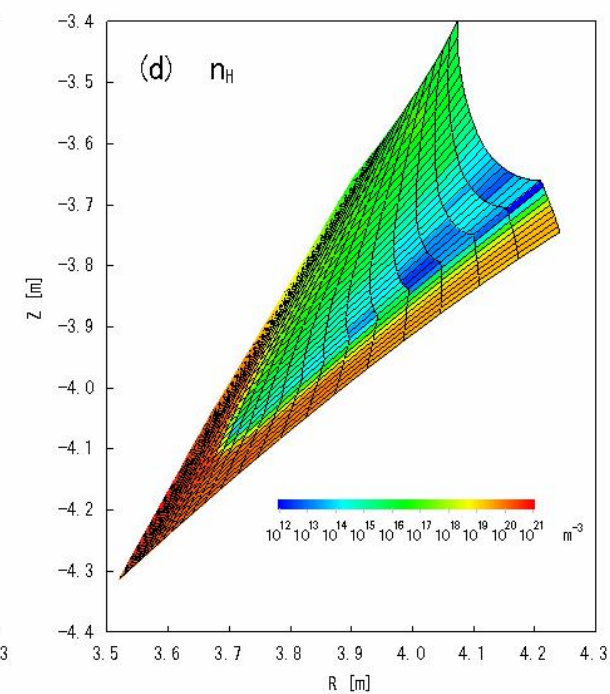
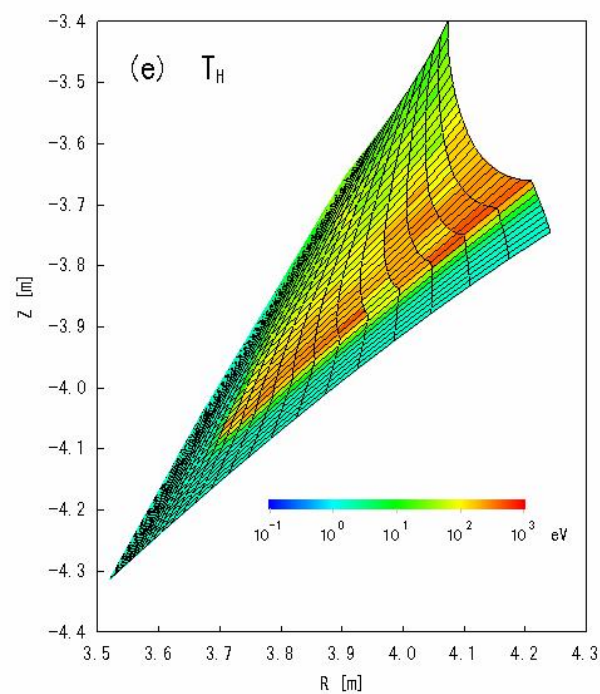
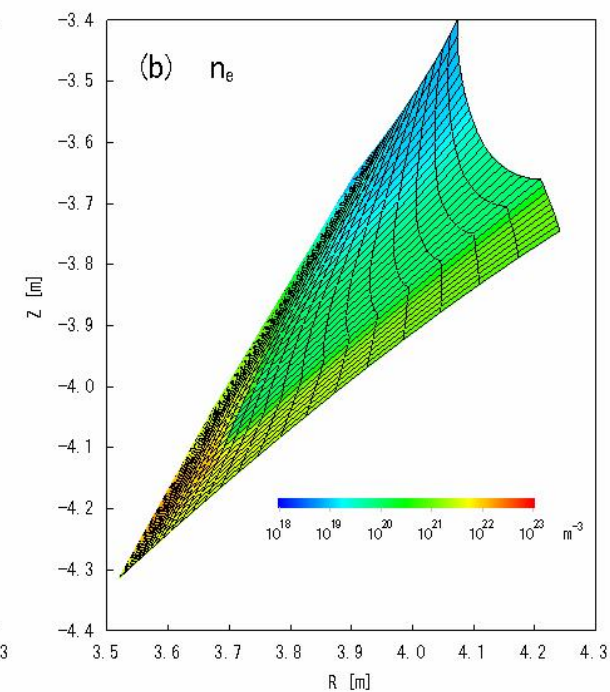
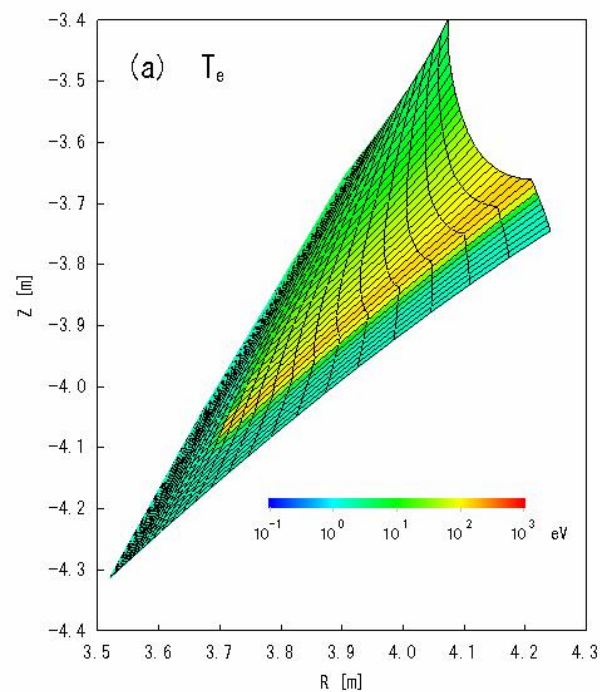
光の発光点および輻射再吸収量の評価点はセルの中心



自セル内で放射された光の吸収も計算

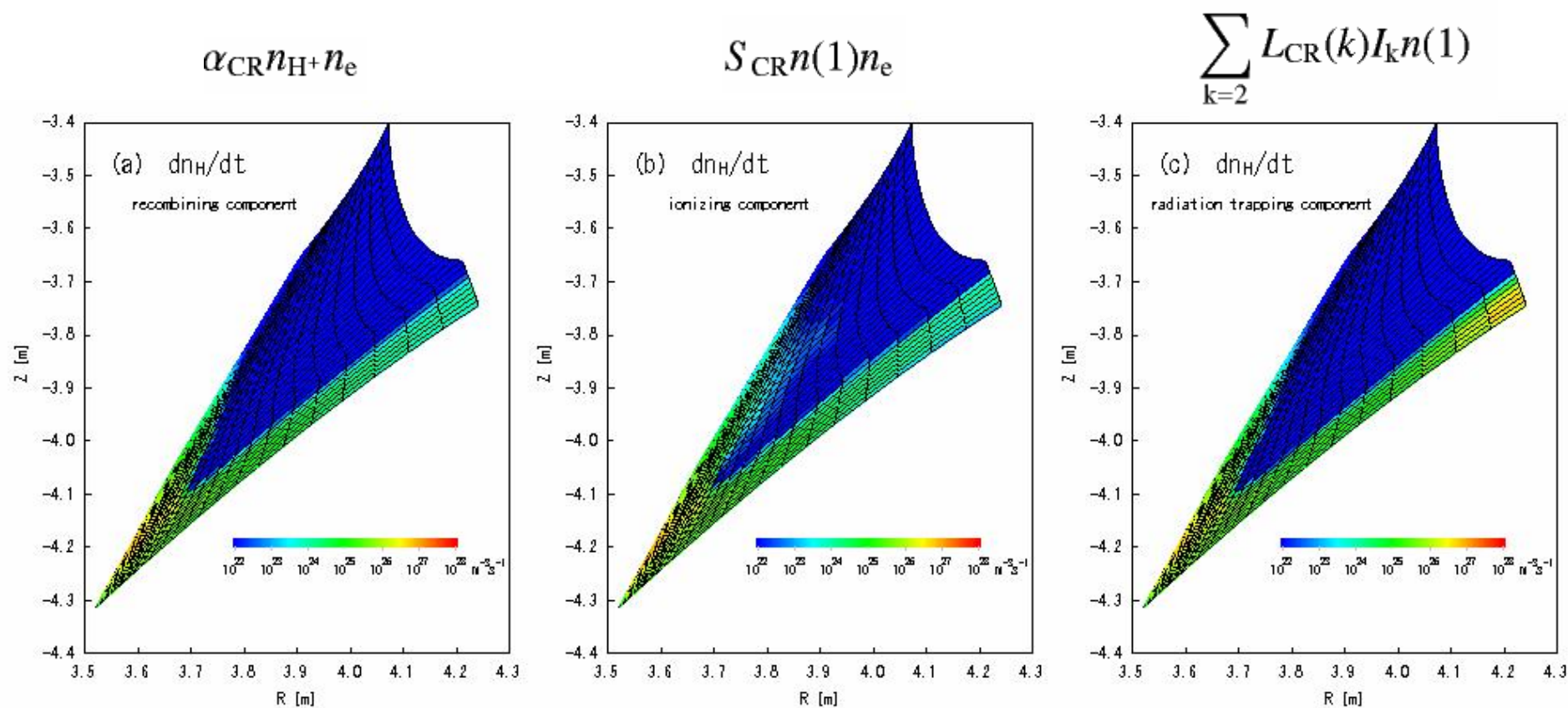
輻射輸送計算

入力データ
(SONIC出力)



収束計算の結果

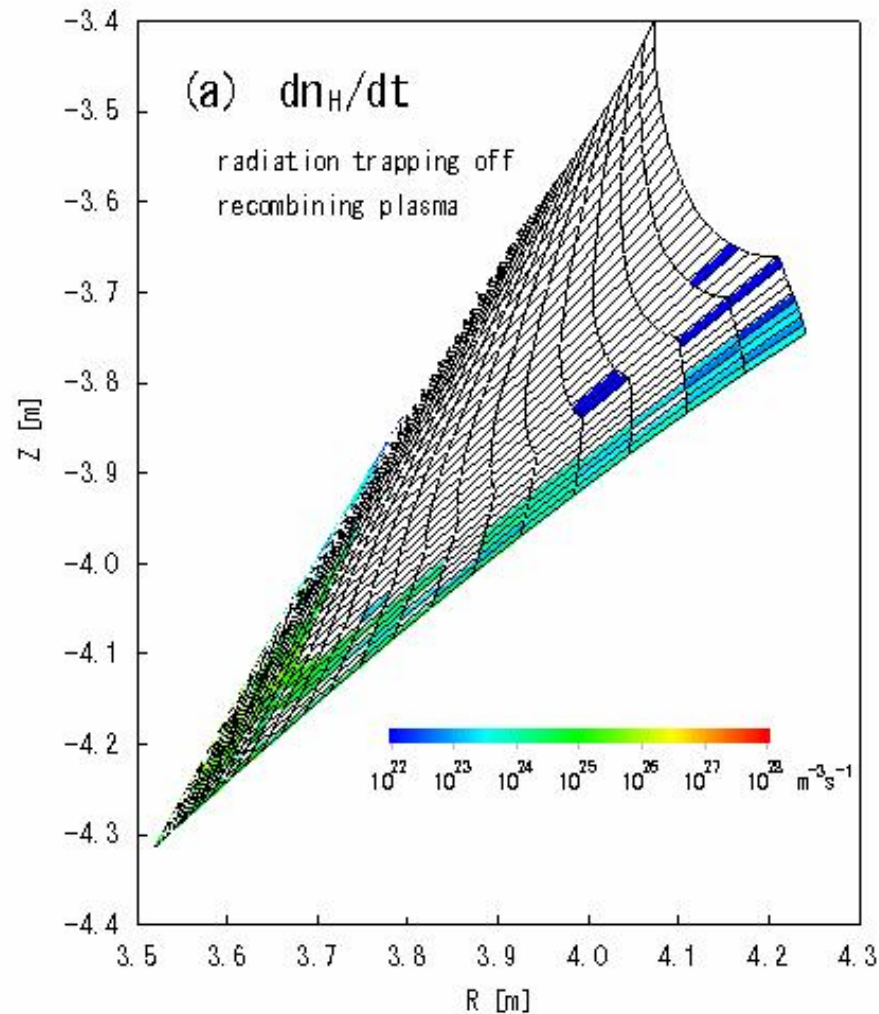
$$\frac{dn_{H^+}}{dt} = -\frac{dn(1)}{dt} = -\alpha_{CR}n_{H^+}n_e + S_{CR}n(1)n_e + \sum_{k=2} L_{CR}(k)I_k n(1)$$



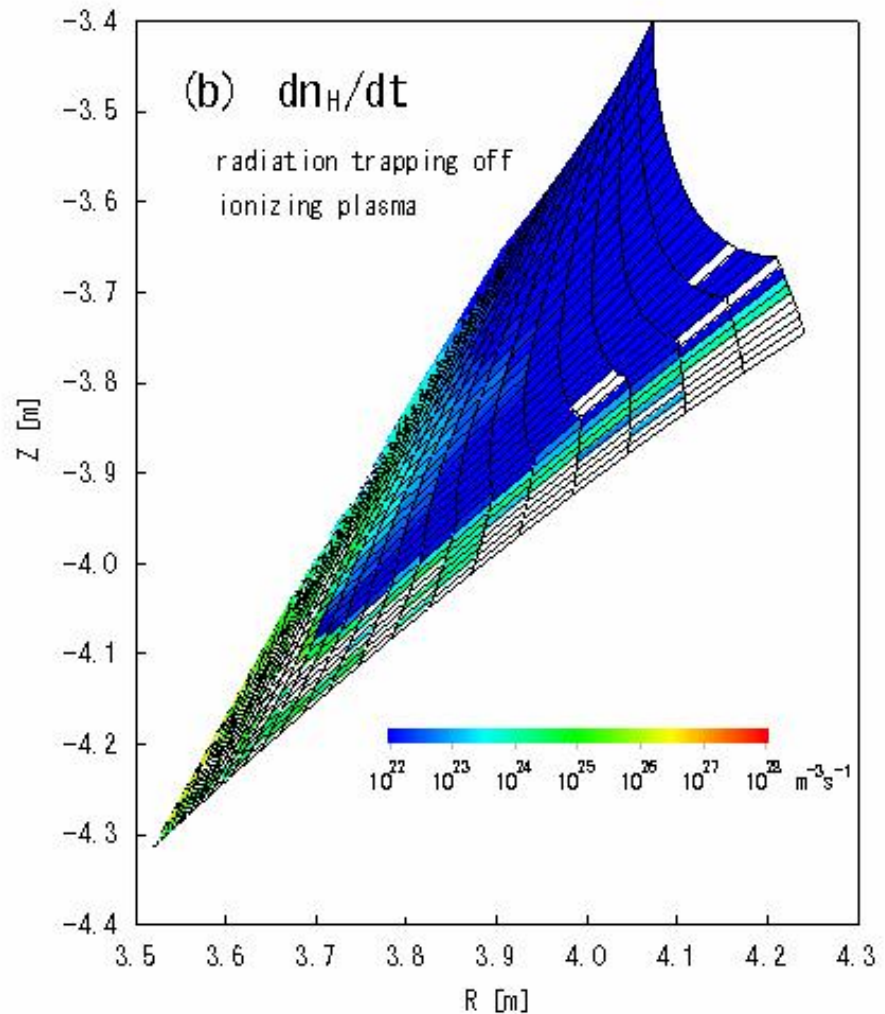
輻射輸送を考えない場合

$$\frac{dn_{H^+}}{dt} = -\frac{dn(1)}{dt} = -\alpha_{CR}n_{H^+}n_e + S_{CR}n(1)n_e + \sum_{k=2} L_{CR}(k)I_k n(1)$$

$\frac{dn_{H^+}}{dt}$ の値が負の領域



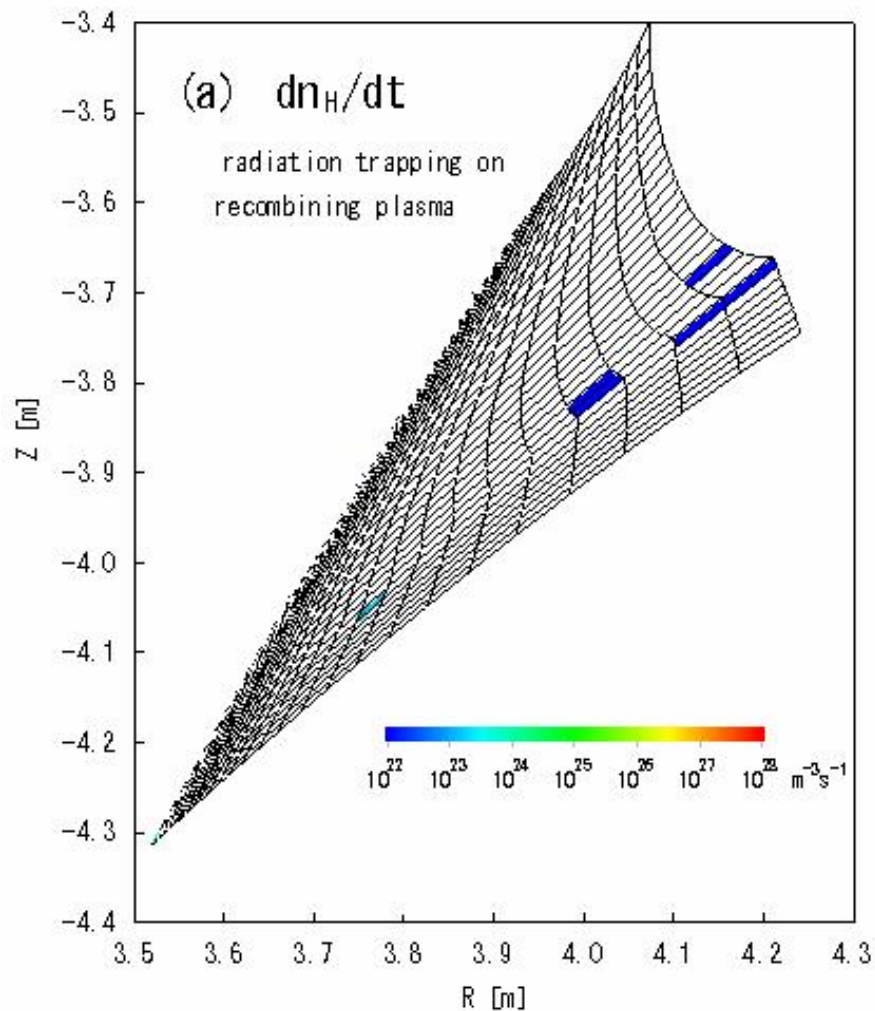
$\frac{dn_{H^+}}{dt}$ の値が正の領域



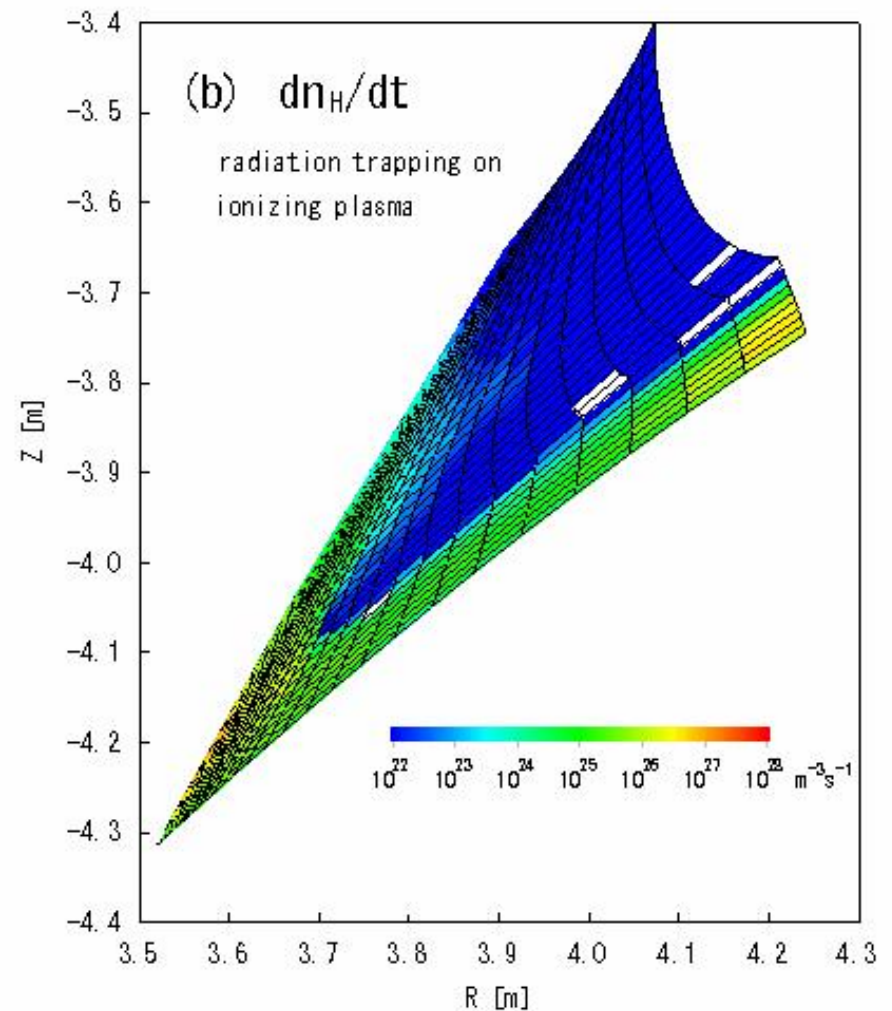
輻射輸送を考える場合

$$\frac{dn_{H^+}}{dt} = -\frac{dn(1)}{dt} = -\alpha_{CR}n_{H^+}n_e + S_{CR}n(1)n_e + \sum_{k=2} L_{CR}(k)I_k n(1)$$

$\frac{dn_{H^+}}{dt}$ の値が負の領域

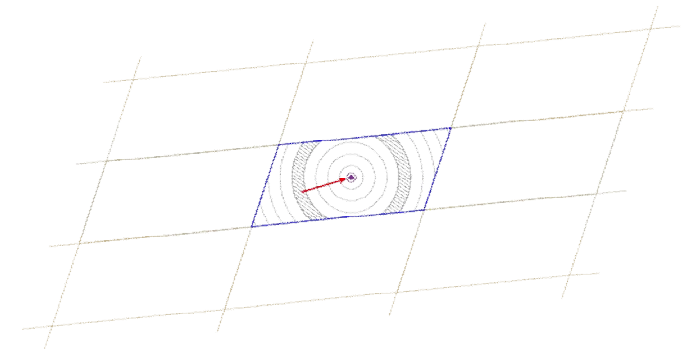
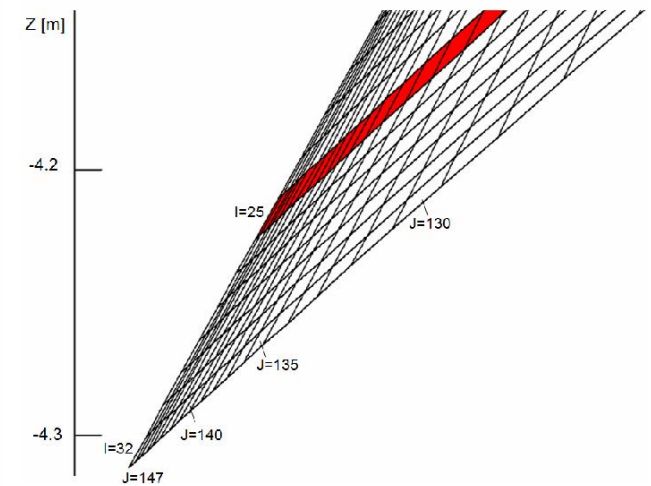
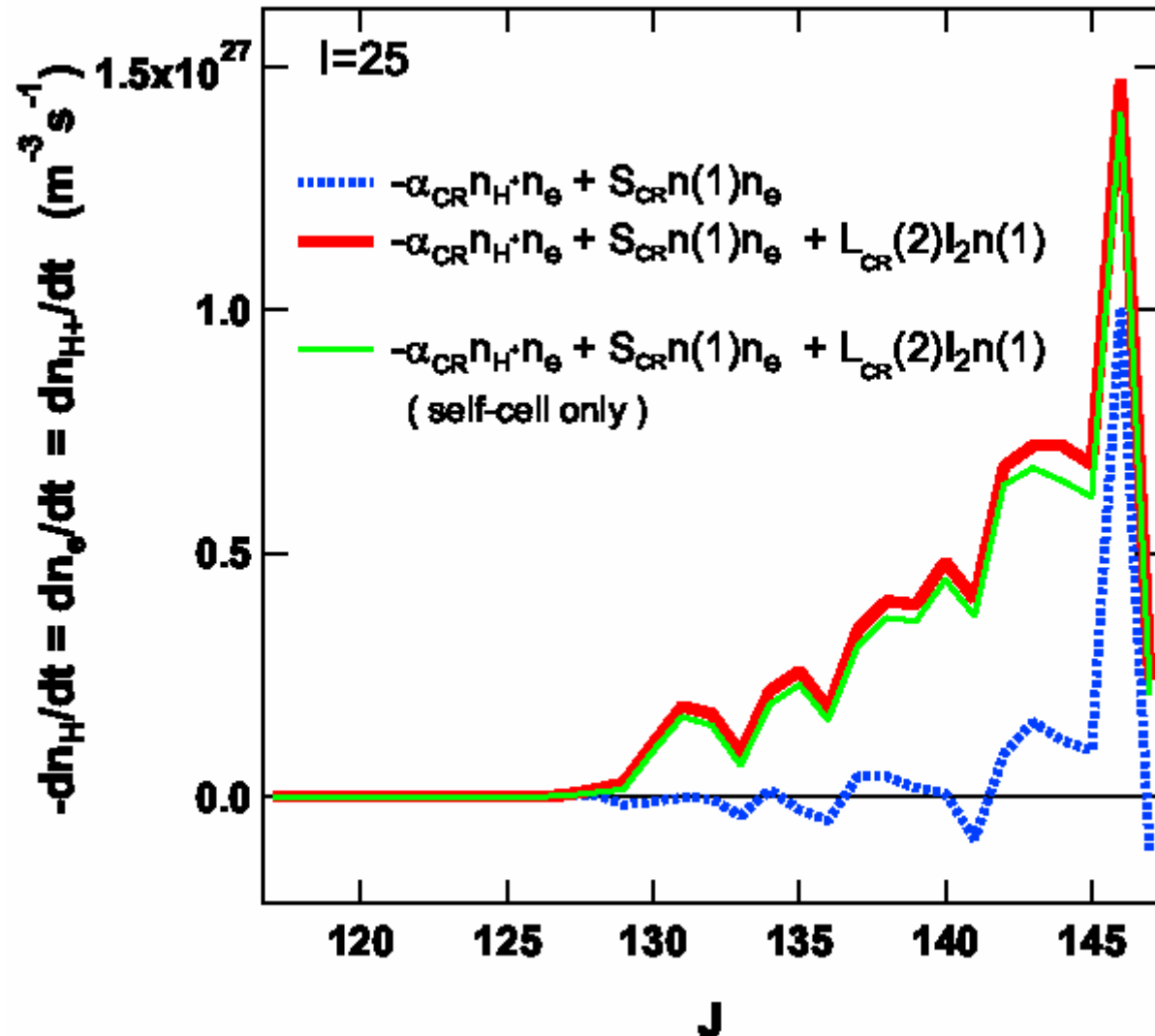


$\frac{dn_{H^+}}{dt}$ の値が正の領域



I=25 自セル内の放射の吸収だけを考慮した場合 (緑のライン)

$$\frac{dn_{H^+}}{dt} = -\frac{dn(1)}{dt} = -\alpha_{CR}n_{H^+}n_e + S_{CR}n(1)n_e + \sum_{k=2} L_{CR}(k)I_k n(1)$$



吸収が効くセルでは、自セル内の放射の吸収だけ考えても結果はほとんど変わらない

SONICへの組み込み

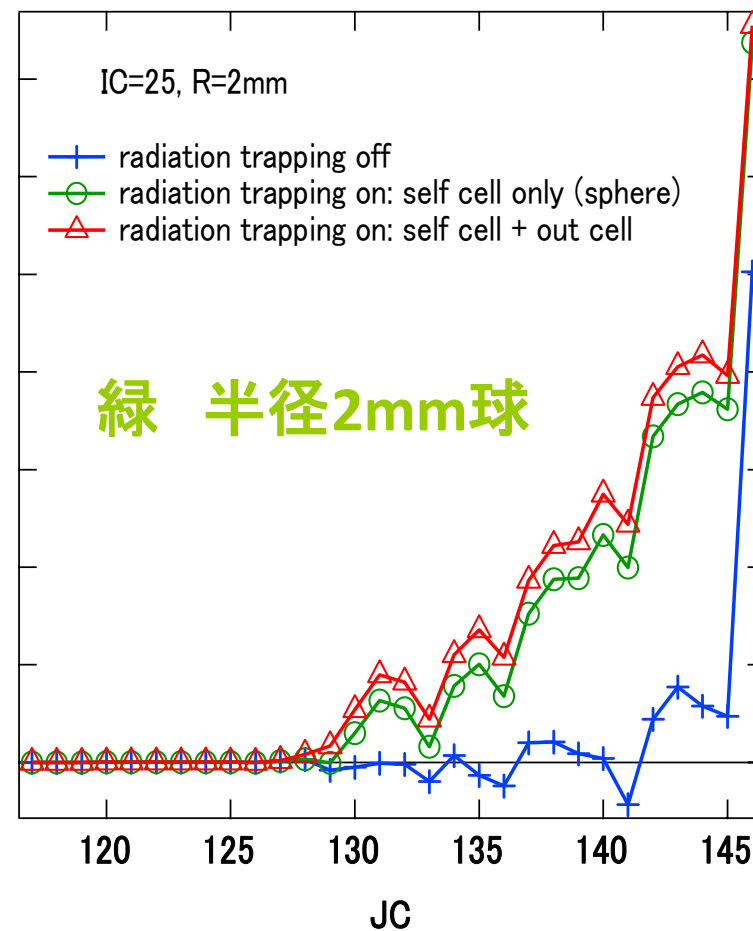
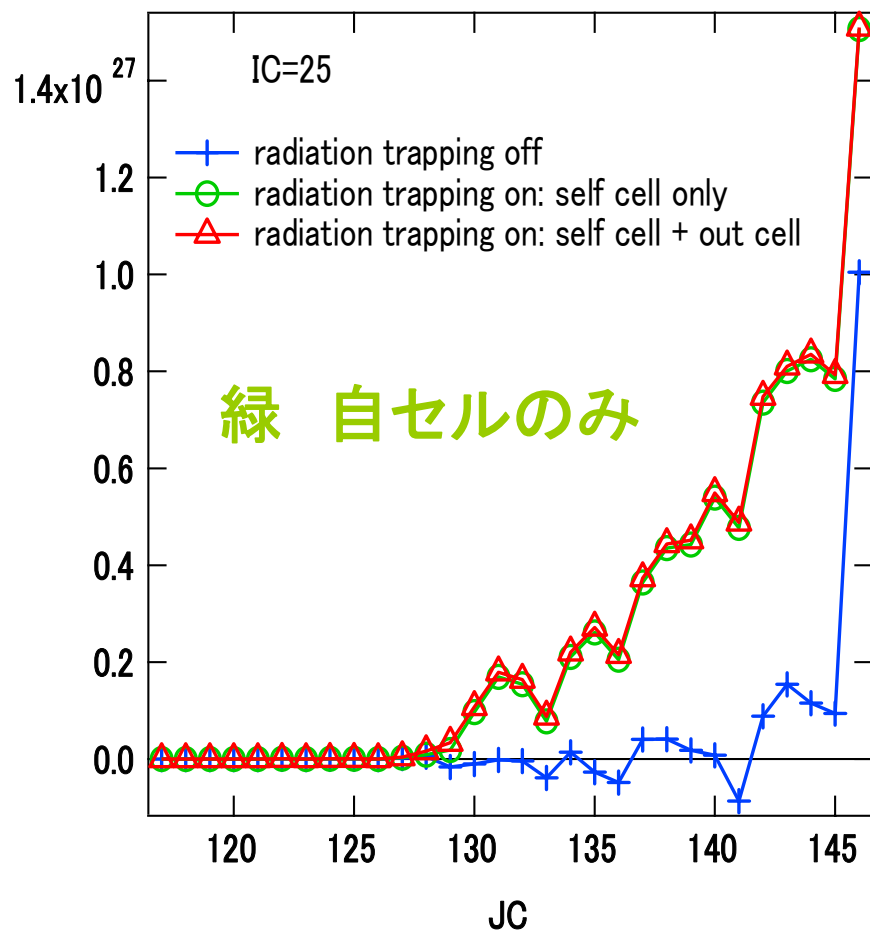
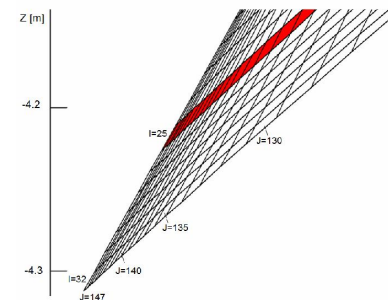
実質的には局所的な扱いが可能

吸収が効くセルでは、自セル内の放射の吸収だけ考えても十分。

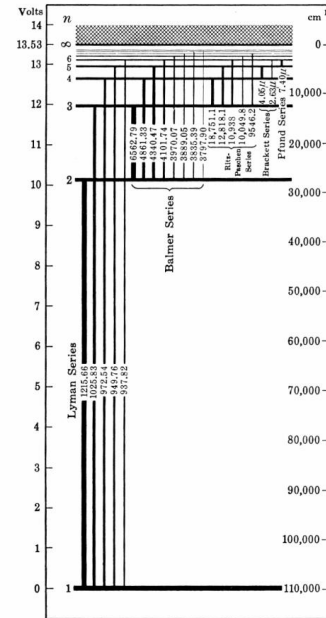
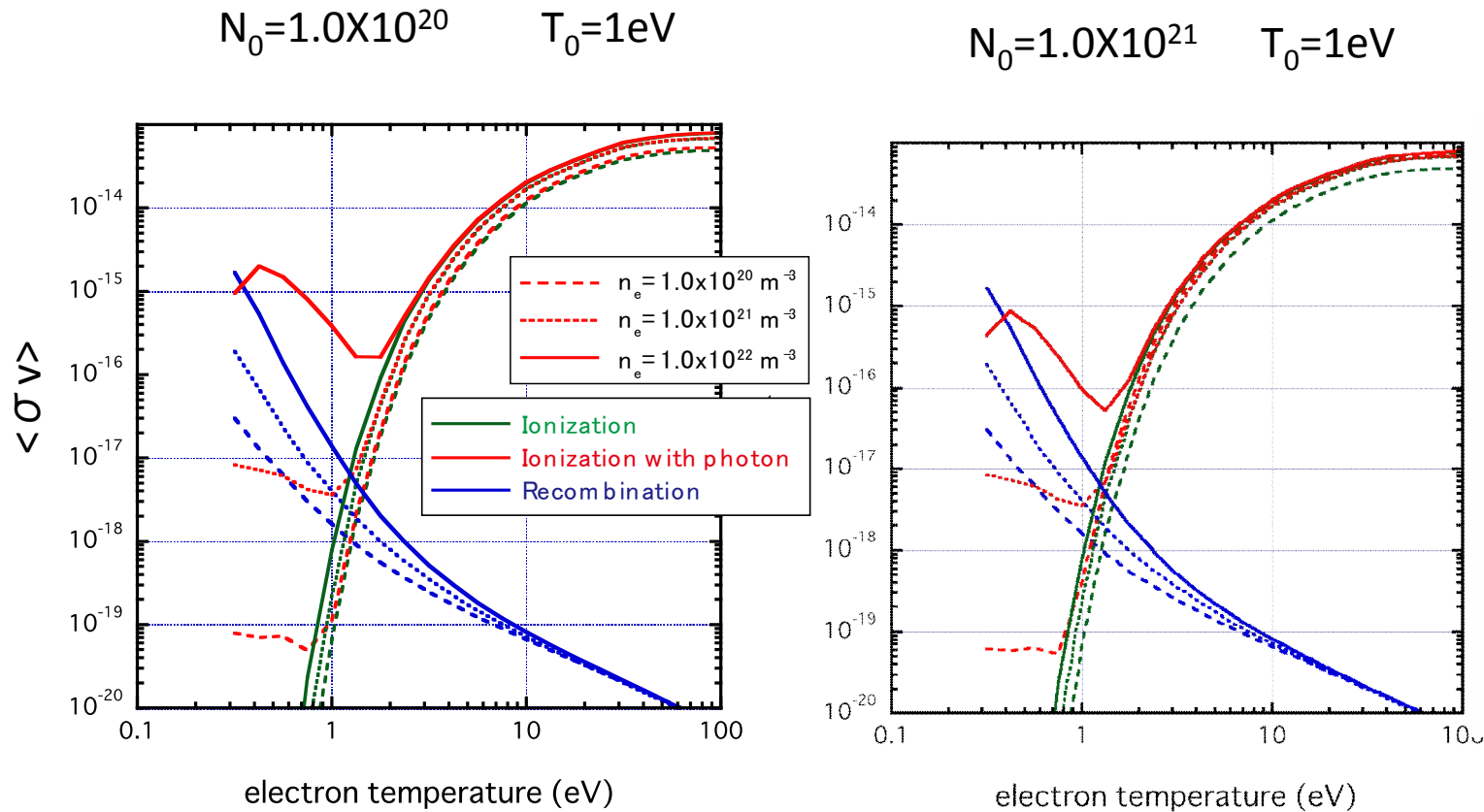
各セルで $(n_e, T_e, n_H, n_i) \rightarrow$ 吸収ありの実効的電離・再結合係数

半径2mmの球(最小のセルサイズの寸法)

各セル共通の吸収を考慮した実効的電離・再結合係数のテーブル作成



輻射捕獲を考慮した実効的な電離・再結合速度係数



$\langle \sigma v \rangle (n_e, n_0, T_e, T_0, T_g)$

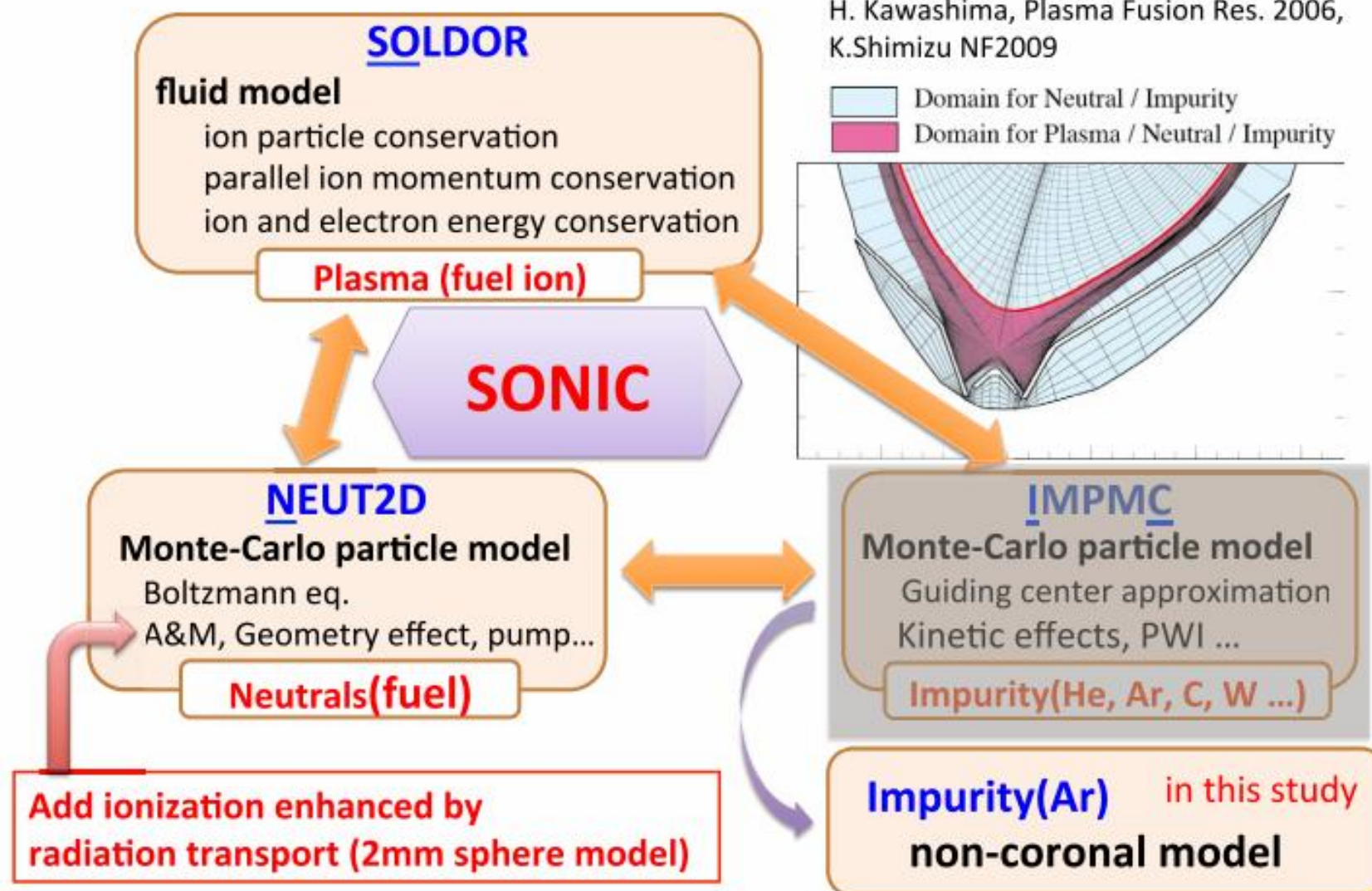
- ・光放射は主に再結合成分から
- ・ここでは(SONICでは)、その吸収は電離成分に分類
- ・吸収があると高励起状態から低電子温度でも電離できる

SONIC

星野 一生

日本原子力研究開発機構

Impact on the plasma solution: iterative calculation of SONIC



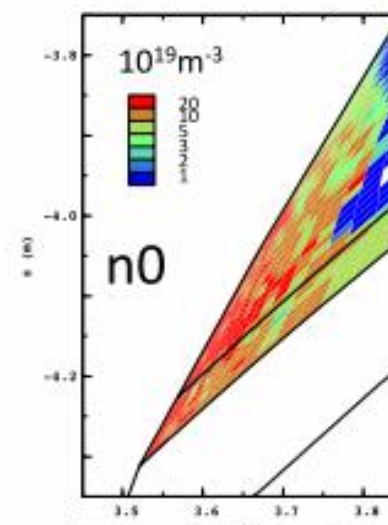
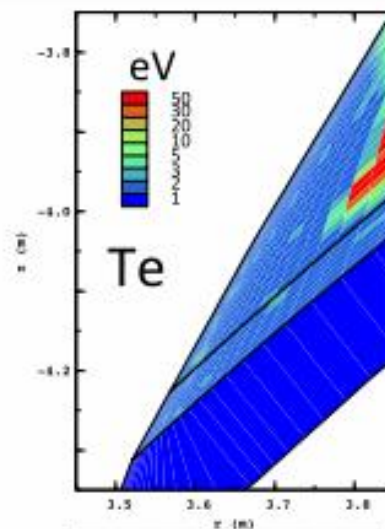
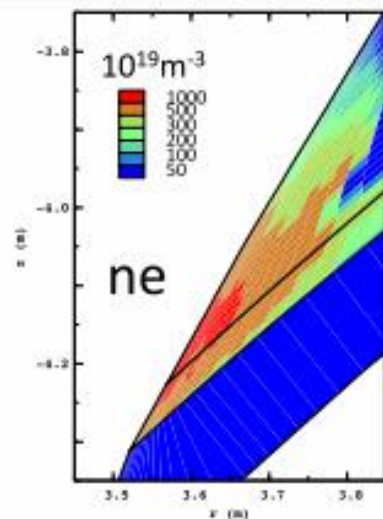
SONIC 計算結果

星野 一生

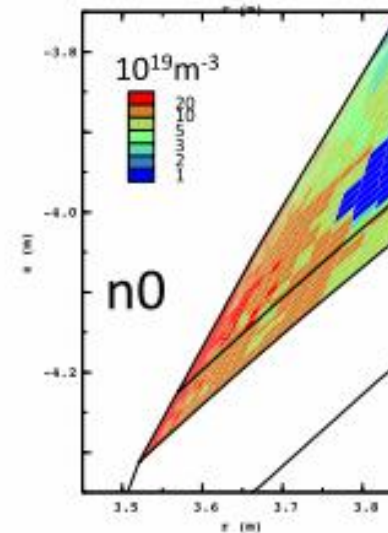
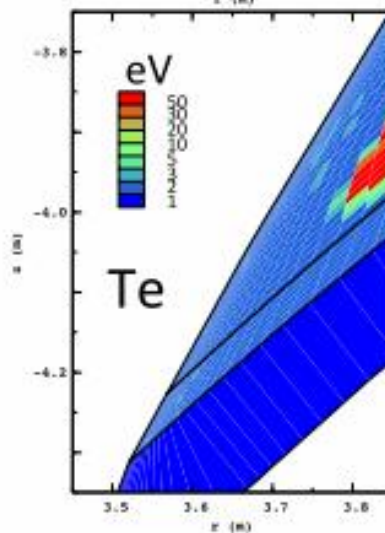
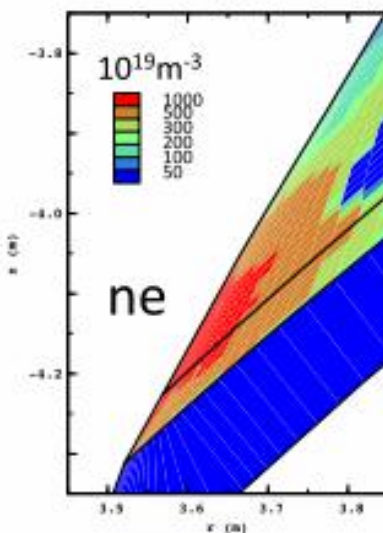
日本原子力研究開発機構

Spatial profile near the inner targets

輻射輸送なし



輻射輸送あり

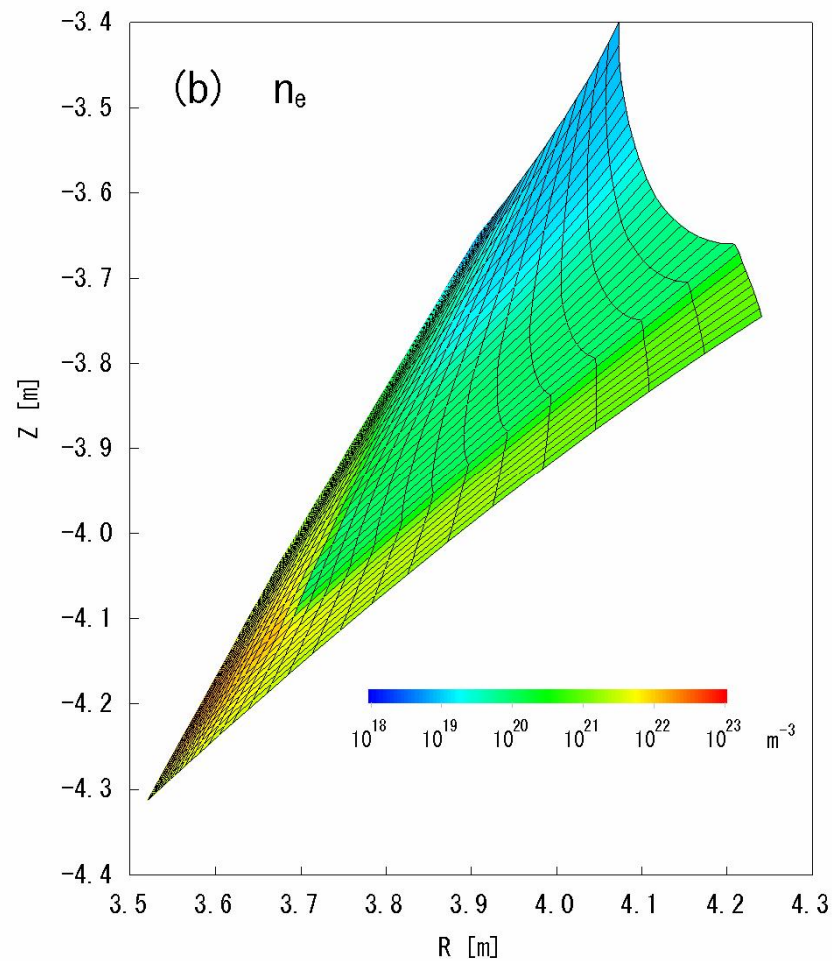
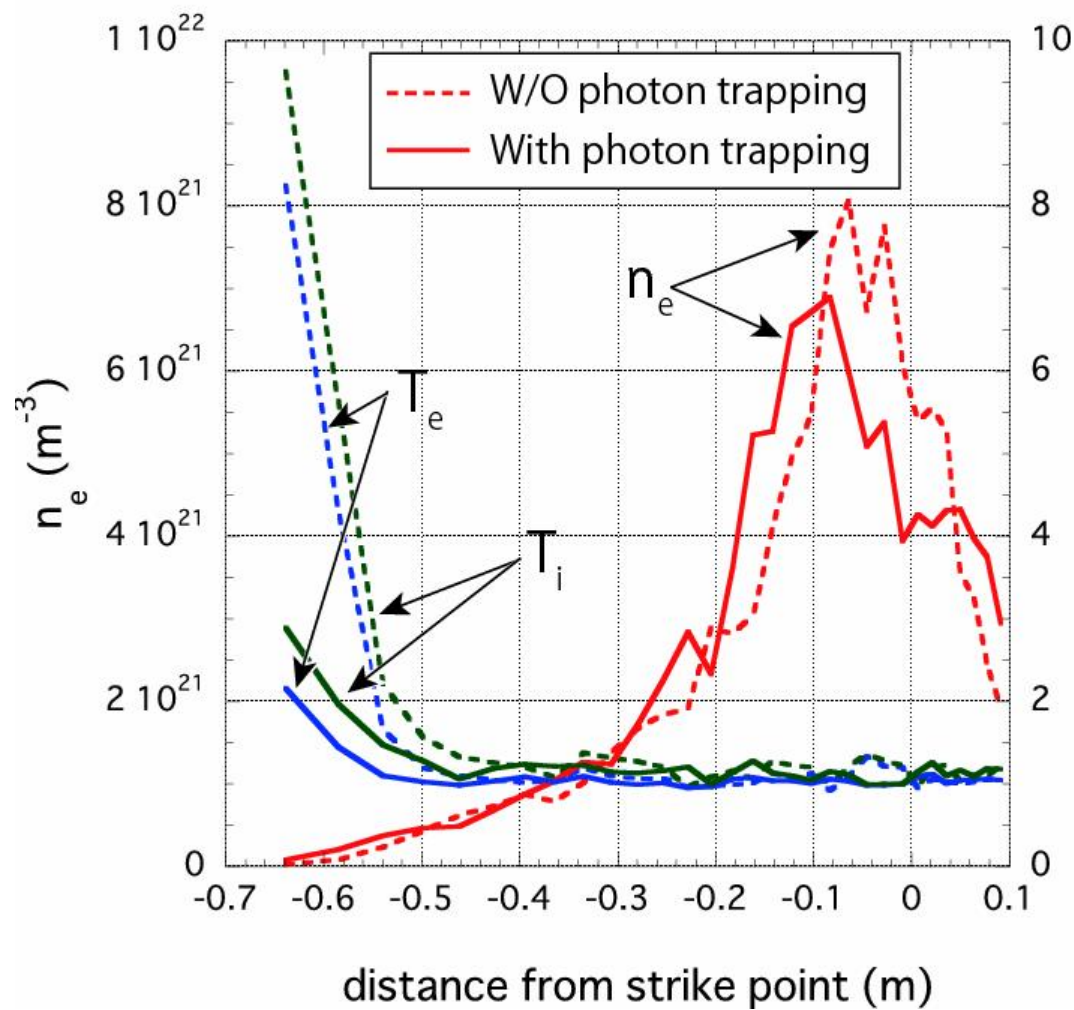


n_e and T_e decrease and n_0 increases due to the enhanced ionization rate

SONIC 計算結果

星野 一生

日本原子力研究開発機構



磁場の考慮(ゼーマン効果・偏光の考慮)

ここまでのモデル : 主量子数 n で準位を区別

磁場の影響(ゼーマン効果)・偏光の考慮なし

準位(スペクトル)の分裂により、吸収が少なくなる？

次のような計算コードを作成

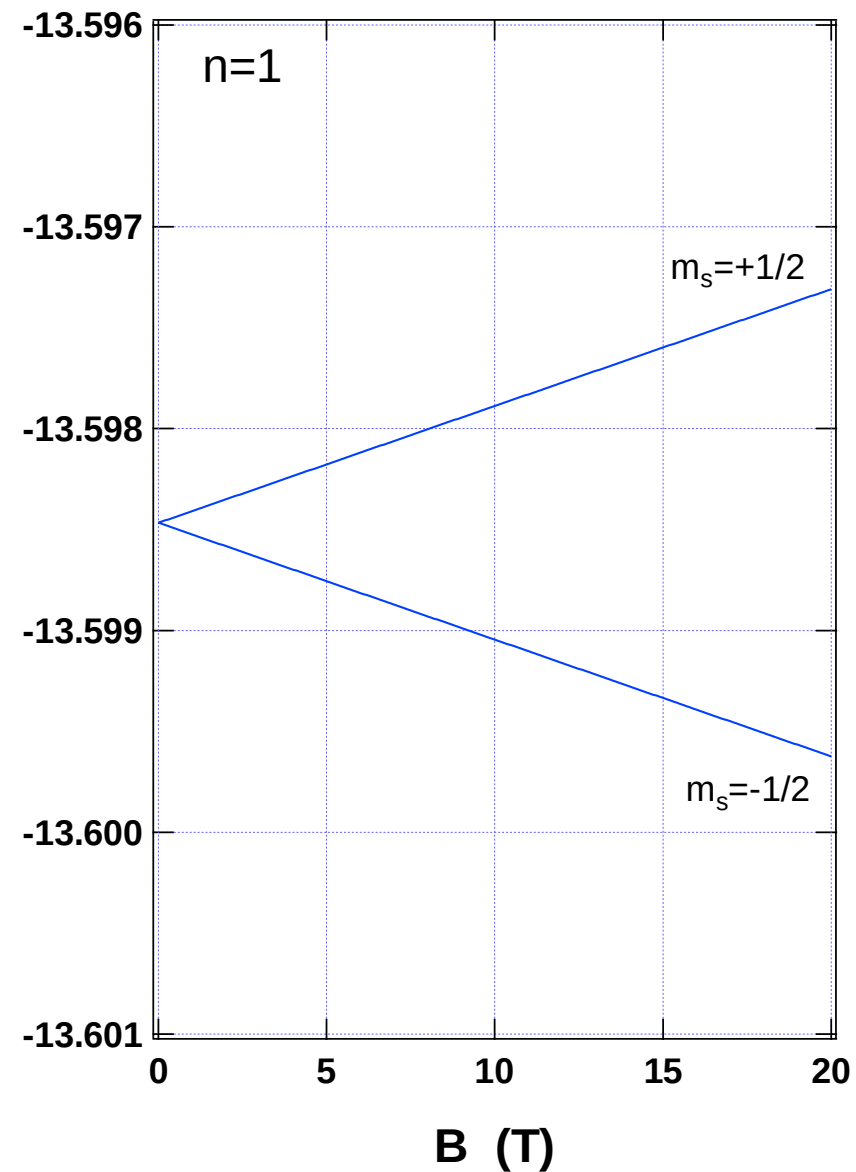
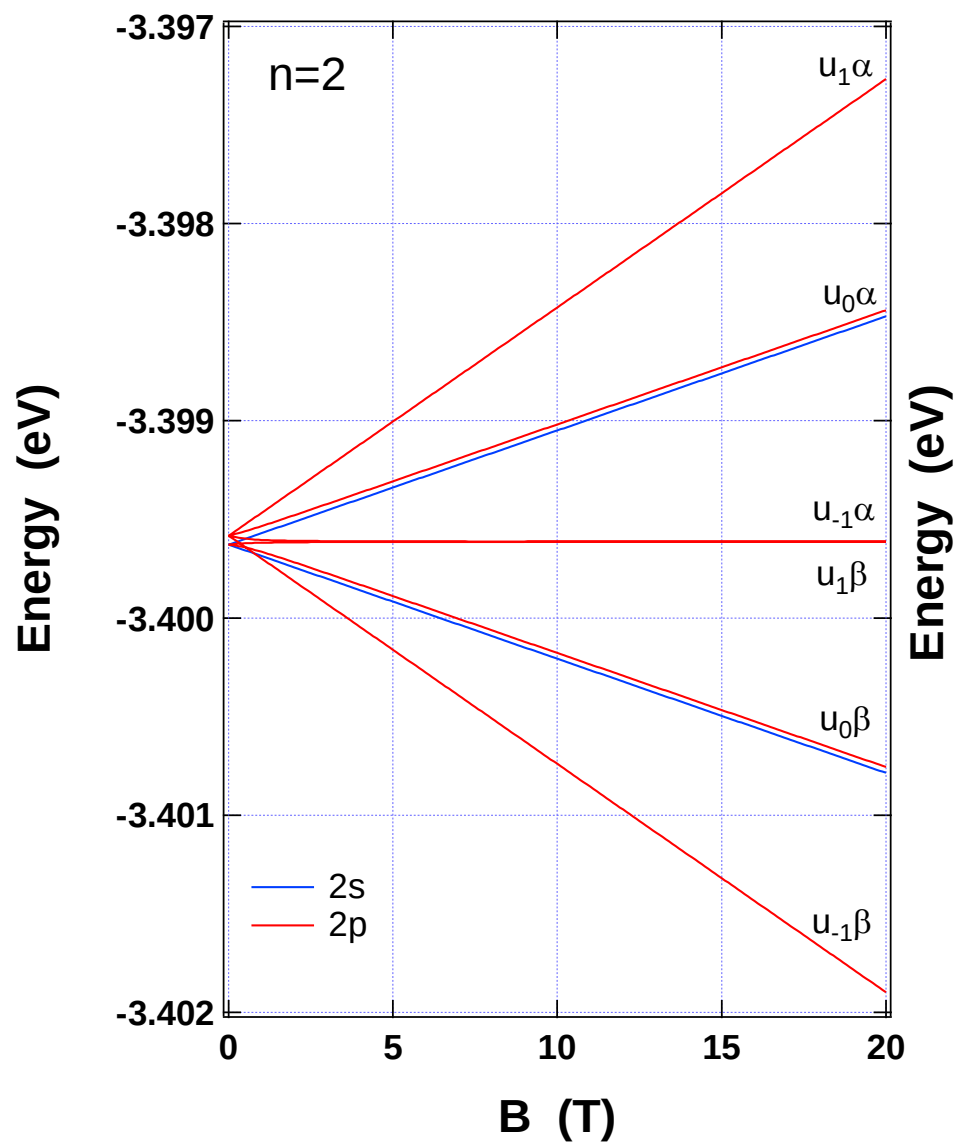
空間的に一様な磁場のプラズマを想定(吸収長が短いので)

(1) 磁場中の水素原子のエネルギー・固有関数を計算
(準位を n LSJMで指定)

(2) 偏光を考えて、空間のいろんな方向に放射される光強度を計算

(3) プラズマ中のある一点で、周囲(半径 $R_{\max}$ 内)から放射される光の

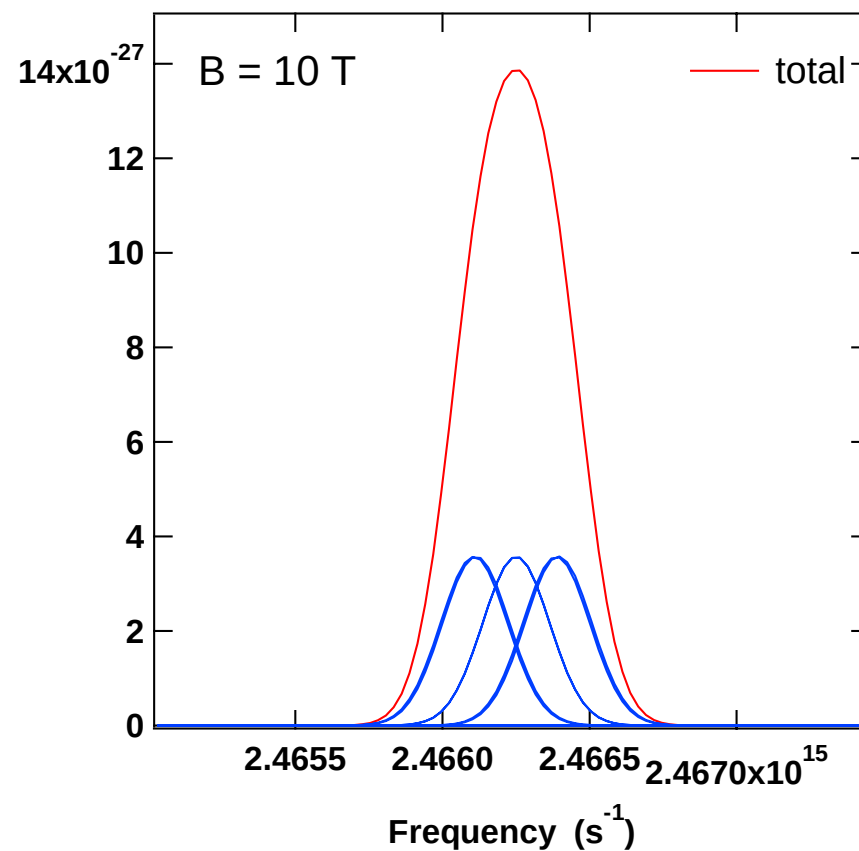
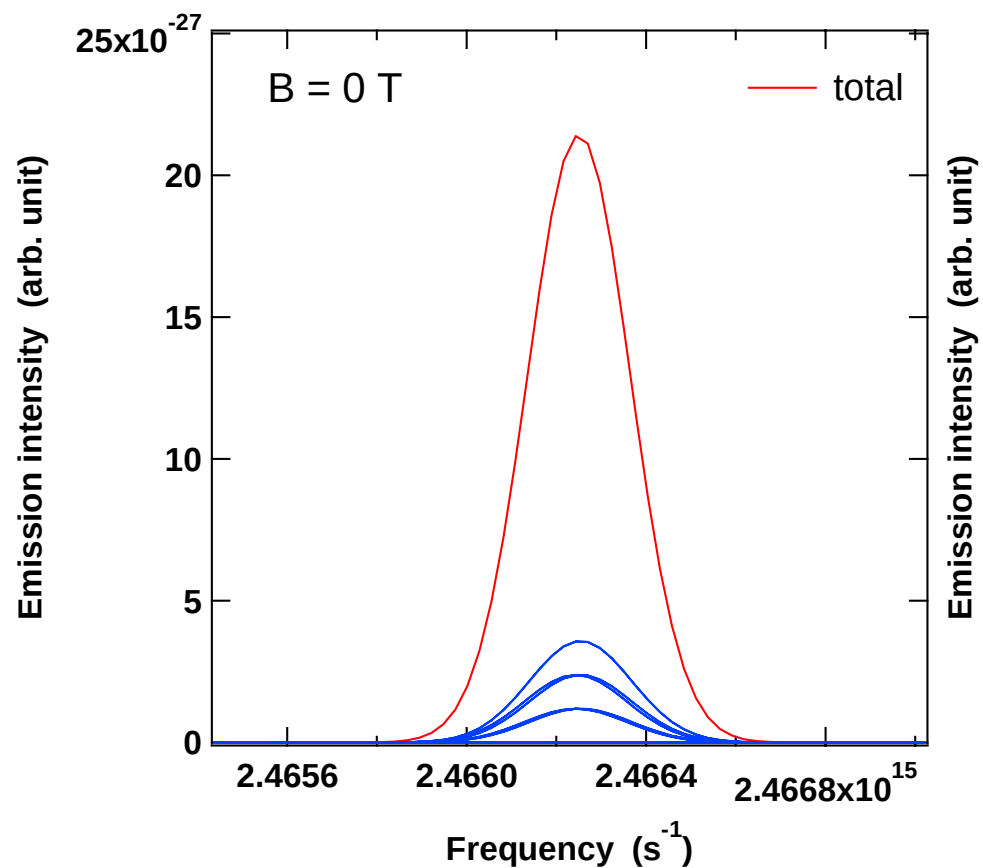
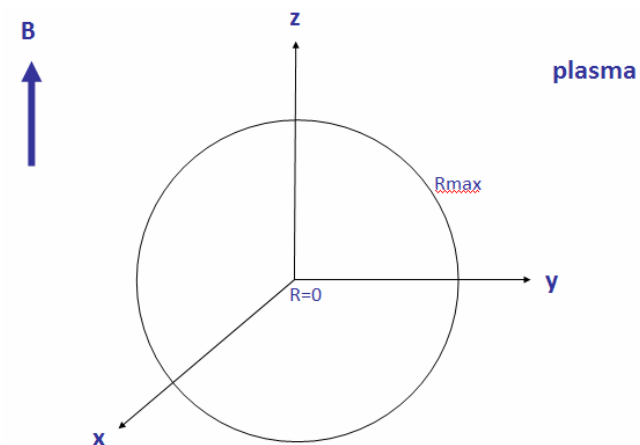
磁場中の水素原子のエネルギーや固有関数をもとめる(準位をnLSJMで指定)



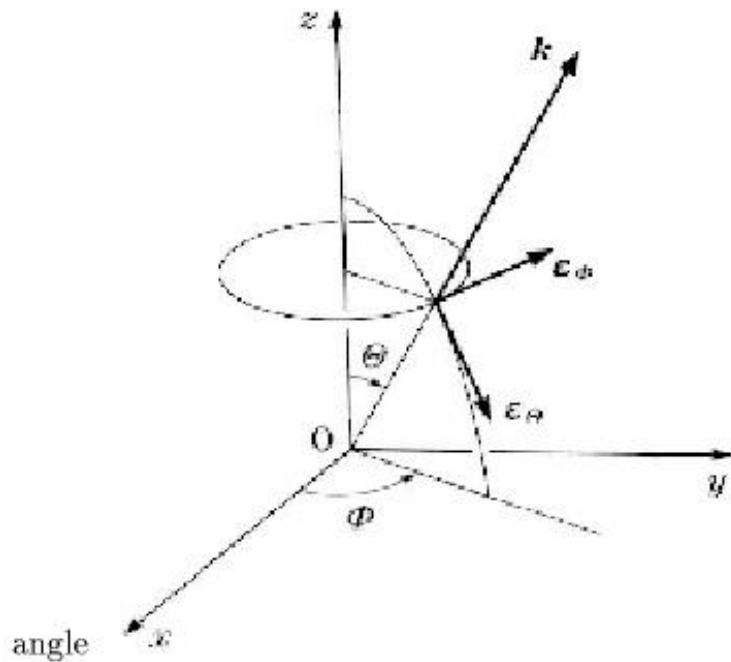
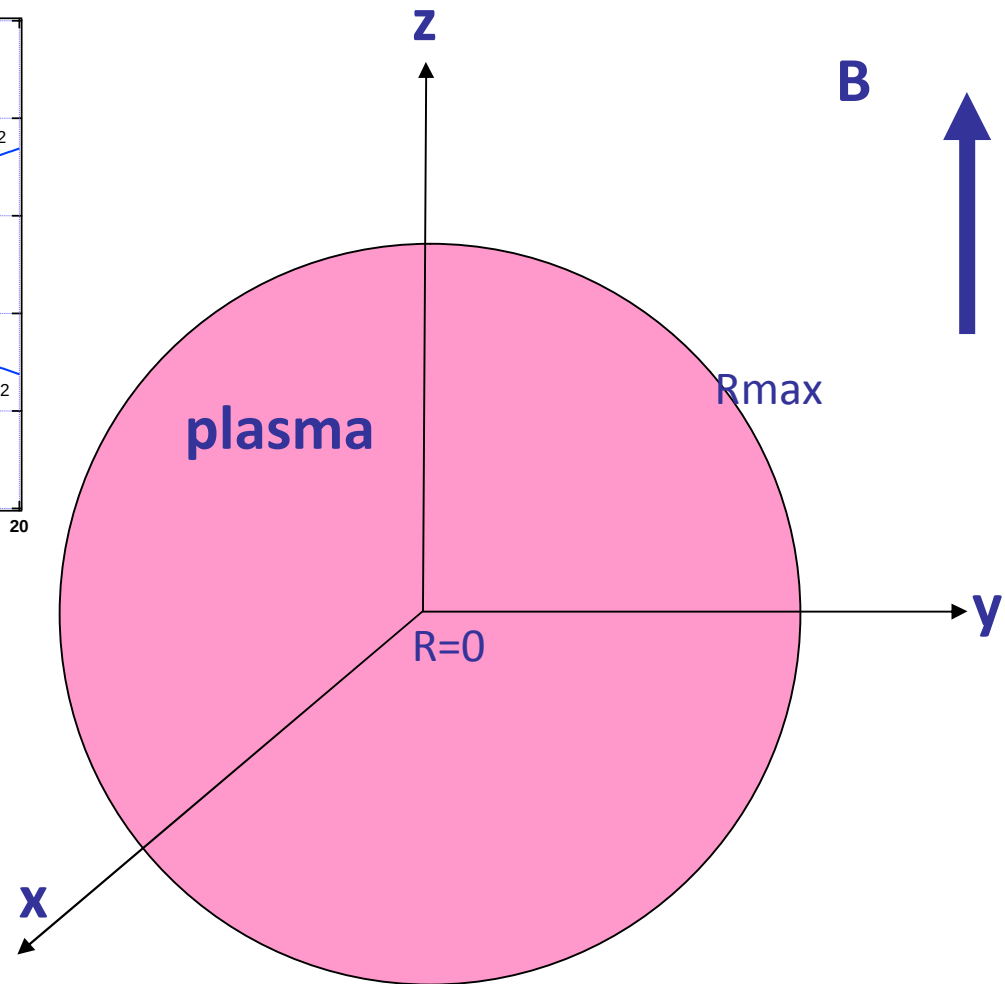
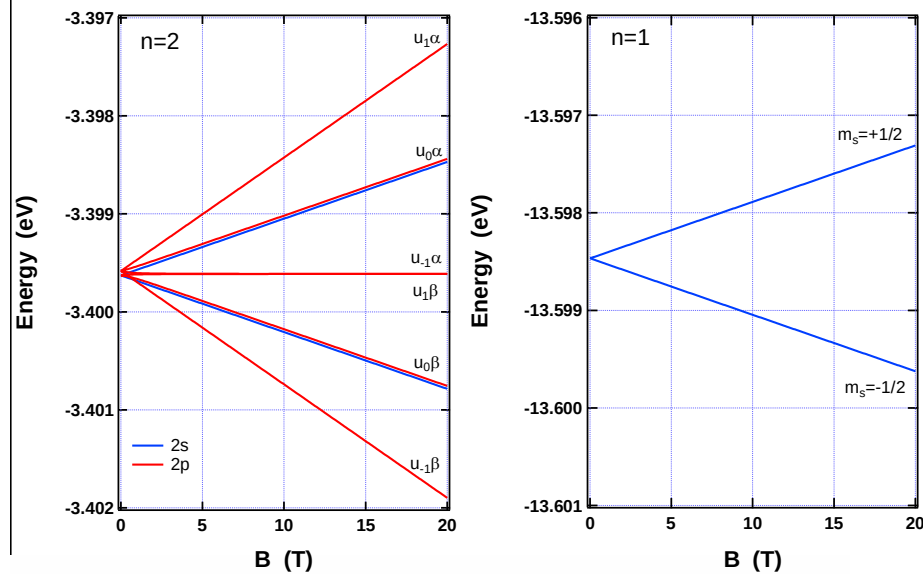
$B = 0 \text{ T}$ と $B = 10 \text{ T}$

発光

(偏光・方向については和をとって表示)

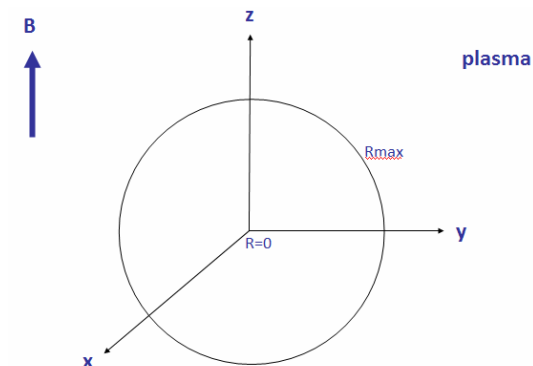


半径 R_{max} の内部を考えて、
その領域から放射される光が $R=0$ のところで吸収される量を計算

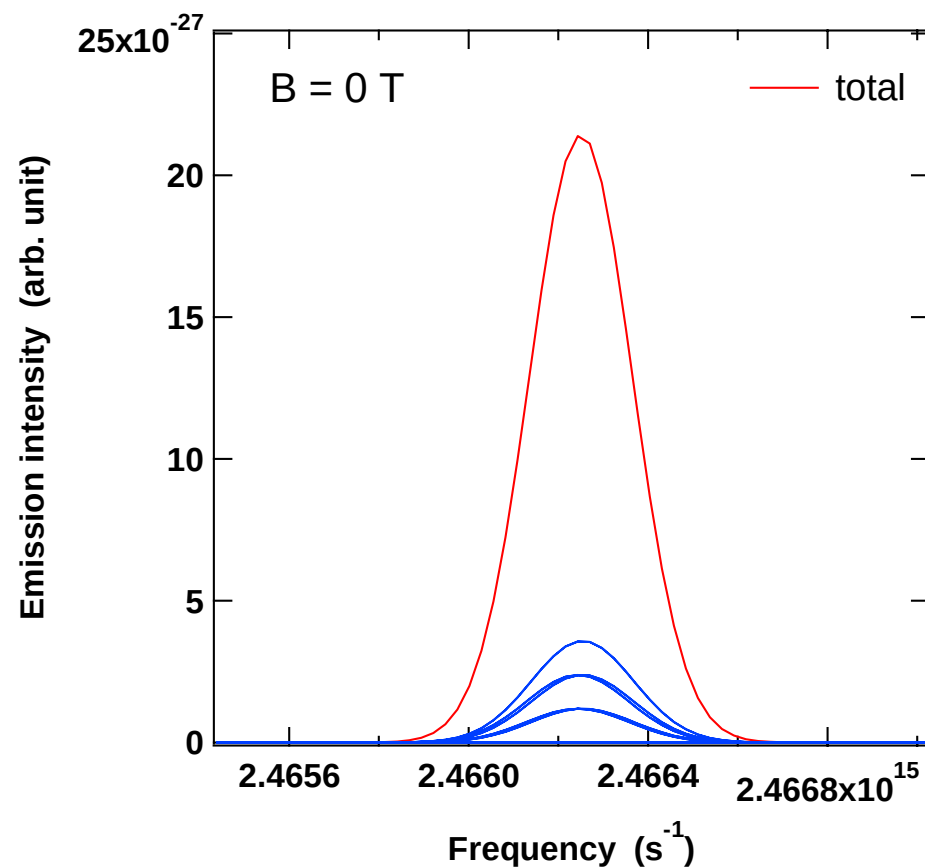


$B = 0 \text{ T}$

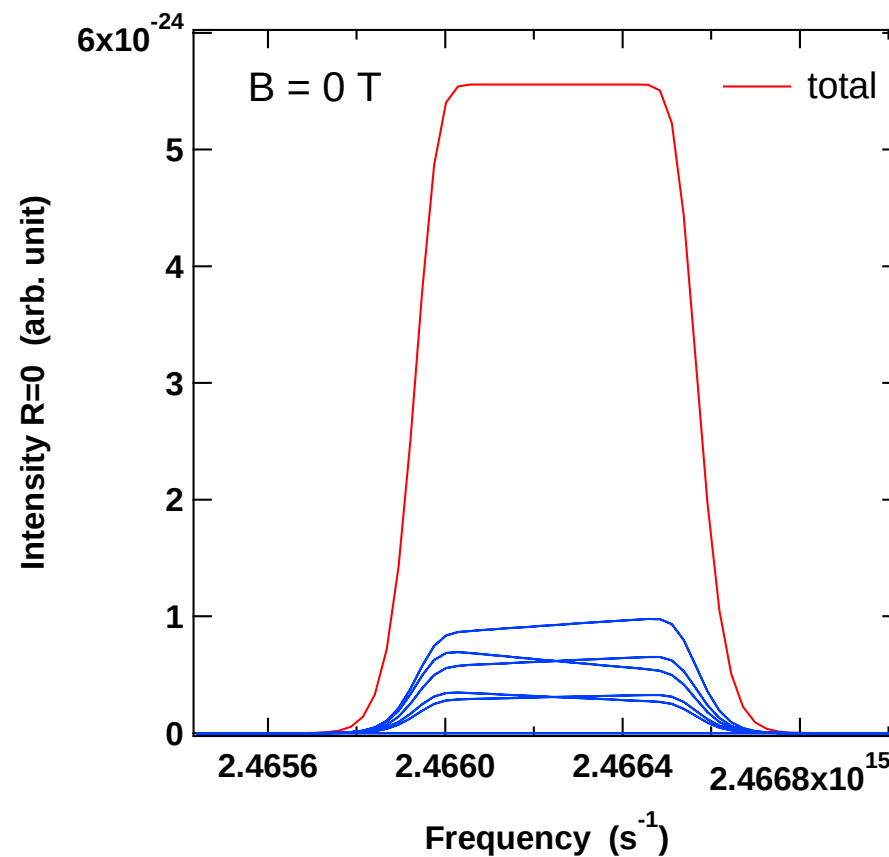
(ここでは偏光・方向については和をとって表示)



発光

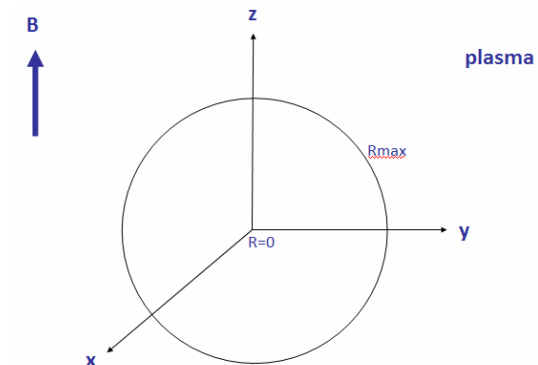


$R_{\text{max}} = 1.0 \text{E-}2 \text{ m}$ の球内の発光が
 $R=0 \text{ m}$ につくる放射場



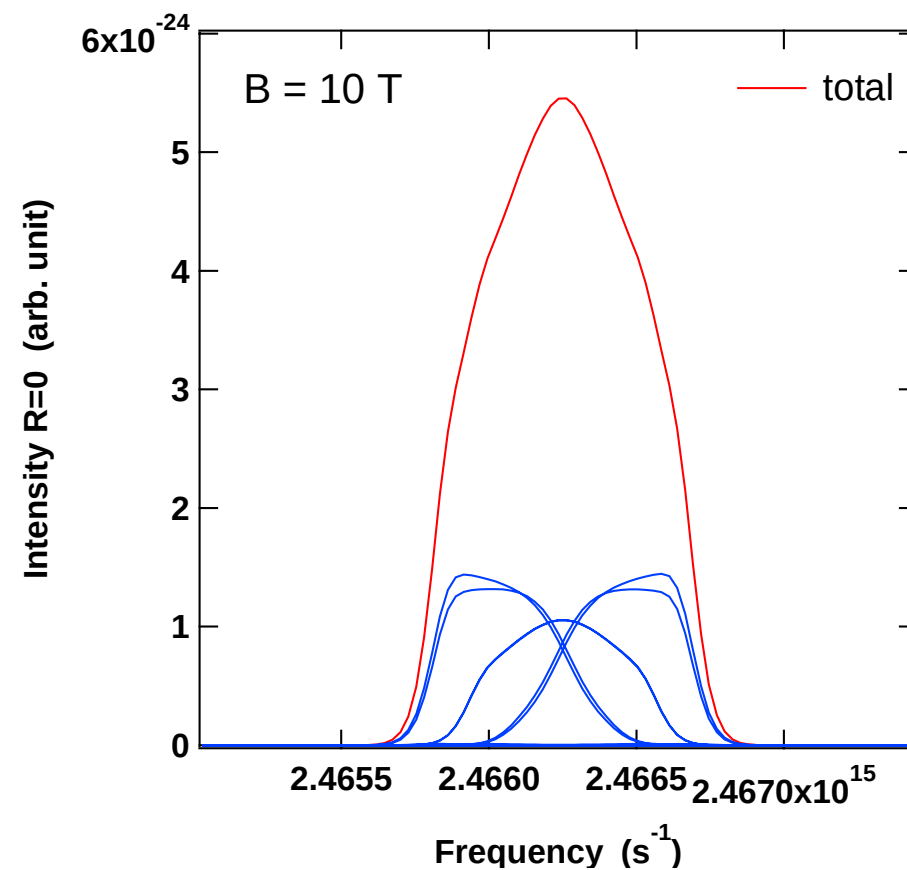
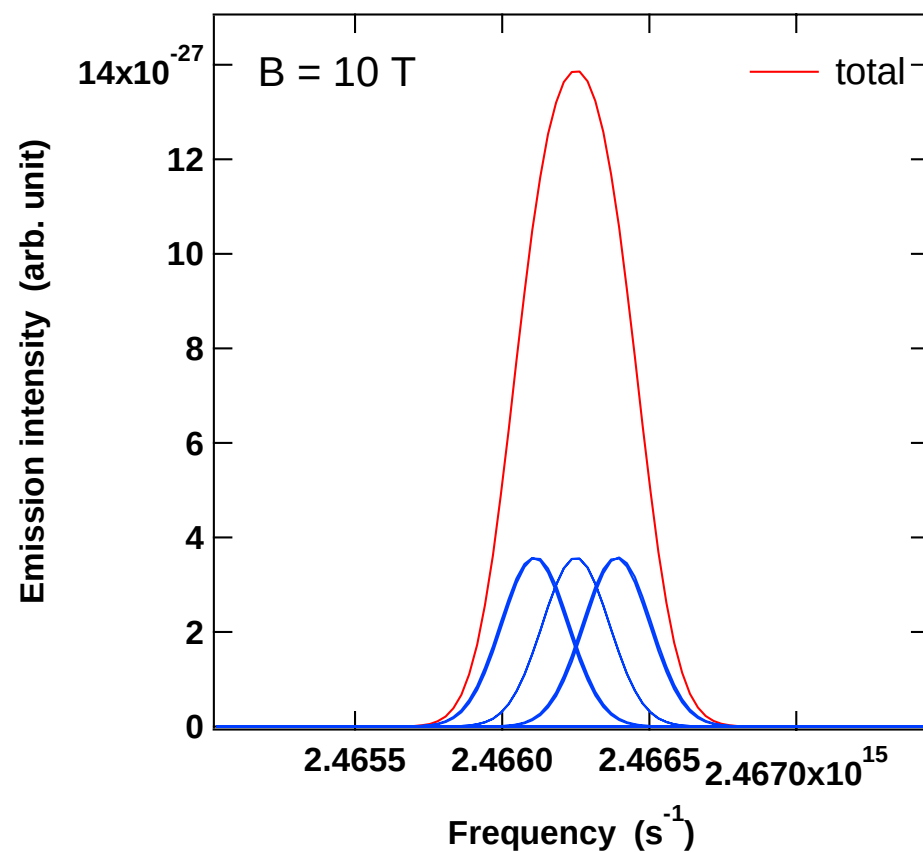
$B = 10 \text{ T}$

(ここでは偏光・方向については和をとって表示)

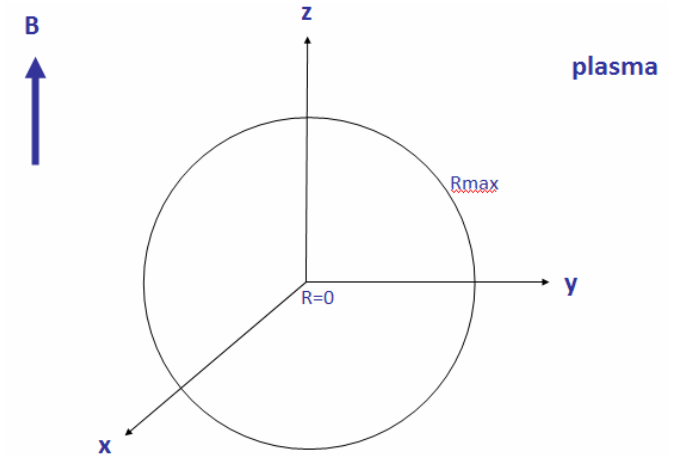
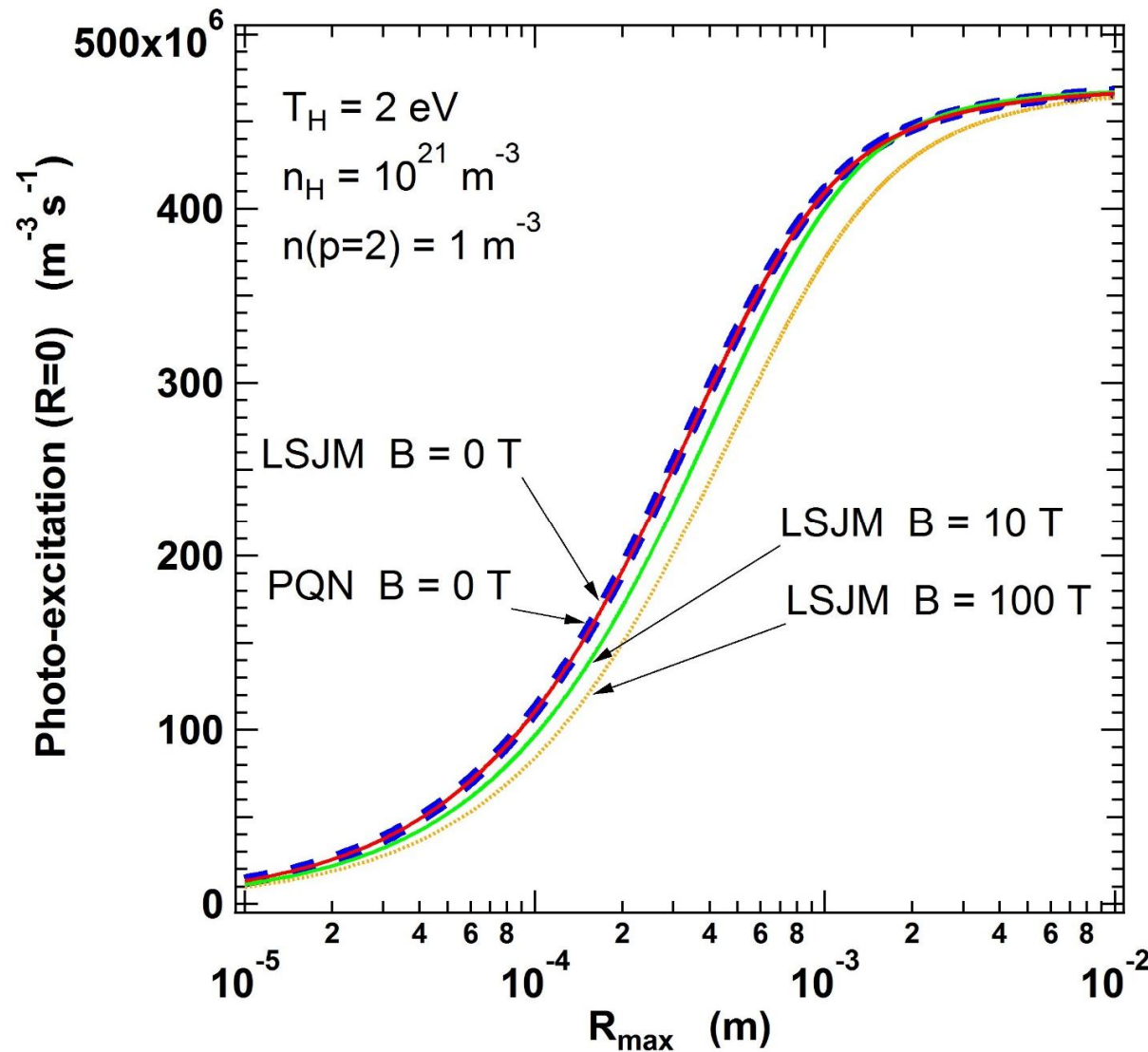


発光

$R_{\text{max}} = 1.0 \text{E-}2 \text{m}$ の球内の発光が
 $R=0 \text{m}$ につくる放射場



半径 R_{max} の内部を考えて、
その領域から放射される光が $R=0$ のところで吸収される量を計算



PQN

主量子数 n で準位を区別した
従来モデルによる計算

LSJM

n LSJMで準位を区別した
モデルによる計算

ゼーマン効果・偏光を考慮

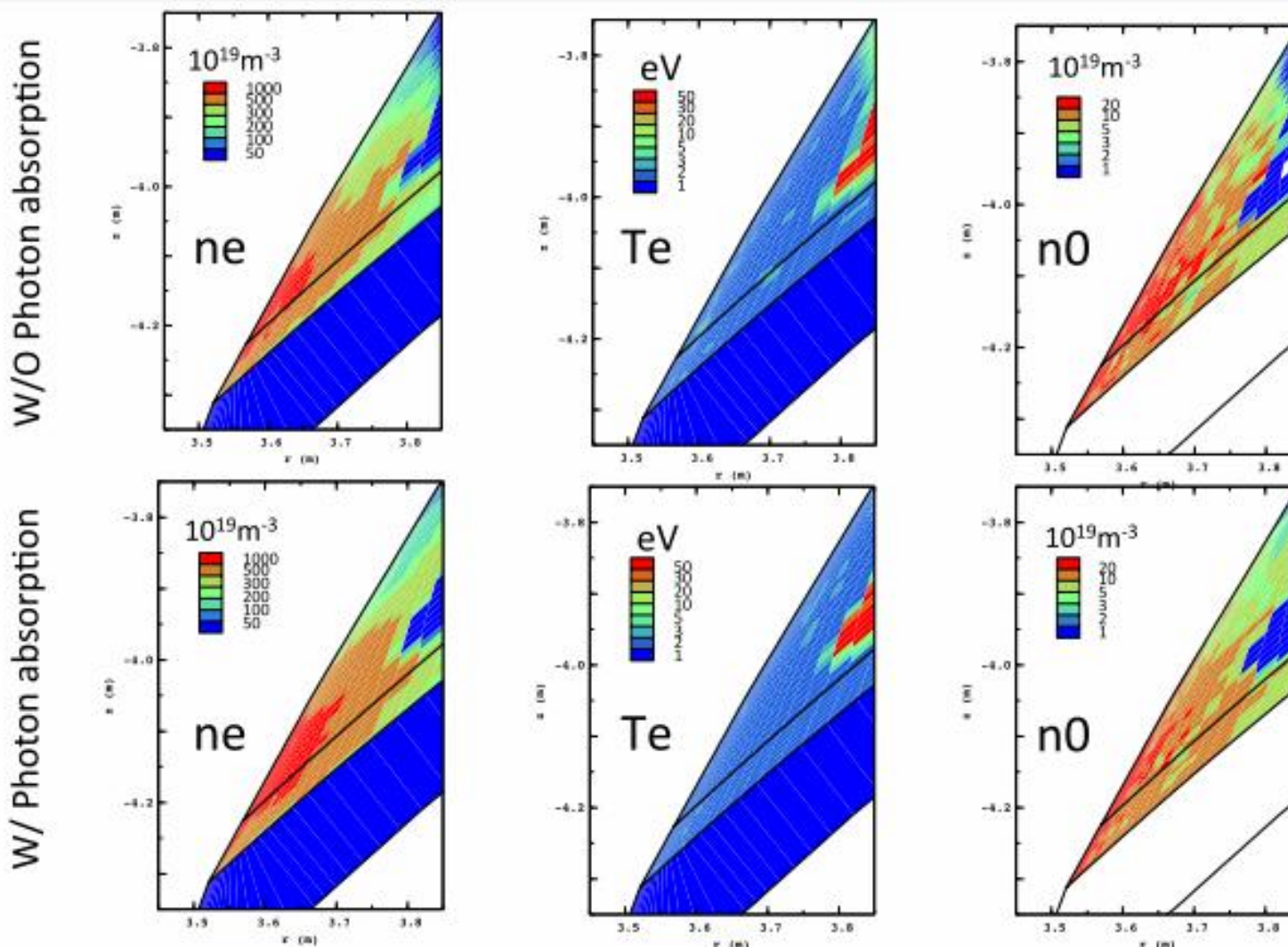
(結論) 従来モデルを用いてよいと思われる

SONIC 計算結果

星野 一生

日本原子力研究開発機構

Spatial profile near the inner targets



n_e and T_e decrease and n_0 increases due to the enhanced ionization rate