

# 輻射輸送・拡散方程式結合スキームによる Lyman-alpha line transferの加速

安部牧人 (筑波大)

共同研究者：

梅村雅之 (筑波大)、久喜奈保子 (筑波大)、Ken Czurprinski (Univ. of Iowa)

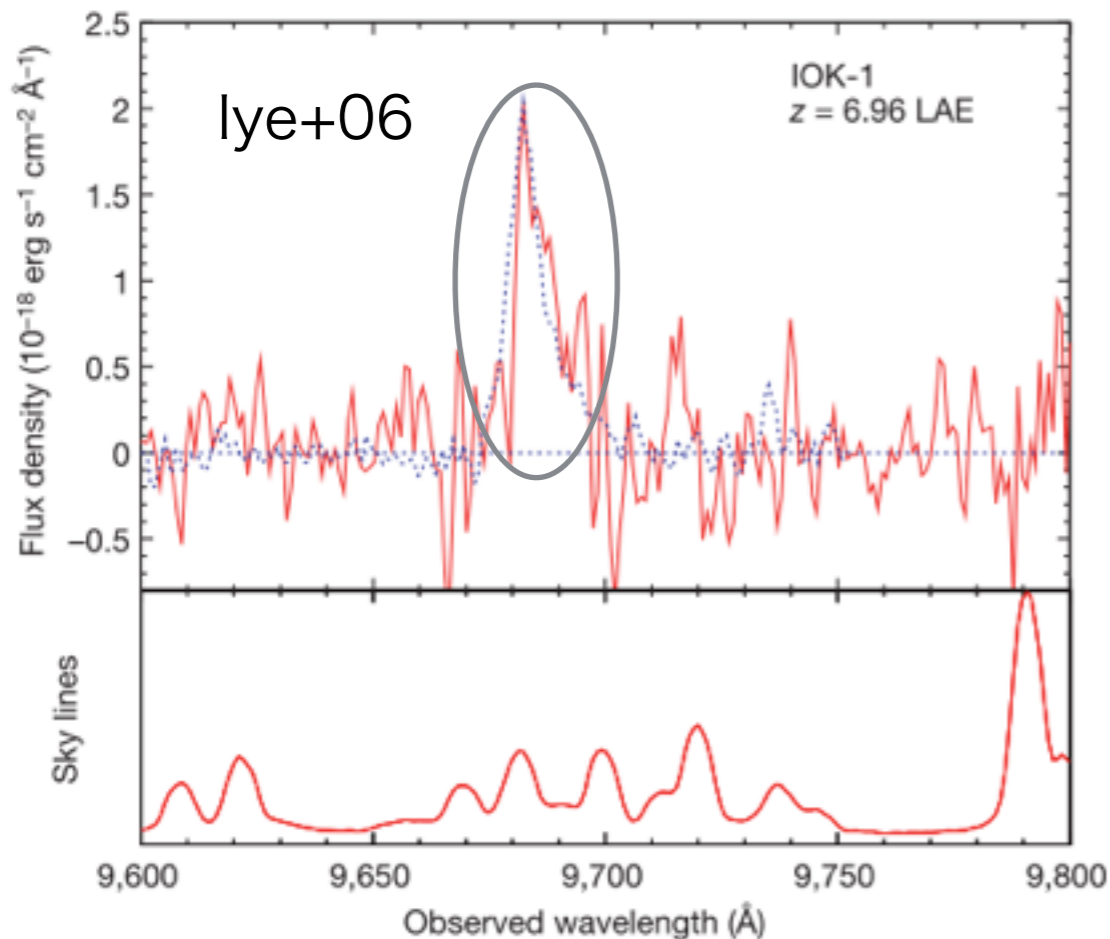
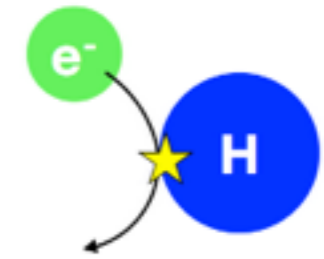
初代星・初代銀河研究会@呉 2018/2/12

# Ly $\alpha$ 輝線

- Ly $\alpha$ 輝線：2P $\rightarrow$ 1Sの遷移
  - 大質量星からの紫外線による光電離/再結合, 衝突脱励起によって生成
  - 観測的に重要な輝線
    - 遠方宇宙の星形成銀河のprobe (Partridge & Peebles 67)

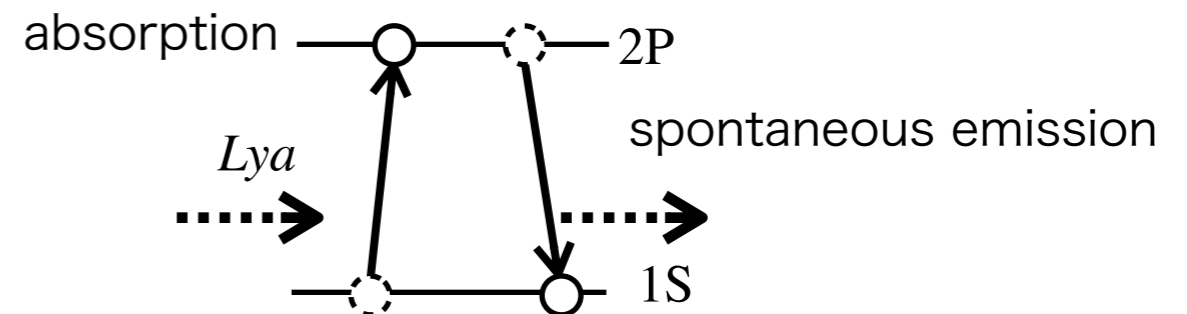
Recombination process in the HII region.

Cooling emission by collisional excitation.



- A係数が非常に大きい ( $6.26 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ )

→ 共鳴散乱過程



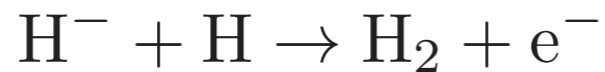
- cross-section  $\sim 10^{-13} \text{ cm}^2$  ( $\sim 10^4 \sigma_{\nu L}$ )

- 多重散乱で系外へ脱出

# Lya feedback

- photodetachment of H<sup>-</sup> ion

水素分子形成



Hの破壊過程⇒水素分子形成の阻害

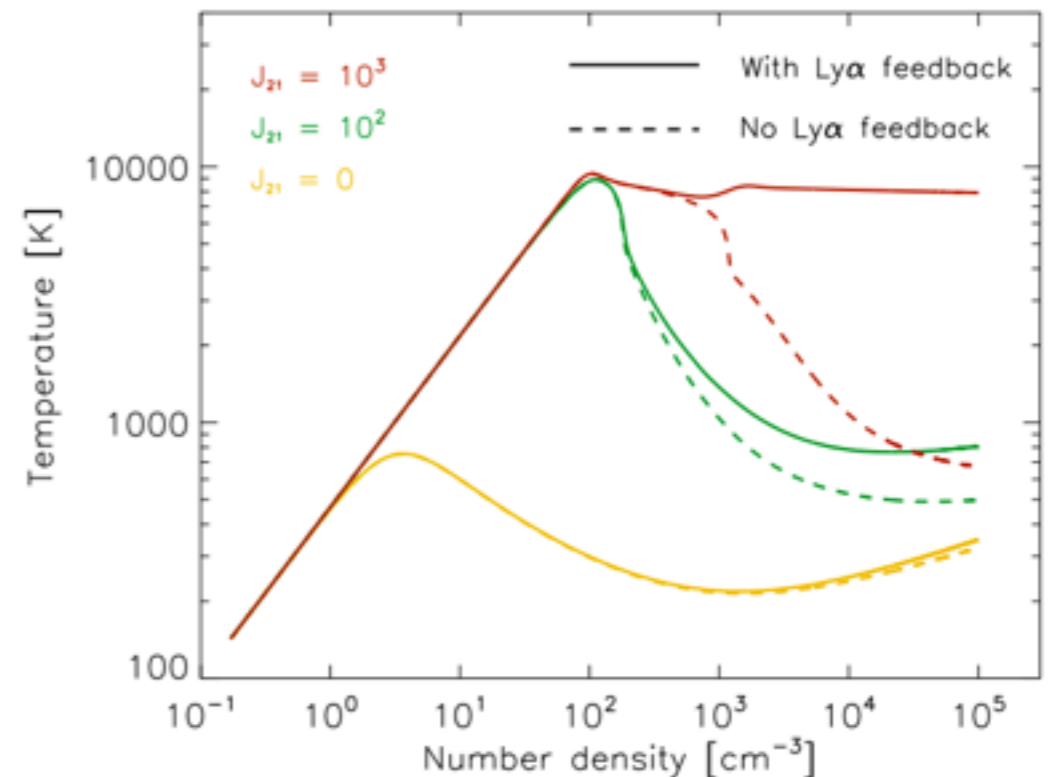
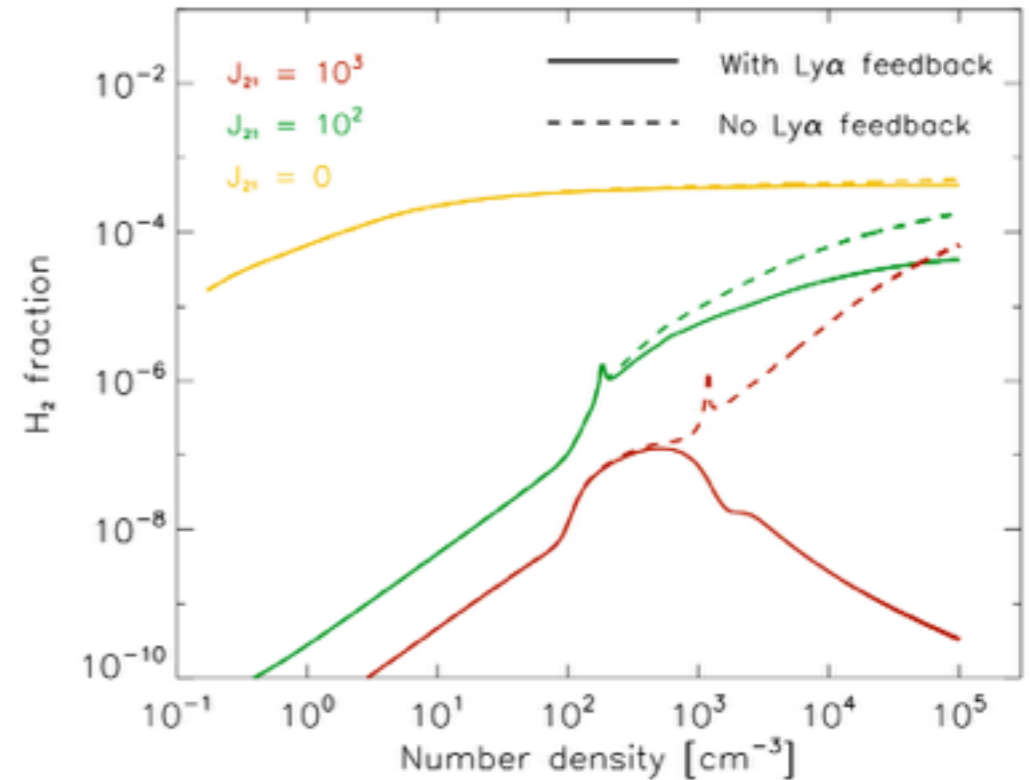


Lya photon : 10.2 eV

photodetachment rate

$$k_{\text{H}^-} = \int d\nu \frac{4\pi J_\nu \sigma_{\text{H}^-}}{h\nu}$$

(de Jong 1972)



Johnson & Dijkstra (2017) one-zone計算

# Ly $\alpha$ feedback

## Ly $\alpha$ radiation force

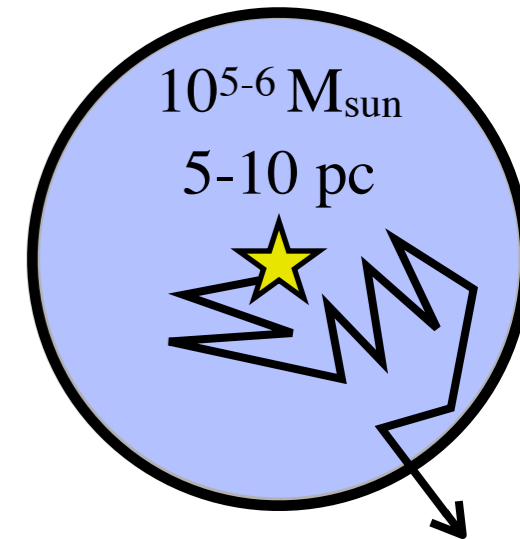
- Ly $\alpha$ 光子：系内にトラップされ、photon densityが上がる

$$F_{\text{rad}}^{\text{Ly}\alpha} \sim \frac{t_{\text{trap}}}{t_{\text{cross}}} \frac{L_{\text{Ly}\alpha}}{c} \equiv f_{\text{boost}} \frac{L_{\text{Ly}\alpha}}{c},$$

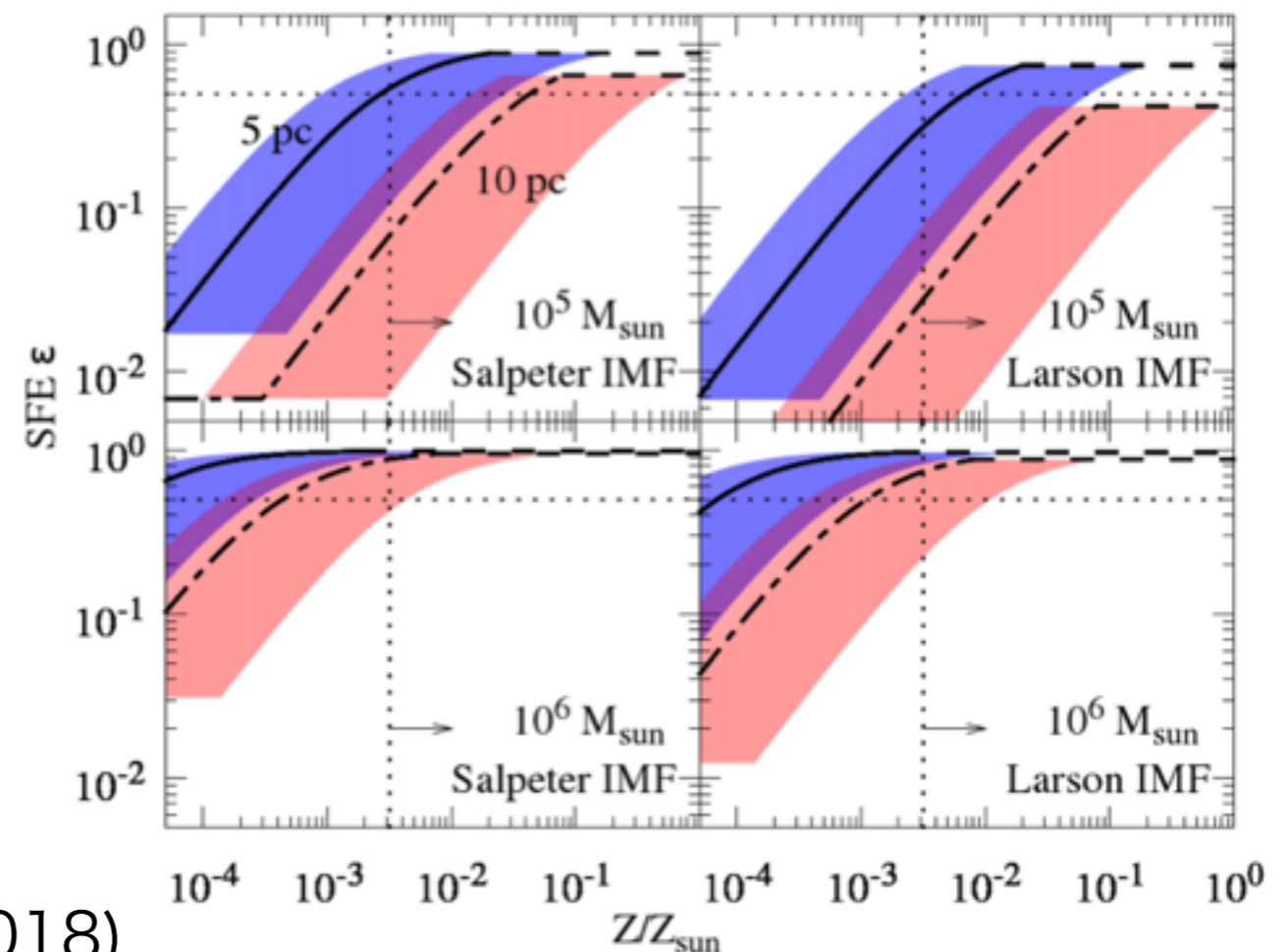
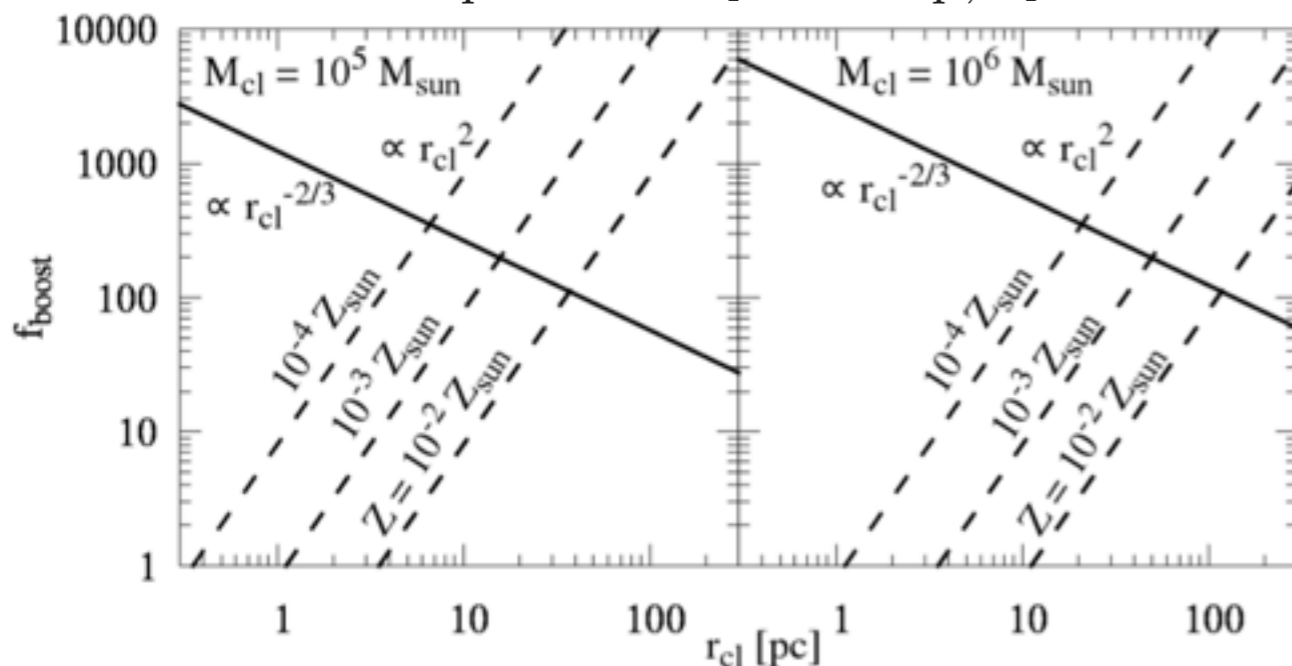
- metallicityが増えるとダスト吸収によってboost factorが小さくなる

→ low-metal gas cloudほどLy $\alpha$  feedbackは効きやすい

→ 超低金属な星団形成の抑制



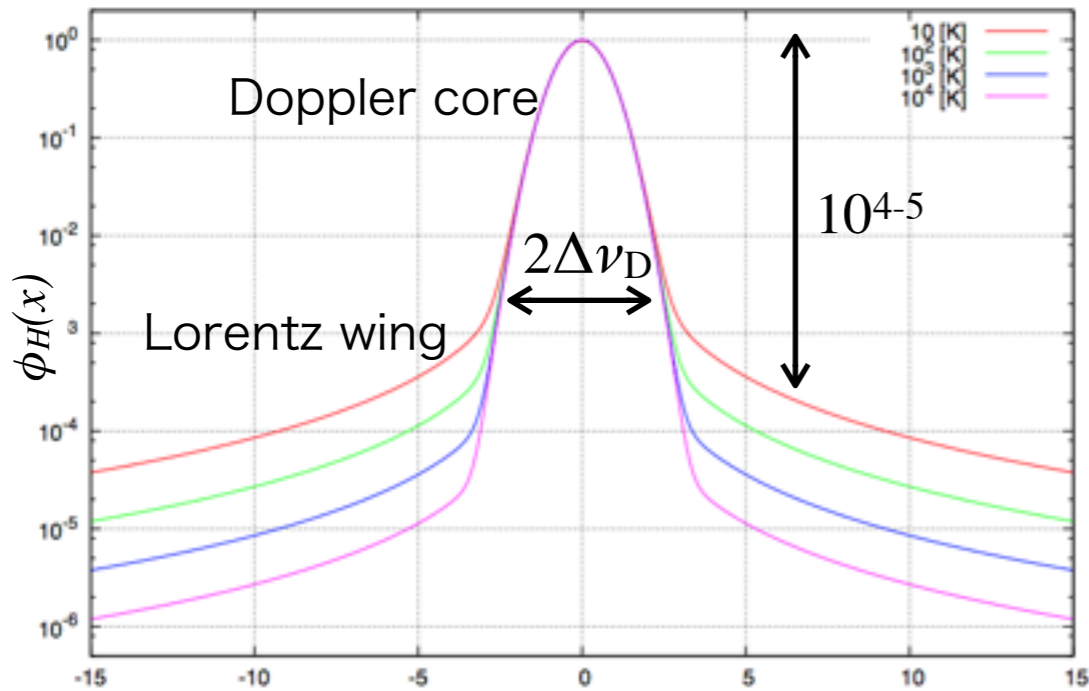
$$t_{\text{trap}} = \min [t_{\text{d}}, t_{\text{trap,H}}]$$



Abe & Yajima (2018)

# Lya 輻射輸送

Voigt profile



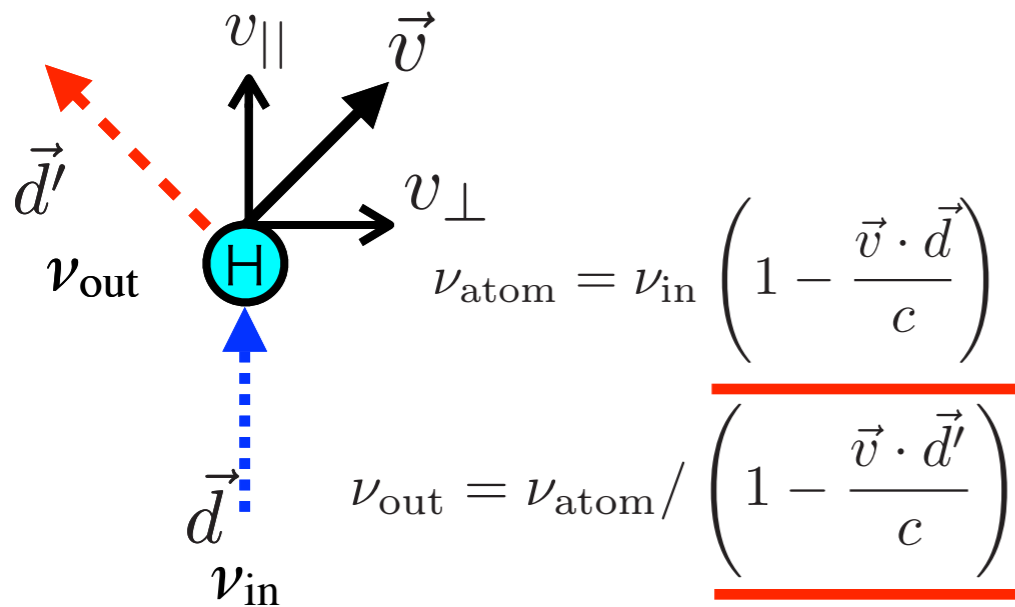
✓ ラインプロファイル (Voigt profile)

$$\sigma_x = f_{12} \frac{\sqrt{\pi} e^2}{m_e c \Delta\nu_D} H(a, x)$$

$$H(a, x) = \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dy \frac{e^{-y^2}}{(x-y)^2 + a^2} : \text{Voigt関数}$$

$$x = (\nu - \nu_0) / \Delta\nu_D \quad a = \Delta\nu_L / (2\nu_D)$$

Doppler幅  $\Delta\nu_D$  で規格化した振動数  $x$



✓ 振動数シフト

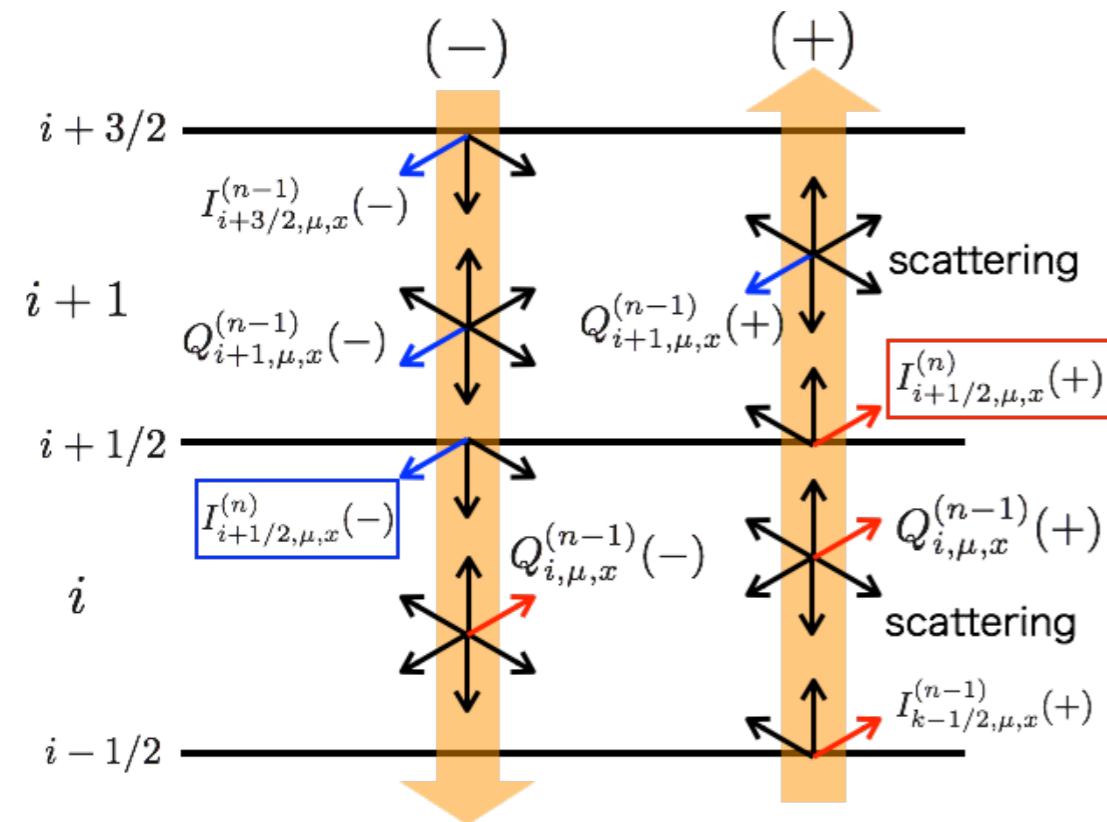
- 原子静止系：coherent散乱
- 実験室系：散乱前後で光子の方向が変わると、Doppler shiftにより振動数が変わる

✓ Lya lineの輸送：振動数シフト + 散乱過程

➔ Monte Carlo法が現在の主流

# Lya line transfer 直接計算：定式化

## 一次元平行平板



$i$  : 空間、 $\mu$  : 方向、 $x$  : 振動数

$n$  : iteration count

$$I_{i+1/2,\mu,x}^{(n)}(+)=I_{i-1/2,\mu,x}^{(n-1)}e^{-\Delta\tau_{\mu,x}}+Q_{i,\mu,x}^{(n-1)}(+)+Q_{i,\mu,x}^{(n-1)}(-)$$

$$I_{i+1/2,\mu,x}^{(n)}(-)=I_{i+3/2,\mu,x}^{(n-1)}e^{-\Delta\tau_{\mu,x}}+Q_{i+1,\mu,x}^{(n-1)}(-)+Q_{i+1,\mu,x}^{(n-1)}(+)$$

- source term  $Q$ : 解くべきintensityで決まっている  $\Rightarrow$  iterationが必要

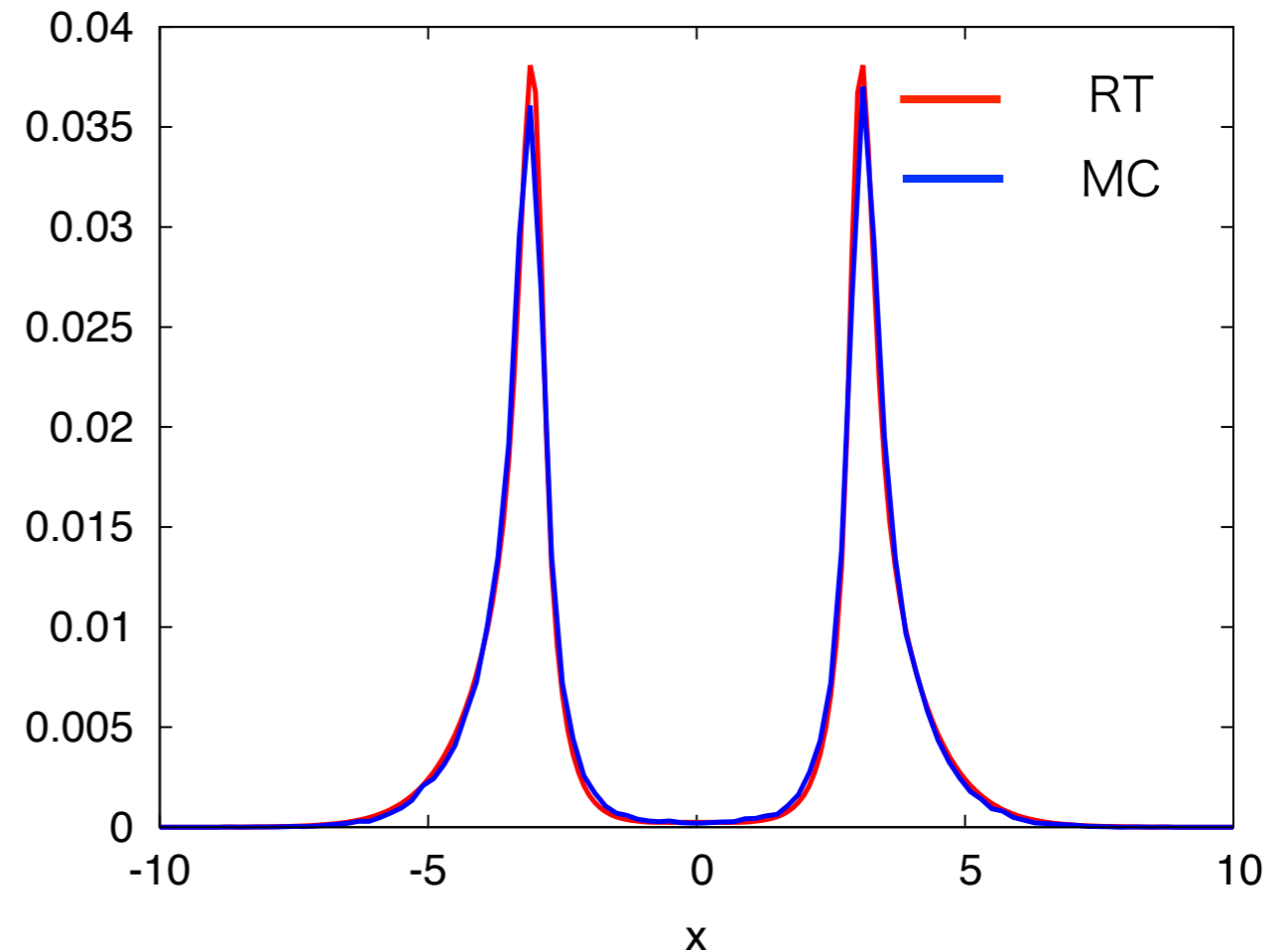
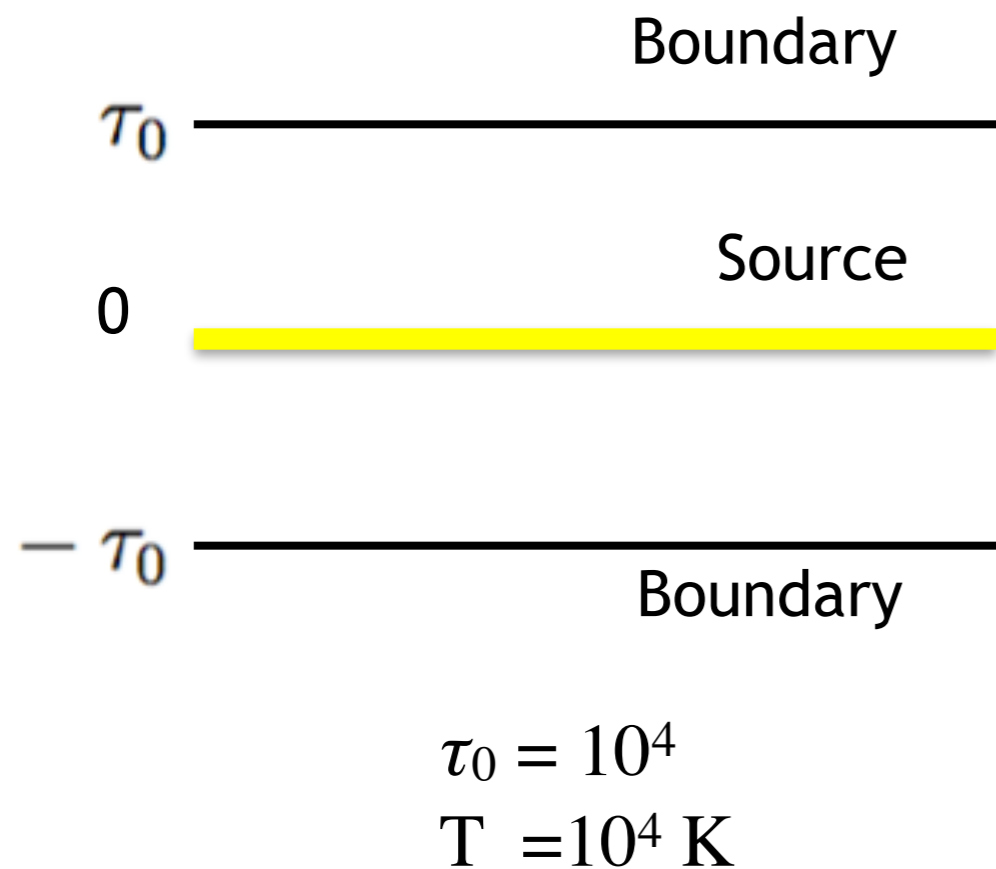
$$Q_{i,\mu,x}^{(n)}(\pm)=\frac{1}{N_{\theta}}\sum_{x'}\sum_{\mu'}I_{i\mp 1/2,\mu',x'}^{(n)}(1-e^{-\Delta\tau_{\mu',x'}})\eta(x',\mu',x,\mu)$$

$\eta$  : 振動数の再分配に関する関数

$(x',\mu')\Rightarrow(x,\mu)$  にシフトする光子の割合を与える分布関数

# 輻射輸送計算によるスペクトルの評価

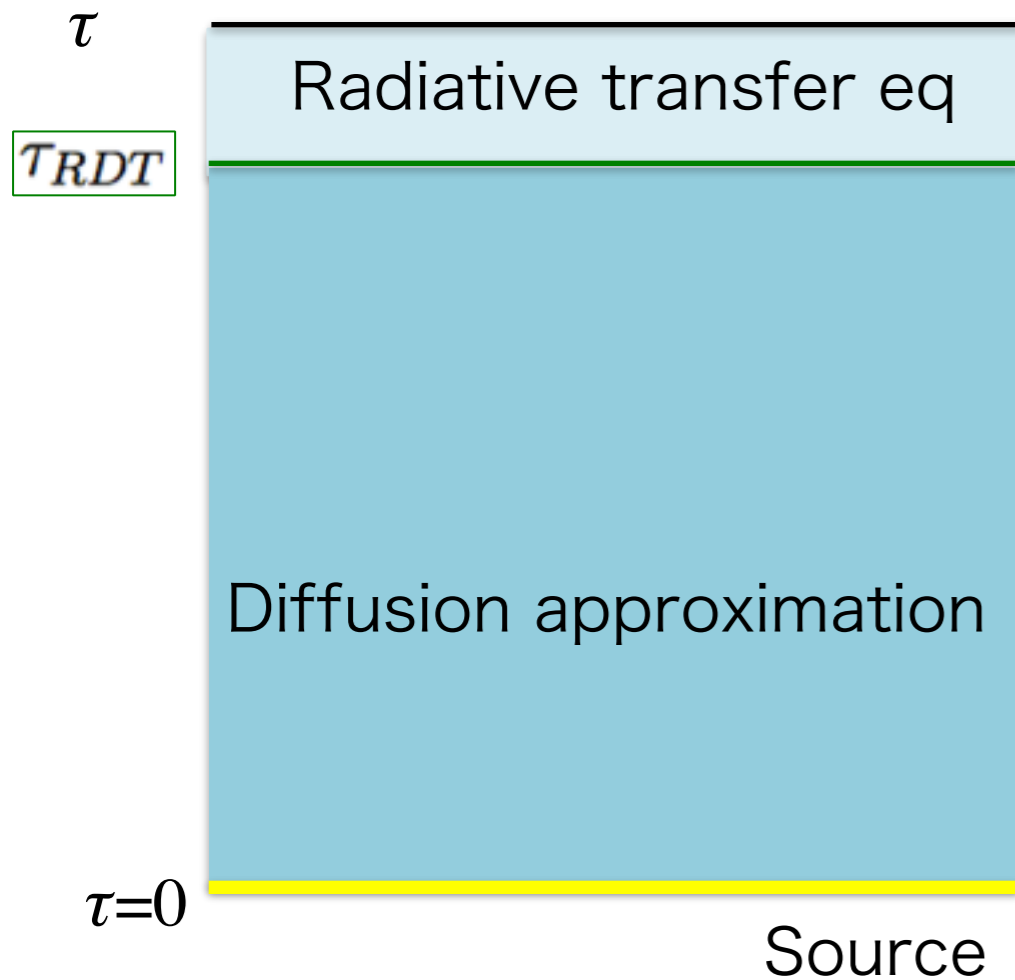
- Monte Carlo計算結果と比較



- wing部分からの脱出 (double peak)
- Monte Carlo計算とよく一致

# Radiative Diffusion & Transfer scheme

- Ly $\alpha$  line transfer (振動数シフト + 散乱)
    - 光学的に厚い系での輻射輸送方程式を直接解くことは計算コストが大きい
- Radiative Diffusion & Transfer (RDT) schemeを考案



← 表面：輻射輸送計算 (RT)

← 内部：輻射の拡散方程式 (DE) を解く

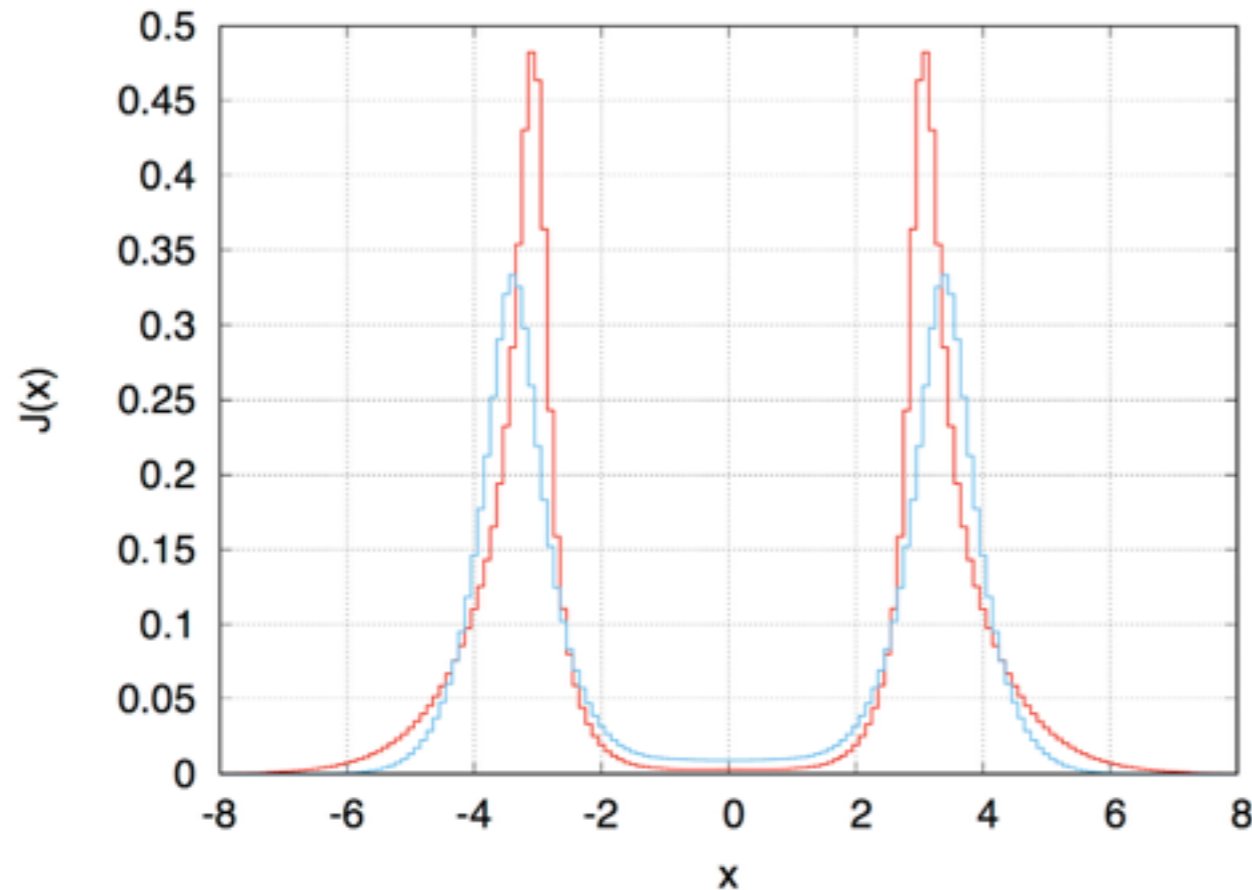
- 光学的に厚い系において、内側の輻射場を輻射拡散近似から求めることで、輻射輸送計算 (収束) の加速を図る
- 1次元平行平板系についてRDT法を適用
- DEを適用する範囲 ( $\tau_{RDT}$ ) はパラメータ



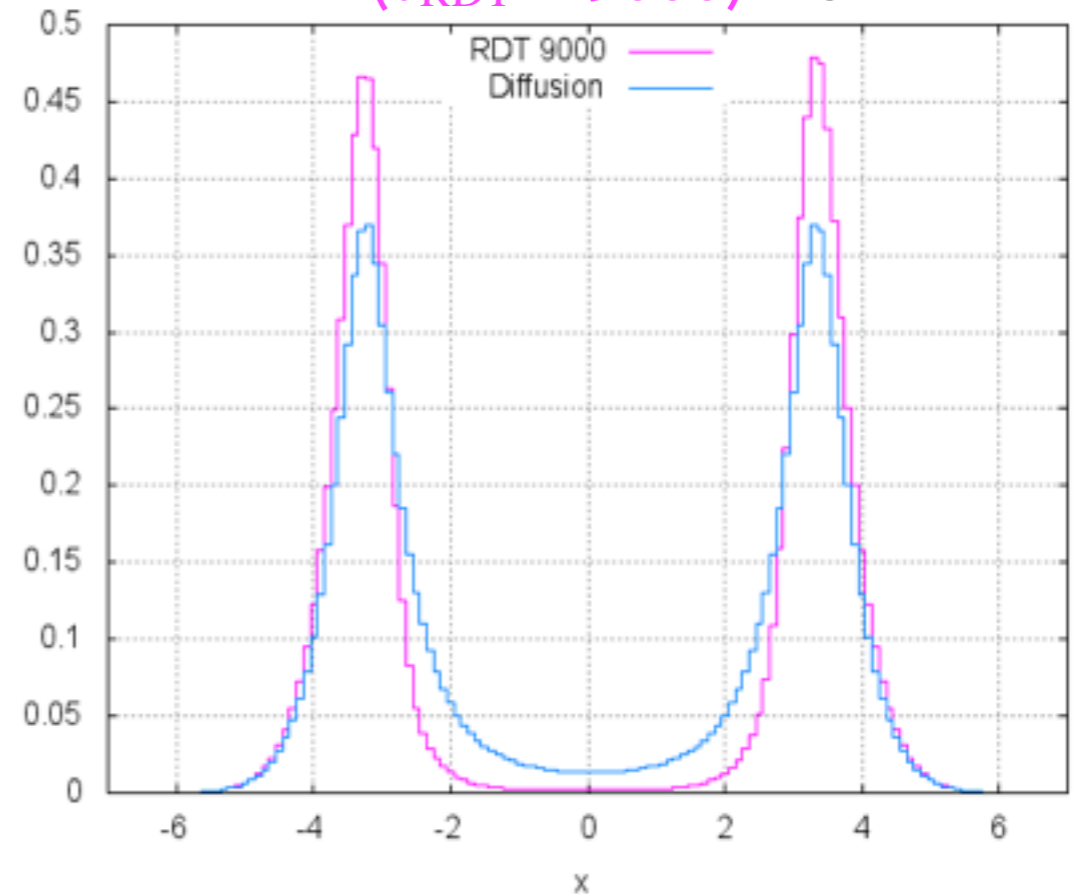
# 脱出光子スペクトル

$$\tau_0 = 10^4 \quad T = 10^4 \text{ K}$$

RT vs DE



RDT ( $\tau_{\text{RDT}} = 9000$ ) vs DE



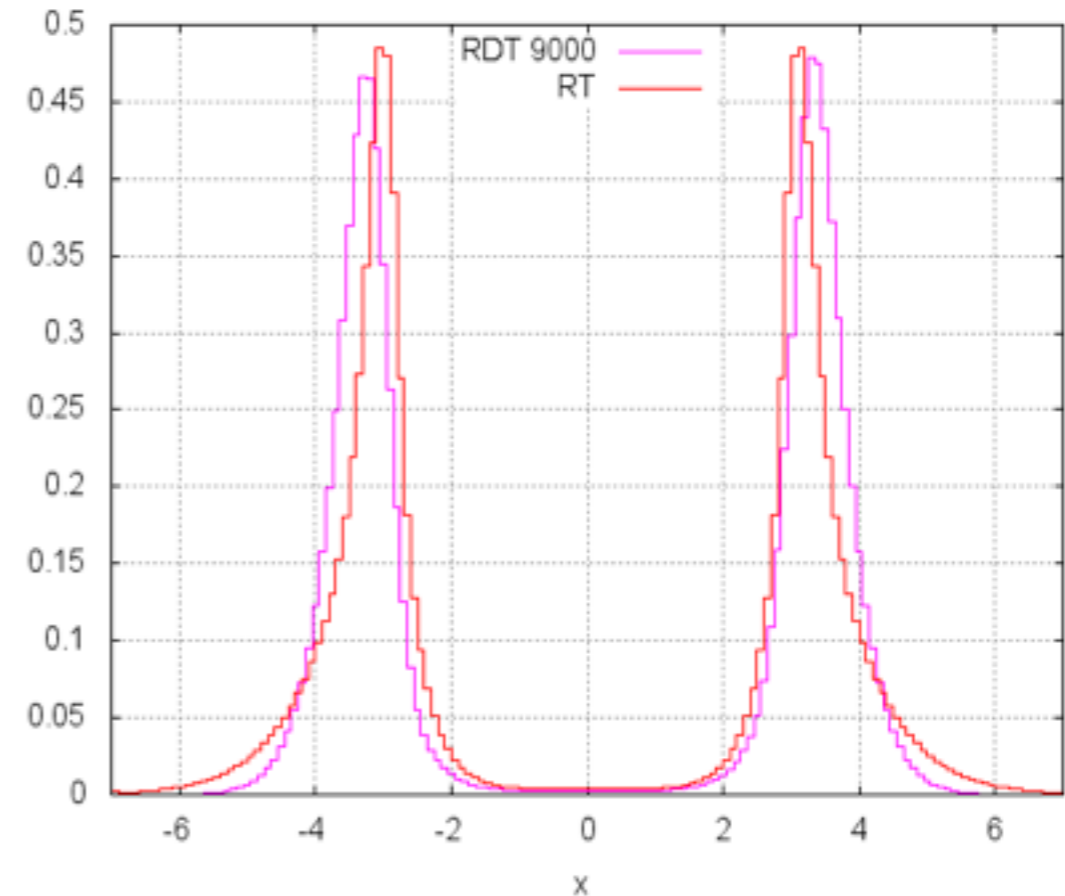
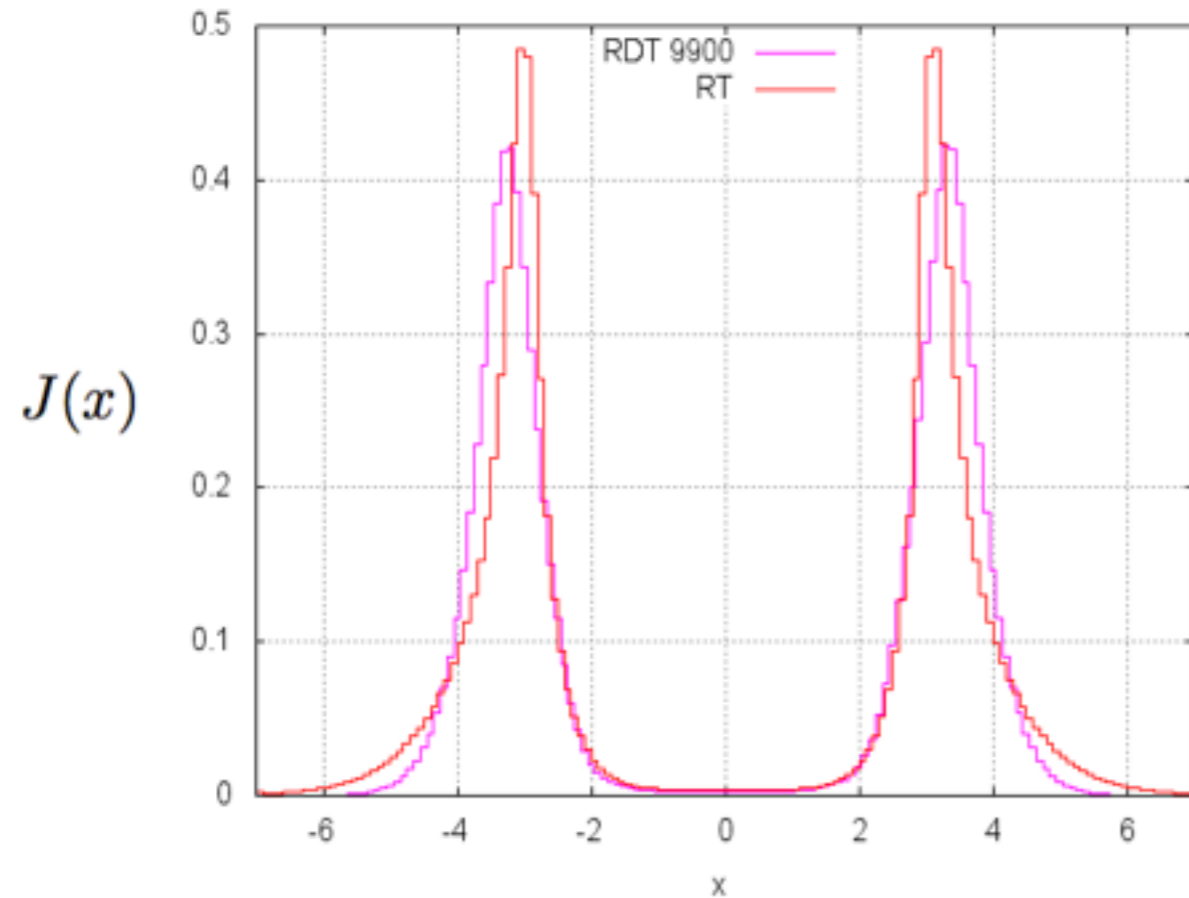
- DEのスペクトルはRTのものからずれる
  - line center付近にphotonが残っており、相対的にpeakの高さが低くなる
    - ➔ transferを解かなければならない
- 表層部分のRT直接によって散乱過程を正しく解くため、line center付近のintensityがwing側へshiftする

# RDT vs RT

$$\tau_0 = 10^4 \quad T = 10^4 \text{ K}$$

$$\tau_{\text{RDT}} = 9900$$

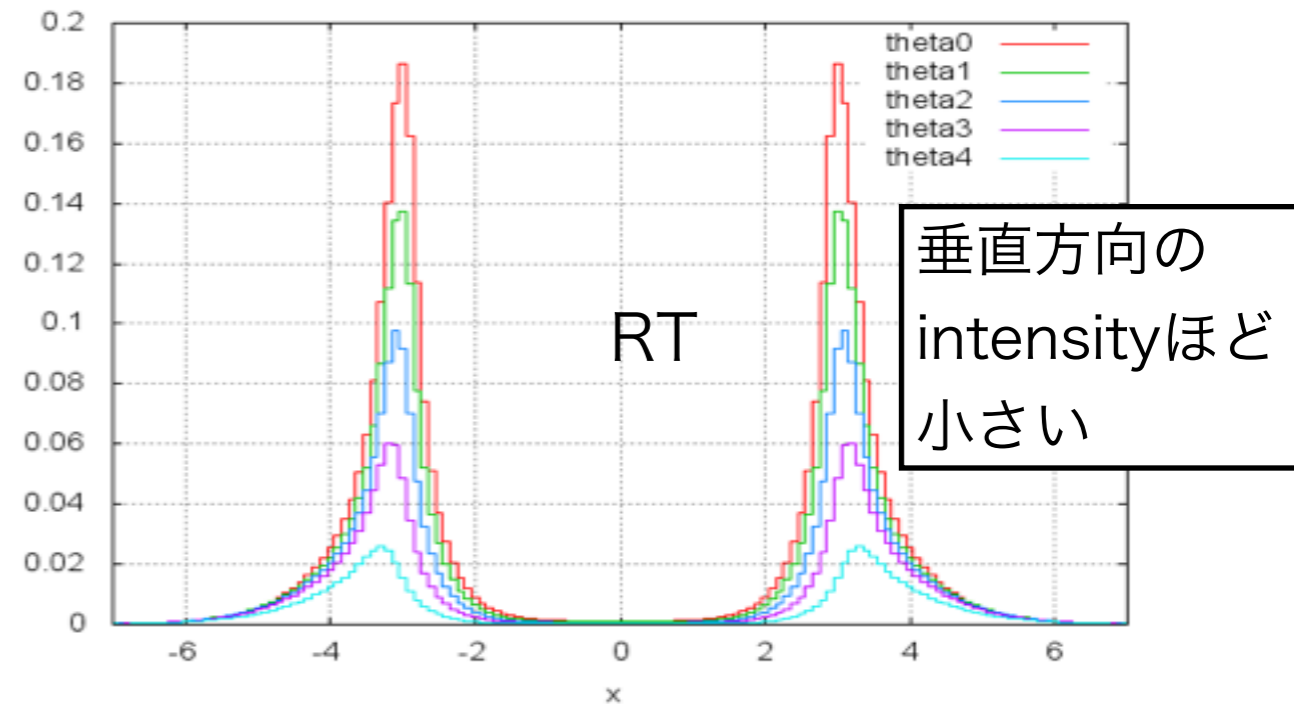
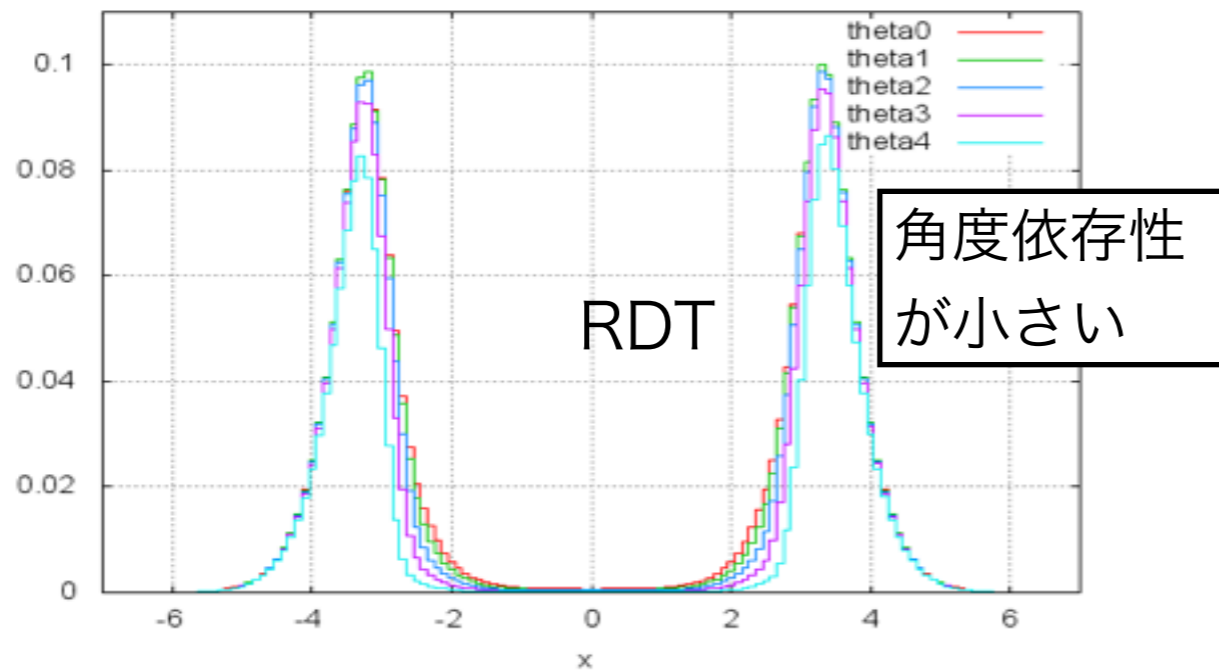
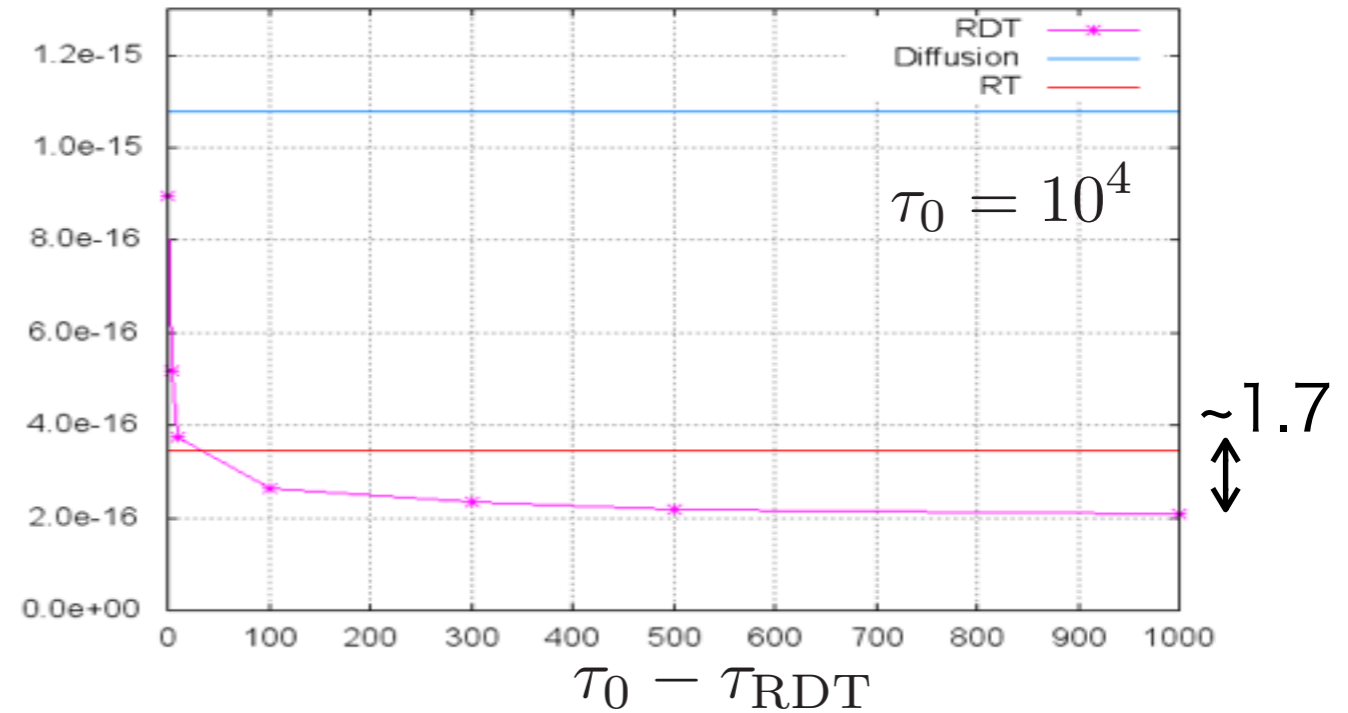
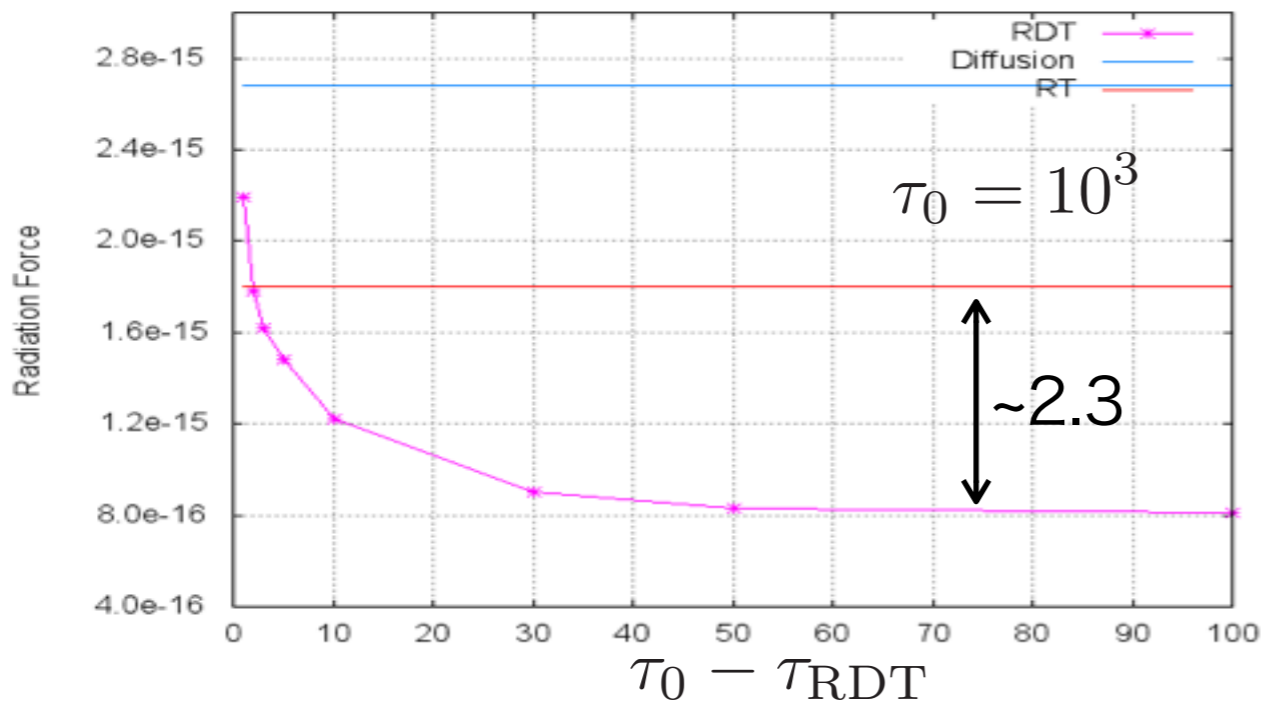
$$\tau_{\text{RDT}} = 9000$$



- ・ 表層部分のRT計算により、line center付近のintensityがよく一致する
  - ・ DEと比べ、RDT計算ではRT計算に近いスペクトルを計算することが可能
- ・ iteration count
  - ・ **RT ~  $3 \times 10^5$** に対し、 **$\tau_{\text{RDT}} = 9900$** で**~500**、 **$\tau_{\text{RDT}} = 9000$** で**~ $2 \times 10^4$** 
    - ・ 計算時間を大幅に短縮することができる

# Ly $\alpha$ 輻射力

$$\propto \int \sigma_x F_x dx \quad F_\nu = \int I_\nu \cos \theta d\Omega : \text{Flux}$$



- DEとRTでは輻射力の評価が異なる
- RDTによって、RT計算に近い輻射力を計算することができる
- 一致しないのは、intensityの角度依存性を正しく評価できないことによる

# まとめ

- Transfer計算とDiffusion近似をカップルさせ、Lya line transferの計算を加速させるスキーム (Radiative Diffusion & Transfer, RDT) の考案
  - ✓ Transfer :  
輻射輸送方程式からline transferを解くことができる手法を開発 (速度場がある場合も解ける)
  - ✓ Diffusion近似 :  
Voigt profileを考慮した輻射拡散方程式によって、正確にdiffusion近似の解を計算
- ✓ RDT法
  - ✓ Diffusion近似に比べRT計算の結果に近いスペクトルを得ることができる
  - ✓ **計算時間 (iteration回数) を大幅に削減することができる**
  - ✓ 角度依存性については十分に解けない ( $\tau=10^4$  K)、より光学的に厚い系で試してみる必要がある