

# SPH粒子データを直接用いた Ly $\alpha$ 輻射輸送計算コードの開発

安部牧人（筑波大）

共同研究者

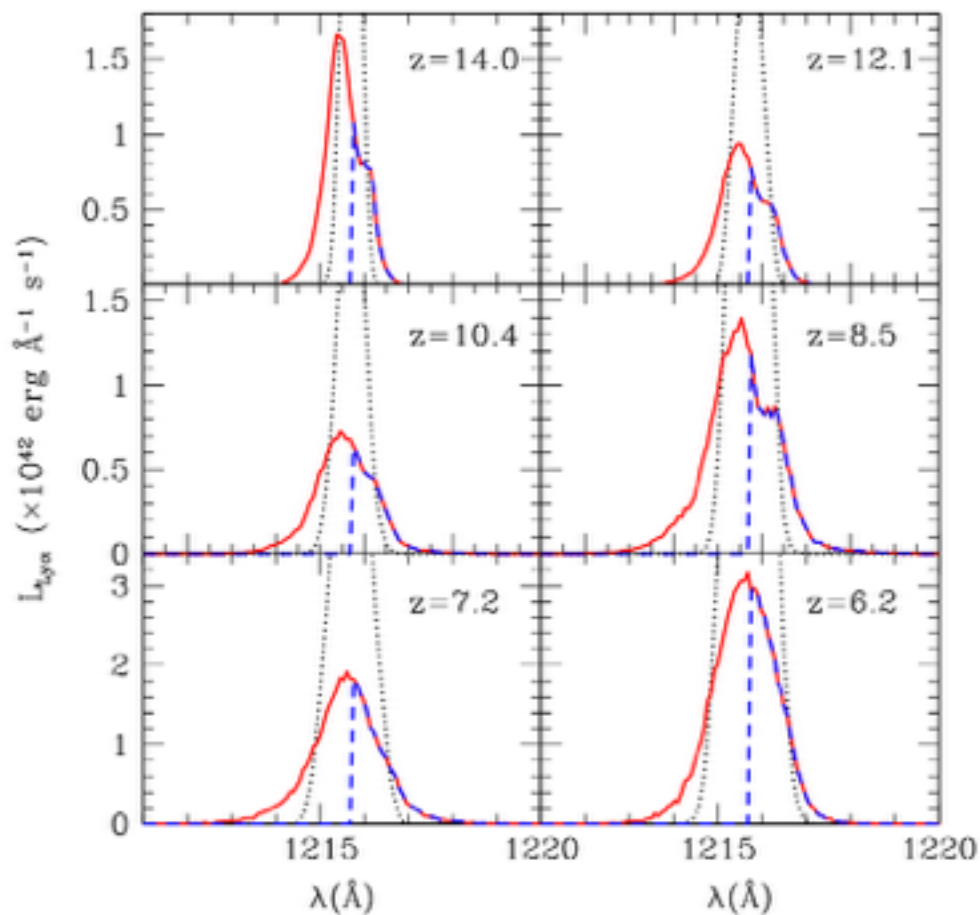
長谷川賢二（名古屋大）、Benoit Semelin（パリ天文台）、  
矢島秀伸（東北大）、梅村雅之（筑波大）

第4回 銀河進化研究会2017@大阪大学 2017/6/8

# Ly $\alpha$ 輝線とLy $\alpha$ 輝線銀河

- Lyman alpha (Ly $\alpha$ ) 輝線
  - 星形成銀河の強力なプローブ  
(Partridge & Peebles 67', 大質量星によるガスの電離 & 再結合で光る)
- Ly $\alpha$ 輝線で非常に明るい銀河 (Lyman alpha emitter, LAE)
  - high-zで多く同定、銀河進化の観点で重要な天体
  - 脱出光子スペクトルには銀河内部の情報 (星形成率、ガスの速度場の情報)

asymmetric profile (shifted to bluer)



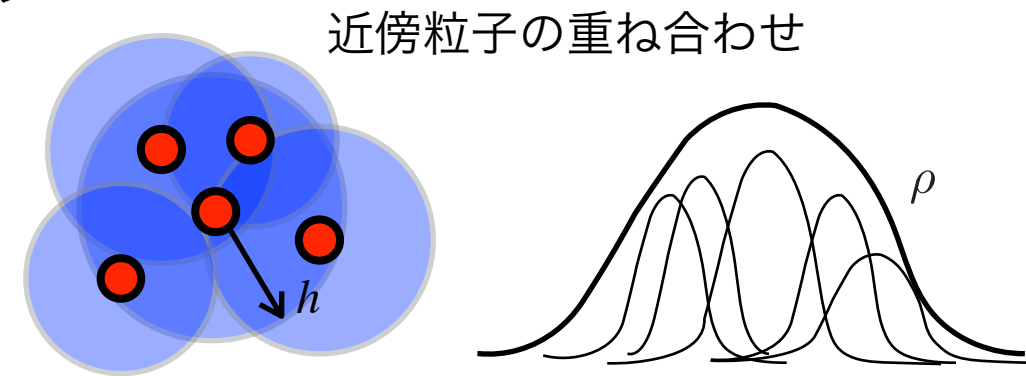
(Yajima+15')

- LAE: 理論的な理解が今後の課題
  - Ly $\alpha$ 光子の脱出過程
    - Ly $\alpha$ 輻射輸送計算 (取り扱いが難しい)
  - Ly $\alpha$  emissivity
    - ISMの状態を正確に求める必要
- 詳細な銀河モデル + Ly $\alpha$ 輻射輸送計算 (RT)

# SPH計算による銀河モデル

- 銀河形成シミュレーションにおける流体計算

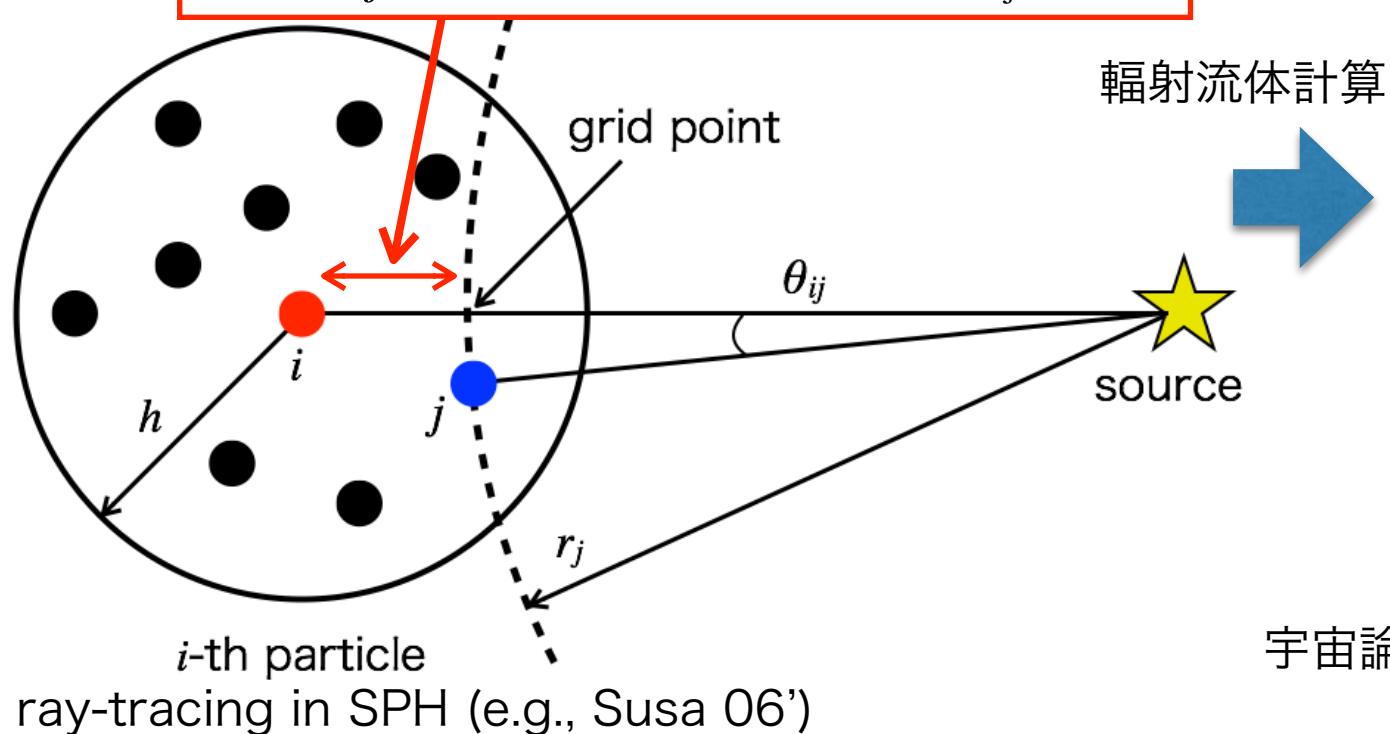
- SPH法（粒子法）、広いダイナミックレンジを取り扱うことができる



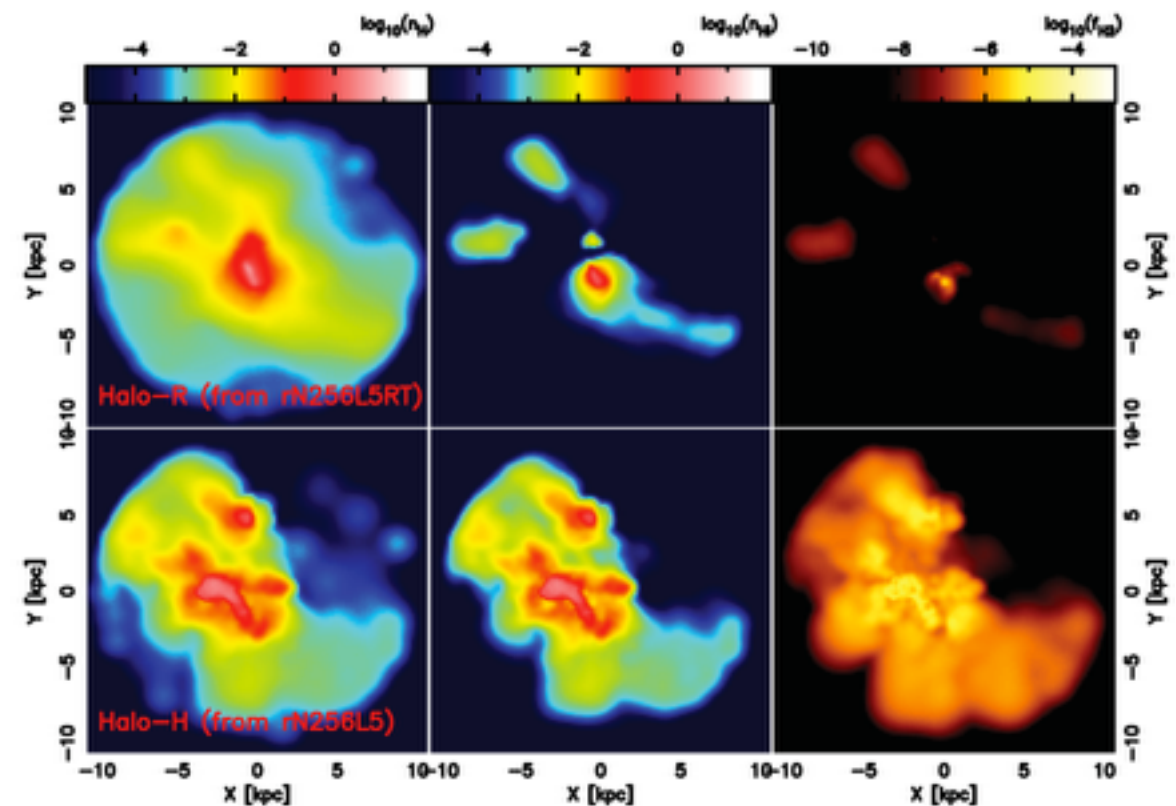
- SPH+UV輻射輸送計算（輻射流体力学）による銀河形成シミュレーション

- 流体計算(SPH)+自己重力(DM)+非平衡化学進化+輻射輸送を同時に解き、ダイナミクスを追うこと（輻射流体計算）が可能になってきた

- SPH粒子を輻射輸送計算のグリッドに
- 上流  $j$  粒子と  $i$  粒子の情報から  $\Delta\tau_{ij}$  の計算



ray-tracing in SPH (e.g., Susa 06')



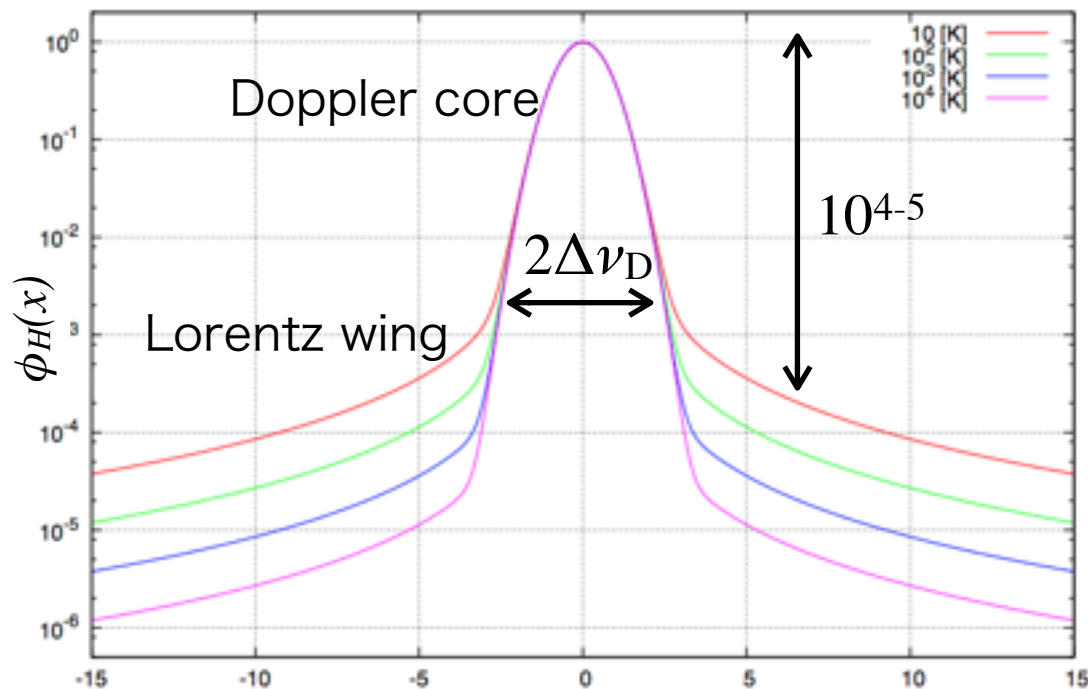
宇宙論的銀河形成シミュレーション(Hasegawa&Semelin 13')

星からのUV feedback込みの計算

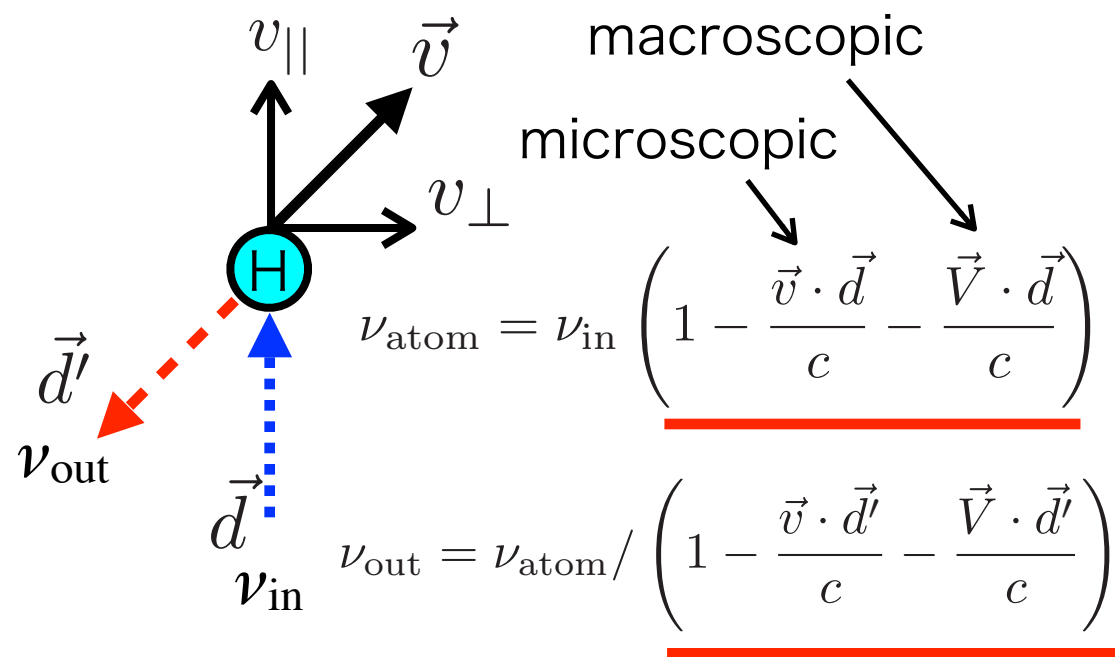
- Lya輻射輸送計算を組み合わせた計算が課題

# Lya輻射輸送 (Radiative transfer, RT)

Voigt profile



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



✓ Lya輝線：2P→1Sの遷移

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

➔ 共鳴散乱過程

- ・ 多重散乱して系外に脱出

✓ ラインプロファイル (Voigt profile)

- ・ coreで非常に光学的に厚くてもwingの光子は系から脱出できる

- ・ 振動数の取り扱い (振動数シフト) が重要

✓ 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

✓ ダストがある場合は、ダストによる吸収/散乱

# Monte Carlo法によるLy $\alpha$ 輻射輸送計算

- Ly $\alpha$ 輻射輸送を輻射輸送方程式から解くのは大変（散乱+振動数シフト）
- Monte Carlo法がよく採用される
  - Ly $\alpha$ 光子がガスと相互作用せずに透過する確率は  $e^{-\tau}$ 
    - 光子が散乱される場所（散乱するまで進める  $\tau$ ）を確率的に与える

## 手続き

(1) target  $\tau$  (光子が進む距離) をランダムに決定する

$$\tau_{\text{target}} = -\ln \xi \quad (\xi: \text{一様乱数})$$

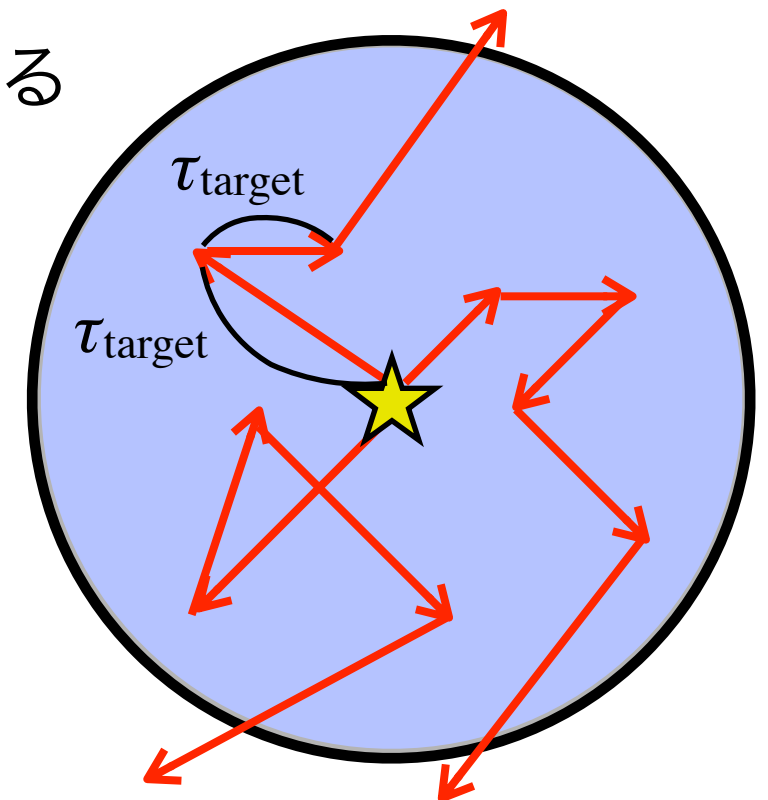
(2)  $\tau = \tau_{\text{target}}$  になるまで  $\tau$  を積分 (ray-tracing)

(3)  $\tau = \tau_{\text{target}}$  で散乱（方向はランダムに決める）

→ 振動数シフトを評価

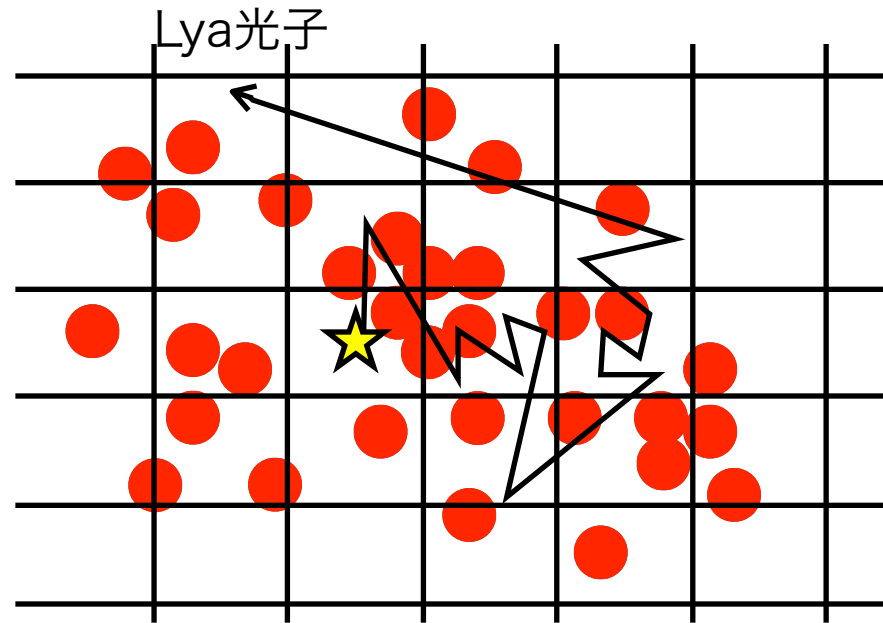
(4) あらたな target  $\tau$  を決め、(1)に戻る

- 光源から多数の光子パケット ( $\sim 10^5$ ) を飛ばし、Ly $\alpha$ 光子の散乱過程を追う

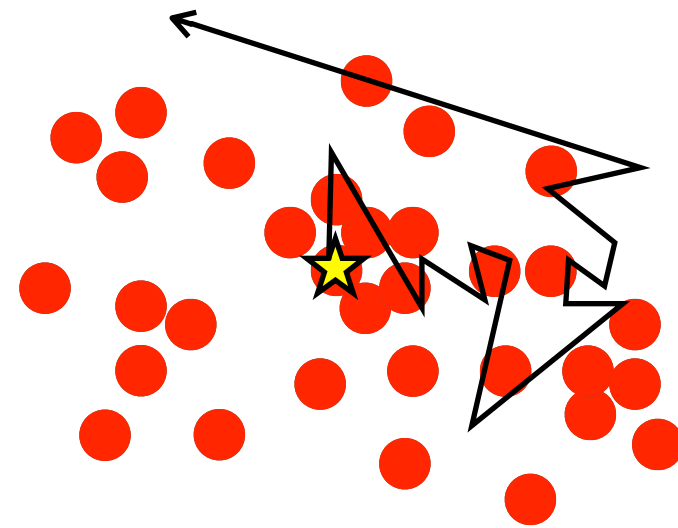


# SPH based Ly $\alpha$ 輻射輸送コードの開発

- これまでのLy $\alpha$  RT Monte Carloコードはメッシュベース
  - mesh-assignによってSPH計算の情報を人工的に落とす



mesh-based : SPHの情報をmesh-assign  
⇒meshの物理量からLy $\alpha$  emissivity決定、Ly $\alpha$  RT計算



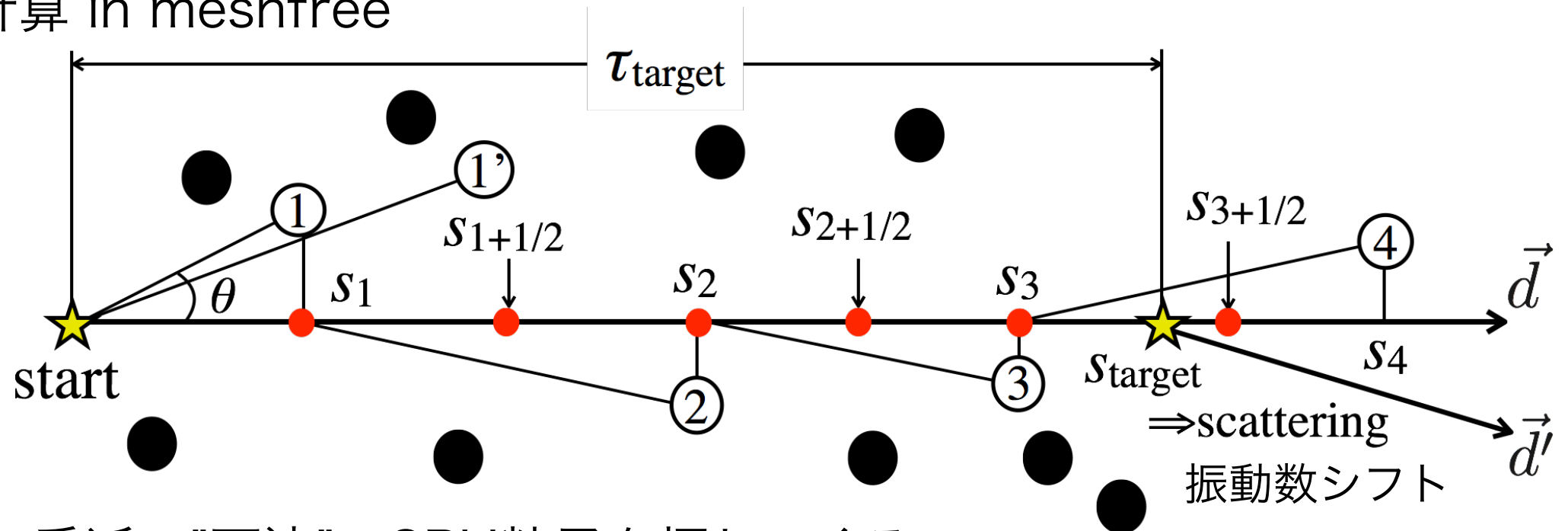
SPH-based : 高密度領域を高解像度で分解

- SPH計算の情報をそのまま使ってLy $\alpha$ 輻射輸送を解きたい (mesh-free)  
**SEURAT: SPH scheme Extended with UV line RAdiative Transfer**を開発
  - SPH粒子を輻射輸送計算の際のgridとして用いる
  - ➔ 高密度領域を高解像度で分解したまま、Ly $\alpha$ 輻射輸送計算を行うことができる



# SPH based ray-tracing in SEURAT

✓  $\tau$  の計算 in meshfree



- ・ 光線上に一番近い”下流”のSPH粒子を探してくる
- ・ 物理量をray上にassign
- ・  $\tau > \tau_{\text{target}}$  になるまでrayに近い粒子の探索 &  $\tau$  積分
- ・ 2粒子の中間点でtauを評価： $\tau_{i+\frac{1}{2}} = \tau_{i-\frac{1}{2}} + \underline{\sigma_{x_i} n_i} (s_{i+\frac{1}{2}} - s_{i-\frac{1}{2}})$   
 $i$  粒子の物理量でtau積分
- ・ 散乱位置の評価： $\tau_{\text{target}} = \tau_{i-\frac{1}{2}} + \sigma_{x_i} n_i (s_{\text{target}} - s_{i-\frac{1}{2}})$  (図だと  $i = 3$ )
- ・  $s_{\text{target}}$  ( $\tau = \tau_{\text{target}}$ )で散乱パケットの新たな進行方向を決めて再びray-tracing
- ・ ray-tracing中に下流粒子が見つからなければ光子は系から脱出したとみなす

# Meshfree Ly $\alpha$ radiative transfer

- ・ SEURATで標準的なテスト問題を解く：
  - 1)emerging spectrum from static sphere
  - 2)emerging spectrum from expanding sphere
  - 3)escape fraction from dusty slab

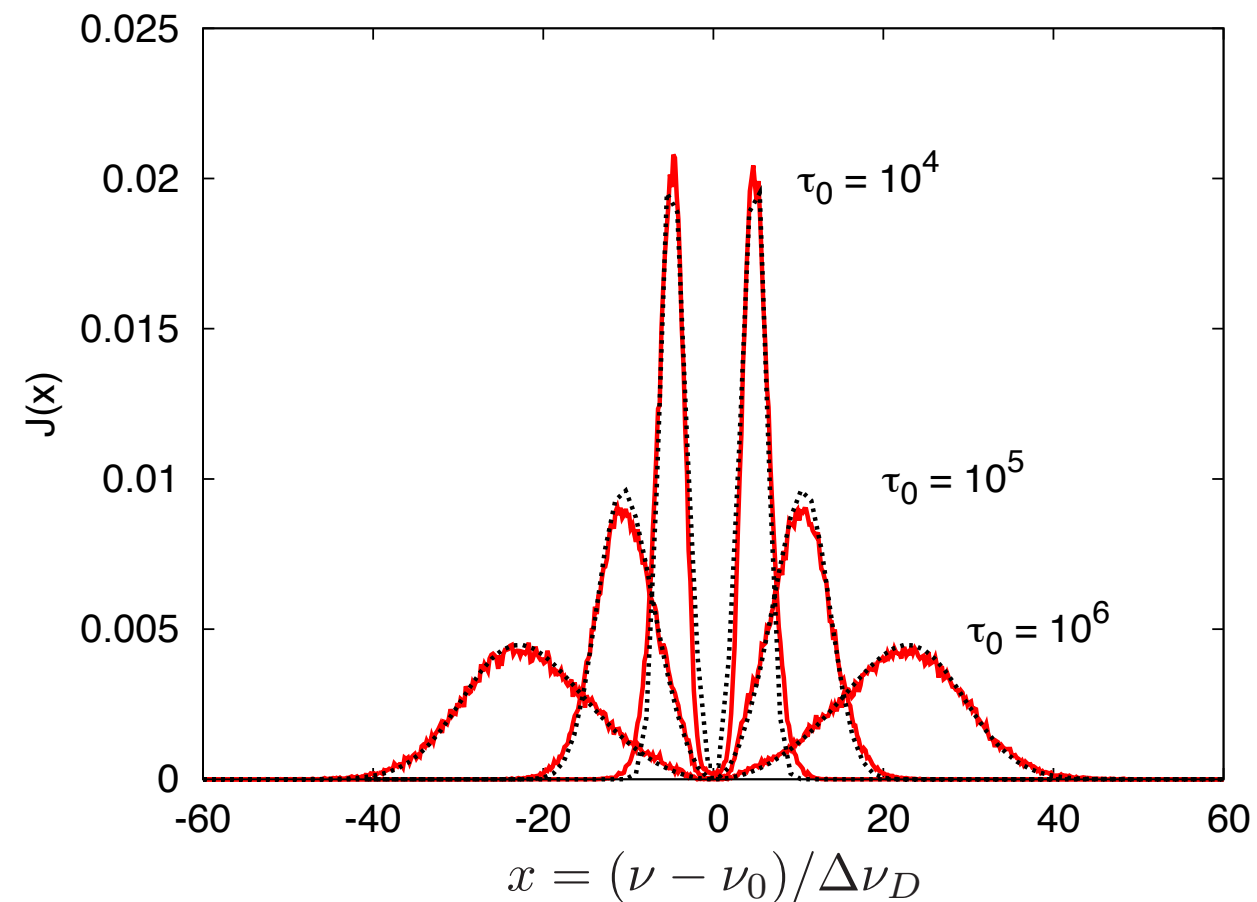
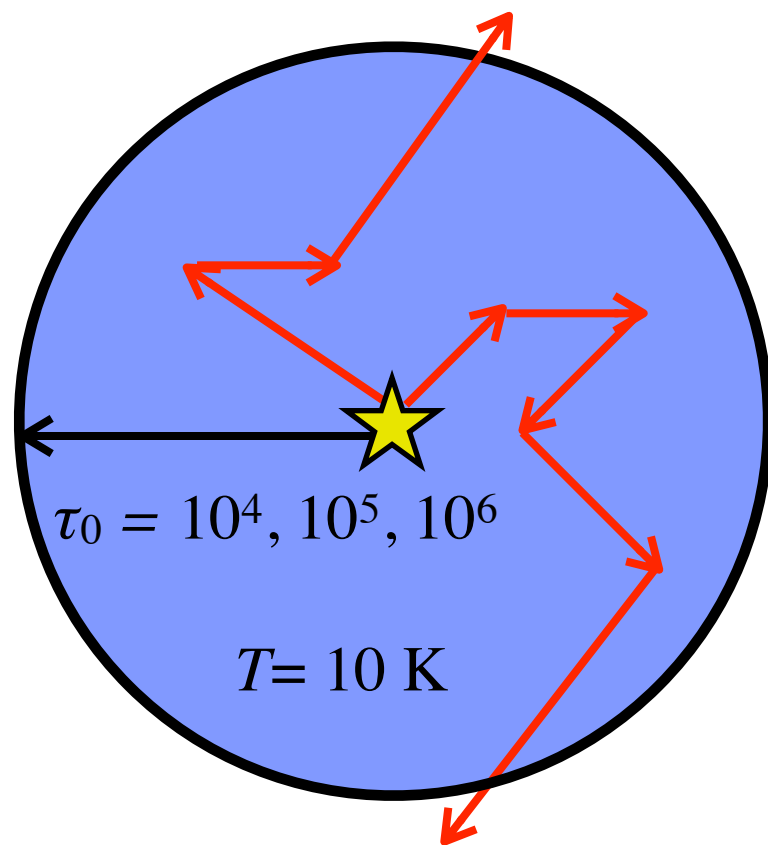
64<sup>3</sup> SPH粒子、光子パケット数=10<sup>5</sup>



# Emerging spectrum from static sphere

脱出光子スペクトルの解析解が知られている

$$J(x) = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{24}a\tau_0} \left\{ \frac{x^2}{1 + \cosh \left[ \sqrt{2\pi^3/27} (|x^3|/a\tau_0) \right]} \right\} \quad (\text{Dijkstra+06'})$$

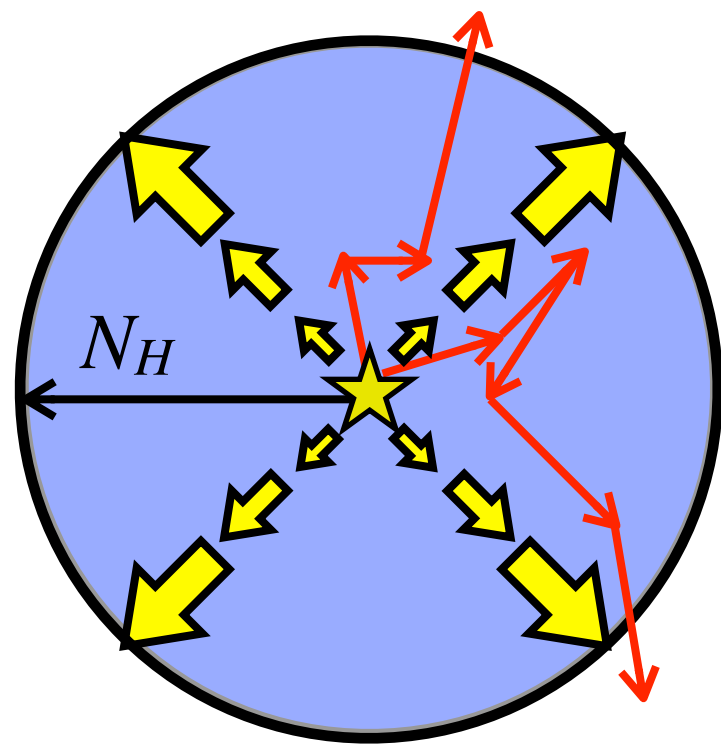


- ✓ 多重散乱に伴う振動数シフトによってwing部分から系外に脱出 (double peak)
- ✓ 光学的に厚い系ほど広がったスペクトル
- ✓ 解析解とよく一致

# Emerging spectrum from expanding sphere

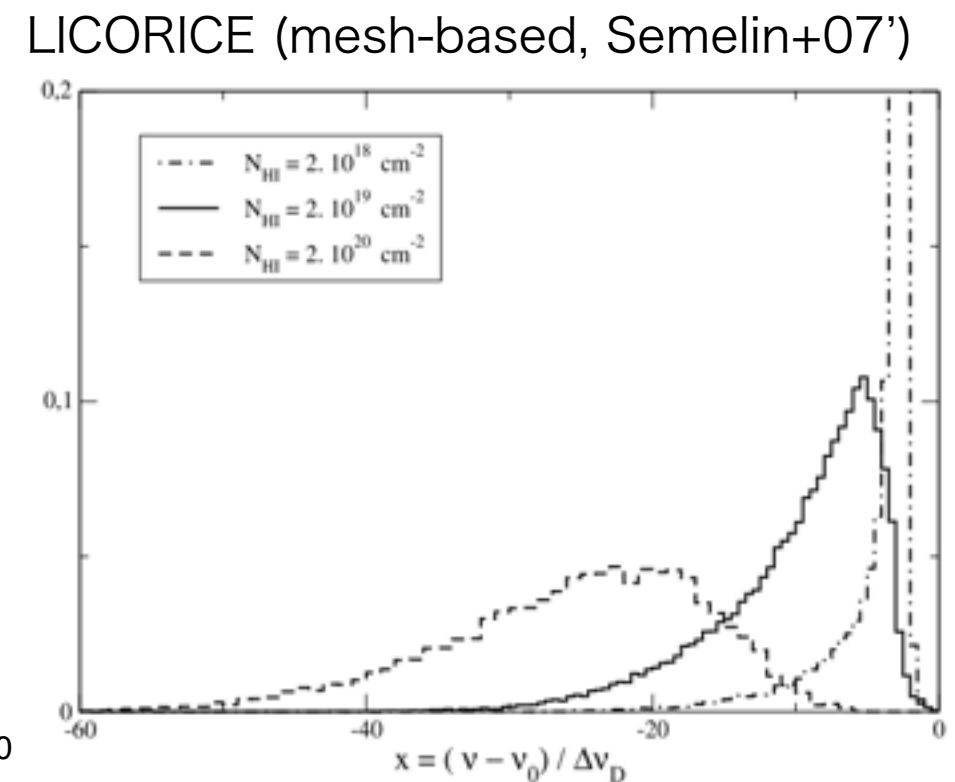
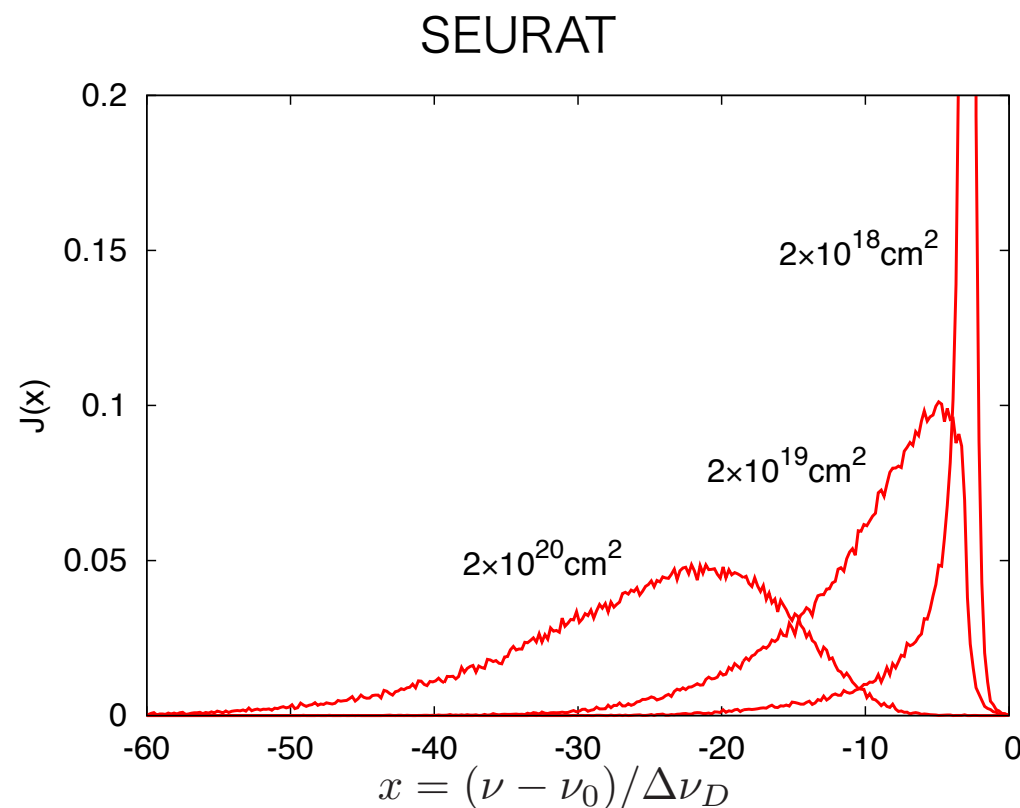
脱出光子スペクトルの解析解は無いが、よくテスト計算に用いられる

- ✓ bulk motionによってblue側( $x > 0$ )の光子がガス静止系でline centerに  
→ red側( $x < 0$ )から脱出してくるような非対称な形のemerging spectrum



$$V(r) = \left( \frac{r}{r_{\max}} \right) v_{\max}$$

$$N_H = 2 \times 10^{18-20} \text{ cm}^2$$



mesh-based codeの結果とよく一致

# Dust scattering/absorption

- dust : 脱出光子スペクトルの形に影響

多重散乱するほどdust吸収の確率が高くなる

- dust込みのoptical depth :

$$d\tau_x = \underbrace{\sigma_x n_{\text{H I}} ds}_{d\tau_{x,\text{H I}}} + \underbrace{\pi r_d^2 Q_{s,x} n_d ds}_{\text{散乱}} + \underbrace{\pi r_d^2 Q_{a,x} n_d ds}_{\text{吸収}}$$

$$n_d \sigma_d ds = d\tau_{x,d}$$

$$Q_{s,x}, Q_{a,x} : \text{ダスト散乱/吸収のQ-value}, \quad n_d = n_{\text{H}} \left( \frac{m_{\text{H}}}{m_d} \right) \left( \frac{M_d}{M_{\text{H}}} \right)$$

光子パッケージが中性水素に散乱される確率

$$\Rightarrow p = \sigma_{\nu} n_{\text{H I}} / (\sigma_{\nu} n_{\text{H I}} + n_d \sigma_d)$$

- コード内でのdustによる吸収の取り扱い

1. stochastic elimination of photon packets (光子パッケージを消す)

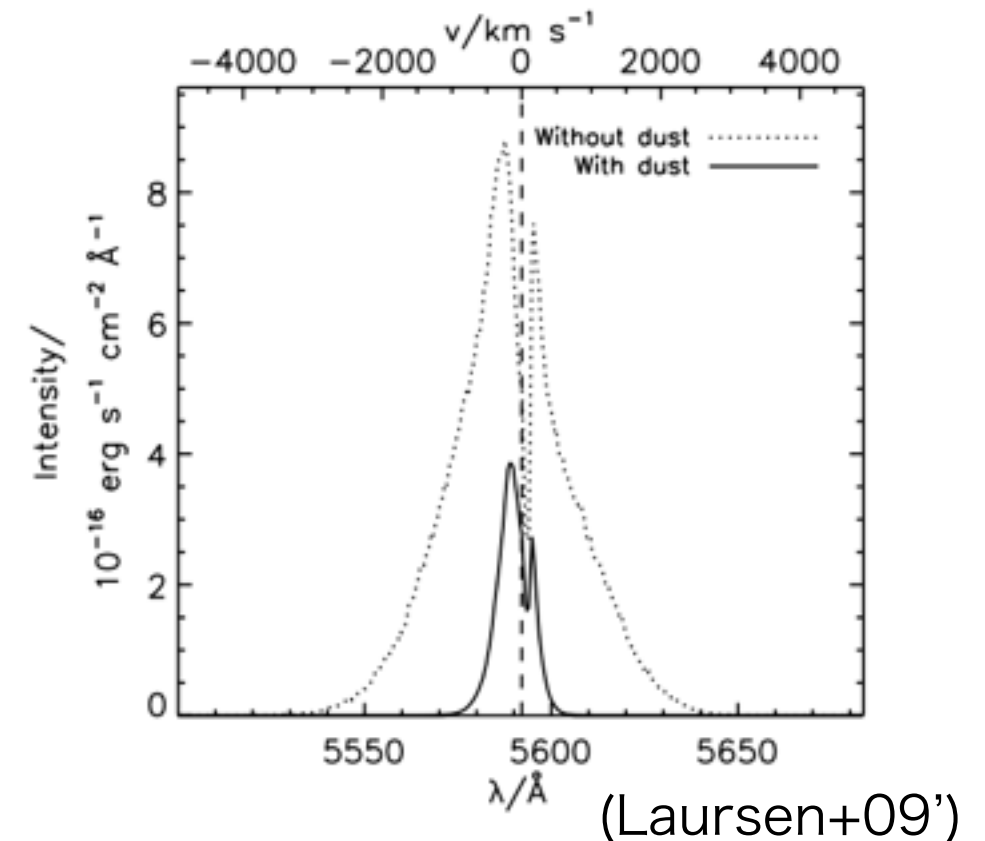
- Dustによって散乱する確率 :  $\varpi = Q_s / (Q_s + Q_a)$

➔  $1 - \varpi$  で光子パッケージを消滅させる

2. attenuation of flux

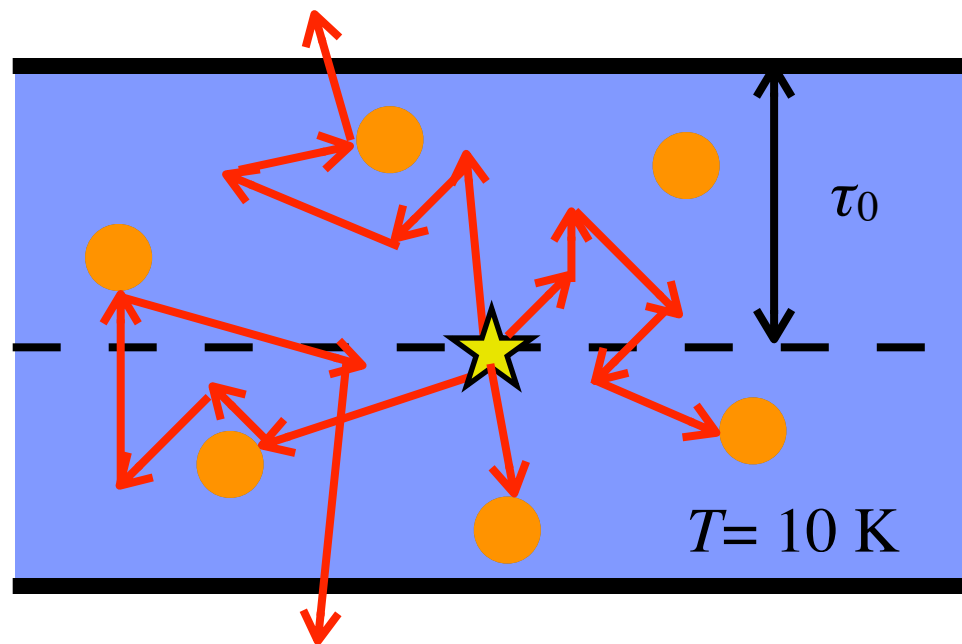
- Lya光子がdustに吸収されない確率は  $e^{-\tau_{d,\text{abs}}}$  ( $\tau_{d,\text{abs}}$ : dust吸収の $\tau$ )

➔ 光子がすすむ度に、packetの光子数を減衰させる

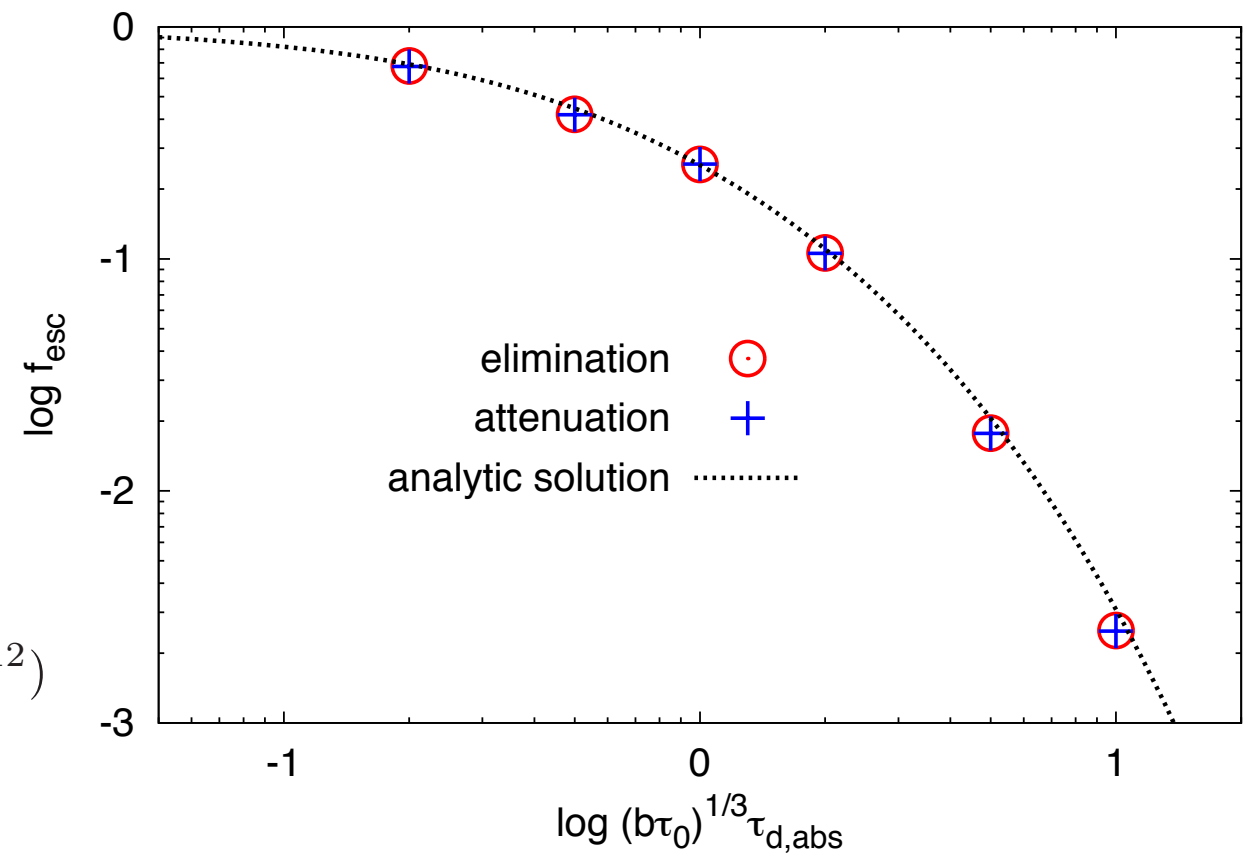


# Escape fraction from a dusty slab

- dusty slabからのLy $\alpha$ 光子脱出確率
  - 解析解が知られている (Neufeld 90')



$$f_{\text{esc}} = \frac{1}{\cosh \left[ \xi' \sqrt{(b\tau_0)^{1/3} \tau_{\text{d,abs}}} \right]} \quad \xi' = \sqrt{3}/(0.525\pi^{5/12})$$



- “stochastic elimination”, “attenuation of flux”ともに解析解をよく再現

# Meshfree Monte Carlo based Lya RT

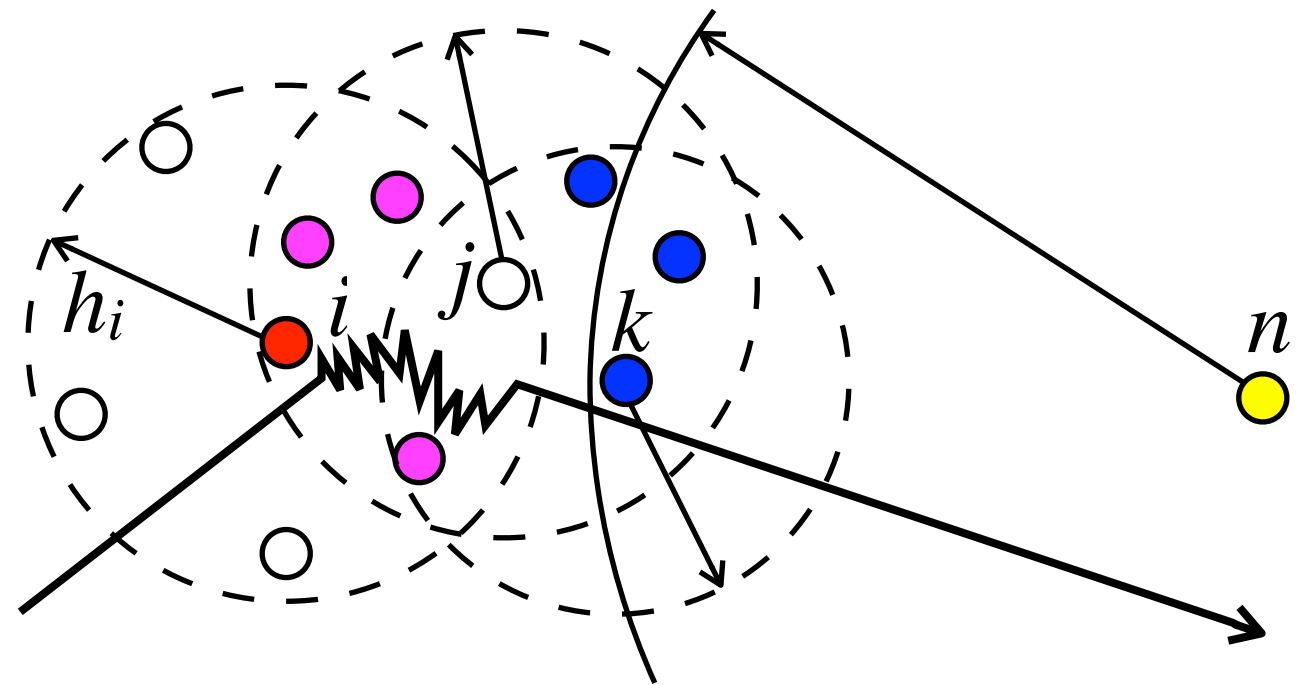
- ray-tracingで下流粒子が見つからない→光子パケットを脱出と判断  
→ うまく粒子を見つけないと光子の脱出を誤って評価、正しくLya RT計算できない
- meshfree Monte Carlo計算が困難になるケース：

## 1. ローカルな光学的厚みが非常に大きい

- $\Delta\tau \gg 1$ のとき、 $\tau = \tau_{\text{target}}$ は1粒子の中で満たされる⇒パケットが1粒子の周りを多重散乱
- パケットの位置によっては、neighbor listから下流粒子を見つけられない
- neighborのneighborまで粒子探索

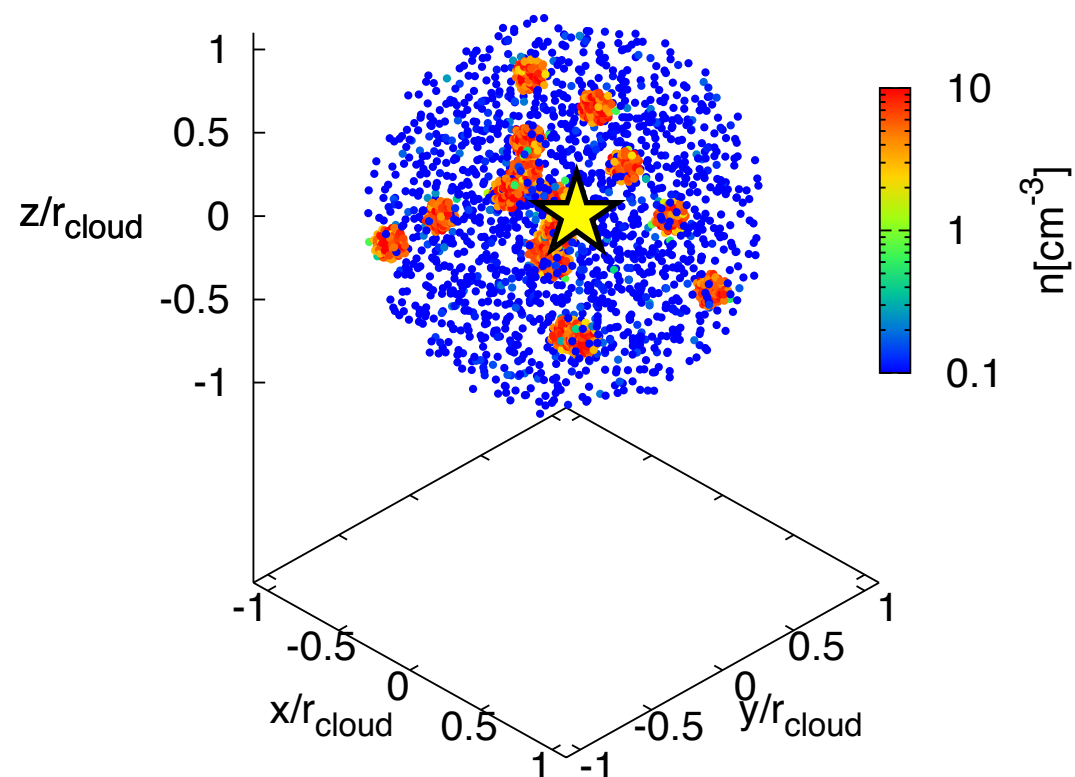
## 2. ガス密度の非一様性が大きい

- 高密度領域の粒子は低密度領域の粒子をneighbor listに含めない
- 低密度領域の粒子は、高密度領域の粒子を近傍粒子リストに含めている場合がある
- scatter list ( $k$ をneighbor listに含めている粒子)から粒子探索



# Adaptivity of SEURAT

- SEURATは銀河形成シミュレーションに適用可能か
  - 一様密度といった単純な密度構造ではない中で、近傍粒子探索が正しく行われるか（meshfree Monte Carlo計算が可能か） 検証
- Ray-tracing in the clumpy cloud
  - 密度コントラスト;  $n_{\text{clump}}/n_f = 100, 1000, 10000$   
( $n_{\text{clump}}/n_f = 1000$  の時、clumpのサイズとfield粒子の平均間隔が同じくらい)

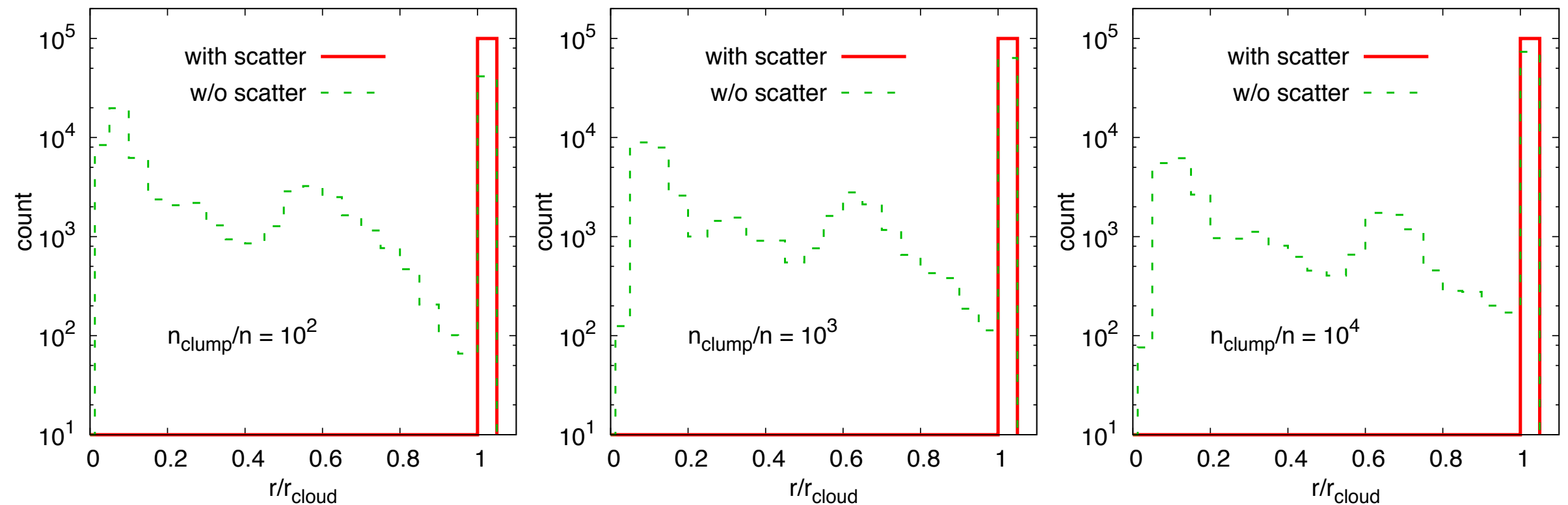


- cloud中心に光源を配置
- 100,000の光子パケットを飛ばす
- “脱出した”（ray-tracingをやめた）光子パケットの位置を検証



# Spatial distribution of “escaped” photon

光子パッケージが“脱出した”と判断した位置の分布



- “neighbor of neighbor” のみの場合 (w/o scatter particle list)
  - 高密度領域の粒子が低密度領域の粒子を見つけれられない
    - 光子パッケージの”脱出”を誤って評価
- scatter listを考慮した場合
  - 密度コントラストによらず、全パッケージが正しく系外に脱出
  - scatter listを近傍粒子探索の際に考慮することで、密度構造が複雑な系に対しても meshfreeでLya輻射輸送計算が可能

# まとめ

- ・ LAEの理論的理解には銀河形成シミュレーションにLya RTを組み合わせた計算が必要
- ・ 銀河形成シミュレーションにはSPH法が広く用いられるが、Lya RT計算コードはメッシュベースで開発されてきた
  - ・ SPH粒子を輻射輸送計算の際のグリッドとして用いる、meshfreeのMonte Carlo Lya RTコードを開発した  
**SEURAT: SPH scheme Extended with Ultraviolet line RAdiative Transfer**
- ・ SEURATでは、水素原子によるLya光子の散乱に加えダスト吸収/散乱過程を実装、テスト計算の結果、meshfreeでこれらの過程が正しく解けることを確認
- ・ “neighbor of neighbor”、“scatter particle list”を用いた近傍粒子探索により、光学的に非常に厚く、また密度の非一様性が大きい系でのray-tracingが可能