

SPH粒子データを直接用いた Ly α 輻射輸送計算コードの開発

安部牧人 (筑波大)

共同研究者

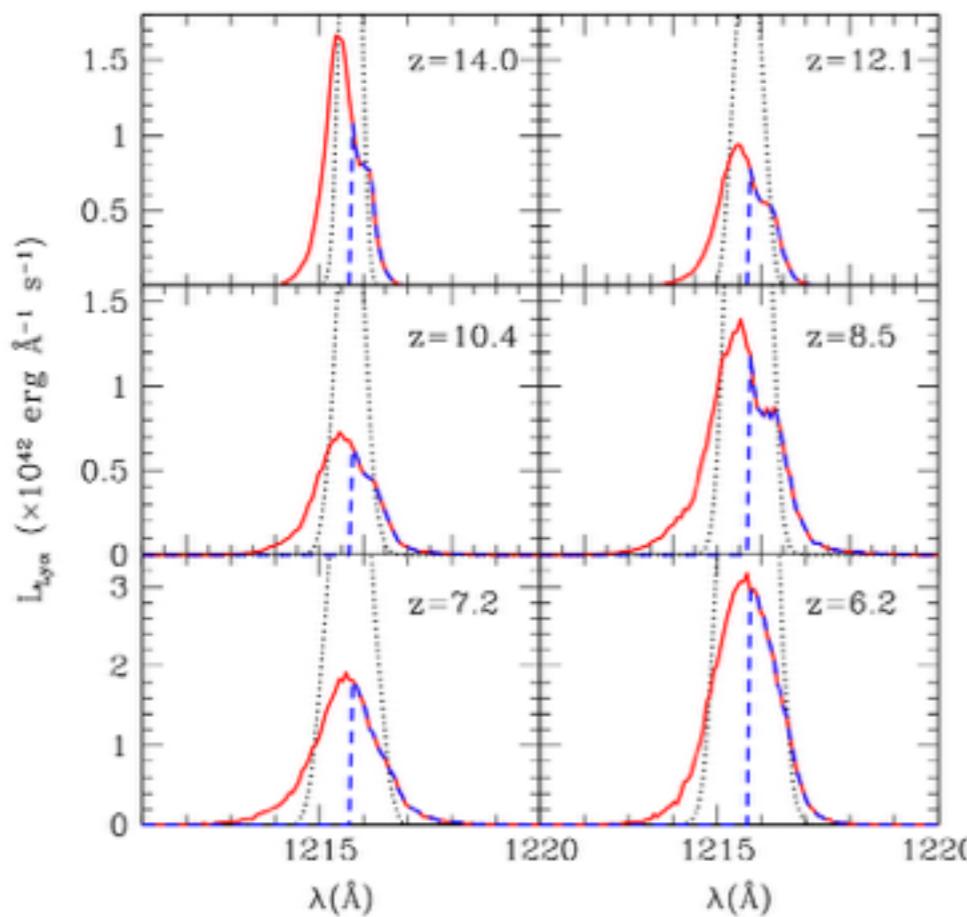
長谷川賢二 (名古屋大) 、 Benoit Semelin (パリ天文台)、
矢島秀伸 (東北大) 、 梅村雅之 (筑波大)

第4回 銀河進化研究会2017@大阪大学 2017/6/8

Ly_a輝線とLy_a輝線銀河

- Lyman alpha (Ly_a) 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_a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)

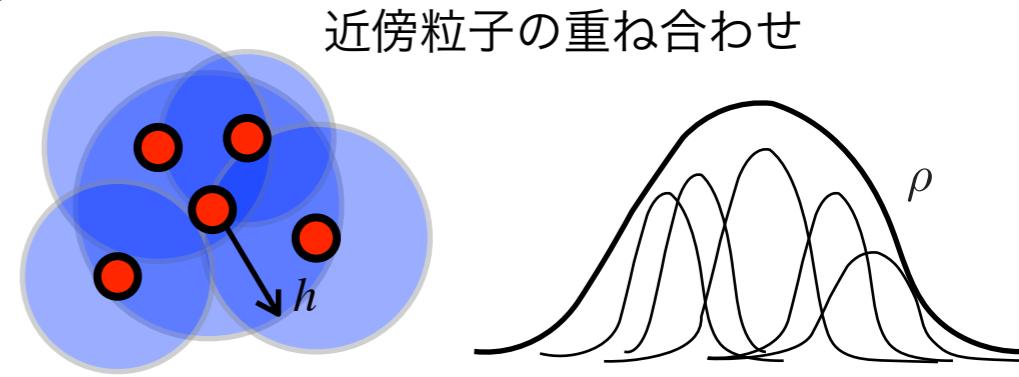


(Yajima+15')

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

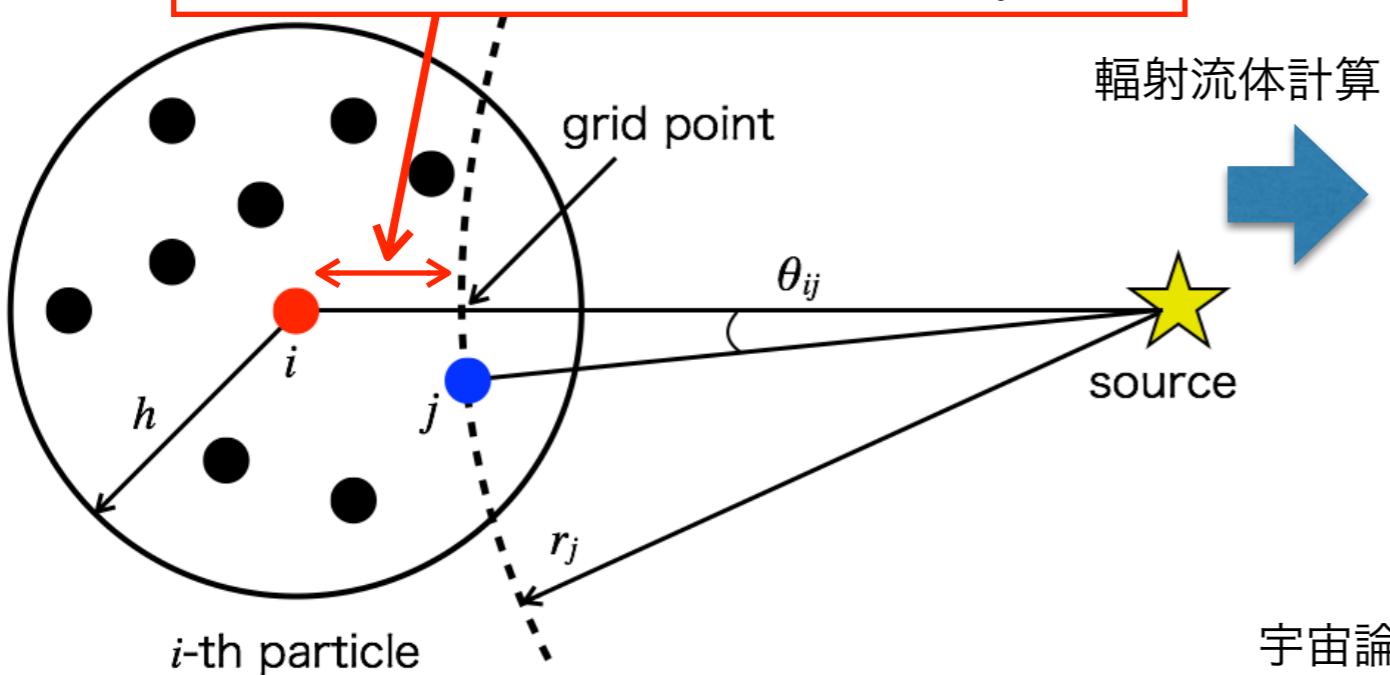
SPH計算による銀河モデル

- 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

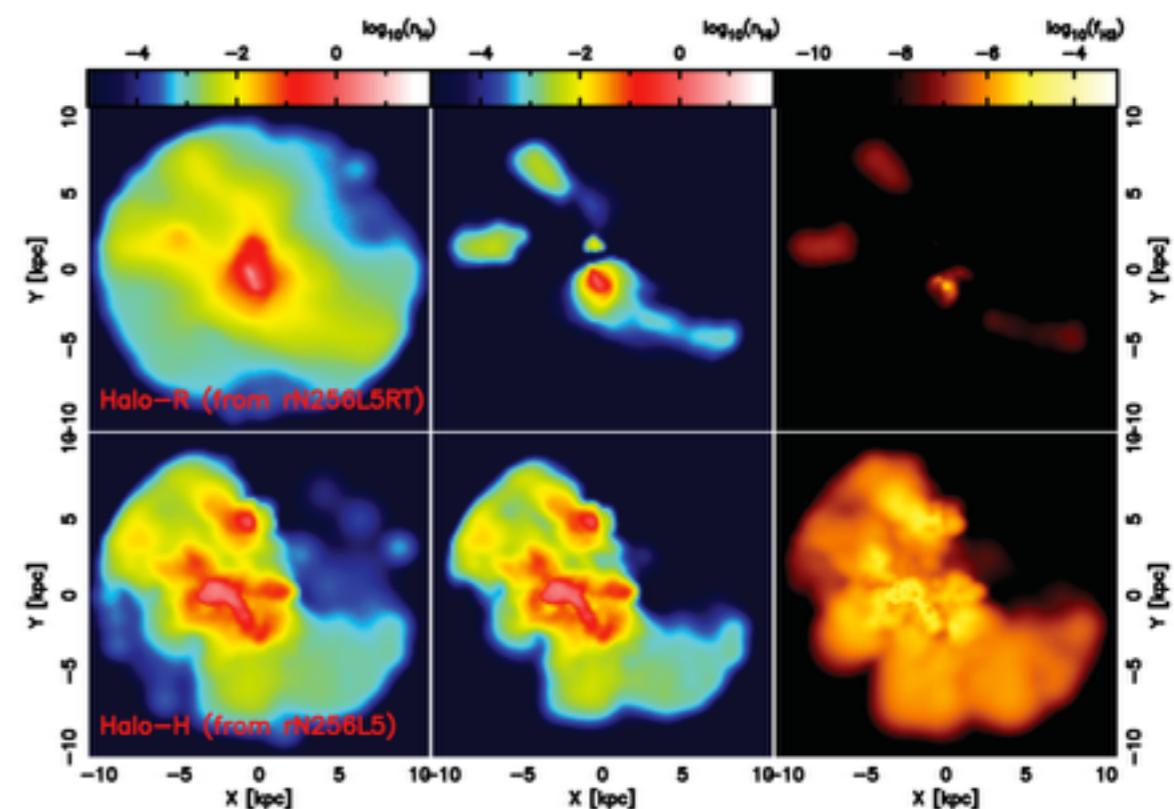


- SPH+UV輻射輸送計算（輻射流体力学）による銀河形成シミュレーション
 - 流体計算(SPH)+自己重力(DM)+非平衡化学進化+輻射輸送を同時に解き、ダイナミクスを追うこと（輻射流体計算）が可能になってきた

- 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



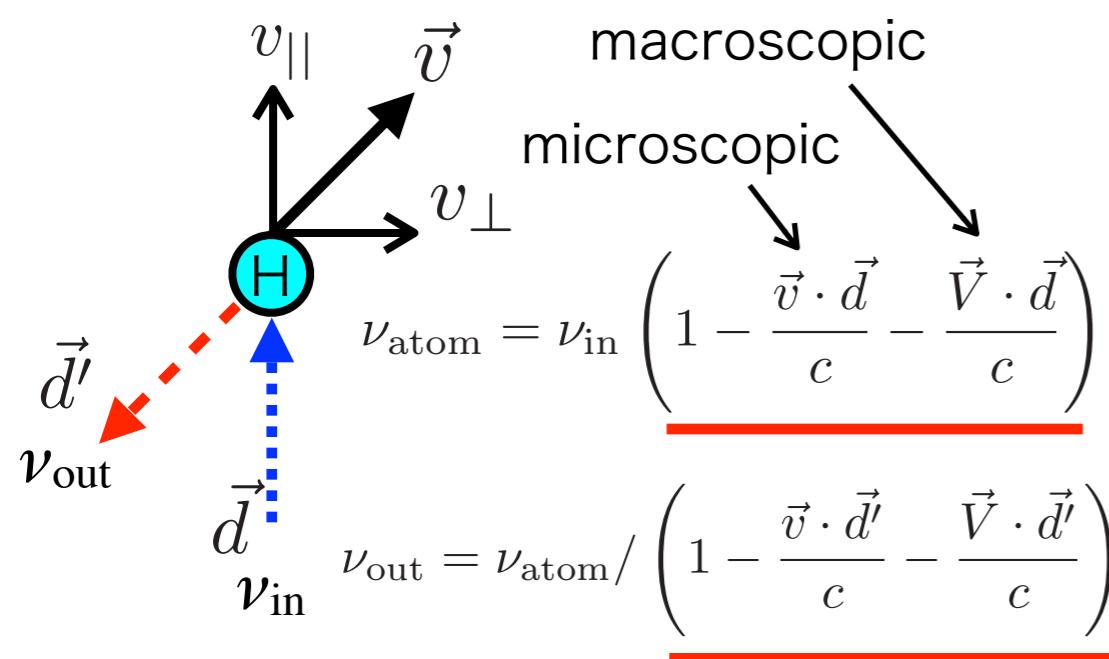
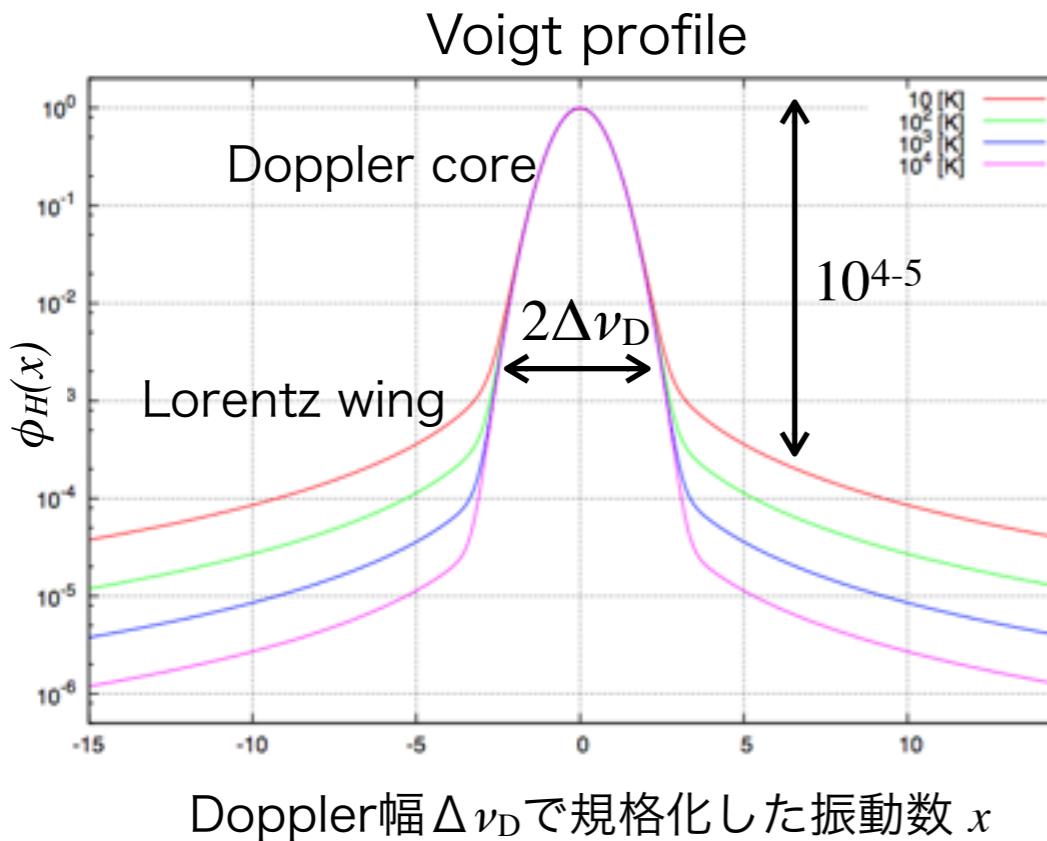
ray-tracing in SPH (e.g., Susa 06')



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

- Ly α 輻射輸送計算を組み合わせた計算が課題

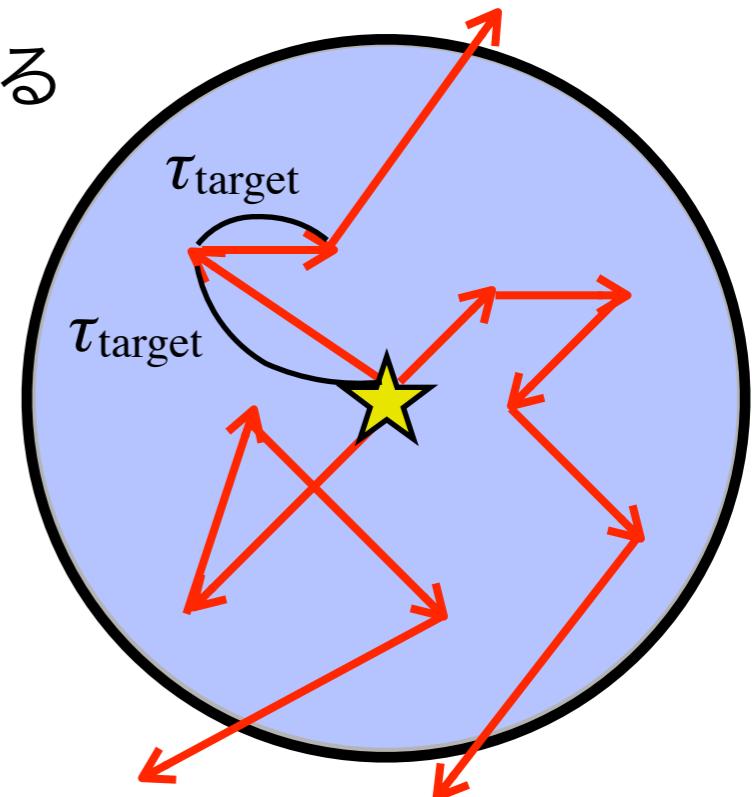
Lyα輻射輸送 (Radiative transfer, RT)



- ✓ Lyα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

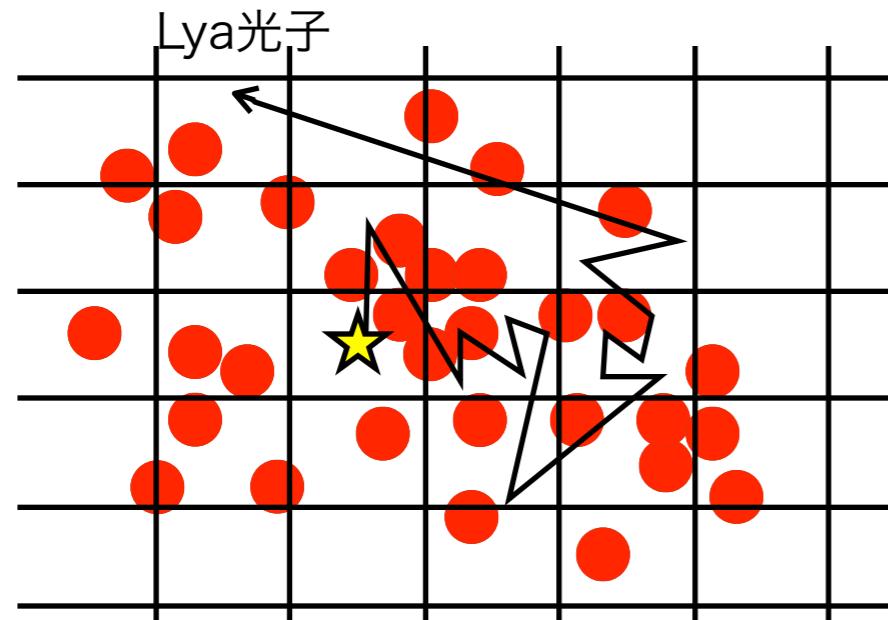
Monte Carlo法によるLy_a輻射輸送計算

- Ly_a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_a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 τ ）を確率的に与える
- 手続き
 - (1) target τ （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 τ 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_a光子の散乱過程を追う

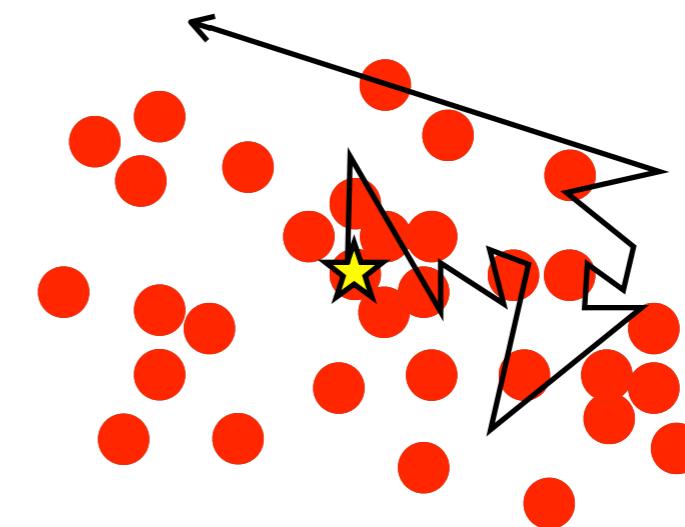


SPH based Ly α 輻射輸送コードの開発

- これまでのLy α 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 α emissivity決定、Ly α RT計算

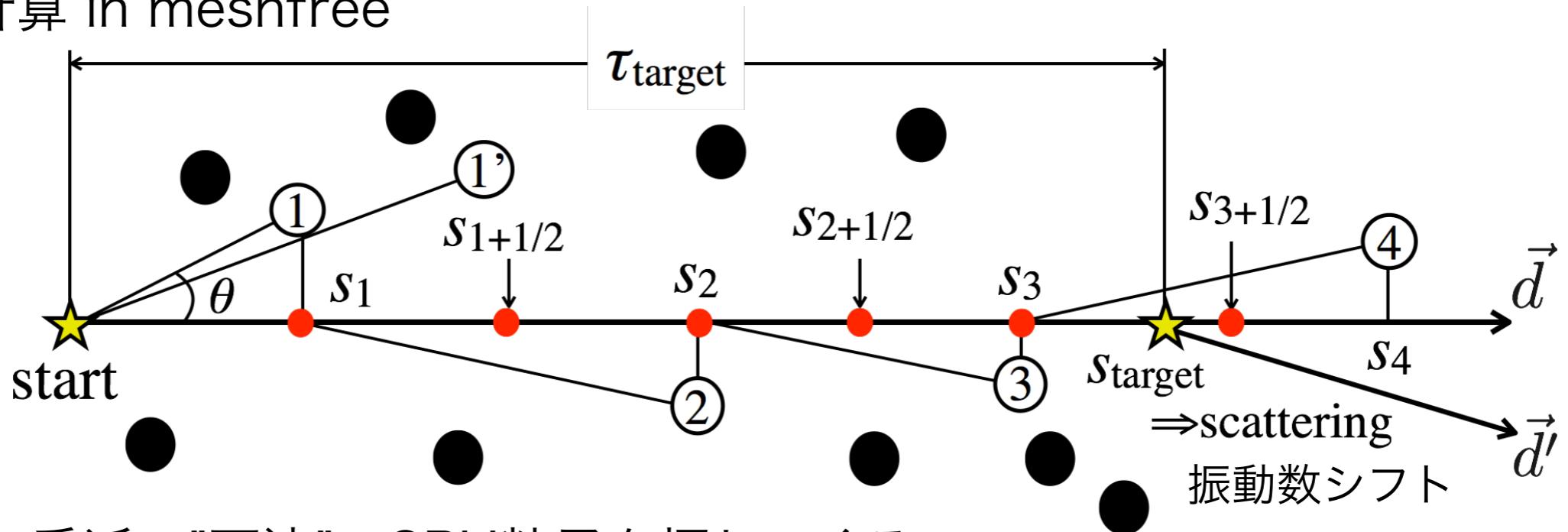


SPH-based : 高密度領域を高解像度で分解

- SPH計算の情報をそのまま使ってLy α 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 α 輻射輸送計算を行うことができる

SPH based ray-tracing in SEURAT

- ✓ τ 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 & τ 積分
- 2粒子の中間点でtauを評価 : $\tau_{i+\frac{1}{2}} = \tau_{i-\frac{1}{2}} + \frac{\sigma_{x_i} n_i (s_{i+\frac{1}{2}} - s_{i-\frac{1}{2}})}{i \text{ 粒子の物理量で } \tau \text{ 積分}}$
- 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 α radiative transfer

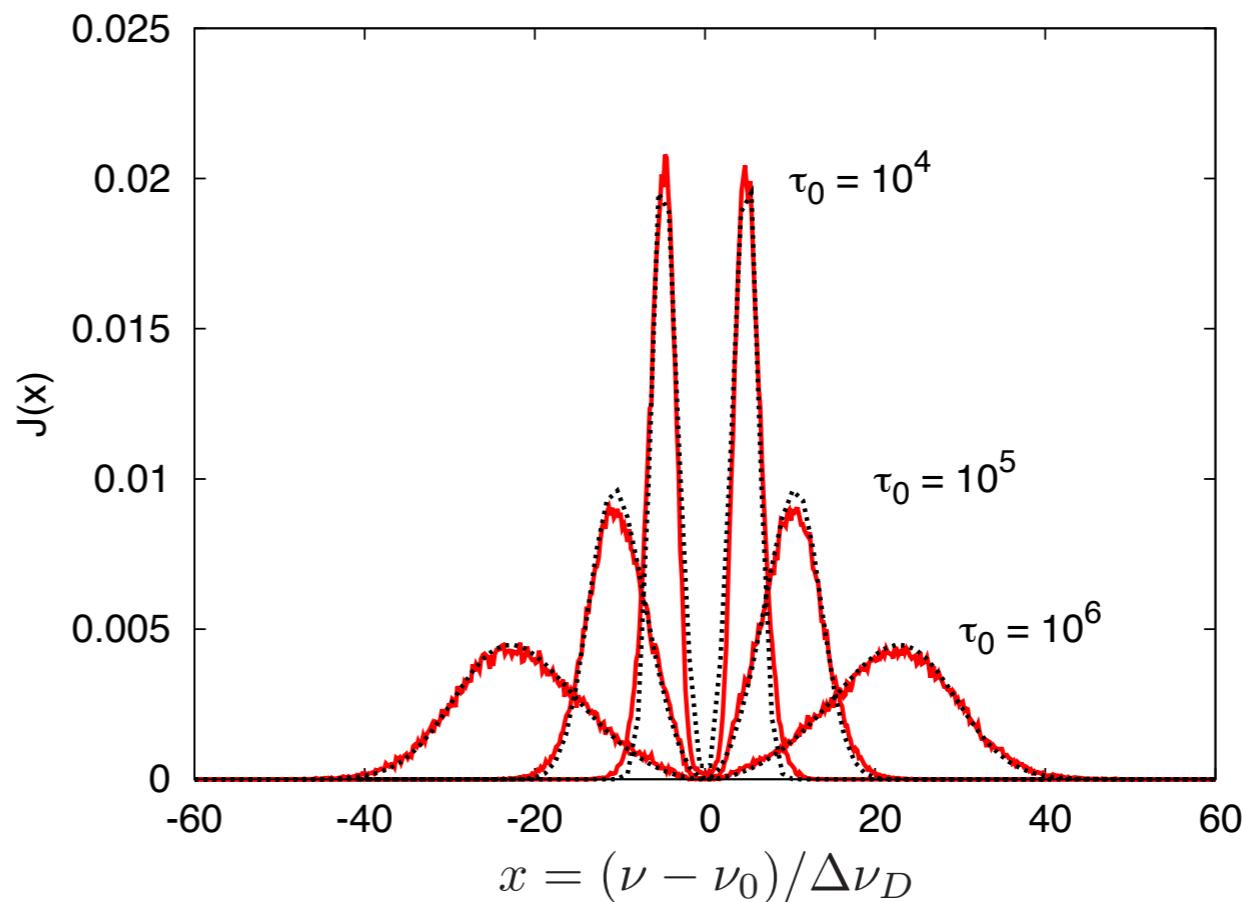
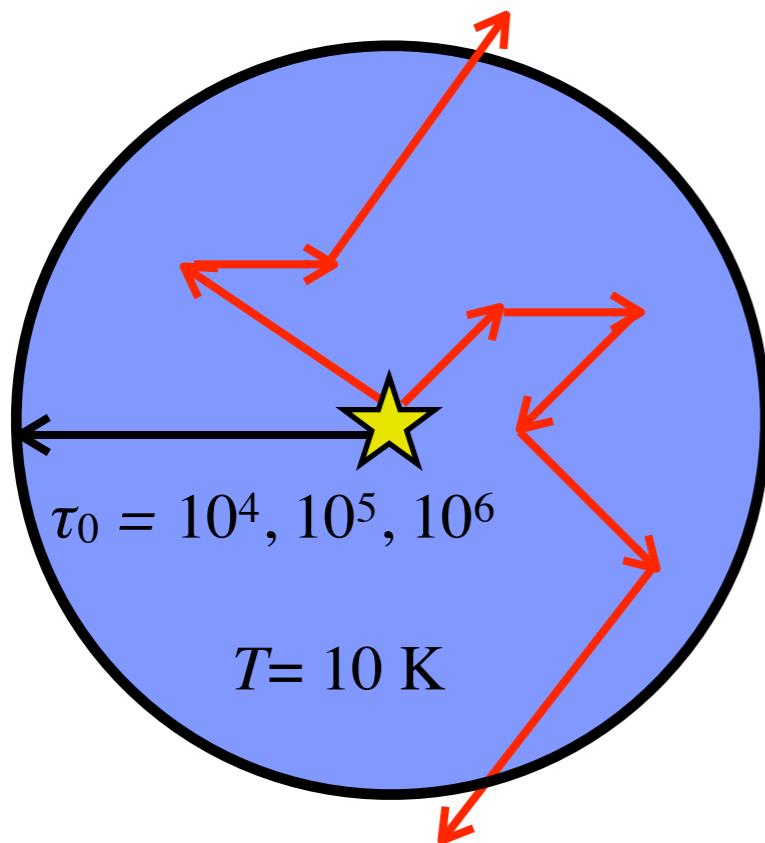
- SEURATで標準的なテスト問題を解く：
 - 1)emerging spectrum from static sphere
 - 2)emerging spectrum from expanding sphere
 - 3)escape fraction from dusty slab

64³ SPH粒子、光子パケット数=10⁵

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

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

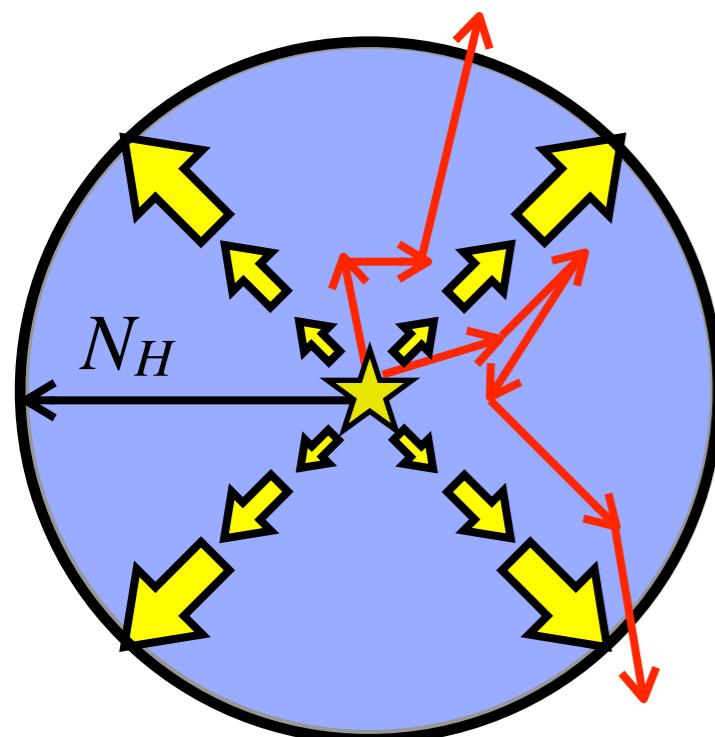


- ✓ 多重散乱に伴う振動数シフトによってwing部分から系外に脱出 (double peak)
- ✓ 光学的に厚い系ほど広がったスペクトル
- ✓ 解析解とよく一致

Emerging spectrum from expanding sphere

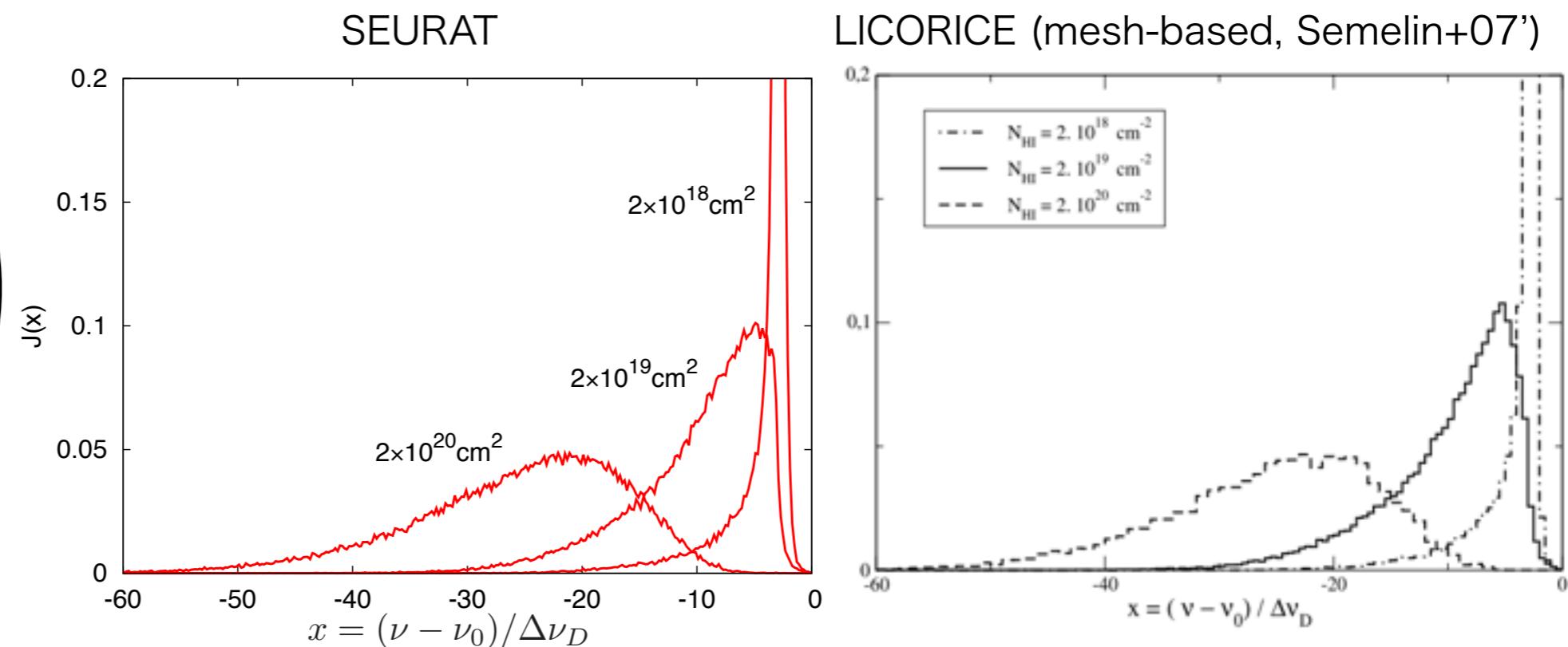
脱出光子スペクトルの解析解は無いが、よくテスト計算に用いられる

- ✓ 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 :

$$d\tau_x = \frac{\sigma_x n_{\text{H}_\text{I}} ds}{d\tau_{x,\text{H}_\text{I}}} + \frac{\text{散乱}}{n_d \sigma_d ds} + \frac{\text{吸収}}{n_d \sigma_d ds} = d\tau_{x,d}$$

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

光子パケットが中性水素に散乱される確率

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

- コード内でのdustによる吸収の取り扱い

1. stochastic elimination of photon packets (光子パケットを消す)

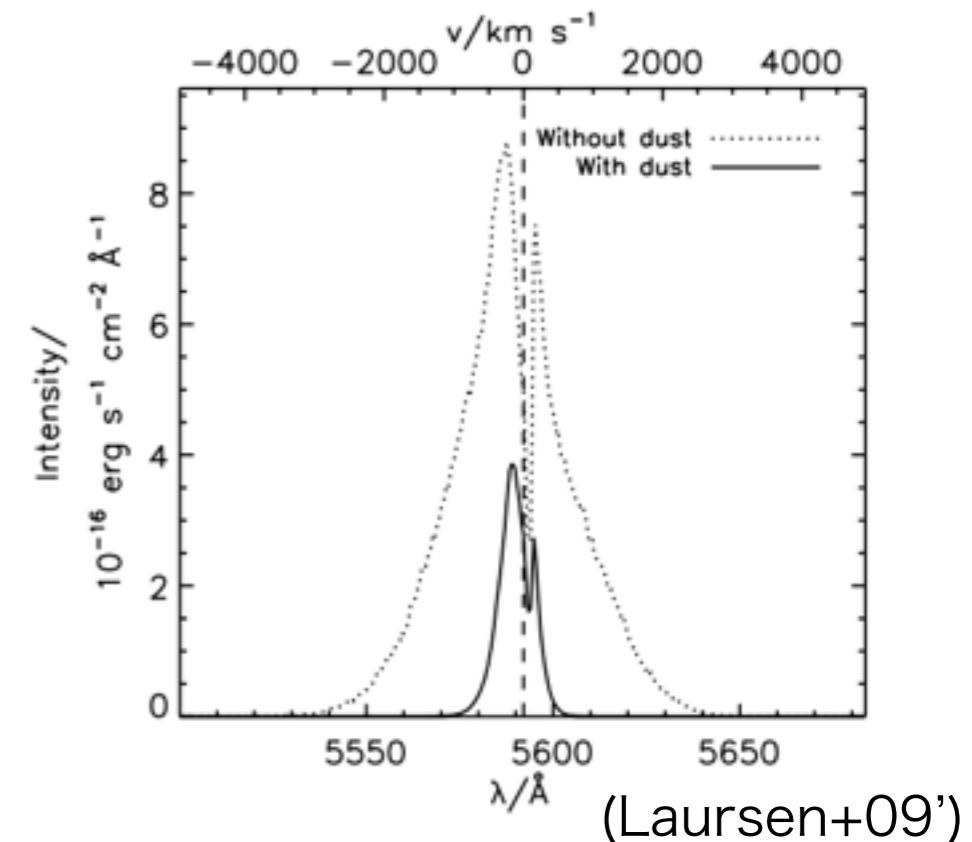
- Dustによって散乱する確率 : $\varpi = Q_s / (Q_s + Q_a)$

→ $1 - \varpi$ で光子パケットを消滅させる

2. attenuation of flux

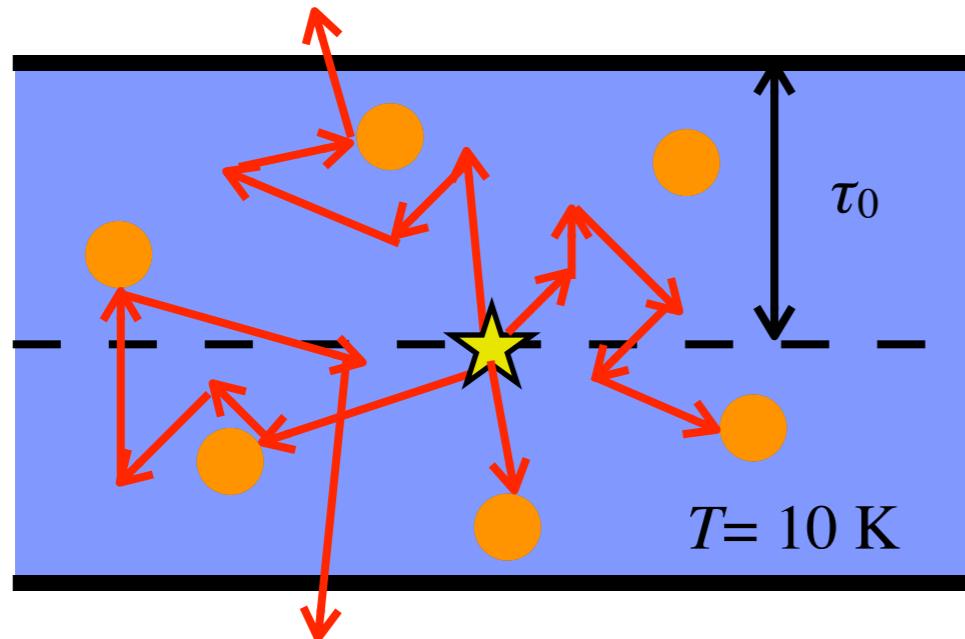
- Ly α 光子がdustに吸収されない確率は $e^{-\tau_{\text{d,abs}}}$ ($\tau_{\text{d,abs}}$: dust吸収の τ)

→ 光子がすすむ度に、packetの光子数を減衰させる

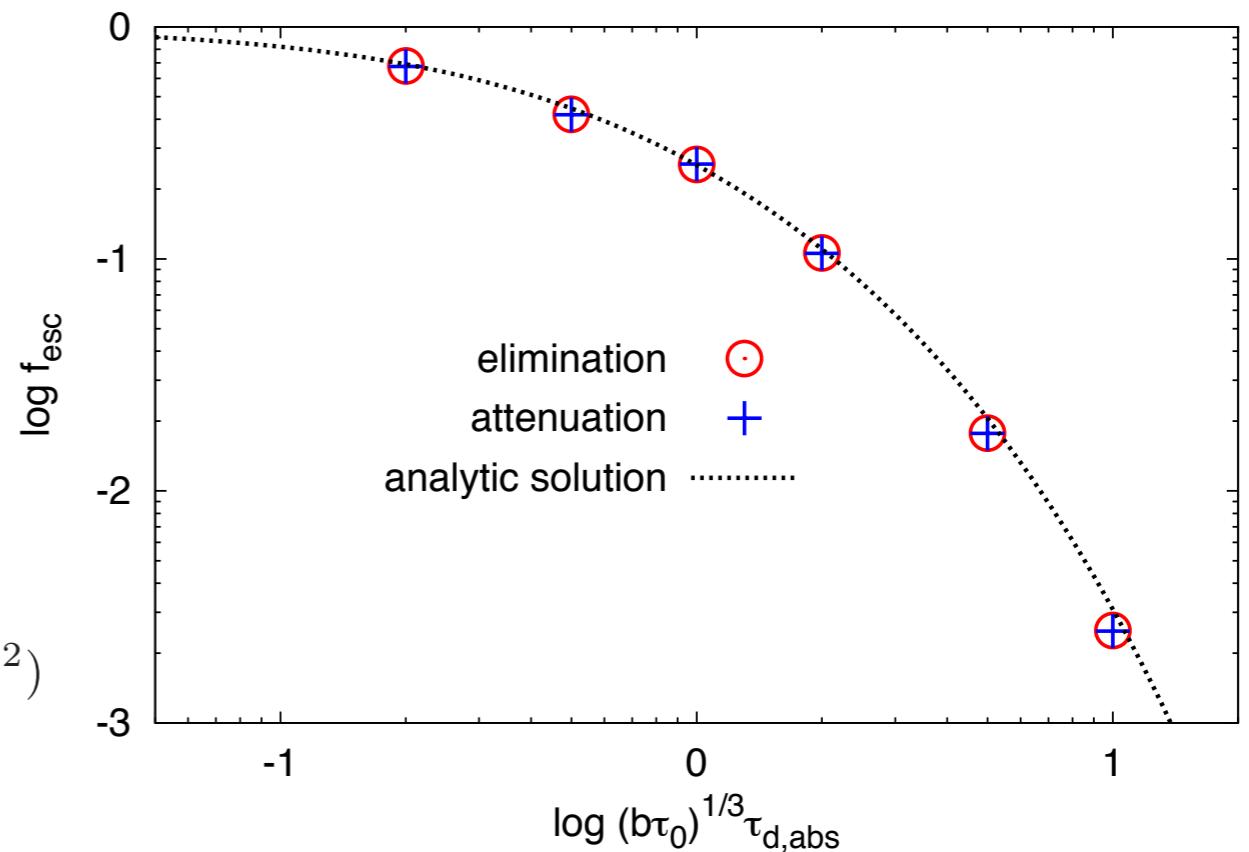


Escape fraction from a dusty slab

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



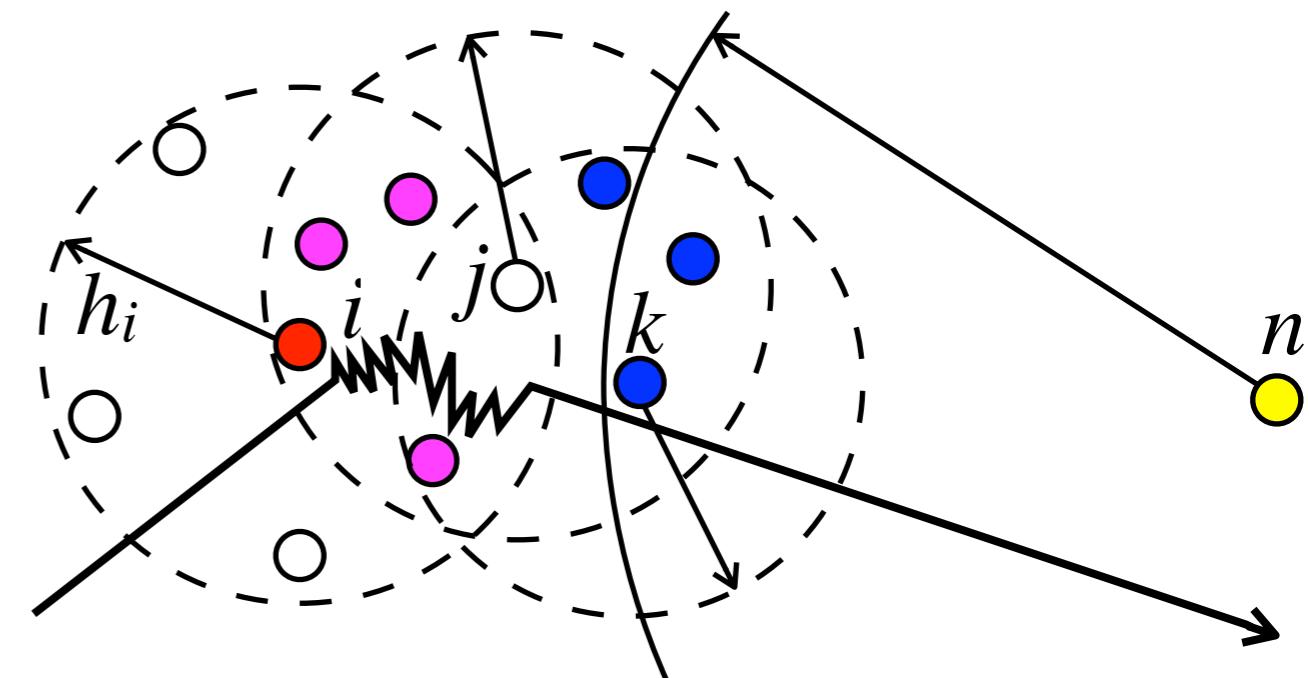
$$f_{\text{esc}} = \frac{1}{\cosh \left[\xi' \sqrt{(b\tau_0)^{1/3} \tau_{\text{d,abs}}} \right]} \quad \xi' = \sqrt{3}/(0.525\pi^{5/12})$$



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

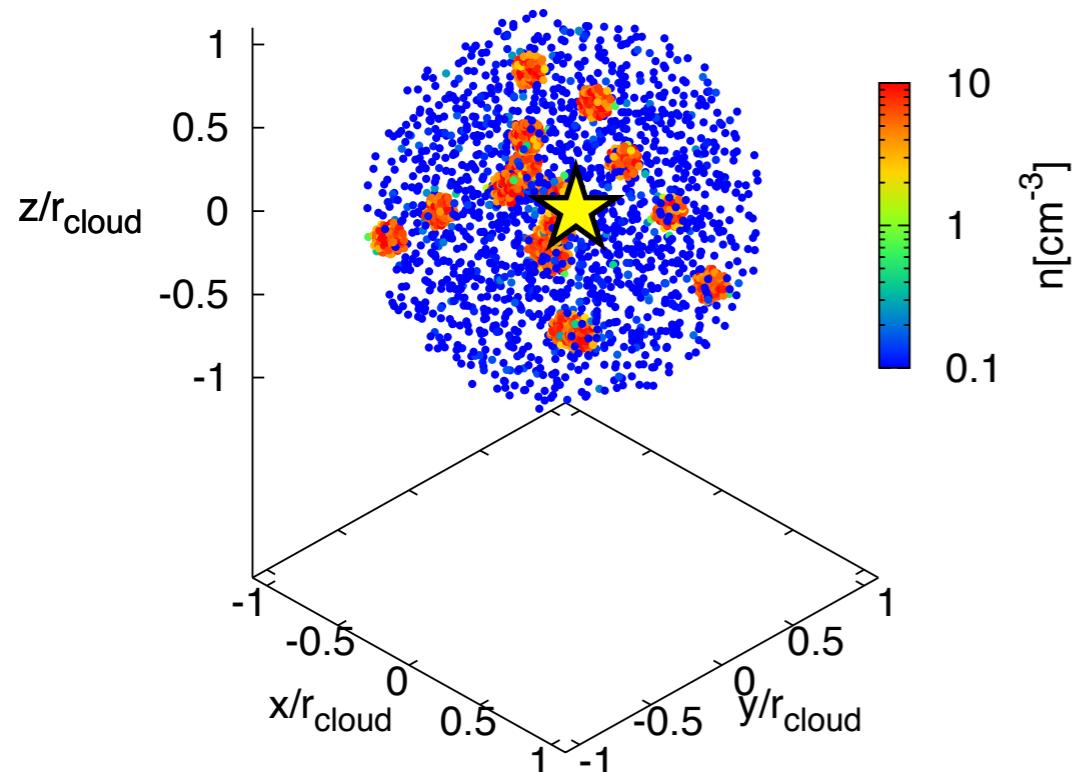
Meshfree Monte Carlo based Ly α RT

- 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Ly α RT計算できない
- meshfree Monte Carlo計算が困難になるケース：
 - 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
 - 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

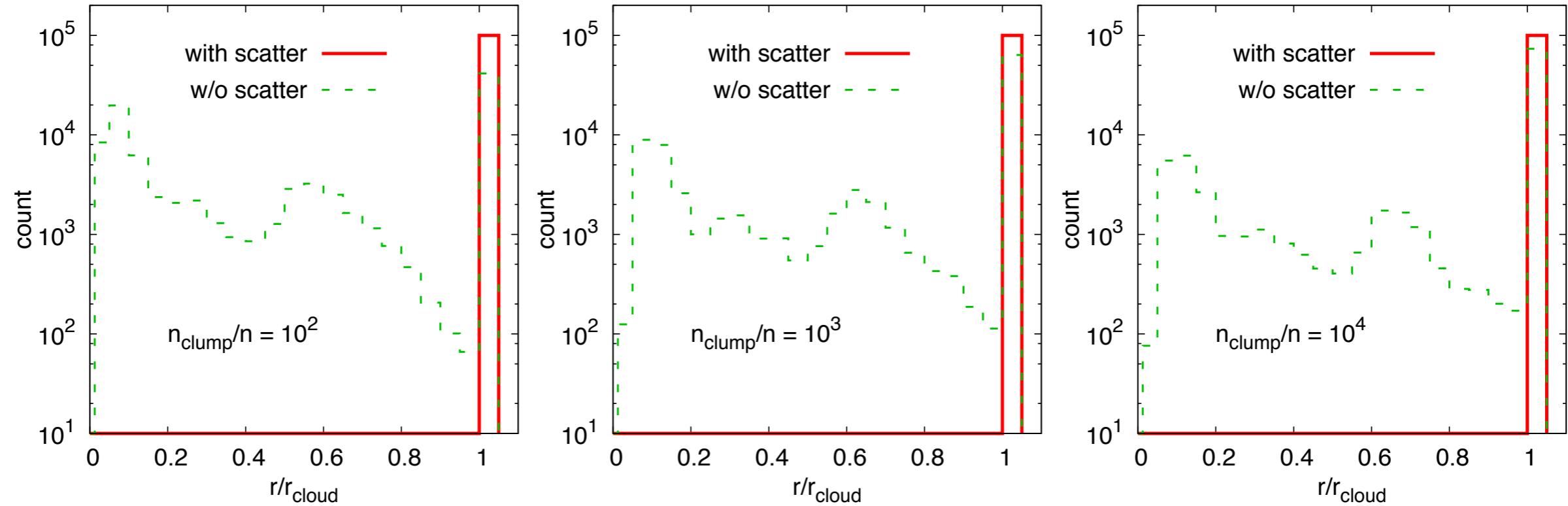
- SEURATは銀河形成シミュレーションに適用可能か
 - 一様密度といった単純な密度構造ではない中で、近傍粒子探索が正しく行われるか (meshfree Monte Carlo計算が可能か) 検証
- Ray-tracing in the clumpy cloud
 - 密度コントラスト; $n_{\text{clump}}/n_f = 100, 1000, 10000$
($n_{\text{clump}}/n_f = 1000$ の時、clumpのサイズとfield粒子の平均間隔が同じくらい)



- 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

光子パケットが“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られない
 - 光子パケットの”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、全パケット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 Ly α 輐射輸送計算が可能

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Ly_a 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、Ly_a 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 Ly_a 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Ly_a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