# Multiphase System における Lyman alpha transfer -cloudの内部運動の影響-

北海道大学理学院 宇宙物理研究室 修士2年 石倉 未奈

## Outline

- Introduction
  - Lyman alpha & Lyman alpha emitter
- Neufeld model
  - Multiphase structure model
  - Studies after Neufeld 1991
- This simulation
  - About my simulation
  - Results
- Conclusion

# Introduction

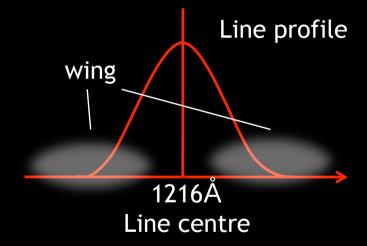
# Lyman alpha

## 放射機構

- 電離領域から放出される再結合線
- 電離光子は主に若くて重い星から放出される
  - → Lya photonは星形成が活発な領域から放出される

## 特徵

- 1216Å (**UV** photon)
- ダストに吸収される



## 散乱

- 中性水素による多数の散乱によって、銀河から脱出するまでの path lengthsが長くなる
  - → ダストに吸収される確率が高くなる

# Radiative transfer for Lya

## Optical depth for line centre

• line centreにいるphotonのoptical depthはたいていの場合、非常に大きい (τ₀>~10<sup>7</sup>)

## Optical depth for x

• Lyα photonsは周波数によって異なるoptical depthを持つ

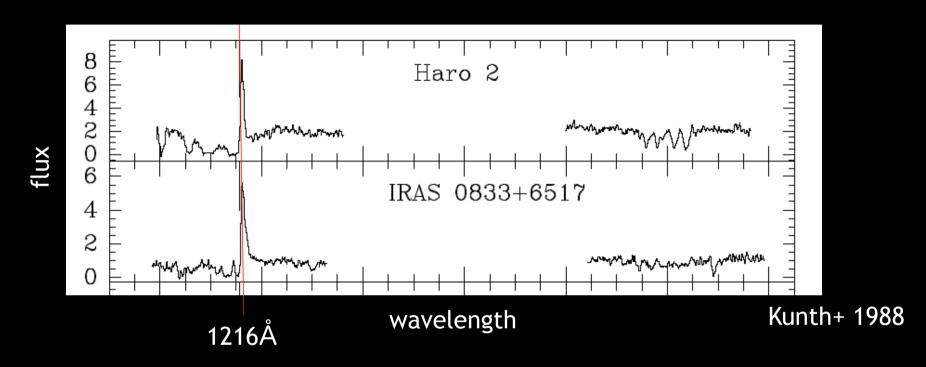
$$au(x) = au_0 \Phi(x)$$
  $\Phi(\mathbf{x})$  : Voigt function

#### Redistribution

Lyαは中性水素によって散乱されるが、その際に散乱した中性水素の持つ速度によってDoppler shiftする

以上の理由からLya line profileは多くの情報を持っていると考えられるしかし同時に非常に複雑化されていることも意味している

# Lyman alpha emitters



## 特徴

- Lyαで強く、continuumで弱く輝いている
- Lyα EW (equivalent width) が大きい
  - → LAE (Lyman alpha emitter) は星形成の活発な若い銀河
  - → Lya photonが吸収されずに銀河脱出できるということは、 ダストの少ない銀河?

# Lyman alpha emitters

## ガスの金属量

Lyαはダストによる吸収を強く受けるため、ダストの少ない若い 銀河がLAEsとして観測されていると考えられてきた

しかし、

- Lyα輝線の強度と金属量の間に相関が見られない(Tenorio-Tagle + 1999)
  - → (ガスの金属量がダスト量を決めていると仮定した場合、) ダストの量はLAEを特徴づける物理量ではない

#### ISMの構造

• Lyα line profileの形状は、そのISMの構造(Neufeld 1991)と運動状態が重要(Kunth+ 1998)

Lyα photonの吸収がダストによって行われているため、LAEs内でダストが重要な役割を担っていることは間違いないが、考えなければならないのはダストの量よりもむしろ、その構造や運動状態である

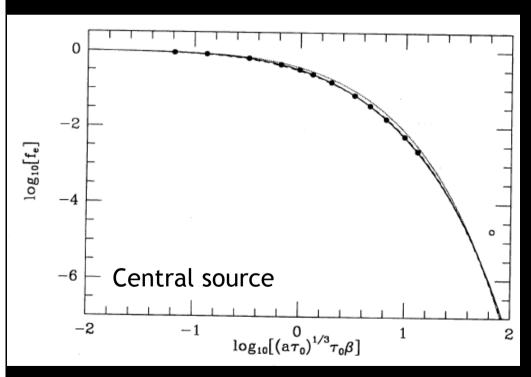
# Neufeld model

# Lyα transfer in homogeneous slab

#### Neufeld 1990

一様に中性水素とダストを分布させたslabでのradiative transferを 解析的に解いた

#### Escape fraction for dusty slab



$$(a\tau_0)^{1/3}\tau_a \sim$$

$$1.74 \times 10^3 \left(\frac{\mathrm{T}}{10^4}\right)^{-1/3} \left(\frac{N_{\mathrm{HI}}}{10^{21}}\right)^{4/3} \left(\frac{\sigma_a}{10^{-21}}\right)$$

一様な物質中ではslab中心にある sourceからLyα photonはほとんどダ ストに吸収されてしまい脱出でき ない

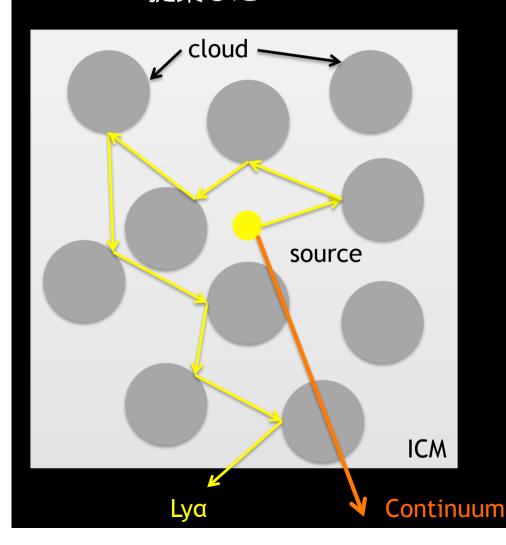
→ しかしsourceがslabの外側にある場合はほとんど吸収されない

Neufeld 1990

# Multiphase structure model

#### Neufeld 1991

• Neufeld 1990で導出した解析解からMultiphase structure modelを 提案した

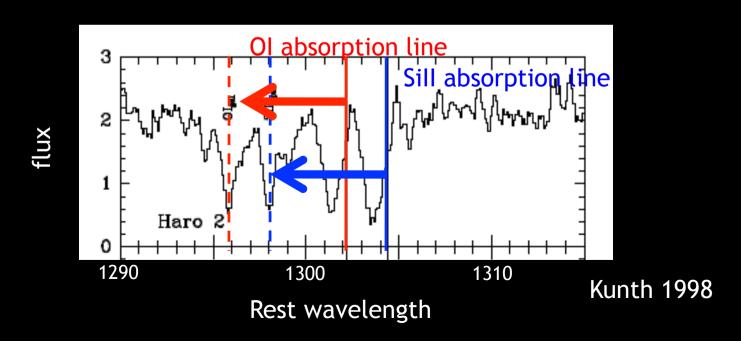


- ダストと中性水素の密度の高い cloudと、密度の低いICM (inter cloud medium)の2相構造
- ICMではLyα photonはダストによる減光を受けない
- Lyα photonはcloudの表面のみで 散乱・吸収される
- Continuumはcloud表面での散乱 がおこらないため、cloudの中ま で浸透し吸収される確率が高く なる
  - → EWが大きくなる

### Studies after Neufeld 1991

#### Kunth et al. 1998

- HST GHRSを使って8個の銀河を調べた結果、Lyα輝線が観測されたものでOIとSillの吸収線を調べると、電離ガスに対してblue shiftしていることが分かった。
- Lyα photonとinteractionするような中性水素ガスは少なくとも 200km s<sup>-1</sup>でoutflowしている
- → Lyaの脱出できる確率が高くなる



## Studies after Neufeld 1991

## Ahn, Lee & Lee 2001, 2002

- Monte Carlo codeを用いてdustless, static, uniformな物質内での Lyα radiative transferを計算した
- 計算時間のかかるline centreを無視することで、非常に光学的に厚いdustless, static, uniformな物質内のradiative transferを計算可能にした

#### Hasen & Oh 2006

- Monte Carlo codeでLyα transferを計算した
- cloudを一つのparticleとしてLyαを散乱・吸収させることで、 dustyなMultiphase structureで、さらにoutflowを入れたより現実 的なモデルで計算することを可能にした

## Point at issue

- Lyα line transferを計算したものは少ない
- 計算できたとしてもモデル化する際に、銀河スケールでの outflowを考慮したものはあるが、cloudの内部運動まで考慮したものは無い
- cloudの内部運動によってはMultiphase structure modelに使用しているcloud表面でのescape fractionと周波数のredistribution functionが変わる可能性がある

cloudの内部運動によってescape fractionやline profile がどのように変化するかを確かめることは重要

# Simulation

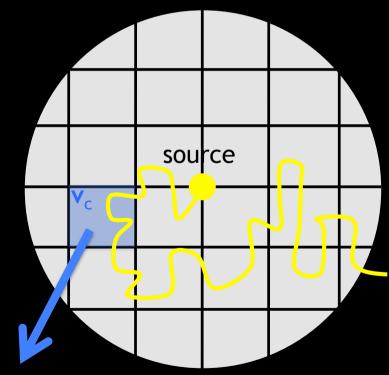
# About my simulation

#### Monte Carlo simulation

Lyα photonのredistribution functionや中性水素の熱運動による速度分布などを再現するMonte Carlo codeを使用した (e.g. Zheng & Miralda-Escude 2002)

#### Set a cloud

- 10pc
- $n_{HI} = 1$ 個/cm<sup>3</sup>
- X<sub>HI</sub> = 1 (電離度)
- T = 100K
- σ<sup>a</sup><sub>-21</sub> = 1
  (水素原子 1 個あたりのダストの反応断面積: ~1でMilky
  Way (Draine & Lee 1984))

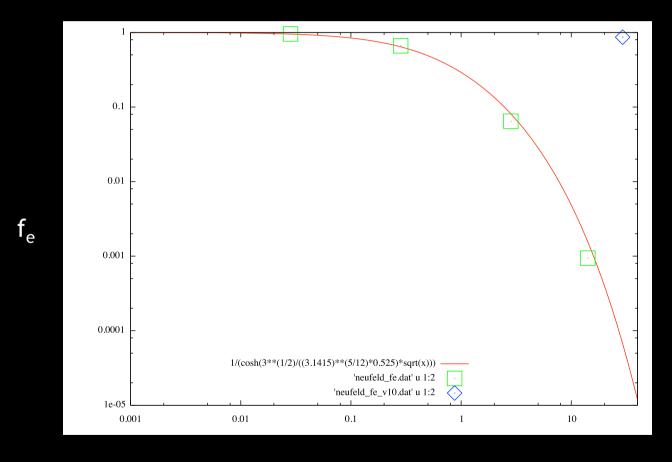


cloud

$$\bar{x} = x - \frac{\mathbf{v}_c \cdot \mathbf{n}}{v_{th}}$$

# Results

## Central source escape fraction



Neufeld analytic solution:

My results

static:

with random velocity 10km s<sup>-1</sup>:

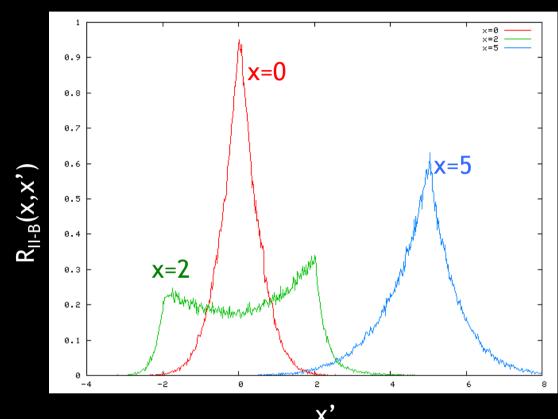
$$(a^*\tau_0)^{1/3*}\tau_a$$

# Conclusion

- ・ Lyαは中性水素との反応性の高さと周波数依存性のために、非常に多くのLAEsのISMの物理的な情報を持っている
- そのためLyα transferを計算するのは非常に困難であるが、観測 とよく一致するようなline profileが得られたら、LAEsの詳しい構 造が分かるかもしれない
- Neufeld 1991によってMultiphase structureを用いれば、大きい EWが説明できるようになった
- その後さらに銀河スケールのoutflowの影響が示され、それを modelに組み込むことでさらにLyα photonのescape fractionを高 く見積もることができた
- しかしそれらのmodelではcloudの内部運動を考慮していないため、 cloud escape fractionを高く見積もりすぎているのではないか
- cloudスケールでのLyα transferを現実的に解くことで、escape fractionとredistribution functionを導き出したい

# **END**

## Redistribution function

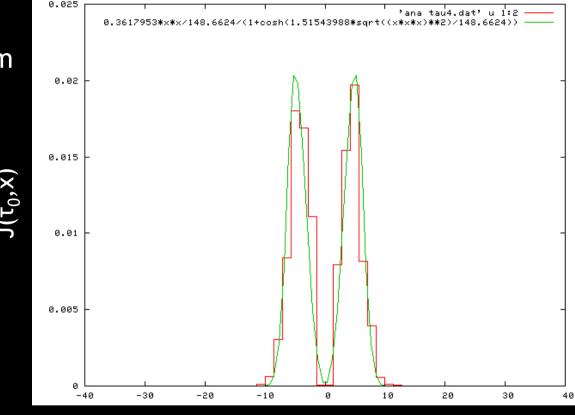


Hummer 19

$$R_{\text{II-B}}(x, x') = \frac{3\pi^{-3/2}}{8} \sigma \int_{\frac{1}{2}|\bar{x} - \underline{x}|}^{\infty} e^{-u^2} \times \int_{\bar{x} - u}^{\underline{x} + u} \left[ 3 - \left(\frac{x - t}{u}\right)^2 - \left(\frac{x' - t}{u}\right)^2 + 3\left(\frac{x - t}{u}\right)^2 \left(\frac{x' - t}{u}\right)^2 \right] \frac{dt dx}{t^2 + \sigma^2}$$

## Neufeld test

Uniform sphere



Analytical solution:

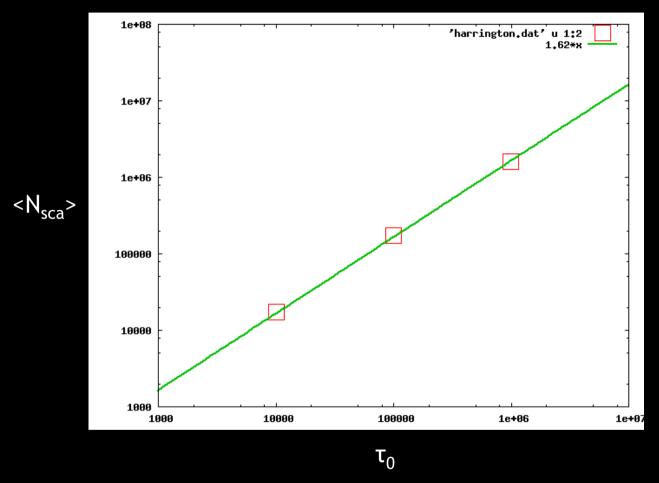
My result:

Dijkstra, Haiman & Spaans 2006

$$J(x) = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{24}a\tau_0} \frac{x^2}{1 + \cosh[\sqrt{2\pi^3/27}(|x^3|/a\tau_0)]}$$

X

# Scattering number test

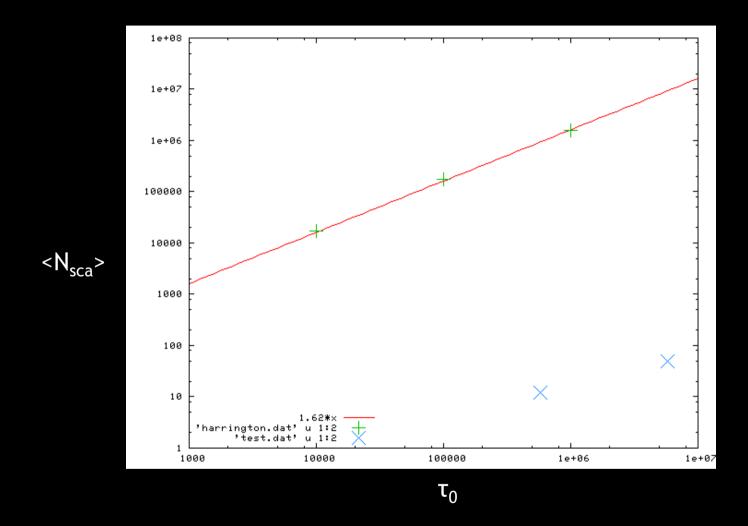


Analytical solution:

My result:

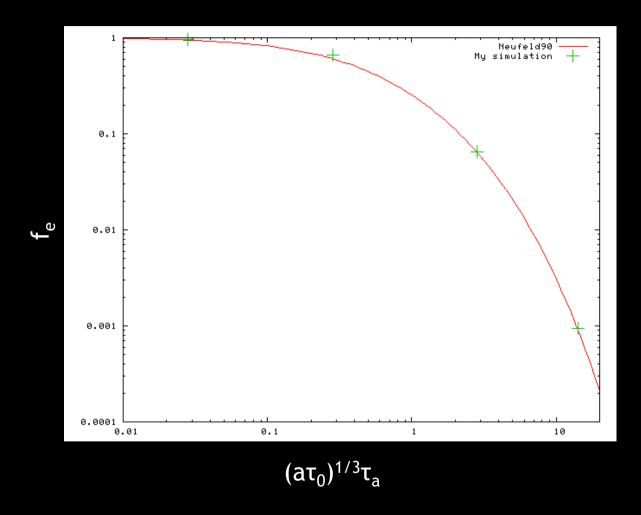
Analytical solution by Harrington 1973

$$\langle N \text{scat} \rangle = 1.612 \tau_0$$



Harrington 1969とv=10km s<sup>-1</sup>の結果比較

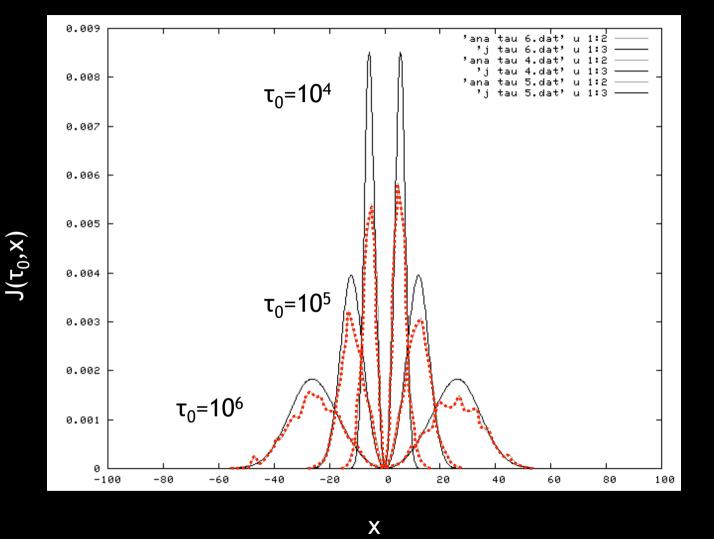
 $\times$  :  $v = 10 \text{km s}^{-1}$ 



Neufeld (1990) derived the exact escape fraction for dusty slab.

$$f_e \sim 1/\cosh\left[\frac{3^{1/2}}{\pi^{5/12}\zeta}(a\tau_0)^{1/6}\tau_a^{1/2}\right]$$

Uniform slab



$$J(x, \tau_0) = \frac{\sqrt{6}}{24\sqrt{\pi}} \frac{x^2}{a\tau_0} \frac{1}{\cosh[\sqrt{\pi^3/54}|x^3|/a\tau_0]}$$

$$\sigma_0 = 5.9 \times 10^{-14} T_4^{-1/2} \text{cm}^2$$

$$x = \frac{\nu - \nu_0}{\nu_{\text{dop}}} \qquad \qquad \nu_{\text{dop}} = (V_{\text{dop}}/c)\nu_0$$

$$a = \frac{\Delta \nu_{\rm L}}{2\nu_{\rm dop}} = 4.72 \times 10^{-4} T_4^{-1/2}$$

$$\Phi(x) = \begin{cases} \exp(-x^2) & |x| < x_c \\ \frac{a}{\sqrt{\pi}x^2} & |x| > x_c \end{cases}$$