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



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
 - Lyα photonは星形成が活発な領域から放出される



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>~10⁷)

Optical depth for x

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

$$au(x) = au_0 \Phi(x)$$
 $\Phi(extbf{x})$: 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Lyα 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

- Lyaで強く、continuumで弱く輝いている
- Lya EW (equivalent width) が大きい
 - → LAE (Lyman alpha emitter) は星形成の活発な若い銀河
 - Lyα 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、

- Lya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)

Lya 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

Lya 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

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
- Lya 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、Lya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blueshiftしていることが分かった。
- → Lya photonとinteractionするような中性水素ガスは少なくとも 200km s⁻¹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Lya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/cm³
- x_{HI} = 1 (電離度)
- T = 100K
- σ^a-21 = 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))

Results

Central source escape fraction

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

Conclusion

- Lya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Lya 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Lya 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Lya transferを現実的に解くことで、escape fractionとredistribution functionを導き出したい

Redistribution function

Neufeld test

Scattering number test

Analytical solution by Harrington 1973

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

Harrington 1969とv=10km s⁻¹の結果比較

X : v = 10km 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

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

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

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

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

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