

多重層雲の輻射輸送的特徴

大阪教育大学天文学研究室 増田剛大

Abstract

超臨界降着円盤はもちろん標準降着円盤の場合でも、降着円盤上空は常にクリアというわけではなく、盤コロナや円盤風や降着ガスなどのため、しばしば希薄なガス物質が存在する。これらを観測する場合には、ガスによる様々な影響が出てくると予想される。さらに、AGNにおいては多くの小さいガス雲が存在するために、複数のガス雲による影響受けることも考えられる。本研究では、無限平面の光源周辺に幾何学的に薄い平板状の層雲が複数存在していると想定して、光源に照らされた層雲中の輻射輸送を解き、光源の放射への影響を調べた。層雲全体の光学的厚みが同じであっても、層雲の数や層の分け方によって最終的に層雲から出射される輻射強度やその方向分布は異なることがわかった。具体的には、層雲を分けるとその輻射強度はより光学的に薄い一枚の層雲の結果に近づく。また、光学的厚みの異なる二枚の層雲を考えた場合には、層雲の順番によっても輻射強度やその方向分布は異なる結果となった。

1. Introduction

層雲における、輻射輸送の研究は Fukue(2013) で研究された。Fukue(2013)では、輻射輸送の解は解析的に求められた。層雲による散乱は、光源のイメージに多大な影響を与える。その影響は特に $\tau_{vb} \sim 1$ あたりで大きい。さらに、層雲の再放射は光源のスペクトルを変える。

本研究では逐次近似 (iteration) によって層雲から最終的に出射される輻射強度を求める。さらに、実際の状況では層雲は一つではなく複数存在することが考えられるため、層雲が複数存在すると想定した計算も行った。

2. 仮定と基礎方程式

本研究では層雲について、次の状況を仮定した。

- (i) 層雲は水素イオン
- (ii) 層雲は平行平面のシート状の層
- (iii) 層雲の垂直方向の光学的厚みは有限
- (iv) 放射率、吸収・散乱係数は一定
- (v) 放射場は等方

(vi) 散乱のみ

(vii) 層雲は下面からのみ照らされ、上面からの入射はない。

平行平面の垂直方向について、輻射輸送方程式は次のようになる

$$\mu \frac{dI_\nu}{dz} = \rho \left[\frac{j_\nu}{4\pi} - (\kappa_\nu + \sigma_\nu)I_\nu + \sigma_\nu J_\nu \right] \quad (1)$$

ここで μ は方向余弦 (= $\cos \theta$)、 I_ν は輻射強度、 J_ν は平均輻射強度、 ρ はガスの密度、 j_ν は質量放射率、 κ_ν は吸収係数、 σ_ν は散乱係数。散乱は等方散乱としている。

光学的厚み $d\tau_\nu \equiv -\rho(\kappa_\nu + \sigma_\nu)dz$ を用いて、輻射輸送方程式を書き直すと次のようになる

$$\mu \frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = I_\nu - \frac{1}{\kappa_\nu + \sigma_\nu} \frac{j_\nu}{4\pi} - \frac{\sigma_\nu}{\kappa_\nu + \sigma_\nu} J_\nu \quad (2)$$

層雲の有限な光学的厚み τ_{vb} は

$$\tau_{vb} = - \int_H^0 \rho(\kappa_\nu + \sigma_\nu) dz \quad (3)$$

ここで、 H は層雲の幾何学的な厚み。

輻射強度について、層雲の上面 ($\tau_\nu = 0$)、下面

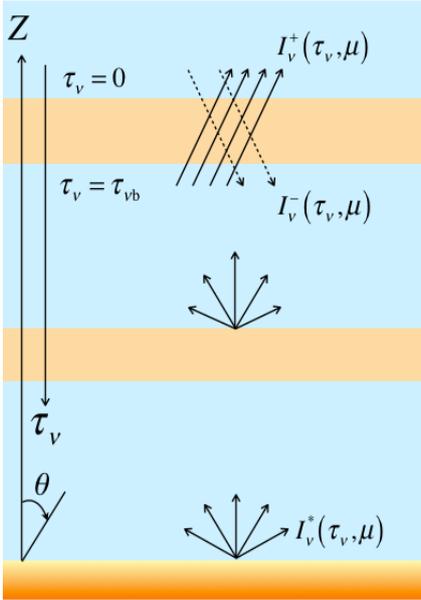


図1 層雲の光学的厚みは有限で、光源の放射は等方である。観測者は鉛直方向上方から観測する。

($\tau_v = \tau_{vb}$) でのそれぞれの境界条件は、仮定から

$$I_v^-(0, \mu) = 0 \quad (4)$$

$$I_v^+(\tau_{vb}, \mu) = I_v^* \quad (5)$$

複数の層雲を計算する場合には、各層雲の間で輻射強度は保存し、無限に広がる光源と層雲を仮定しているため、層雲の上面から出射される輻射強度を次層の入射強度とする。

上層からの back scattering は無視し、各層で上面からの入射はないものとしている。

3. 逐次近似法 (iteration)

式 (2) を積分することで、形式解を得る。

$$I_v(\tau_v, \mu) = e^{-\frac{\tau_v}{\mu}} I_v + \int_0^{\tau_v} e^{-\frac{\tau_v - \tau_v'}{\mu}} S_v d\tau_v' \quad (6)$$

ここで S_v は源泉関数。本研究では散乱のみを仮定しているため、 $S_v = J_v$ としている。

輻射輸送方程式を積分方程式にすることで、逐次近似法を使うことができる。まず、Fukue(2013) で与えられた J_v の解析解を用い式 (6) を解くこと

で、 I_v の分布を得る。そして、得られた I_v の分布から平均輻射強度

$$J_v \equiv \frac{1}{4\pi} \oint I_v d\Omega \quad (7)$$

を求めることができる。さらに、新たな J_v を用いて再び I_v を求める。この試行を繰り返すことによって解は収束し、最終的に逐次近似解を得る。

4. 平均輻射強度と輻射流束

図2に光学的厚みに対する、平均輻射強度とエンディントン流束 ($H_v = F_v/4\pi$) を示す。 F_v は輻射流束の垂直方向の成分。層雲の光学的厚みは $\tau_{vb} = 1$ 。縦軸は光源の輻射強度を1とし、横軸は光学的厚み。

平均輻射強度について、解析解の場合 (図2、一点鎖線) に比べ、逐次近似解は層雲の下面 $\tau_v = \tau_{vb}$ では大きく、上面 $\tau_v = 0$ では少し下がっている。これは、解析解に比べ、逐次近似解では、下面での散乱による下向きの放射が大きく現れ、上面では散乱によって強度は減少することを示す。

5. 層雲から出射される輻射強度

複数の層雲が存在することを仮定した場合に得られた輻射強度を示す。各結果は横軸を方向余弦 μ で示す。つまり、 $\mu = 1$ で雲に垂直方向の輻射強度、 $\mu = 0$ で雲に平行な方向の輻射強度を表す。

5.1 異なる光学的厚みの二層

光学的厚みの大きい層と小さい層の二層を想定した場合の結果を示す。二層を合わせた層雲の光学的厚みが1、10、0.1の場合の結果をそれぞれ図3、4に示している。

光学的厚みの比は厚い層と薄い層をすべて9:1とし、厚い層が上層の場合と薄い層が上層の場合をそれぞれ調べた。

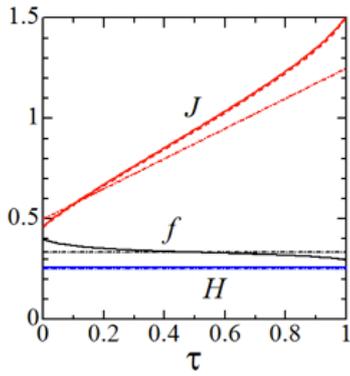


図2 光学的厚みに対する、平均輻射強度とエンディオン流束を示す。層雲の光学的厚みは $\tau_{vb} = 1$ 。縦軸は光源の輻射強度を1とし、横軸は光学的厚み。

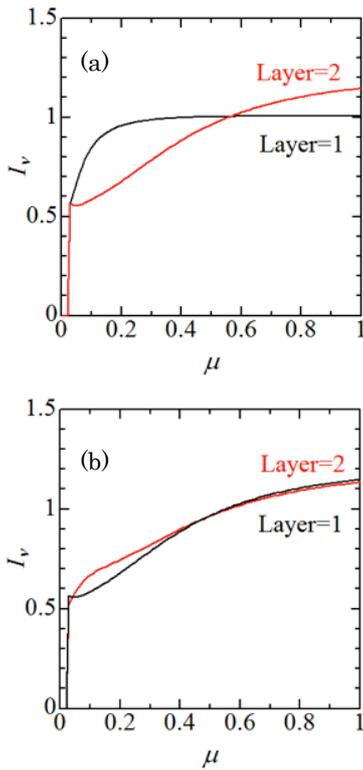


図3 二層を合わせた光学的厚みが1の場合の輻射強度の方向分布。縦軸に光源の輻射強度で規格化した強度、横軸に方向余弦を示している。(a) 厚い層が上層の場合と (b) 薄い層が上層の場合。黒い線が一層目、赤い線が二層目からの出射強度を示す。

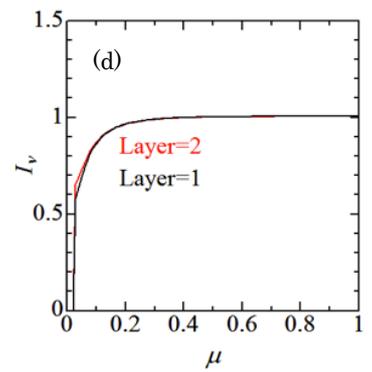
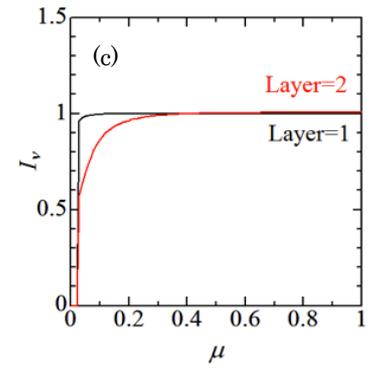
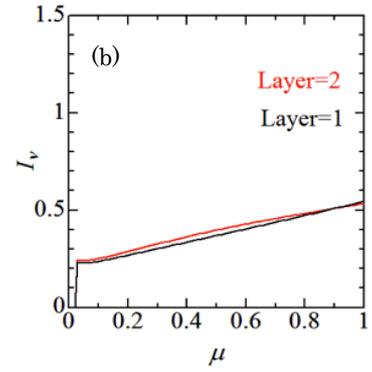
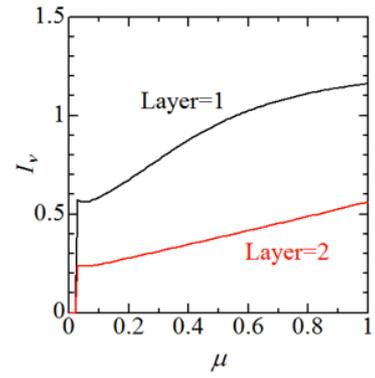


図4 二層を合わせた光学的厚みが10の (a) 厚い層が上層の場合と (b) 薄い層が上層の場合、二層を合わせた光学的厚みが0.1の (a) 厚い層が上層の場合と (b) 薄い層が上層の場合の強度の方向分布。黒い線が一層目、赤い線が二層目からの出射強度を示す。

図3で示すように二層を合わせた光学的厚みが1の場合には、厚い層が上層の場合と薄い層が上層の場合で、最終的に第二層から出射される強度の分布は異なる。図3(a)では、分布は光学的厚みが1の層雲が一層の場合にほぼ等しいが、図3(b)では、小さい μ で大きく異なる。図4(a),(b)で示す二層を合わせた光学的厚みが10の場合でも、同様の影響が見られるが、二層を合わせた光学的厚みが1の場合ほど大きくない。

6. 層の数による出射される強度分布の変化

全体の光学的厚みが1、10、0.1の場合をそれぞれ均等な光学的厚みの2層、5層、10層に分けた場合の結果を図5に示す。

全体の光学的厚みが1の場合(図5(a))、層の数が増えると、最終的に出射される強度の分布は光学的厚みの小さい層雲が一層の場合に近づく。光学的厚み0.1の層雲10層に分けた場合(図5(a)紫色の線)では、その強度分布は光学的厚みが0.1の層雲が一層の場合(図5(b)黒の線)にかなり近い。全体の光学的厚みが10、0.1の場合(図5(b)(c))でも同様の傾向が見られる。

7. まとめ

本研究は、層雲から出射される強度は、全体の光学的厚みが同じであっても、層雲ごとの光学的厚みの分布や層の数によって変わる可能性を示した。層ごとに厚みが異なる場合には、特に光学的厚みの小さい層が上層になる場合で、単純に一層の場合とは出射される輻射強度の分布が異なる。光学的厚みを均等に複数の層に分けた場合には、層の数を増やすほど全体の光学的厚みが小さい場合に近づく。

本研究では二層目以降の後方散乱を無視したが、後方散乱を考慮した計算も行っていく必要がある。

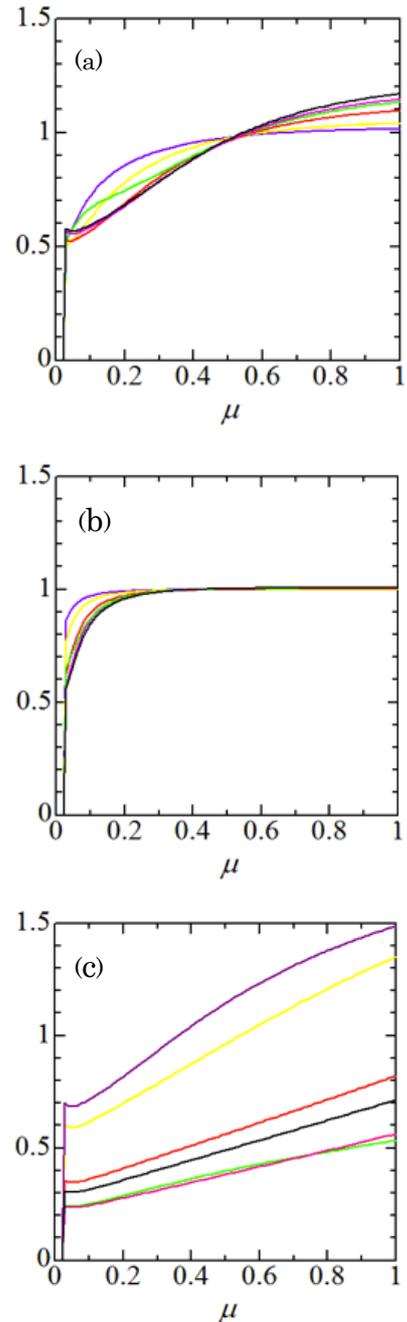


図5 層雲の数1, 2, 5, 10層それぞれの場合の最上層から出射される強度の方向分布を示す。(a), (b), (c)は、すべての層雲を合わせた光学的厚みが1, 0.1, 10の場合をそれぞれ示している。黒い線は層の数が1層、赤い線は2層、緑色の線と桃色の線は光学的厚みが異なる場合の2層、黄色い線は5層、紫の線は10層の場合をそれぞれ示している。

今回の結果は、雲の大きさが小さく上層からの影響が十分に小さい場合に当てはまる。

また、実際の光源は平面ではなく、球状や円盤状降着円盤状、もしくはそれらを合わせた形状が考えられる。さらに、層雲の形状についても、平面だけでなく、球殻状が考えられる。

本研究では、光源の上で静止している雲を仮定したが、今後は運動している雲の輻射輸送についても研究していく。