

# 活動銀河核における連続光光度と広輝線領域サイズの関係の補正

野間 千菜美 (東北大学大学院理学研究科天文学専攻)

## Abstract

活動銀河核 (AGN) の中心にある大質量ブラックホールの質量を見積もるには reverberation mapping という方法が用いられ、輝線の連続光変光に対する遅延時間から輝線放射領域 (BLR) のサイズを見積もり、ブラックホールの質量を決定する。こういった方法で求められた BLR のサイズと luminosity の間には相関関係が見つかっている。この関係を使えば luminosity を観測するだけで輝線放射領域のサイズを見積もることができ、より簡単に多くの銀河についてブラックホールの質量を得ることができる。これまでは可視の luminosity を用いて BLR のサイズを見積もっていたが、今回は 46 天体のデータを用いてこの関係に新しいパラメータ ( $H\beta$  の luminosity) を加えて補正し、さらに精度よく輝線放射領域のサイズを見積もれるような新しい関係を与える。

## 1 Introduction

銀河のバルジに大質量のブラックホールが存在する証拠は様々な研究から得られていて、その質量は近傍の (普通の) 銀河については中心領域の恒星やガスの運動から見積もられる (Kormendy & Richstone (1995)). Magorrian et al. (1998) はブラックホールの質量  $M_{\bullet}$  とその母銀河のバルジの質量  $M_{\text{bulge}}$  や luminosity  $L_{\text{bulge}}$  の間に比例関係があることを発見している。また、母銀河の星の速度分散  $\sigma$  と  $M_{\bullet}$  の関係は  $M_{\text{bulge}}$  や  $L_{\text{bulge}}$  と  $M_{\bullet}$  の関係よりも分散が少なく、良い関係であることもわかっている (Genhardt et al. (2000a)). こういった関係はブラックホールという非常に狭い領域と数 kpc に及ぶ銀河全体との間に関係があることを示しており、銀河の形成や進化の理解に非常に重要な役割を果たすと考えられている。したがって、様々な種類や redshift に対するこの関係を知るために、より多くのサンプルを得る必要がある。

活動銀河核 (AGN) の場合は母銀河の恒星の光と AGN との光のコントラストが強いため、恒星やガスの運動から中心のブラックホールの質量を見積もることができない。しかし、近傍の Seyfert 銀河である NGC 4258 のメーザーガスの運動から AGN の中心にも大質量ブラックホールが存在する証拠が得られた例もある (Miyoshi et al. (1995)). AGN の中心のブラックホールの質量を見積もる方法としてよ

く使われているのは“ reverberation mapping ”であり、この方法では連続光の変光に対する幅の広い輝線の変光の時間遅延を見ることで、その輝線が放射された領域 (Broad-Line Region, BLR) の半径を見積もる。BLR の輝線放射ガスが中心の天体の重力ポテンシャルによって運動していると仮定すると、 $r_{\text{BLR}}$  の半径  $r$  と輝線放射ガスの速度 (輝線の幅)  $\sigma$  を用いて、半径  $r$  内の質量は  $M(r) \approx r\sigma^2/G$  で見積もれる。この方法を使って、AGN の大量のサンプルを得ることができるようになった。一方で、reverberation mapping によって BLR の半径を見積もるには何十年にもわたって数日周期での変光を観測する必要があるが、こういった観測は現実的には難しい。

Kaspi et al. (2000) は 28 個の quasar を 7.5 年間分光観測し連続光と Balmer 線で reverberation mapping を行った。そのうち正確なデータが得られた 17 個の天体について、BLR の半径  $R_{\text{BLR}}$  と  $5100\text{\AA}$  の連続光の luminosity との間に  $R_{\text{BLR}} \propto L^{0.700 \pm 0.033}$  の関係を得た。この関係から、たった一回の観測で luminosity と輝線の幅を測ればブラックホールの質量を見積もることができる。さらに Kaspi et al. (2005) では、様々な波長 ( $5100\text{\AA}$  の可視光、 $H\beta$ 、UV、X 線) について BLR の半径と luminosity の関係を調べた。特に  $H\beta$  や可視光に関してはデータが多く、良い相関が得られている。

しかし、これまでの  $R_{\text{BLR}} - L$  関係は luminosity

に対してひとつの観測のみを用いてきた。したがってここでは、さらに良い相関を得るために複数のパラメータを使用して関係を補正することを考える。具体的には、データ数の多い可視光や  $H\beta$  の luminosity を用いて関係を補正していく。

## 2 Date

今回用いたデータは Kaspi et al. (2005), Bentz et al. (2009), Denney et al. (2010), Grier et al. (2012) のものを使った。Kaspi et al. (2005) は 35 天体について 63 個の  $H\beta$  と可視光のデータがある。UV や X 線のデータもあるが、今回は  $H\beta$  と可視光のデータのみ使う。Bentz et al. (2009) は 9 天体、Denney et al. (2010) は 6 天体、Grier et al. (2012) は 5 天体についての  $H\beta$  と可視光のデータがある。

Kaspi et al. (2005) では luminosity を見積もる際に、銀河系のダストによる減光についても考慮しており、その補正法については Cardelli et al. (1989) に基づいている。Kaspi et al. (2005) 以外のサンプルについてもこの補正を行って luminosity を求めた。宇宙論パラメータは  $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_M = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$  を用いた。

## 3 Results

はじめに、 $R_{\text{BLR}} - L$  関係の確認をする。Kaspi et al. (2005) に基づき、luminosity が低い NGC 3227 と NGC 4051 の 2 天体は fitting から除外する。同様に、この 2 天体よりも luminosity の低い天体も除外する。図 1 と図 2 はそれぞれ、同じ天体のデータが重複しているものについては平均をとったときの可視の luminosity,  $H\beta$  の luminosity と reverberation mapping で求めた BLR の半径  $R_{\text{rev}}$  の関係である。また、図 3 と図 4 は重複したデータについて平均を取らずにすべてのデータをプロット (NGC 3227, NGC 4051 およびそれより luminosity の低い天体は除外している) したものであり、それぞれ可視、 $H\beta$  の luminosity と  $R_{\text{rev}}$  の関係である。図中の N はサンプル数で、r は相関係数である。いずれの場合も、左が Kaspi et al. (2005) のデータのみをプロットしたも

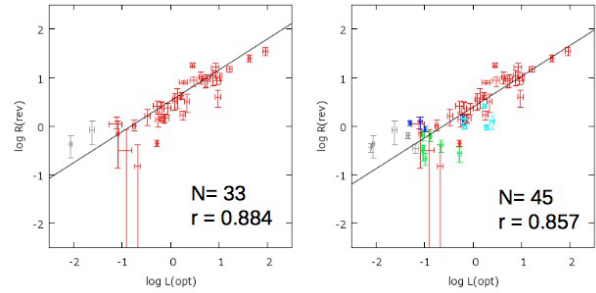


図 1: 平均を取った場合の可視の luminosity との関係

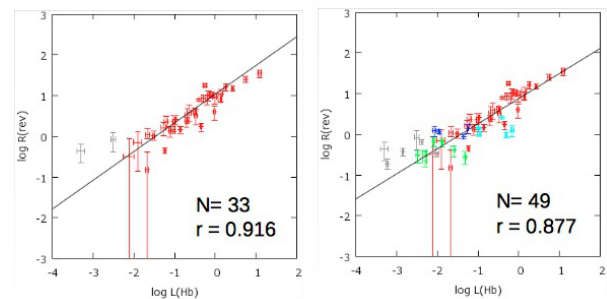


図 2: 平均を取った場合の  $H\beta$  の luminosity との関係

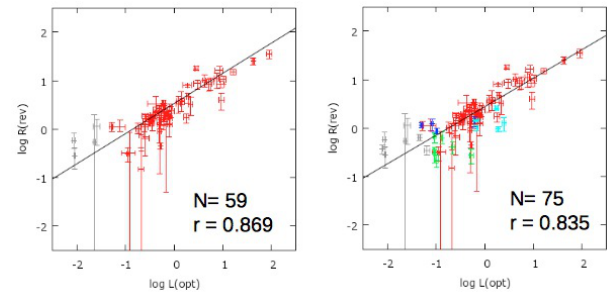


図 3: すべてのデータを用いた場合の可視の luminosity との関係

の、右が他の 3 つの論文のデータも加えてプロットしたものであり、他の論文のデータを足すと若干相関が悪くなっている。サンプルの選び方で結果が変わるのは測定方法による違いに起因するのかもしれないが、今回はこの系統的な違いはないものとして話を進めていく。

それぞれの  $R_{\text{rev}} - L$  関係から BLR のサイズを見積もり ( $R_{\text{est}}$ )、観測した BLR のサイズ ( $R_{\text{rev}}$ ) との残差を以下の式で求める。

$$R_{\text{err}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left( \frac{R_{\text{rev}} - R_{\text{est}}}{\sigma_{\text{rev}}} \right)^2} \quad (1)$$

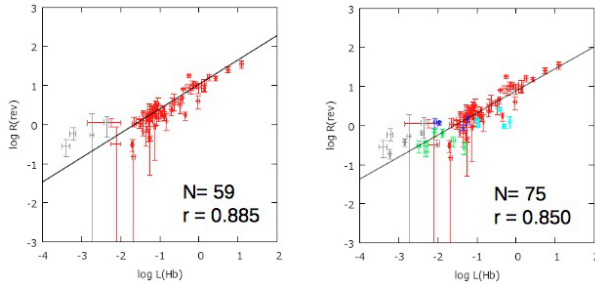


図 4: すべてのデータを用いた場合の Hβ の luminosity との関係

ここで、 $\sigma_{\text{rev}}$  は reverberation mapping を行った時の測定誤差である。また、 $R_{\text{err}}$  の値とともに、図 1 ~ 4 について

$$\log R_{\text{rev}} = a \log L_{\lambda} + \beta \quad (2)$$

の形で fitting したときの  $\alpha$  と  $\beta$  の値を表 1 に示す。

表 1: 関係の傾きと切片および残差

	N	$\alpha$	$\beta$	$R_{\text{err}}$
可視	33	0.636	0.523	3.471
	59	0.621	0.529	2.711
	49	0.633	0.395	4.535
	75	0.587	0.442	3.626
Hβ	33	0.704	1.035	2.902
	59	0.623	1.030	2.481
	49	0.615	0.887	3.985
	75	0.564	0.448	3.518

$R_{\text{BLR}} - L$  関係の傾きはおよそ 0.6 ほどであり、この関係に対して 3~4 倍のエラーが存在する。 $R_{\text{BLR}} - L$  関係にはよい相関があるといってもまだ分散は大きいことがわかる。この分散、すなわち  $R_{\text{rev}}$  と  $R_{\text{est}}$  の差を小さくする為に、実際のサイズからのずれを表す  $R_{\text{est}}/R_{\text{rev}}$  と  $L_{\text{H}\beta}/L_{\text{opt}}$  の関係を求めることで実際の BLR のサイズからのずれを補正することを考える。reverberation mapping は連続光に対するガスの反応を見ているため、輝線に関するパラメータを用いることで良い補正ができると考えられる。

図 5 と図 6 はそれぞれ、重複した天体の平均をとった場合とすべてのデータを利用した場合の

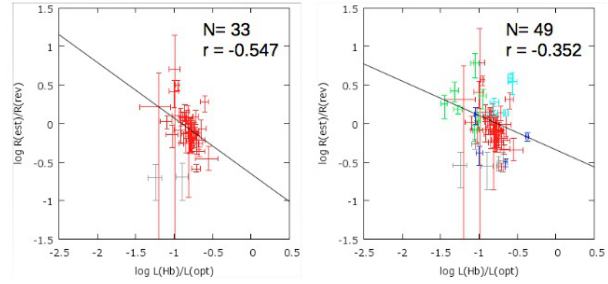


図 5: 平均した場合の  $R_{\text{est}}/R_{\text{rev}}$  と  $L_{\text{H}\beta}/L_{\text{opt}}$  の関係

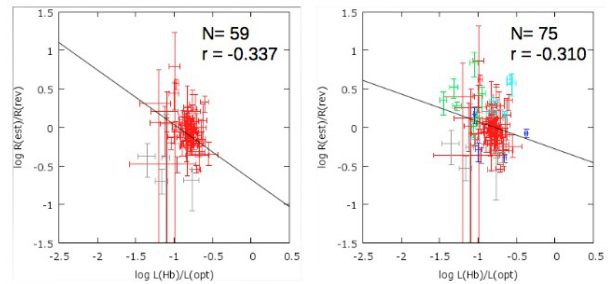


図 6: すべてのデータを用いた場合  $R_{\text{est}}/R_{\text{rev}}$  と  $L_{\text{H}\beta}/L_{\text{opt}}$  の関係

$R_{\text{est}}/R_{\text{rev}}$  と  $L_{\text{H}\beta}/L_{\text{opt}}$  の関係を示している。どちらも左が Kaspi et al. (2005) のみ、右が Kaspi et al. (2005) 以外の 3 つの論文のデータを用いたときの結果である。相関係数はあまり良くないが、わずかに相関があることがわかる。

表 2 にそれぞれの関係を

$$\log \frac{R_{\text{est}}}{R_{\text{rev}}} = a \log \left( \frac{L_{\text{H}\beta}}{L_{\text{opt}}} \right) + b \quad (3)$$

の形で fitting したときの  $a$  と  $b$  の値と分散を示す。

表 2: 関係の傾きと切片および分散

N	a	b	分散
33	-1.391	-1.193	2.372
59	-0.711	-0.675	2.263
49	-0.446	-0.675	2.262
75	-0.356	-0.279	3.090

表 1 の可視や Hβ の残差と比較すると、分散は 2~3 割減少し、パラメータを増やすことえ多少の改善が見られる。したがって、ブラックホール質量の見積もりのエラーが BLR のサイズのエラーだけであると考え、大雑把に見積もって 20~30%ほどの工

ラーの補正ができるかもしれない。

式 (2) と式 (3) を合わせることで、 $L_{opt}$  と  $L_{H\beta}$  から  $R_{BLR}$  を求める式を得ることができる。

$$\left(\frac{R_{BLR}}{10 \text{ lt day}}\right) = A(L_{opt})^{B_{opt}}(L_{H\beta})^{B_{H\beta}} \quad (4)$$

表 3 に  $A$ ,  $B_{opt}$ ,  $B_{H\beta}$  の値を示す。

表 3: 関係のパラメータ

N	A	$B_{opt}$	$B_{H\beta}$
33	52.01	-0.755	1.391
59	16.03	-0.090	0.711
49	5.443	0.187	0.446
75	5.259	0.231	0.356

## 4 Discussion & Conclusion

Kaspi et al. (2005) のサンプルに関しては相関関係が良いが、偶然そろったデータである可能性も考えられるので、広く汎用するのであれば様々なデータを用いた表 3 の下の 2 つを使うのが良いのかもしれない。しかし、得られた結果に関していずれも違いが大きすぎるため、一概にどの関係を使うのが良いかは言えない。今回は多少の改善は見込めるものの十分な結果が得られなかったが、今後さらにサンプル数を増やすことで良い補正関係が得られると考えられる。また、十分な結果は得られなかったが、多少の改善が見られた理由について考察を加える。ガス雲の照射面における光子の密度と電離領域の密度の比として電離パラメータは

$$U = \frac{Q}{4\pi r_{line}^2 c n_e} \quad (5)$$

と定義される。ここで、 $Q$  は単位時間あたりに電離できる光子の数、 $r_{line}$  はその輝線が見られる領域の半径、 $n_e$  は電離領域の密度である。電離パラメータ  $U$  は輝線ごとに決まるのでここでは一定であり、電離領域の密度  $n_e$  も一定と仮定すると、式 (5) から  $r_{line} \propto L^{0.5}$  が得られる。これは、大雑把に見れば表 1 の傾き  $\alpha$  と一致する。

しかし実際は、密度一定という仮定が間違っているという可能性がある。Korista et al. (1997) は図 7

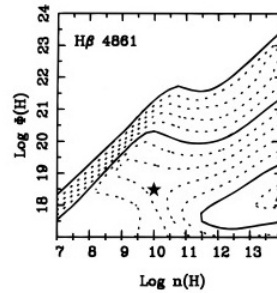


図 7:  $Q$  と  $n$  の関係

にあるような  $Q$  と  $n_e$  の関係を与えたが、この図は  $Q$  と  $EW(H\beta)$  から  $n_e$  が決まることを示している。 $Q$  は  $L_{opt}$  に比例したパラメータであり、 $EW(H\beta)$  は  $L_{H\beta}/L_{opt}$  から与えられるので、 $L_{H\beta}$  と  $L_{opt}$  を使って  $Q$  と  $n_e$  が決まる。このことと式 (5) から、BLR のサイズと可視、 $H\beta$  の luminosity との関係が見られるため、 $L_{opt}$  と  $L_{H\beta}$  を使うことで  $R_{BLR}$  の見積もりに多少の補正を加えることができたのではないかと考えられる。

## Reference

- Kormensy, J., & Richstone, D. 1995, ARA&A, 33, 581  
 Magorrian, J., et al. 1998, AJ, 115, 2285  
 Gebhardt, K., et al. 2000a, ApJ, 539, L13  
 Miyoshi, M., Moran, J., Herrnstein, J., Greenhill, L., Nakai, N., Diamond, P., & Inoue, E. 1995, Nature, 373, 127  
 Kaspi, S., Smith, P. S., Netzer, H., Maoz, D., Jannuzi, B., & Giveous, U. 2000, ApJ, 533, 631  
 Kaspi, S., Maoz, D., Netzer, H., Peterson, B. M., Vesterggard, M., & Jannuzi, B. T. 2005, ApJ, 629, 61  
 Bentz, M. C., Walsh, J. L., Barth, A. J., et al. 2009, ApJ, 705, 199  
 Denney, K. D., Peterson, B. M., Pogge, R. W., et al. 2010, ApJ, 721, 715  
 Grier C. J. et al., 2012, ApJ, 755, 60  
 Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. 1989, ApJ, 345, 245  
 Korista, K., Baldwin, J., Ferland, G., & Verner, D. 1997, ApJS, 108, 401