

# 銀河 01a 「あかり」による ULIRG の水素輝線 $Br\alpha$ ・ $Br\beta$ の観測

東京大学理学系研究科物理学専攻

修士 2 年 矢野健一

2012/8/1 発表

## 概要

UltraLuminous InfraRed Galaxy (ULIRG) は、多量のダストからの熱放射により赤外線で非常に明るく輝く銀河であり、宇宙初期ほど数が多かった。このため、そのエネルギー源が星形成と活動銀河核 (AGN) どちらなのか調べることで、宇宙初期に星とブラックホールどちらが優勢であったかを判別でき、マゴリアン関係など銀河進化の謎が解明できると期待される。

私は、ULIRG における星形成活動を調べるため、赤外線天文衛星「あかり」の近赤外分光観測を用いて、星形成の指標となる水素再結合輝線  $Br\alpha$ ・ $Br\beta$  の初の同時観測を行った。これらの輝線は赤外線であるためダスト減光の影響が小さく、ダストの多い ULIRG の観測に適している。この観測からダストに影響されない星形成率の測定を行い、ULIRG における星形成率の系統的な議論を行う。

また、 $Br\alpha$ ・ $Br\beta$  強度比が異常を示す天体も見つかった。一般に予想される  $Br\beta/Br\alpha$  強度比は  $\sim 0.6$  程度であるが、IRAS 10494+4424 では  $Br\beta/Br\alpha$  強度比が  $\sim 1.2$  となった。ダストによる減光では、短波長の  $Br\beta$  の方がより強く減光されるため、この結果は説明できない。本発表ではこの結果の解釈についても議論する。

## 1 Introduction

### 1.1 ULIRG とは？

UltraLuminous InfraRed Galaxy (ULIRG) とは、 $L_{IR} \geq 10^{12} L_{\odot}$  で定義される赤外線で非常に明るく輝く銀河である。この ULIRG は図 1 (Goto et al., 2010) のように遠方ほど数が多くなるため、その性質の解明が銀河進化の理解にとって重要となっている。

強い赤外線は加熱された多量のダストからの熱放射であり、その加熱のため、ULIRG には強いエネルギー源が存在すると考えられている。エネルギー源の候補には、1. 爆発的な星形成、2. 活動銀河核 (AGN) 中心のブラックホールへの質量降着、の 2 つがある。このどちらが重要なのか判別できれば、宇宙初期に星形成と AGN のどちらが優勢だったか、つまり、星とブラックホールのどちらが重要だったかを議論できる。

これは、現在の銀河で普遍的に成り立つバルジの星質量と中心ブラックホール質量の関係 (Magorrian et al., 1998, マゴリアン関係) の起源解明に繋がるなど、重要なトピックとなっている。

しかしながら、ULIRG のダストが多いという特徴のため、エネルギー源の直接観測は困難であり、星形成と AGN のどちらが重要であるのかは未だに解明されていない。そこで、今回は、ダストの減光が少ない赤外線の観測から、ULIRG における星形成活動を調べることを考えた。

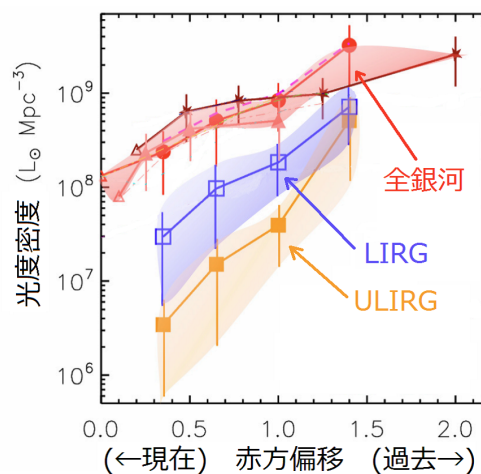


図 1 ULIRG/LIRG の光度密度；全銀河 (赤) に対する ULIRG (黄) の寄与が過去 (右側) ほど高くなっている

## 1.2 水素輝線 $\text{Br}\alpha\cdot\text{Br}\beta$ による星形成率の測定

### 1.2.1 「あかり」近赤外線分光観測

赤外線を用いて ULIRG の星形成活動を調べるにあたり、私は赤外線天文衛星「あかり」(図 2) の近赤外線分光観測に着目した。これは、地球大気に影響されない波長 2.5–5.0  $\mu\text{m}$  の分光観測であり、後述するように星形成の観測に適した、水素再結合輝線の  $\text{Br}\alpha$  ( $\lambda_{\text{rest}} = 4.05 \mu\text{m}$ ) と  $\text{Br}\beta$  ( $\lambda_{\text{rest}} = 2.63 \mu\text{m}$ ) を同時観測できるためである。この波長帯を一度に分光できるのは「あかり」のみであり、これを用いて、ダストの影響の小さい赤外線の水素再結合輝線による、ULIRG における初の系統的な減光率および星形成率の測定を行う。

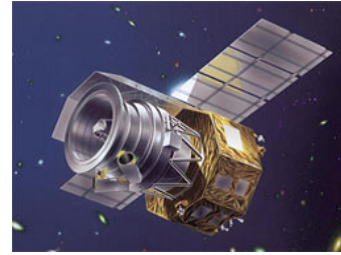
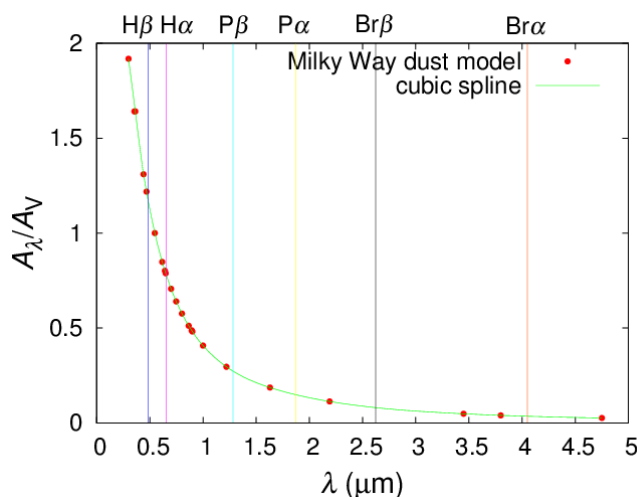


図 2 赤外線天文衛星「あかり」

### 1.2.2 $\text{Br}\alpha\cdot\text{Br}\beta$ 輝線と星形成率

$\text{Br}\alpha\cdot\text{Br}\beta$  輝線は水素の再結合輝線であり、水素が電離した領域から放射される。この水素再結合輝線の強度と、水素を電離できる 13.6 eV 以上のエネルギーを持った電離紫外線の光子数は比例するため (Osterbrock & Ferland, 2006)、その強度が電離紫外線量の良い指標となる。電離紫外線は主に重い OB 型星が放射するが、これら OB 型星は寿命が短いため、星形成が活発な領域にしか存在しない。このため、 $\text{Br}\alpha\cdot\text{Br}\beta$  輝線強度から計算した電離紫外線量から、必要な OB 型星の数を推定することで、その銀河での最近の星形成活動の度合いを調べることができ、初期質量関数を仮定すれば星形成率まで求めることができる。

この水素再結合輝線を用いた星形成率の測定には、これまでは主に観測が容易な可視光の  $\text{H}\beta$  輝線などが用いられてきた。ただし、これら可視光の輝線はダストによる減光を強く受けるため、ダストの多い ULIRG の観測には適していない。これに対し、今回用いる  $\text{Br}\alpha\cdot\text{Br}\beta$  輝線は近赤外線であり減光を受けにくいいため、ULIRG においても正確に星形成率を求めることができる。減光率は、波長  $\lambda$  における Flux の観測値を  $F_\lambda$ 、減光前を  $F_\lambda^0$  として  $A_\lambda \equiv 2.5 \log_{10}(F_\lambda^0/F_\lambda)$  で定義されるが、この波長依存性を示したのが図 3 および表 1 である。これより、今回用いる  $\text{Br}\alpha\cdot\text{Br}\beta$  は可視光の輝線に比べ、等級で 1 桁以上減光が少ないことが分かる。



輝線	$A_\lambda/A_V$
$\text{H}\beta$	1.166
$\text{H}\alpha$	0.7742
$\text{P}\beta$	0.2737
$\text{P}\alpha$	0.1486
$\text{Br}\beta$	0.08103
$\text{Br}\alpha$	0.03568

表 1 各輝線に対する  $A_\lambda$

図 3 減光曲線及び各輝線に対する減光率 (Draine, 2003)

### 1.2.3 Br $\alpha$ -Br $\beta$ 輝線強度比と減光率

また、減光率の波長依存性を利用して、2本の輝線の強度比の観測値を、減光が無い場合の理論値と比較することで、減光率を見積もることもできる。例えば Br $\alpha$  と Br $\beta$  では、Br $\beta$  の方が波長が短く強く減光されるため、減光が強くなると Br $\alpha$  に対して Br $\beta$  が小さくなる。これを示したのが表 2 で、減光が無い場合の強度比には case B、 $T = 10000$  K、low density limit の値を仮定している (Osterbrock & Ferland, 2006)。

表 2 には従来のダスト減光の指標に良く用いられる H $\alpha$  と H $\beta$  の場合 (Balmer decrement) も示したが、これより、例えば  $A_V = 10$  mag では、H 輝線では比が小さくなり過ぎて観測が難しいのに対し、Br $\alpha$  と Br $\beta$  では観測可能な値であることが分かる。このように今回用いる Br $\alpha$ -Br $\beta$  では、ダスト減光の少ない近赤外線輝線であるため、より減光の強い場合でも減光率を測定することができる。また、「あかり」近赤外分光観測によって同時観測できるため、開口補正などを行う必要なく強度比の議論ができることも利点である。

$T$	10000 K				
$A_V$ (mag)	—	1	3	10	30
$j_{H\beta}/j_{H\alpha}$	0.3483	0.2428	0.1180	$9.423 \times 10^{-3}$	$6.891 \times 10^{-6}$
$j_{P\beta}/j_{P\alpha}$	0.4688	0.4177	0.3318	0.1481	$1.479 \times 10^{-2}$
$j_{Br\beta}/j_{Br\alpha}$	0.5647	0.5416	0.4982	0.3719	0.1613

表 2 Case B における水素の各輝線の強度比

## 2 これまでの観測結果

私はこれまでに、近傍の ULIRG をターゲットにした「あかり」のミッションプログラムである AGNUL のデータのうち、phase 2 (液体ヘリウム冷却期間) で grism 分光を行った 50 観測について解析を行った。1 観測で 2 天体検出されたものもあり、全部で 51 天体についてスペクトルを調べ、Br $\alpha$  および Br $\beta$  輝線の強度を測定した。赤方偏移によって輝線波長が観測波長の外側になっていたり、天体が重なっていたり、S/N が悪いデータもあり、Br $\alpha$ -Br $\beta$  輝線強度が求まったのは最終的に 36 天体となった。

この 36 天体について、まず Br $\beta$ /Br $\alpha$  強度比を計算し減光率を求めたところ、23 天体については減光率が正の値で求まったが、13 天体については減光率が負になってしまった。つまり、減光が無い場合の理論値よりも、Br $\beta$  が Br $\alpha$  に対して強いという結果になった。前述のように、ダストによる減光では Br $\beta$  は Br $\alpha$  に対して弱くなるため、今回観測された結果とは逆方向の効果になる。このため、この 13 天体に対しては、輝線強度比を case B にダスト減光を加えたものでは説明できないという結果を得た。今回の解析で得たスペクトルの例として、 $A_V \sim 0$  の天体の例を図 4、 $A_V > 0$  の天体の例を図 5、 $A_V < 0$  の天体の例を図 6 に示す。

現時点では Br $\beta$ /Br $\alpha$  強度比までしか求められていないため、減光率が求まった 23 天体については、次は輝線強度から電離紫外線量を計算し、星形成率まで求めることを考えている。見かけ上  $A_V$  が負になる、つまり、Br $\beta$  が Br $\alpha$  に対して強くなっている天体については、次の節で議論する。

- $\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ 強度比 =  $0.56 \pm 0.15$ 、 $A_V = 0.1 \pm 6.6$  mag

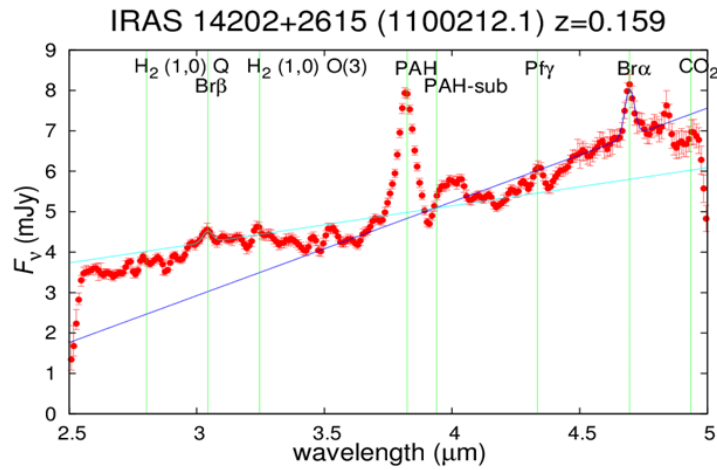


図 4  $A_V \sim 0$  の天体の例

- $\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ 強度比 =  $0.31 \pm 0.15$ 、 $A_V = 14 \pm 11$  mag

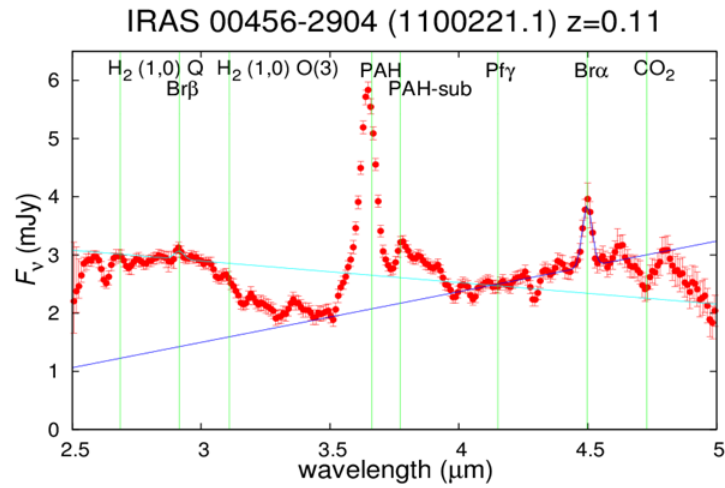


図 5  $A_V > 0$  の天体の例

- $\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ 強度比 =  $1.15 \pm 0.14$ 、 $A_V = -17 \pm 3$  mag

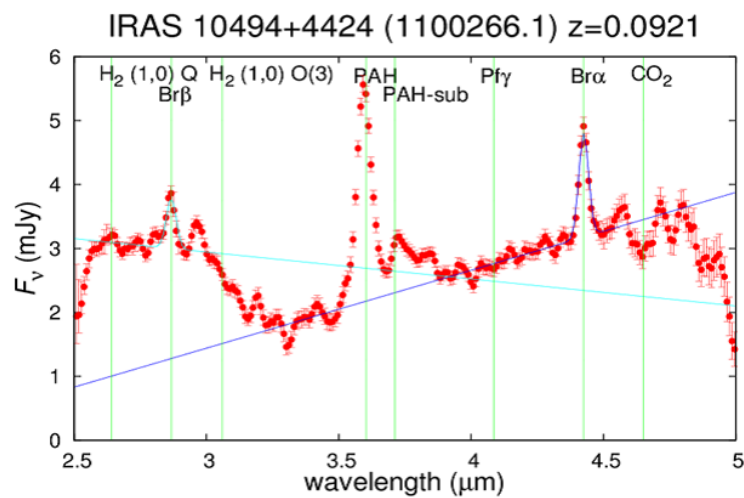


図 6  $A_V < 0$  の天体の例

### 3 Br $\alpha$ ·Br $\beta$ 輝線強度比異常

Br $\beta$  輝線の強度が強くなるような状況がないかを調べるため、私は CLOUDY というコードを用いてシミュレーションを行った。CLOUDY を用いると、電離領域から放射される輝線の強度を、電離放射の形や強度を入力することで計算できる (Ferland et al., 1998)。入射スペクトルの形は 40000 K の blackbody、強度は電離光子数が  $Q = 10^{49} \text{ s}^{-1}$  として固定し、水素密度を高密度 ( $10^5\text{--}10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ) で変化させて、水素輝線の強度比の変化を調べた。

輝線強度の水素密度に対する変化のシミュレーションの結果が図 7 である。密度の低い  $n_H = 10^5 \text{ cm}^{-3}$  などではほぼ case B の場合の強度比になっているが、高密度では強度比が大きく変化し、ところどころで輝線強度の逆転が起こることが分かった。Br $\beta$  が Br $\alpha$  に対して強くなるような場合が、 $n_H = 10^9 \text{ cm}^{-3}$  で再現されたため、次にこの逆転の原因が何であるかを調べた。

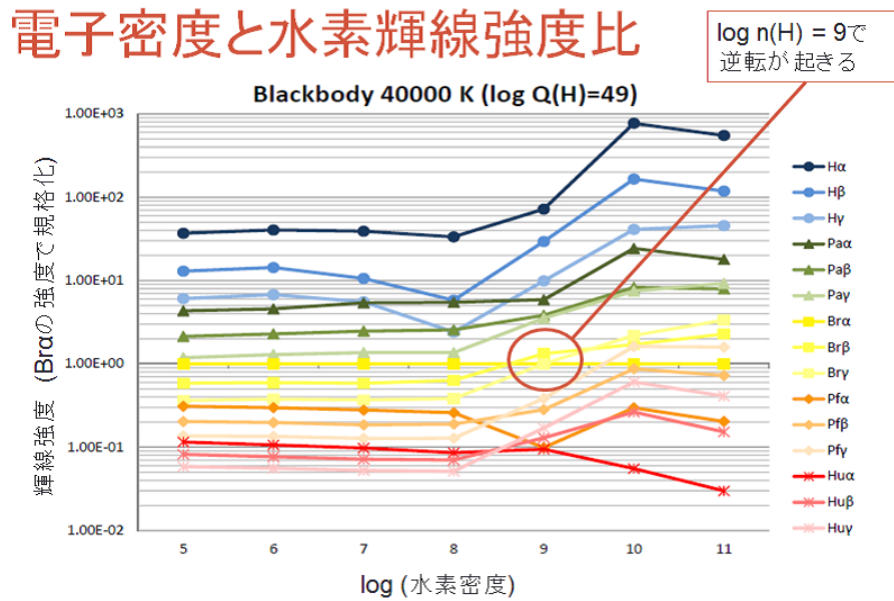


図 7 CLOUDY の結果

図 8 は、 $n_H = 10^5 \text{ cm}^{-3}$  と  $10^9 \text{ cm}^{-3}$  の場合に、各輝線の強度を電離放射が入射する側から累積していった時にどのように変化するか (cumulative intensity) を示しており、グラフの右端での強度比が図 7 の各値に対応している。これを見ると、case B に近い  $n_H = 10^5 \text{ cm}^{-3}$  では輝線強度は順番にきれいに並んでいるのに対し、 $10^9 \text{ cm}^{-3}$  では途中で反転が起こっていることが分かる。またその反転は、遷移間の主量子数の変化の大きさ  $\Delta n = 1$  (H $\alpha$ 、Pa $\alpha$ 、Br $\alpha$  など)、2 (H $\beta$  など)、3 (H $\gamma$  など) の順に、内側から増加量が頭打ちになることで生じているように見える。

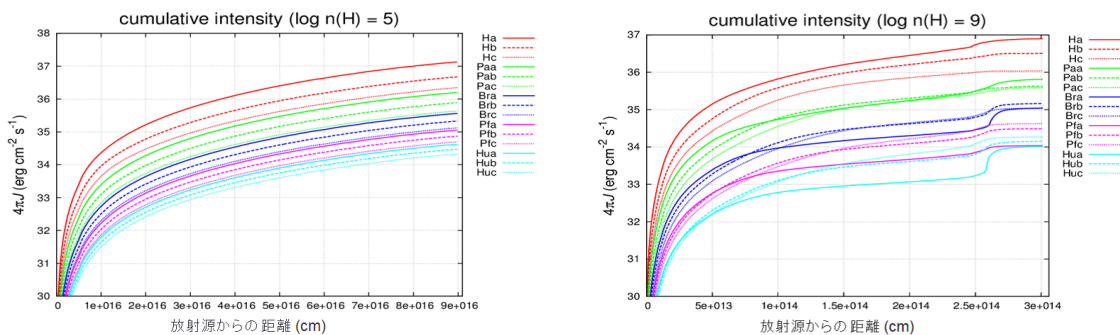


図 8 cumulative intensity (左:  $n_H = 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 、右:  $n_H = 10^9 \text{ cm}^{-3}$ )



最後にこの頭打ちの原因を調べるために、各輝線の optical depth の半径に対する変化を調べた。この optical depth と、cumulative intensity を半径で微分した値 (=cumulative intensity の増加量) を、Br 系列についてプロットしたのが図9である。これを見ると、ちょうど各輝線の optical depth が 1 になるような場所で、cumulative intensity の増加量が頭打ちになっていることが分かる。このため、今回のシミュレーションにおける  $\text{Br}\alpha$ ・ $\text{Br}\beta$  輝線強度の反転は、optical depth の効果によっていることが分かった。

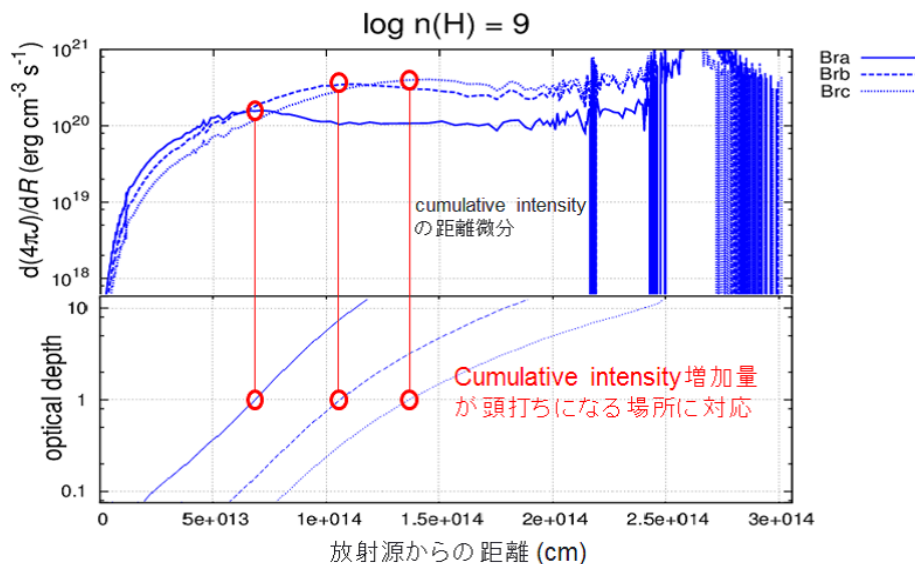


図9 optical depth と cumulative intensity 増加量

以上から、高密度の領域では optical depth の効果により、 $\text{Br}\alpha$ ・ $\text{Br}\beta$  輝線強度の反転が起こり得ることが分かった。このため、見かけの  $A_V$  が負になる天体の解釈として、高密度領域における星形成を1つの候補として現在考えている。また、この他にも、MASER のような共鳴が起きている場合や、他の輝線が重なって  $\text{Br}\beta$  の見かけの強度が増えている可能性があるなど、様々な解釈が考えられるため、今後もより詳しくこの問題を調べていきたいと考えている。

## 参考文献

- Draine, B. T. 2003, ARA&A, 41, 241  
 Ferland, G. J., Korista, K. T., Verner, D. A., et al. 1998, PASP, 110, 761  
 Goto, T., Takagi, T., Matsuhara, H., et al. 2010, A&A, 514, A6  
 Magorrian, J., Tremaine, S., Richstone, D., et al. 1998, AJ, 115, 2285  
 Osterbrock, D. E., & Ferland, G. J. 2006, Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei, 2nd ed., ed. D. E. Osterbrock & G. J. Ferland (University Science Books)