

ASTE を用いた衝突銀河の CO(3-2) サーベイ観測

道山 知成 (総合研究大学院大学 物理科学研究科天文科学専攻)

Abstract

銀河と銀河の衝突は宇宙で頻繁に起こっている。銀河衝突によって星形成活動が誘発され、赤外線で明るく輝くと考えられている (U/LIRGs: $L_{\text{FIR}} > 10^{12} L_{\odot}$, $L_{\text{FIR}} > 10^{11} L_{\odot}$)。また、衝突していない渦巻銀河と衝突して爆発的な星形成を起こしている U/LIRGs は異なる分子ガス質量と星形成率の関係 (KS 関係) を示すことが観測的に明らかになっている。理論シミュレーションではこれらの違いが衝突による星形成効率 ($\text{SFE} = \Sigma_{\text{SFR}} / \Sigma_{\text{GAS}}$) の進化に起因していると主張している。しかし、観測的な証拠は得られていない。というのも、衝突銀河の分子ガスの観測は衝突が進んだ赤外線で見やすい銀河に偏っており、衝突初期段階の銀河の観測がほとんど行われていなかったからである。

そこで、衝突初期段階の銀河を中心 16 天体 ASTE 望遠鏡を用いて 2014 年 11 月と 2015 年 6 月に CO(3-2) 輝線を観測した。これまで観測が行われていなかった $L_{\text{FIR}} = 10^{10-11} L_{\odot}$ の衝突銀河の分子ガス観測のサンプルが増加した。衝突の段階が進むと徐々に SFE が増加する様子は確認できず、衝突の初期段階ですでに高い SFE で星形成が起きていることを示唆する結果となった。

1 Introduction

1.1 衝突銀河、KS 関係

赤外線で見やすい銀河は Ultra/Luminous Infrared Galaxies (U/LIRGs: $L_{\text{FIR}} > 10^{12} L_{\odot}$, $L_{\text{FIR}} > 10^{11} L_{\odot}$) と呼ばれている。U/LIRGs の多くは相互作用している銀河であることが観測的に示されている (Sanders and Mirabel et al. 1996)。銀河同士が相互作用すると、潮汐力が働き星の材料である分子ガスが銀河の中心に落ち込み、爆発的な星形成が起こると考えられている。星形成が活発な銀河はダストの再放射によって赤外線で見やすい。銀河衝突のシミュレーションでも、衝突によって爆発的な星形成が起こることが示されている。特に、最新の高空間分解能シミュレーション (Bournaud et al. 2011 等) では、衝突の初期段階 (2 つの中心核が十分に離れている) で、すでに活発な星形成が誘発されていることが示されている。さらに、これらのシミュレーションでは星形成効率 ($\text{SFE} = \Sigma_{\text{SF}} / \Sigma_{\text{gas}}$ or $L_{\text{FIR}} / L_{\text{CO}}$) が銀河衝突に伴って進化することを示している。星形成効率とは、銀河に付随している分子ガスの質量と 1 年間に作られる星の質量を比較したものである。つまり、逆数は銀河に含まれている分子ガスの全質量が全て

星に変わるのに必要な時間である。星形成銀河において分子ガス質量と星形成率の間には相関があることが観測的に示されている (図 1 左: Kennicutt-Schmidt 関係。以後 KS 関係と呼ぶ。Daddi et al. 2010)。一般的な渦巻銀河と、爆発的な星形成をしている銀河は KS 関係上で異なる系列 (図 1 の青線と赤線) に存在していることが示されている。上で紹介したシミュレーションではこれら 2 つの違いが銀河衝突によって引き起こされると主張している。

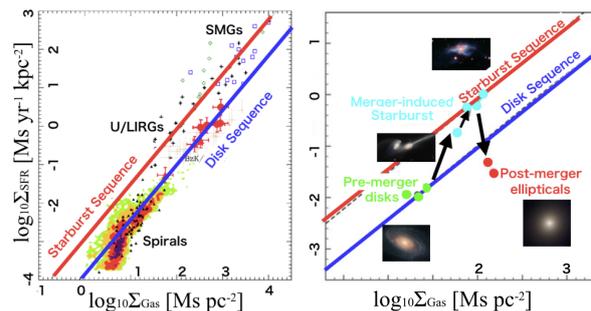


図 1: (左) 観測的に明らかになっている KS 関係。円盤銀河は青線上に、U/LIRGs は赤線上に分布している [Daddi et al. 2010 改]。 (右) 銀河衝突によって KS 関係上を銀河が移動することを示したシミュレーション結 [Bournaud et al. 2011 改]。

1.2 分子ガスの観測

分子ガスは現在と未来の星形成活動に使われる重要な材料である。一酸化炭素分子 CO の回転遷移による放射はサブミリ波帯で観測できるため、銀河に存在する冷たい分子ガスの指標としてよく使われている。我々のグループはこれまでに比較的分子ガスの密度が高く高温 ($n_{crit} \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$, $T_{ex} \sim 10 \text{ K}$) のガスを調べることができる CO(3-2) 輝線を用いて観測を進めてきた。14 個の近傍の U/LIRGs の CO(3-2) 観測では、CO(3-2) 輝線と遠赤外線光度から求められる星形成率の間に良い相関があることを示している (Iono et al. 2009)。さらに、U/LIRGs と比較して静かに星形成をしている孤立した渦巻き銀河の観測でも同様の相関が見られた (Wilson et al. 2012)。これら 2 つの観測の重要な結果として、1.CO(3-2) は銀河全体の星形成とそれに直接関連している分子ガスを調べるためには重要な輝線であること 2. 普通の渦巻き銀河は U/LIRGs と比較して SFE が低いこと、の 2 点が挙げられる。これらの先行研究で欠如している点は、「SFE が銀河衝突の過程においてどのように進化するのかを観測的に理解すること」である。これら 2 つの研究のサンプルの間を埋めるためには、星形成率が低い衝突銀河、まだ衝突の初期段階である銀河を観測することが重要である。そこで、本研究では赤外線光度に依存しない方法で衝突銀河のサンプルを選び出し CO(3-2) の観測を ASTE を用いて行った。

2 Sample Selection

VV カタログは可視光の観測から相互作用していると判断された銀河のカタログである (Vorontsov-Velyaminov et al. 1991)。VV カタログから衝突銀河を選び出すことで、星形成の大小に偏りが無いサンプルを選び出すことができる。そこで、以下に述べる方法にしたがって観測天体を決定した。1.2MASS の K バンド等級比が 3 以下のもの (同程度の質量の銀河が衝突しているものを選び出すため)、2.IRAS から FIR の光度が測定できるもの (星形成率を求めるため)、3.ASTE から観測可能。一方、VV カタログには可視光で暗いが赤外線では明るい銀河は含まれ

ていない。赤外線では明るい天体はこれまでの研究で分子ガスが観測されているものが多いが、一部観測されていない天体もあり、それらの天体については本観測のサンプルに含まれている。図 2 に観測天体の一部の HST 画像を示した。また、中心核間距離が 4 kpc 以下のものを衝突の後期段階 (L)、4-10 kpc のものを衝突の中期段階 (M)、10kpc 以上のものを衝突の初期段階 (E) として今後議論を進める。

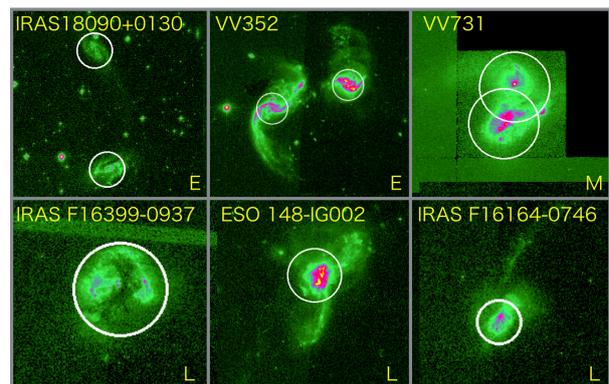


図 2: 観測天体の HST 画像。白丸は ASTE ビームサイズ $22''$ を表している。右下に衝突の段階 E,M,L を示した。

3 Observations and Analysis

3.1 ASTE

ASTE 望遠鏡は南米チリアタカマ砂漠にある口径 10 m のサブミリ波望遠鏡である。南半球には系外銀河の CO(3-2) 輝線が観測できる広帯域の分光計が少なかったため、南天の天体はほとんど観測されてこなかった。本研究では南天の天体を観測することでサンプル数の増加を図っている。2014 年 10 月 19-23 日、11 月 15-19 24 25 日、2015 年 6 月 19 22 23 日に観測を行った。受信器は 2014 年と 2015 年それぞれ CAT345 と DASH345 を使い、分光計はどちらも WHSF の 2GHz モードを使用した。典型的なシステム雑音温度は $\sim 300 \text{ K}$ であった。ポインティングの精度は $3''$ 以下になるように 1.5 時間に 1 回程度の割合で確認した。16 天体の観測を実行し、9 天体から CO(3-2) 輝線を検出することに成功した。

3.2 Data Analysis

Newstar を用いて解析を行った。速度方向に 10 ~ 30 km/s でピンングしたデータを用いて天体の積分強度 $I_{CO(3-2)}$ [K km/s] を測定し、Gao & Solomon et al. (1999) に従って CO の光度を求めた。

$$L'_{CO(3-2)} = 23.5 \times \Omega_{s*b} D_L^2 I_{CO} (1+z)^{-3} \quad (1)$$

CO(3-2) を検出できなかった天体に関しては 50 km/s でピンングしたデータを用いて rms ノイズレベルを測定し、CO 光度の 3 上限値を以下のように求めた。

$$I_{upper} = \frac{\sqrt{2\pi}}{2} \sigma (T_{rms} \times 3) \quad (2)$$

ただし CO(3-2) を検出した天体の平均値の $\sigma=110$ km/s とした。また、CO 強度の絶対値の誤差は典型的な値の約 30 % であるとみなす。その場合光度に換算した誤差は対数スケールでおおよそ ± 0.15 程度となる。今後の課題としてより正確な誤差の見積りが必要である。さらに、7 章でも述べるが FIR 光度は不定性が大きく、現時点で誤差の正しい見積りはできていない。

4 Results

表 1 に観測結果を示した。2 つの銀河をそれぞれのビームで観測している天体に関しては、IRAS の観測から求めた遠赤外線全光度を星質量の比を用いてそれぞれの銀河に分配して個々の赤外線光度を見積もっている。また、それぞれの銀河の中心核の座標と赤方偏移を NED から引用し中心核同士の距離を求めている。図 3 右に赤外線高度のヒストグラムを示した。このヒストグラムから U/LIRGs と比べて本研究では赤外線ですぐ暗い衝突銀河の数が増加していることがわかる。

5 Discussion

今回観測した天体に加えて、これまでに 10m Heinrich Hertz Telescope を用いたサーベイ (Mao et al. 2010, Leech et al. 2010) に含まれていた衝突銀河、先行研究 Iono et al. 2009 の U/LIRGs を合わせて、

天体名	L_{FIR}	L_{CO}	Separation	stage
NGC7252	10.70	8.95	-	L
IRAS1639	11.44	9.30	-	L
ESO148	11.89	9.39	-	L
vv731a	10.89	8.74	5.86	M
vv731b	10.90	8.83	5.86	M
vv122a	10.65	8.57	8.95	M
vv242a	10.69	8.94	14.34	E
vv352b	10.98	8.73	30.50	E
vv830b	10.98	9.35	57.38	E
IRAS1809	11.19	< 8.8	-	L
vv081b	9.49	< 7.6	5.73	M
vv081a	9.50	< 7.4	5.73	M
vv122b	10.27	< 8.0	8.95	M
vv242b	10.69	< 8.7	14.34	E
vv352a	11.02	< 8.9	30.20	E
vv830a	11.02	< 8.7	57.38	E

表 1: 観測結果。単位はそれぞれ赤外線光度 L_{FIR} [L_{\odot}]、CO 光度 L_{CO} [$K km/s pc^{-2}$]、中心核同士の距離 Sep [kpc]。stage 欄は 2 章で述べた銀河衝突の段階分類に従っている。

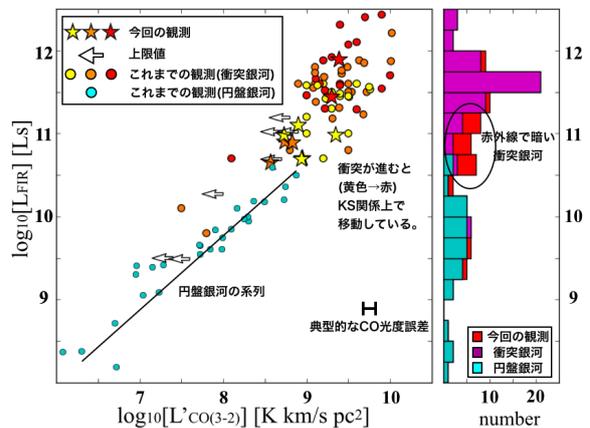


図 3: CO 光度と遠赤外線光度の関係、赤外線光度ヒストグラム。散布図上での黄色橙色赤色は中心核同士の距離を表している。黄色:10 kpc 以上 (初期段階)、橙色:0-10 kpc(中期段階)、赤色:中心核を分解できていない (後期段階)

合計 67 天体の衝突銀河と Wilson et al. 2012 で観測されている 27 個の渦巻き銀河の観測結果を図 3 で比較した。1 章で述べたような銀河衝突における KS 関係上での明らかなシフトは見られなかった。また、中心核同士の距離と SFE の関係を図 4 に示した。両者に明らかな相関は見られなかった。一方、衝突の後期段階の銀河は孤立した円盤銀河よりも SFE が高い傾向にある ($\log[SFE]$ の中央値はそれぞれ 2.5 と 1.9、平均値は 2.4 と 2.0)。つまり、銀河衝突の段階が進むにつれて SFE がだんだんと大きくなるわけではなく、衝突している銀河は衝突の初期段階ですすでに SFE が高くなっていることを示唆している。

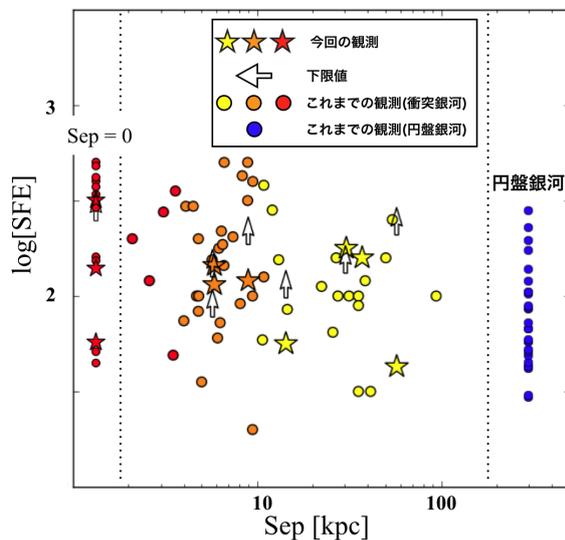


図 4: 中心核間の距離と SFE の関係。記号は図 3 と同じ。明らかな相関は見られない。

6 Conclusion

これまで観測が進んでいなかった赤外線での暗い衝突銀河の分子ガスの観測を ASTE 望遠鏡を用いて行った。先行研究と比較することで、衝突の段階が進むと徐々に SFE が増加する様子は確認できなかった。これは、銀河衝突において SFE はほとんど変化しないことを示唆しており、衝突の初期段階ですすでに高い SFE で星形成が起きていることを示している。

7 Future Works

本研究では CO(3-2) 輝線のみを利用している。CO(1-0) 等他の準位間の輝線放射を観測することで、銀河に含まれる分子ガスの温度や密度に制限をつけることができる。すでに本研究のサンプルの一部は 2015 年 4 月の野辺山観測で CO(1-0) 輝線を観測済みであり、現在データ解析を行っている。

また、問題点の 1 つとして、遠赤外線光度の正しい見積りがあげられる。ASTE 観測は銀河の中心の 22" 円内の分子ガスの量を見積もっているのに対し、遠赤外線光度は銀河全体の値を用いている。すなわち、遠赤外線光度を過大評価している可能性が高い。これを解決するために WISE を用いた 22" 内の遠赤外線光度の見積りに取り組んでいる。

ALMA を用いて空間分解することは本研究を大きく前進させることができる。現在は銀河全体の分子ガスの振る舞いを議論では衝突の段階と SFE に相関は得られなかったが、空間的に平均化されていて傾向が消えているだけかもしれない。また、空間分解した星形成率を計算するためには、連続光の観測が有効である。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台、野辺山宇宙電波・太陽電波観測所からのご支援に感謝いたします。

Reference

- [1] Bournaud et al. 2011, EAS, 51, 107
- [2] Daddi et al. 2010, ApJ, 714, 118
- [3] Gao & Solomon et al. 1999, 512, L99
- [4] Iono et al. 2009, ApJ, 370, 158
- [5] Leech et al. 2010, MNRAS, 406, 1364
- [6] Mao et al. 2010, ApJ, 724, 1336
- [7] Sandars & Mirabel et al. 1996
- [8] Vorontsov-Velyaminov et al. 1991 third reference catalogue of bright galaxies
- [9] Wilson et al. 2012, MNRAS, 424, 3050