

銀河の大衝突

伊王野 大介

〈国立天文台 ALMA 推進室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: d.iono@nao.ac.jp

広大な宇宙の至る所で起こる大事故、銀河同士の大衝突。この想像を絶する壮大なスケールで起こる現象は、宇宙を司る銀河の進化には必要不可欠な現象である。近傍宇宙を観測すると、銀河と銀河の衝突によって爆発的な星形成が引き起こされていることがわかる。遠方宇宙を観測すると、ここでも衝突、または合体銀河が多く存在することが最近の高分解能観測でわかってきている。筆者らは、銀河の衝突によって爆発的に起こる星形成をより良く理解するために、星形成の元である星間ガスの分布を電波干渉計を使い観測した。ここではその観測データ、また観測とシミュレーションを比較した結果を紹介する。

1. 銀河の大衝突

銀河同士の大衝突は想像を絶する壮大なスケールで起こる現象であるが、宇宙を司る銀河の進化には必要不可欠な現象である。1980年代に赤外線衛星 IRAS によって明らかにされた、銀河中心部が赤外線で極めて明るくなっている現象（超高光度赤外線銀河¹⁾）も、大銀河同士の衝突が密接に関係していることがわかっている。また、体積が現在よりもっと小さかった初期の宇宙は、銀河同士の衝突頻度が現在の宇宙よりはるかに高かったと推測されており、実際に遠方の非常に明るい銀河を可視光で観測すると、多くが衝突もしくは合体後の変形した銀河であることが解明されつつある^{2),3)}。よって、近傍銀河の衝突を研究することは、銀河形成史、または銀河における星形成史を解き明かすうえでの重要な鍵を握っていると考えられる。

銀河衝突時の星の動きは、ニュートンの運動方程式と大型計算機を使って比較的簡単に計算できるので、1970年頃からさまざまな手法で計算が繰り返されている。しかし、銀河衝突シミュレ-

ーションの先駆者、Erik Holmberg は、1941年に斬新かつ独創的な手法で計算をし、論文を発表している⁴⁾。ご存知のとおり、当時は現在われわれの身近にあるパソコン、ましてやシミュレーション用の大型専用計算機など存在しなかった。では、どのようにして計算は行われたのであろうか。

Holmberg はまず 37 個の電球を使い、銀河円盤のような形に電球を 2 次元分布したものを二つ作った。もちろん、たった 37 個の電球で銀河内の星すべてをたとえることはできないので、電球 1 個を星団という単位とし、電球の光度をその星団の質量とたとえた。ここで、それぞれの星団が受ける全光量の一つ一つ測定し、重力と光がともに距離の 2 乗に反比例することを利用して、各星団が受ける重力が計算できる。この作業を繰り返していくことによって、2 銀河の衝突進化を時間方向に大まかに追っていくことができるのである。このたいへんな作業により Holmberg は、銀河の進行方向と回転の向きが同じ場合と違う場合では、潮汐力によって銀河外に放出される星の分布に大きな差が出ると結論した。これは、その後の計算機を使ったシミュレーション（31年後の

Toomre 兄弟⁵⁾) により正しいことが証明された。

最新のシミュレーションでは、銀河は星、ガス、それと暗黒物質でモデル化されており、ブラックホールまでモデル化されているものまである⁶⁾。これらのシミュレーションによって、衝突によって引き起こされる爆発的星形成の特性を解明するのが現在の大きな課題である⁷⁾。また、天の川銀河のような大渦巻銀河同士が衝突し、それに続いて合体すると、10億年くらいの長い時間を経て楕円銀河に進化していくことも同様な手段で解明されている⁸⁾。

2. 星間ガスの観測

星形成には、まず元となる星間分子ガスが必要である。その分子ガスの塊が、重力収縮、超新星爆発による圧縮、乱流、磁場、と複雑な物理が入り組んで、最終的に10万年から100万年くらいの時間を経て原始星になることが大まかにわかっている⁹⁾。では、この分子ガス、特に系外銀河におけるガスをどのように観測したらよいのだろうか。理想的には、銀河全体の約90%を占める水素、特に星形成の元となる水素分子を観測したいのだが、この分子は非常に弱い輝線しか発せず、観測は難しい。そこで、主流なのが水素分子と密接な関係をもつ一酸化炭素分子輝線(CO)の観測である。COは輝線が強く、地上からの観測も容易である。また、比較的高密度なガスの分布と運動を求めるのに適しており、COの輝度を使って間接的に水素分子ガスの総質量を求める方法も広く活用されている。その他、水素原子(HI)は低周波電波望遠鏡で簡単に観測でき、低温、低密度ガスの分布と運動を求めるのに適している。ここでは、衝突銀河におけるCOとHIの高分解能電波干渉計観測、また観測データとシミュレーションを比較した研究を紹介する¹⁰⁾⁻¹²⁾。

3. 星間ガスの分布

理想的には統計的有意性がある多数の衝突銀河

を観測し、同数の孤立銀河とガスの運動や分布、物理特性を比較したい。しかし、高分解能データが得られる干渉計を使って観測するには、1天体につき半日くらい必要となるので、大規模なサーベイとなると観測時間に制限があるために困難である。そこで、筆者らはZhu et al.¹³⁾が単一鏡で得たデータを使い、以下の条件のもと衝突銀河10対を厳選した。(1) CO輝線が強い、(2) 2銀河間の離隔が5秒角程度の分解能で完全に空間分解できる、(3) 2銀河の質量がほぼ等しい。COの観測はアンテナ6基からなるカリフォルニア工科大学ミリ波干渉計Owens Valley Millimeter Array(OVRO)にて(VV 253はアーカイブから)、また、HIの観測はニューメキシコ州にある大規模電波干渉計Very Large Array(VLA)で行った(VV 48, VV 247, VV 731はアーカイブから、VV 254, VV 769はJ. Condon氏より提供)。

10対のHIとCOの分布を図1に示す。まず見てすぐわかるように、HIは潮汐力によって簡単に引き伸ばされ、光で見える潮汐腕よりも長く伸びている例が多数ある。逆にCOは衝突の莫大なエネルギーにも影響されることが少なく、銀河円盤の重力によって拘束されているものがほとんどである。ここで面白いのが、COが円盤または潮汐腕の外に観測されているものが3対(VV 254, VV 769, VV 247)あることである。これは衝突時のエネルギーで銀河外に引き出されたCOなのか、それとも後天的にそこで希薄ガスが重力収縮しCOが形成されたものなのかは、このデータからははっきりとは結論できない。このうち2対(VV 254, VV 769)は、Taffy Galaxies^{14), 15)}と呼ばれ、共に2銀河間に電波連続波のピークがある。この強い電波連続波は、2銀河が真っ正面から衝突した際に引き出されたものだと考えられ、まだ衝突後間もないことがこのような現象からわかる。

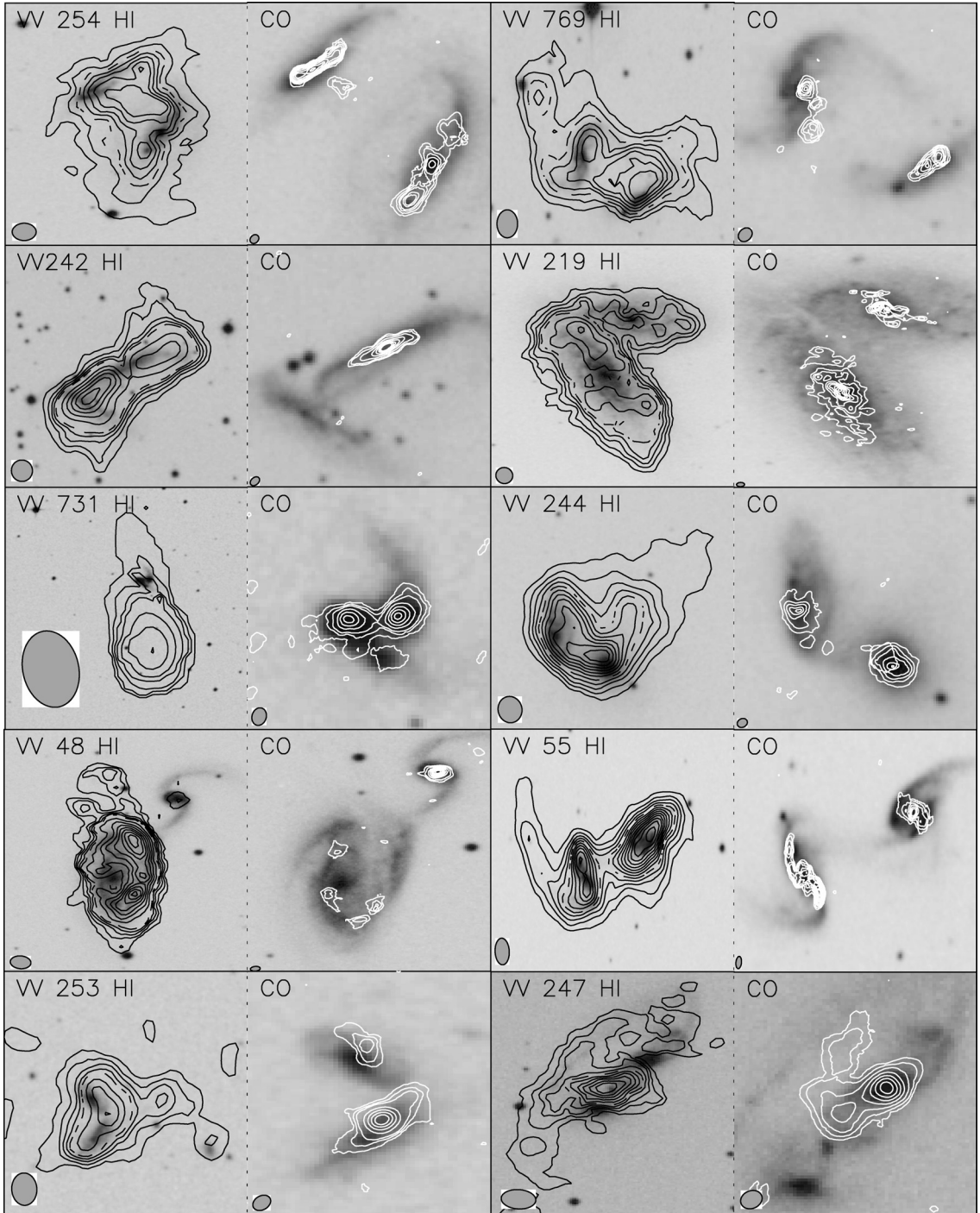


図1 衝突銀河における HI と CO の分布. 各図の左上に天体名, 左下にそれぞれの分解能を表した. 背景にある光の絵は DSS (Digital Sky Survey) R band. CO の分布がわかりやすいように, CO 図は多少拡大してある.

4. シミュレーション

データをもう少し詳しく説明する前に、ここでシミュレーションによって理論的に推測されていることについて少し述べたい。冒頭でも少し触れたが、最近のどのシミュレーションにも共通して言えるのが、束縛エネルギーが小さい円盤外側の

ガスは潮汐力によって銀河外に引き出されることである。その反面、銀河中心部では星による棒状構造が形成され、内側のガスは角運動量を失い、1億年くらいかけて中心方向に流れていく(図2)。円盤外に出された希薄ガスは銀河間物質としてそのまま残り、銀河中心に集まった高密度ガスはその後、星に変わっていくと予測されている。

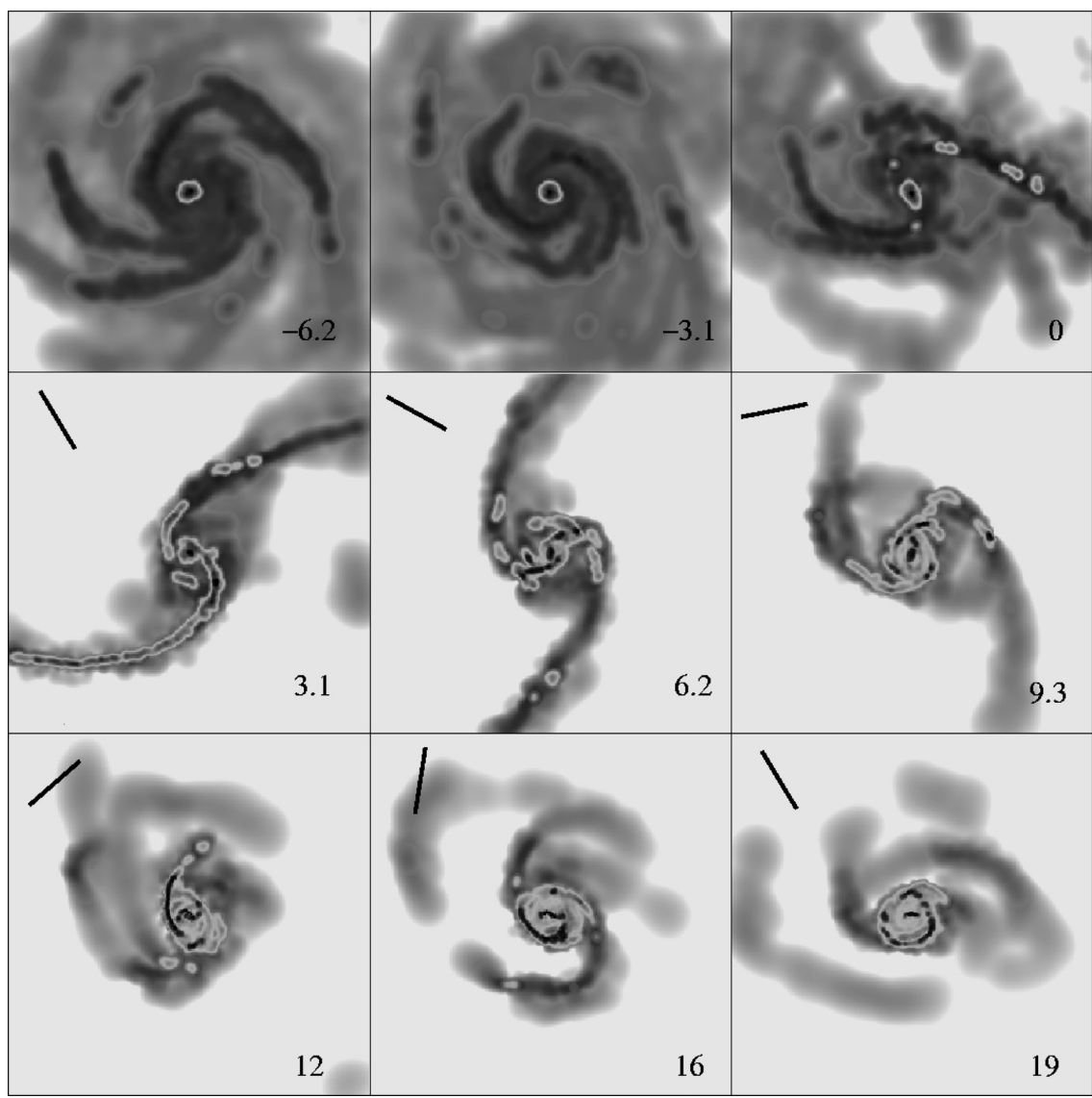


図2 シミュレーションにおける、ガスの分布進化。各図の右下に衝突からの時間(単位: 1000 万年), 左上には星の分布の棒状構造の角度を示した。

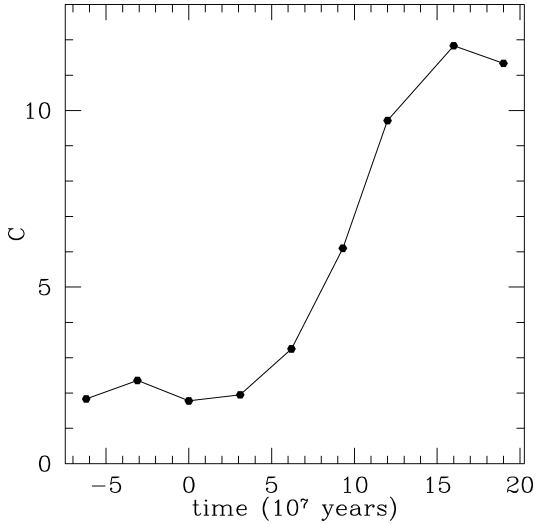


図3 シミュレーションにおける、 C の時間進化。

では、その高密度ガスが銀河中心方向に集まっていく様子を簡単に定量化するため、以下の方法を使う。星とガス、それぞれについて全体輝度の68%を囲んだ半径の比を計算する。その比をCompactness Parameterと呼び、ここからは C と表す。 C の値が大きい場合は、光円盤に対してガスが中心に凝縮されていることになる。逆に C の値が小さい場合は、ガスが光円盤の広域にわたって分布されていることになる。図3にシミュレーションから求めた、 C の時間変化を示した。銀河衝突前は $C=2$ (星円盤がガス円盤の約2倍の大きさである)、衝突後約5千万年間 C はほとんど変わらず、衝突に対してのガスの初期反応が比較的ゆっくりであることがわかる。しかし、そこから1-2億年にかけて、 C が急激に5-6倍程度上がり、最終的にガスが星に対して10倍程度凝縮されていることになる。銀河中心方向にガスが凝縮している様子は、図2からもわかる。

5. 観測とシミュレーションの比較

観測とシミュレーションを比較して何が学べるのであろうか。観測データとシミュレーションの結果が完全に一致すれば、実験に使われた衝突の

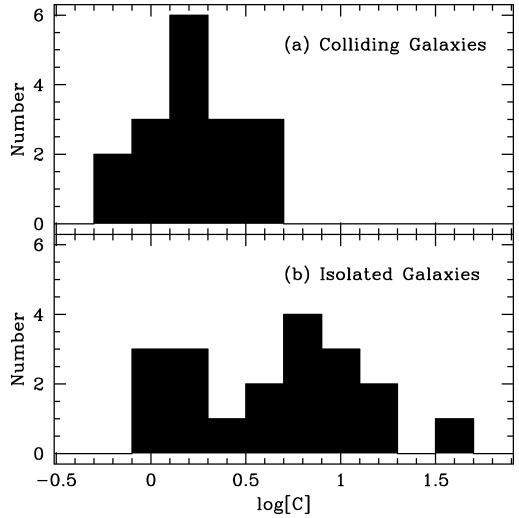


図4 観測データから求めた (a) 衝突銀河, (b) 孤立銀河の C のヒストグラム。

初期条件や、われわれの理解している物理理論が完全に正しいことになる。逆に、観測結果に信頼性があり、なおかつ二つの結果が一致しなければ、シミュレーションに使われた初期条件がおかしい、物理理論が不正確、もしくは不十分であることになる。では、ここで観測されたデータは果たしてシミュレーションと一致するのであろうか。HIの分布は、シミュレーションと大まかに一致することが以前より知られているので¹⁶⁾、ここではCOに注目したい。シミュレーションに見られる中心方向へ輸送されるガスは、中心に近づくにつれて高密度になっていくことが図2から明らかである。このような高密度ガスは後に星に変わっていくので、観測で得たCOの分布と直接比較することが可能である。では、COは主に衝突銀河の円盤中心方向に観測されているであろうか。これは先に紹介した、 C を使って調べることができる。図4(a)にその結果を表した。この図からもわかるように、観測データから求めた C は最小0.7、最大でも4.7であり、平均は 1.9 ± 1.1 。シミュレーションと比較するとだいぶ小さい結果が出る。 C がシミュレーションの結果($C=2-12$)

より小さいということは、分子ガスがシミュレーションから予想されているより光円盤領域にわたって観測されていることになる。このことについてもう少し詳しく調べてみるため、観測データから得られる C を衝突銀河と孤立銀河の間で比較する。

6. 衝突銀河と孤立銀河の比較

衝突銀河と孤立銀河ではガスの分布が違ふことは、シミュレーションの結果から予想される。ここでは、実際にそれが観測データに見られるか調べてみたい。主な孤立銀河の CO サーベイは野辺山と OVRO 干渉計を使った Sakamoto et al.¹⁷⁾ や BIMA 干渉計を使った Helfer et al.¹⁸⁾ などがあるが、ここでは Helfer et al.¹⁹⁾ の BIMA SONG (BIMA Survey of Nearby Galaxies) で観測された 44 銀河のうち、CO 輝線が強く、銀河円盤面積の 80% 以上が BIMA 干渉計の視野内に収まっている 18 銀河を選んだ。

図 4(b) に孤立銀河の C の分布を表した。二つの異なった銀河形態の C の値が相違した分布を示していることがこの図から明白である。孤立銀河は C の値にばらつきがあり ($C=1-13$, 平均 = 7.6), ガスの分布が中心方向に偏っている銀河も多数見られる。その反面、ここで観測した衝突銀河の C の値は全体的に小さく ($C=1-5$, 平均 = 1.9), 星形成の元である分子ガスが光円盤領域にわたって分布している銀河が多いことを示唆している。

これらの観測から、銀河の衝突によって分子ガスが光円盤領域にわたり形成される可能性が高いことが、結論の一つとして出せる。また、シミュレーションから予測される結果と観測結果が相違する点は、シミュレーションに使われている物理が不完全であることを示唆している。ここで紹介したシミュレーションは、ガスの粘性、シミュレーションの解像度、超新星爆発のフィードバック、星形成率など、不確定性の高いパラメーター

が多数あるので、今後の観測と理論を比較した研究などでこれらの物理をよりよく理解できるようにしていくことが課題である。また、このシミュレーションで使われている手法は、宇宙論的シミュレーションにも広く使われており、物理現象を正確にモデル化することは、宇宙進化をよりよく理解するうえでも非常に大事であるといえる。

7. ま と め

初期宇宙の非常に明るい銀河の多くが衝突、合体銀河であることが最近の深いサーベイでわかってきている。では、明るい初期銀河は、近傍宇宙で観測されている超高光度赤外線銀河に匹敵する天体であると考えてよいのだろうか。この問題を解決するには、高分解能、高感度サーベイ観測が必要となってくるので、日欧米が共同建設中の ALMA によって明らかにされるであろう。しかし、現在までに観測されている天体を見る限りでは、銀河同士の衝突は、銀河形成史を解き明かすうえでの重要な鍵を握っていることは間違いなさそうである。銀河は、100 億年以上前に生まれてから現在に至るまで、他の銀河と衝突することは避けて通れない道であるようだ。

謝 辞

本稿は筆者の博士論文の一部をまとめたものがあります。指導教官である Min Yun 氏、Paul Ho 氏には多くの良きアドバイスをいただきました。CfA プレドク時代お世話になりました。齋藤正雄氏、松下聡樹氏、坂本 和氏、大橋永芳氏、新永浩子氏、高桑繁久氏、Alison Peck (Pre-doctoral) 氏にたいへん感謝します。本稿の執筆にあたりましては、松下聡樹氏より多くのコメントをいただきました。

参考文献

- 1) Sanders D. B., Mirabel I. F., 1996, ARA&A 34, 749
- 2) Chapman S. C., et al., 2003, ApJ 599, 92
- 3) Conselice C. J., Chapman S. C., Windhorst, R. A., 2003, ApJ 596, L5
- 4) Holmberg E., 1941, ApJ 94, 385
- 5) Toomre A., Toomre J., 1972, ApJ 178, 623
- 6) Springel V., Di Matteo T., Hernquist L., 2005, MNRAS 361, 776
- 7) Mihos J. C., Hernquist L., 1996, ApJ 464, 641
- 8) Barnes J. E., Hernquist L., 1996, ApJ 471, 115
- 9) Hartmann L., Ballesteros-Paredes J., Bergin E. A., 2001, ApJ 562, 852
- 10) Iono D., Yun M. S., Ho P. T. P., 2005, ApJS 158, 1
- 11) Iono D., Yun M. S., Mihos C. J., 2004, ApJ 616, 199
- 12) Iono D., Ph.D. Thesis 2004, University of Massachusetts, Amherst, MA.
- 13) Zhu M., et al., 1999, AJ 118, 145
- 14) Condon J. J., et al., 1993, AJ 105, 1730
- 15) Condon J. J., Helou G., Jarrett T. H., 2002, AJ 123, 1881
- 16) Hibbard J. E., Mihos C. J., 1995, AJ 110, 140
- 17) Sakamoto K., et al., 1999, ApJS 124, 403
- 18) Helfer T. T., et al., 2003, ApJS 145, 259

Colliding Galaxies in the Universe

Daisuke IONO

*National Astronomical Observatory of Japan,
ALMA-J Office 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo
181-8588, Japan*

Abstract: Galaxy-galaxy collision is a phenomenon observed all over the universe. In the local universe, collisions of two massive galaxies are known to induce intense starburst activities, evolving to systems exceedingly bright in far infrared emission. In the early universe, high spatial resolution observations have found that a significant fraction of far-infrared bright sources are also colliding galaxies. Thus understanding the physical properties of the local colliding galaxy population is an important first step to improve our knowledge of the history of galaxy formation and evolution. Here I present an observational study of atomic and molecular gas emission in a sample of 10 local colliding galaxies, and present results from a comparison with numerical simulations.