

IRAS 銀河の観測： 銀河の合体，星形成そして銀河の進化

川辺良平*・石黒正人*・奥村幸子**・谷口義明***

1. はじめに

野辺山ミリ波干渉計 (NMA) はこれまで主に“近傍”の詳しい観測を行ない，中心部の分子ガスのバー構造，円盤部での分子ガスの渦状構造などを鮮明に描き出し，系外銀河での星形成・星間ガスの構造の研究を推進する大きな力となってきた。一方で，我々は“近傍”をより詳しく観測することだけでは決して得られない情報を，“より遠く”を観測する事により得ることが出来る。常に“より遠く”の宇宙は我々を魅了するものであるが，しかし“より遠く”を観測することは，検出技術の向上，感度との競争なくしては有り得ない。NMAでも，高感度・高空間分解能を生かして，距離約 200 Mpc ぐらいまでの“少し遠く”まで，分子ガス観測の限界をのぼしつつある。観測天体は“明るい”IRAS 銀河の多くを占める合体銀河である。合体銀河は近傍にはほとんどないが，銀河形成・進化という観点から非常に興味深く，また“少し遠く”にあっても，銀河全体にわたって大規模に星・ガスの合体現象が起こっているのだから，それに関係した星間ガスの構造・進化，星形成を調べるのは限られた分解能でもそれほど困難ではない。以下ではNMAによるIRAS 銀河の観測について紹介しよう。

2. 合体銀河と IRAS 銀河

合体銀河の研究はトーマスの楕円銀河形成の Merger 仮説にさかのぼる。トーマス等は 1970 年台に，楕円銀河形成に関する 1 つの説，楕円銀河は円盤銀河の合体により形成される (Merger 仮説) というものを発表した。のちにオーストラライカーの強烈的な反論，N 体シミュレーションとの不一致などがあって窮地に陥った。しかしその後，観測・理論ともに進展があり，オーストラライカーの反論に対する反論が揃ってきて，Merger 仮説が蘇りつつある。一方，IRAS 衛星によるサーベイにより発見された，きわめて大きい遠赤外光度を持つ銀河—高光度赤外銀河—の多くに，合体銀河の兆候があることが見いだされ，これらの銀河は多くの研究者の興味を集めている。これらの銀河は， $z < 0.1-0.2$ で検出され，遠赤外光度 L_{fir} は約 $10^{11-12.5} L_{\odot}$ ，QSOs ($\sim 10^{12-13.5} L_{\odot}$) に

匹敵する光度をもち，QSOs と同程度の空間密度をもつ。また Luminosity Function も似ている (Soifer et al.: Sanders et al.)。エネルギーのほとんどがダスト放射で多量の分子ガスを含み ($M(\text{H}_2) \sim 10^{6-10.5} M_{\odot}$)，分子ガスは中心部 ($d < 4 \text{ kpc}$) に集中している傾向がある。ほとんどの銀河は合体銀河もしくは相互作用銀河で， L_{fir} が大きいほど合体銀河の割合は多い。 $10^{12} L_{\odot}$ を越える莫大な遠赤外光度の起源に関しては 2 つの説，多量の分子ガスによる爆発的星形成 (SFR $\sim 10-50 M_{\odot}/\text{yr}$) によるとする説，中心の活動的中心核 (AGN) に起因するという説があり，決着はついていない。これらのガスリッチな円盤銀河の合体により生まれた超高光度遠赤外銀河の運命はどうなるのか，この場合でも楕円銀河が形成されるのか，ガス成分はどう進化して行くのか，などの多くの問題を抱えている。

ここでいう合体銀河には，はっきりした定義はない。これは，合体の過程，合体銀河の構造がまだよくわかっていないこと，合体にはいろいろな銀河の組合せがあり，その合体後の構造もよくわかっていないことなどを反映している。ここでは，主にガスリッチな円盤銀河どうしの合体銀河のみを扱う。合体銀河の形態の特徴としては (Schweizer, 1982), 1) 潮汐テイルがあること (細いテイルの存在は星の冷たい円盤成分に起因する事の証拠であると考えられている), 2) リップル (波紋) やシェル構造があること (これらの構造の起源としては楕円銀河と円盤銀河の衝突説がある), 3) 電波，赤外での 2 重中心核がある (合体前の銀河の中心核の残骸)，などがある。合体銀河の光度分布はドボークルールの経験則“ $r^{1/4}$ 則” ($I = I_0 \exp\{-a(r^{1/4}-1)\}$) に従い，潮汐テイル，リップを除くと明るい部分は楕円銀河とよく似た構造をしている。“ $r^{1/4}$ 則”の物理的解釈としては，牧野らにより，コア (中心部) は等温なので密度分布は r^{-2} ，ハローの密度分布は“激しい緩和”後は r^{-4} で，このふたつをつなぐと見かけ上 $r^{1/4}$ 則に従うと示唆されている。代表的な IRAS 銀河 ARP 220 では，近赤外ではじめて $r^{1/4}$ 則が成り立つことが示唆されている。

3. 野辺山ミリ波干渉計での IRAS 銀河の観測

合体過程，特にガス系の振舞い・進化を調べることが，爆発的星形成 (SB)，遠赤外放射の越源，AGN 活動性，そして銀河進化—ガスリッチ円盤銀河の合体はどういう銀河を生み出すか？ 円盤銀河 (SO, Sa) か楕円銀河 (ダ

* 国立天文台・野辺山 Ryohei Kawabe, Masato Ishiguro,
** 東大教養 Sachiko Okumura, *** 東大理学部天文センター Yoshiaki Taniguchi: Observations of IRAS Galaxies: Merging of Galaxies, Star Formation, and Evolution of Galaxies

ストレーンをとまらう?) か—などを考える上できわめて重要である。これらの問題を攻略するため、私たちは 88 年冬季より野辺山ミリ波干渉計を用いて一酸化炭素分子線 CO ($J=1-0$) をプローブとした合体銀河の分子ガスの構造・運動を調べるためのサーベイ観測を開始した。観測視野 $1'$ は距離 50 Mpc の天体でも 17 kpc に相当し、ほぼ銀河全体をおおうことができる。また空間分解能は $2''-4''$ 、距離 50 Mpc の天体で 500 pc-1 kpc に相当する。速度分解能は $40-50 \text{ km s}^{-1}$ である。観測天体は以下の選択基準によって、合体銀河の可能性の高いものを選択した。(1) $L_{\text{IR}} > 10^{11} L_{\odot}$ の高遠赤外光度をもつ銀河、(2) 明らかに通常の円盤銀河もしくは相互作用銀河でないもの(潮汐テイルのあるものは優先的に選択)。(3) CO 分子線がすでに検出されており、きわめてガスリッチであるもの ($M(\text{H}_2) \sim 1-3 \times 10^{10} M_{\odot}$)。これまでに NMA で観測された銀河は、名大の高橋、福井らによって観測された NGC 2623 も加えると、合計 8 個である(表 1)。これらの銀河の距離は 70-179 Mpc の範囲にある。

NMA での観測の主な結果は以上の通りである(Kawabe et al. 1990, Okumura et al. 1990)。1) Mrk 231 を除くほとんどの銀河で、分解能 $2''-5''$ で分子ガスの構造は分解された(70 Mpc の距離で $2''$ は 700 pc に相当)。2) 中心の直径 1 kpc の領域に分子ガスが集中しているもの(Mrk 231, Arp 220; グラビア写真 5-③) もあれば、直径 12 kpc まで広がっている例(NGC 828; グラビア写真 5-①) もあり、分布はさまざまである。3) ほとんどの銀河で分子ガスにシステマティックな速度構造があり、分子ガス分布も考慮すると、分子ガスは比較的コンパクトなガス円盤を形成していると考えられる。4) 分子ガスの表面密度、 $\sigma(\text{H}_2)$ 、は高いもので $10^4 M_{\odot}/\text{pc}^2$ 近くに達している。また $\sigma(\text{H}_2)$ は、遠赤外光度-分子ガス質量比、 $L_{\text{IR}}/M(\text{H}_2)$ (L_{IR} の起源が星形成中心であれば、いわゆる“星形成効率”の指標)と相関があることが明らかになった(図 1)。これは、分子ガスが中心部に詰まっているものほど“星形成効率”が高くなっていることを示している。

Arp 220 と NGC 828 についてももう少し詳しく結果を見て行く。Arp 220 では、約 $1''$ (約 400 pc) 離れた 2 重中心核が連続波電波、近赤外の観測で明らかにされている。我々の観測結果では、分子ガスはこの 2 重中心核を取り巻き、約 1 kpc の広がりを持っている(グラビア写真 5-①)。そして光学写真で見られるダストレーン方向に速度勾配があり、中心核円盤を形成していると考えられる。その質量は $4 \times 10^{10} M_{\odot}$ に達する。一方、NGC 828 では分子ガスの構造は十分分解され、ダストレーン方向に直径 12 kpc にわたってのびた構造をもち、対称

表 1

銀 河	種 類
Arp 220	Merger
NGC 6240	Merger
Mrk 231	Merger
NGC 6090	Merger
NGC 828	Merger
NGC 695	Merger? (1)
Mrk 331	Merger? (2)
NGC 2623	Merger? (3)

- (1) リング銀河。
 (2) 楕円状銀河。
 (3) 高橋(名大)他による観測。

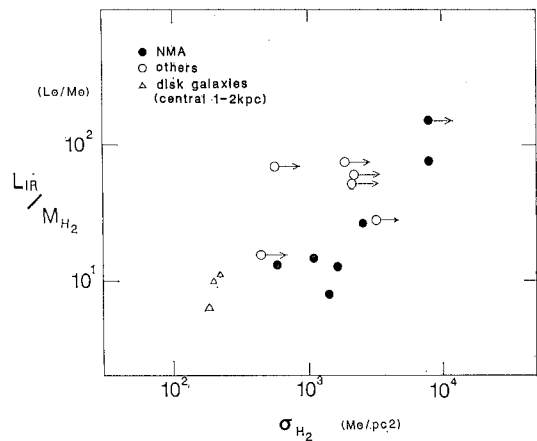


図 1 分子ガスの表面密度、 $\sigma(\text{H}_2)$ (M_{\odot}/pc^2) と遠赤外光度-分子ガス質量比、 $L_{\text{IR}}/M(\text{H}_2)$ (L_{\odot}/M_{\odot}) と相関。黒丸が NMA による結果、三角は、比較のためにプロットした分子ガスの中心集中を示す近傍銀河の中心部 1 kpc 以内での値。

的な速度場が存在する(グラビア写真 5-③)。このことは、マージ後のガス系(おもに分子ガス成分)はすでにほぼ緩和状態にあり、分子ガスは回転軸方向のよく決まった薄いガス円盤 ($M(\text{H}_2) \sim 2 \times 10^{10} M_{\odot}$) を形成していることを示している。この銀河では、星の顕著な円盤は見られず、ガスのみが円盤を形成している。光度分布はドボークルールの $M^{1/4}$ 則に従い、テイル構造、ダストレーンを除くと楕円銀河のような構造を示している。

$\sigma(\text{H}_2)$ と $L_{\text{IR}}/M(\text{H}_2)$ の相関の意味することはどういうことであろうか。ガスリッチな円盤銀河の合体によりガス系は頻りに“激しい”星間雲間衝突を繰り返し、その結果として緩和状態に落ち着き高密度大質量ガス円盤を形成するであろう。このガス円盤の大きさは、合体する円盤銀河の構造、合体の初期条件、そして合体過程に左右され、角運動量の多くを失い中心核にガスが落ち込んでしまう場合、またそれとは反対に角運動量の多くを

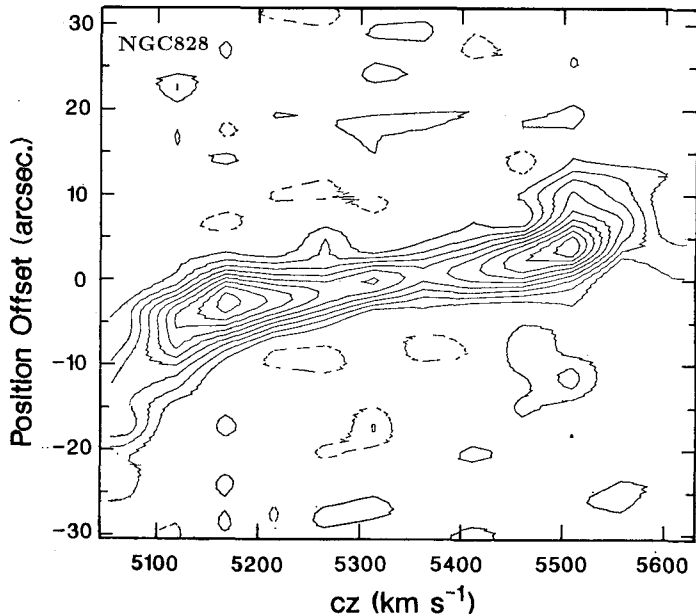


図 2 NGC 828 における CO ($J=1-0$) 輝線の回転曲線. 横軸は視線速度, 縦軸は銀河の中心からの位置 (1 秒約 400 pc).

保存し銀河スケールのガス円盤を形成する場合など様々な場合があるであろう。分子ガス質量がほぼ同じであれば、このガス円盤の大きさにより $\sigma(\text{H}_2)$ が決まり、ガスがより中心部に落下した場合、すなわち $\sigma(\text{H}_2)$ が大きい場合は中心核ガス円盤中での頻繁な星間雲間衝突が効率のよい活発な星形成 (爆発的星形成) をトリガーし、 $L_{\text{FIR}}/M(\text{H}_2)$ は大きくなる。この様に考えると、 $\sigma(\text{H}_2)$ と $L_{\text{FIR}}/M(\text{H}_2)$ の相関は、明るい IRAS 銀河の遠赤外光度の起源が星間雲間衝突による星形成によることを意味している。また、星間雲の衝突という観点に立つと、 L_{FIR} が大きい合体銀河、すなわち星間雲衝突が頻繁に起こりそれにより星形成が活発に起こっている銀河、ではガス系がほとんど緩和状態にあることは自然に理解できる。

これらの合体銀河の運命はどうなるのか。NGC 828 に見られるようなガス円盤が安定に存在すれば、活発な星形成により近いうちに (約 10^9 年) $3 \times 10^{10} M_{\odot}$ の程度の星の円盤が形成されるはずであり、この銀河はバルジの大きな円盤銀河 (SO, Sa) のように見えてくるかも知れない。この NGC 828 の観測結果は、ガスリッチな円盤銀河の合体による円盤銀河形成の可能性を示唆しており非常に興味深い。また、我々の結果から考えると、シュバイツァーがすでに指摘していることであるが、ハッブル系列は、合体によるバルジ成分の成長進化とガス系による円盤部の再形成によって起こる晩期型銀河から早期型銀河への進化の系列を表わす、という考え方も重要な意味を持っている。

今後の観測の課題としては、中性ガス系全体 (H_2 + HI 中性原子) の構造・進化を明らかにするために、

もっと多くの銀河の CO 干渉計観測を行い H_2 分子分布を統計的に調べることで、HI (中性原子) の高空間分解能観測をすることにより低密度ガスの分布を調べることが重要である。また、星の系を詳しく調べるために吸収の影響の少ない近赤外での観測、またエネルギー源が AGNs か星形成かを調べる上で、X線の観測などが重要である。

4. 最後 に

単に銀河の合体といっても、星とガス系の合体であり、種々の銀河の組合せがあり、その過程は複雑である、生み出される銀河は複雑怪奇、渦状銀河のような人を強く引きつけるような秀麗さはない。しかし、この合体銀河から銀河の進化・形態の謎を解くカギが得られ始めており、今後も、NMA の観測によりこの謎に迫ってきたい。また、将来的にはミリ波干渉計の性能—感度・分解能—を極め銀河形成問題へも駒を進めて行きたいと考えている。

References

- Kawabe et al., 1990, the 3rd Haystack Symposium, in press.
- Okumura et al., 1990, IAU Symp. No. 146, in press.
- Sanders et al., 1988, Ap. J., **328**, L35.
- Saneers et al., 1988, Ap. J., **325**, 74.
- Schweizer, 1982, Ap. J., **252**, 455.
- Soifer et al., A.R.A.A., 1987, **25**, 187.
- Toomre and Toomre, 1972, Ap. J., **178**, 623.