

銀河ダイナミクスによって引き起こされる 分子雲の進化

幸 田 仁

〈ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校 Department of Physics and
Astronomy, Stony Brook University, NY 11794-3800, USA〉
e-mail: jin.koda@stonybrook.edu

CARMA ミリ波干渉計と野辺山 45 m 電波望遠鏡によって行った、渦巻銀河 M51 の一酸化炭素 (CO) 輝線の観測について紹介する。銀河内部での星間ガスの進化について、標準的な描像を再考するきっかけを与えられればと思う。渦巻き腕を抜けた分子雲は、腕で生まれた星からのフィードバックによって破壊され、原子ガスとなってインターアーム空間に抜けていくと考えられている。しかし、この描像は M51 では重要ではなさそうだ。逆に、渦巻き腕密度波による分子雲の合体、および腕のシア運動による超巨大分子雲の“引きちぎり”が、分子ガスの進化を巻き起こしているように見える。星形成は分子雲の中で起きるため、母体となる分子雲の進化は星形成を理解するうえで欠かさない。銀河ダイナミクスに起因する星間物質の進化シナリオは、星形成の誘発機構を考えるうえでも、重要である。M51 で見られた、銀河ダイナミクスによって起こされる巨大分子雲の進化は、進行中の近傍銀河の CO サーベイでも、同様に見られる。

1. はじめに

この研究は、筆者がカリフォルニア工科大学に研究員として在籍したときから行っている研究である。CARMA ミリ波干渉計とは、カリフォルニア工科大学の OVRO 干渉計と、バークレー校・イリノイ大学・メリーランド大学所有の BIMA 干渉計の合計 15 台のアンテナを再利用した合成干渉計で、カリフォルニア州にある。筆者は OVRO 干渉計時代から CARMA 干渉計運用初期にわたってカリフォルニア工科大学に在籍し、CARMA 観測所の建設チームの一員であった。

渦巻き銀河 M51 の観測は、観測所キーププロジェクトとして、初期運用フェーズの 1 年以上の歳月にわたり、ほくほくした気持ちで行った。後で説明するように、干渉計データを補う単一鏡データもこの観測に不可欠であり、ミリ波観測装

置として世界最大の野辺山 45 m 電波望遠鏡が活躍した。CARMA 干渉計、野辺山 45 m 鏡による M51 の分子ガス観測とその成果について、ここでは紹介したい。

2. 巨大分子雲とその進化

2.1 巨大分子雲

オリオン座大星雲などに代表される星の形成は、巨大分子雲と呼ばれる高密度の分子ガスの塊の中で起きている。巨大分子雲は太陽の 10 万から 100 万倍もの質量をもち、天の川銀河には数千個が存在する。平均的な巨大分子雲の質量は、太陽質量の 40 万倍である。大質量の星形成はほぼ例外なく巨大分子雲で起きているため、星の形成の研究には、その母体となる巨大分子雲の形成や進化、内部構造の理解が欠かさない。巨大分子雲は自己重力と、内部運動（おそらく乱流運動と思

われている)による圧力の釣り合いによって構造を支えている。また、その巨大な質量にもかかわらず、実際に星になる質量は、全体の数%からせいぜい10%程度と非常に低く、どのように大量の高密度ガスを“星形成しない”状態に保つことができるのか、まだ理解されていない。

天の川銀河で最大の巨大分子雲は約100万太陽質量のものだが、銀河系外の渦巻銀河M51には、1,000万から1億太陽質量にも及ぶ特別に大きな巨大分子雲も観測されており、巨大分子群とも呼ばれている^{2),3)}。密度の低い領域では星からの紫外線によって分子が壊されてしまうため、分子ガスの観測によく使われる一酸化炭素(CO)ガスが検出された場合、それは分子雲の中に存在すると考えて良い。

銀河系の太陽系半径より内側の領域では、分子ガスは全ガス質量の約半分以上を占めており、ほとんどが巨大分子雲の中に含まれている。そのため、巨大分子雲の進化は、星形成に重要なだけでなく、銀河の中で星間物質がどのように進化するかを理解するうえでも、とても重要である。その意味では、銀河の中で星間ガス進化の標準的なモデルと、分子雲研究の現状に矛盾があるので、まずその点について説明する。

2.2 星間ガス進化の標準モデル

星間ガスが銀河回転の中でどのように進化するか、というのは基本的な問題である。教科書には一応の描像が書かれている⁴⁾。図1は、渦巻き腕を通過するガスの相の進化のイラストである。この描像では、まず原子ガスが渦巻き腕の間(インターアーム空間)に存在する。この原子ガスは渦巻き腕の密度波によって圧縮され、高密度になって、分子雲が形成される。分子雲の形成とともに、その内部では星形成が始まる。生まれたての大質量の星は、分子ガスを破壊する紫外線を放射し、超新星爆発を起こすため、親となる分子雲はすぐに壊される。分子雲とともに分子ガスも破壊され、渦巻き腕を出たガスは原子ガスとなって、

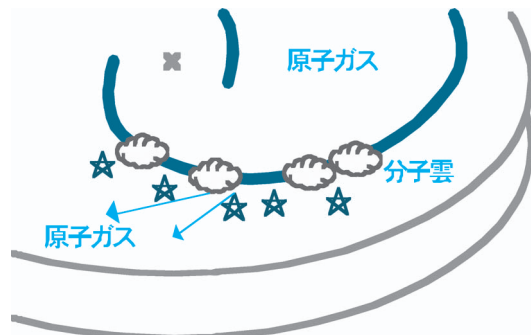


図1 標準的な星間ガスの進化の描像。インターアームでは原子ガスとして存在する星間ガスは、渦巻き腕の圧縮により巨大分子雲となる。巨大分子雲の中では星形成が起り、星からのフィードバック(紫外線, 超新星爆発)によって分子雲は破壊される。壊された分子雲は、原子ガスとしてインターアーム空間に放出される。

インターアーム空間に戻る。

本稿では、この標準モデルに疑問を投げかけるが、まずはこのモデルの根拠について見ておこう。観測的には、一つの直接的な証拠と、いくつかの間接的な証拠が提案されている。

直接的な証拠とされるのは、これまでの高分解能のミリ波干渉計による系外銀河の観測において、渦巻き腕には分子ガスの存在を示すCO輝線が検出されるが、インターアーム領域にほとんどCO輝線が観測されていないという点である^{5),6)}。干渉計を用いた観測についてはデータ解析上、いくつかの問題が残されており、それについては後で述べる。しかしとにかく、分子ガスがインターアームに検出されないという直接的な結果は、渦巻き腕を通過後、分子ガスおよび分子雲がすぐに破壊されるということを示唆するように見える。

間接的な証拠はいくつかある。まず、近傍の分子雲の中にある生まれたての星の年齢の問題がある。もしも分子雲の長い寿命にわたって星形成がいつでも起きていたとすると、現在の分子雲の中には、さまざまな年齢の星があると予想できる。しかし観測的には、数百万年程度の若い星しか

いように見える。これは逆に言えば、分子雲の寿命が非常に短く、100万年程度である、と解釈すればわかりやすい⁷⁾。渦巻き腕を通過後、インターアームに分子ガスが消えるとすれば、短い分子雲の寿命を説明しやすい。

次に、分子雲内部のガス運動が超音速である、という事実がある。超音速のガス運動を長期間にわたって保つことは、簡単ではない。特に分子雲では放射冷却が非常に効率的に働く。超音速のガス運動エネルギーは放射によってすぐに散逸されてしまうことが知られている^{8),9)}。散逸にかかる典型的なタイムスケールは100万年程度と短い。そのため分子雲の寿命が100万年以下でない限り、何らかの形でエネルギーを外から供給し続けなければ、超音速運動は説明できない。しかしエネルギーを供給する効率的なメカニズムについては知られておらず、分子雲の寿命は短いとすると、説明しやすくなる。

さらなる傍証は、天の川銀河内部において、大質量星の周りの分子ガスが、紫外線によって光分解されたり、超新星爆発によって部分的に壊されている様子が観測される点である¹⁰⁾。また、銀河系外の渦巻き銀河では、大質量星の形成領域を示す水素の電離輝線(H α 輝線)が、渦巻き腕の下流側に集中して分布しており、渦巻き腕の内部で起きた星形成が、その母体となる分子雲を十分に破壊できるような印象を受ける。これらは、具体的にどの程度の分子ガスが壊されるのかなど、定量的な議論を伴うものではないが、写真から受ける視覚的な印象が、標準モデルに寄与するところは大きい。

つまり標準的なモデルでは、渦巻き腕では分子ガス、インターアームでは原子ガスと、比較的短時間でガスの相が進化するのである。

2.3 巨大分子雲の寿命問題と進化

上記のような星間ガス進化の標準と思われているモデルがあるにもかかわらず、星間ガスの最重要要素の一つである巨大分子雲の進化について

は、1980年代から議論が続いており、大筋についての合意も得られていない。例えば分子雲の寿命は、100万年程度という、その巨大な質量から考えると極端に短い説があるのに対し⁷⁾、1億年以上という、非常に長い寿命を唱える学説まで¹¹⁾、さまざまである。この寿命の違いは、巨大分子雲の構造や進化だけでなく、星の形成を理解するうえでも非常に大きい。

例えば寿命が非常に長い場合を考えてみる。銀河回転の典型的なタイムスケールは1億年である。もしも巨大分子雲の寿命が1億年を超えるならば、分子雲は銀河回転に従って銀河円盤の中を運動する。これが正しければ、標準モデルのいう、渦巻き腕通過後の分子雲破壊、とは相反する。この場合、巨大分子雲同士の衝突なども起きる可能性があり、それこそが星形成を誘発する原因となりうる。分子雲の衝突がないと星形成が誘発されないとすれば、ほとんどの分子雲で星形成率が非常に低い理由の説明にもなる。また、銀河衝突の際には分子雲衝突の頻度が増すため、衝突銀河の爆発的星形成の説明としても使われる。

逆に、寿命が非常に短い場合を考えてみる。例えば巨大分子雲が、星間ガスの重力収縮によって作られるとする。平均的な密度の星間ガスから重力崩壊が始まる場合、収縮にかかる典型的な時間(自由落下時間)は1,000万年程度である。もしも分子雲の寿命が100万年程度ならば、分子雲は形成すると同時に破壊される、ということになる。銀河回転との関係という意味では、分子雲は銀河の内部をほとんど動かないうちに、破壊されてしまう。破壊の原因はおそらく超新星爆発など、星からのフィードバック過程であり、分子雲全体の重力崩壊による圧縮で、星形成が始まると考えるのが自然だろう。

巨大分子雲の寿命によって、星間ガスの進化モデル、星形成を誘発するメカニズムは、変わってくるのである。

3. CARMA ミリ波干渉計と野辺山 45 m 電波望遠鏡による観測

上で述べたように、星間物質の標準的なモデルでは、渦巻き腕を通過直後に分子雲がほぼ 100% 破壊されるとされているにもかかわらず、分子雲の寿命についてはまだ議論が終わっていない。もしも寿命が長い場合、分子雲は渦巻き腕を通過後も生き延びて、インターアーム領域にも存在するはずで、標準モデルとは相容れない。

ところで、インターアームに分子雲が検出されなかった、というミリ波干渉計から得られた分子雲破壊の「直接的な証拠」について、干渉計をよく知った学者たちの間ではすぐに受け入れにくい事情がある。例えば、かつて OVRO 干渉計による

M51 の観測でくっきりと見つかった「第三の分子ガス渦巻き腕」が¹²⁾、その後の BIMA 干渉計の観測では消えた¹³⁾、という事実がある。新しく建設された CARMA 望遠鏡で、分子雲の進化と、星間ガス進化の標準的なモデルとの相違に、切り込みたいと思った。

3.1 これまでと反する結果

この問題に決着をつけるには、巨大分子雲の一つ一つを検出する高分解能観測が直接的である。特に、渦巻き腕などの銀河の構造と、分子雲の進化の関係を理解するためには、近傍銀河の観測が不可欠である。筆者らは近傍の渦巻き銀河である M51 の分子ガスを、CARMA ミリ波干渉計、および野辺山 45 m 望遠鏡で観測した。最も存在量の多い水素分子は低温では放射をしないため、分子ガス観測によく使われる、CO ガス輝線の観測を行った。

図 2 は CARMA ミリ波干渉計と、野辺山 45 m 望遠鏡のデータを合成した、新しい M51 の CO 輝線分布である。これまでの観測結果に反して、インターアームにも CO 輝線を検出した。さらに、中性水素 21 cm 輝線のデータと比較することで、全ガス質量に対する分子ガスの存在比を計算してみた(図 3)。その結果、標準モデルで予想された、渦巻き腕通過後の分子ガスから原子ガスへの相変化は起こっていない。また、分子ガスの比率は渦巻き腕でもインターアーム領域でも、動径方向にほとんど変わらず、非常に高い値を保つ、ということがわかった。

つまり、教科書にある星間ガスの標準進化モデルとは違い、渦巻き腕を通過した後も、ガスは原子ガスになるだけでなく、分子ガスとして存在することを示している。またこの観測では、通過したあとの分子ガスは分子雲として、インターアームに確認にされた。「生まれたばかりの星によって分子雲は壊される」という従来の説とは違い、分子雲はインターアーム領域へと流れていくわけである。標準モデルを見直す必要があるようだ。

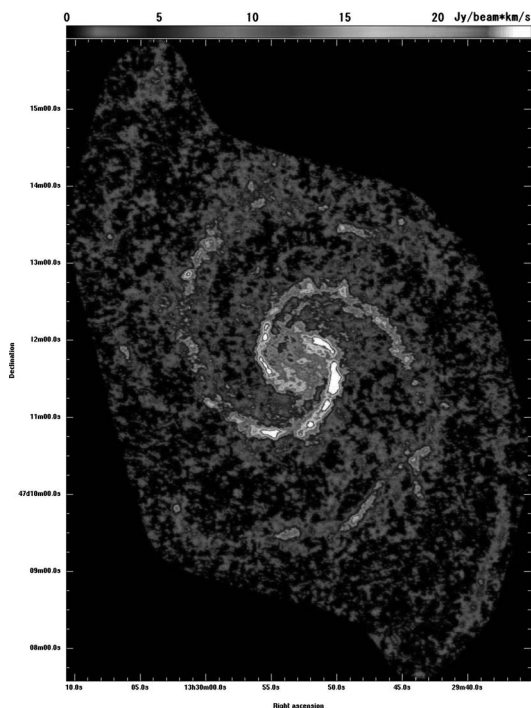


図 2 新しい M51 の分子ガスマップ。CARMA ミリ波干渉計と野辺山 45m 電波望遠鏡による一酸化炭素 (CO) 輝線の観測による。渦巻き腕 (アーム) だけでなく、腕と腕の間 (インターアーム) 領域にも複数の巨大分子雲が見つかった。

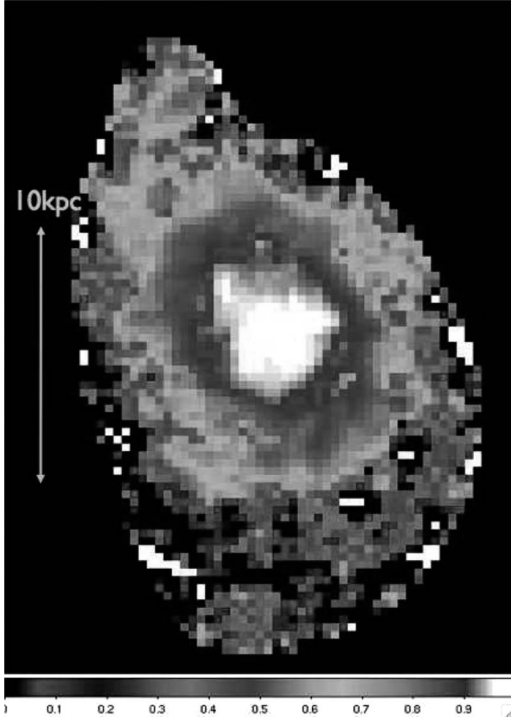


図3 分子ガスの存在比。全ガス面密度に対する、分子ガス密度の占める割合。中心の10 kpc程度の領域で、分子ガス存在比は非常に高く、70-80%以上が分子ガスとして存在する。

3.2 干渉計による観測の基礎と問題点、その克服

ところで、最新の結果と昔の結果が、どうしてここまで正反対に違いえるのだろうか？ ここで電波干渉計によるイメージング観測について、基礎的なことを説明したい。

電波干渉計はいくつものアンテナをケーブルでつなげたもので、天体画像のフーリエ成分が観測によって得られるデータとなる。例えば二つのアンテナを使った場合、ある瞬間に二つのアンテナが受けるシグナルの積は、天体画像のフーリエ変換の1成分となる。観測できるフーリエ成分の波数は、アンテナ間の距離で決まる。天体の画像を再現するためには当然、すべてのフーリエ成分が必要になる。すべてのフーリエ成分を得ることができれば、それらをフーリエ変換したものが、天

体の画像ということになる。

つまり、“多くのフーリエ成分を集める”というのが、電波干渉計によるイメージ観測の鍵になる。しかし現実にすべてのフーリエ成分を得るのは簡単ではない。得られるフーリエ成分の数を増やすため、一般に三つの方法を用いる。

まず一つめは、アンテナを物理的に動かすことである。フーリエ成分の波数はアンテナ間の距離で決まるから、アンテナを動かして距離を変えれば、多くのフーリエ成分が得られる。この方法はほとんどすべての電波干渉計で使われているが、アンテナを動かすたびにさまざまな校正や調整が必要となって、時間と労力が莫大なため、飛躍的にフーリエ成分の数を増やすというわけにはいかない。

二つめは、シンセシスと呼ばれる方法である。アンテナは、地球の自転とともに回転している。この動きを観測している天体のほうから見下ろすと、アンテナの位置関係は時々刻々と変わる(図4)。つまり1日中同じ天体を観測すると、地球の自転によって多くのフーリエ成分が得られることになる。一般的に、電波干渉計の観測では、これら二つの方法を使ってフーリエ成分の数を増やす。

三つめは、アンテナの数を増やすことである。一つのアンテナペア(二つのアンテナ)から、ある瞬間に得られるフーリエ成分は一つだけである。アンテナの数を三つに増やせば、三通りのアンテナペアが考えられるから、三つのフーリエ成分を得ることができる。アンテナの数を N 台に増やせば、 $N(N-1)/2$ 個のフーリエ成分を同時に得ることができる。野辺山ミリ波干渉計は6台のアンテナでできていたので、15個のフーリエ成分が得られたことになる。CARMA干渉計には15台のアンテナがあるので、105個のフーリエ成分を得ることができる。これまでの干渉計に比べ、画像の質は飛躍的に向上した。

最新の干渉計であるCARMAやALMAでは、アンテナの数を増やすことでフーリエ成分の数を

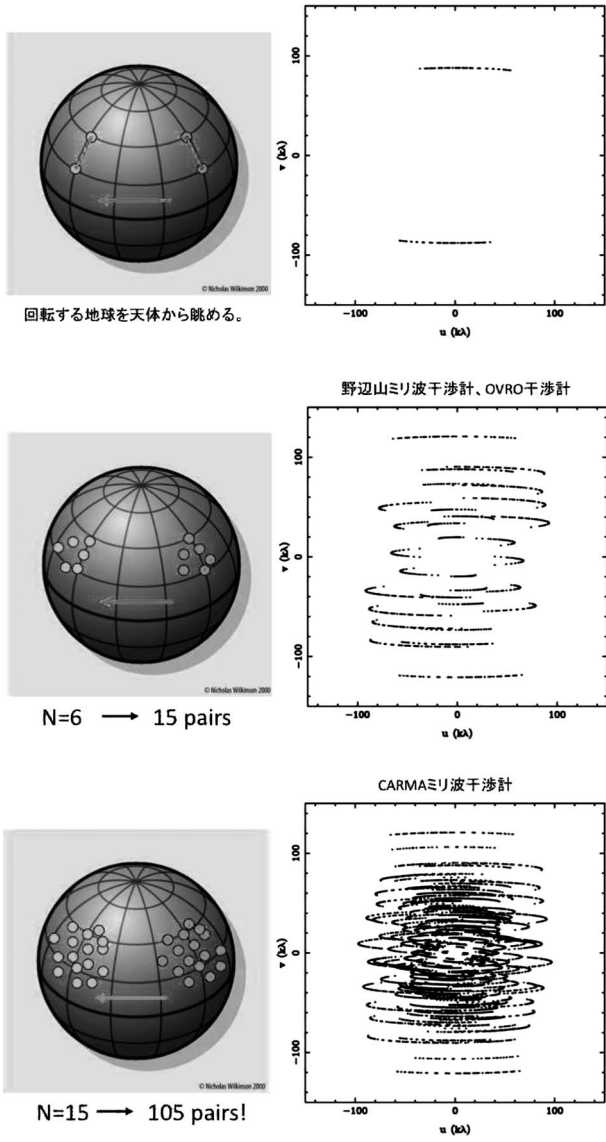


図4 干渉計で得られるフーリエ成分の増やし方. 左の図: 地球回転によるアンテナ配置の回転の模式図. 地球回転を利用することにより, 時々刻々と, アンテナ相互の位置関係が変わる. この効果を使うことにより, 得られるフーリエ成分の数を増やすことができる. 右の図: 2次元フーリエ空間の中での, データの埋まり具合. 上から下へ: アンテナの数を増やすことにより, 干渉計で得られるフーリエ成分の数を増やすことができ, フーリエ空間を埋めることができる. これら二つの方法のほかに, アンテナを物理的に動かしてフーリエ成分の数を増やすことも行われる.

飛躍的に増やしている. その上でさらに, アンテナ移動やシンセシス技術を使って, フーリエ空間のほぼ全体を, データ点で埋めることができるわけである.

逆に言うと, これまでのミリ波干渉計にはたか

だか6台程度のアンテナしかなかった. そのため, 得られるフーリエ成分の数も限られており, フーリエ空間を十分に埋めることができなかった. 得られていないフーリエ成分については, 言わば“情報がない”わけで, フーリエ変換によ

て天体画像を再現する際には何らかの推測を行う必要があった。それでも、最適な推測を行うための合理的な方法も提案されていて、干渉計はさまざまな成果を上げてきた。しかし輝線強度の取りうる量の幅が大きく（または「最大値と最小値の比」）、構造が複雑な場合（例えば、輝線強度の強い渦巻き腕のすぐ横に、強度弱いインターアーム領域があるような場合）を研究するとき、これまでのミリ波干渉計はほとんど無力であった。

教科書にも書かれている標準的な星間ガス進化モデルには、一つだけ直接的な証拠があった。インターアームに分子雲が検出されなかった点である。しかしこの証拠は、これまでの干渉計観測が、インターアームの輝線強度の分布を正確に観測できなかったことによる、まやかしの結果だったのである。

3.3 野辺山 45 m 鏡データとの合成

筆者らの観測には重要な点がもう一つある。野辺山 45 m 望遠鏡の観測によって、干渉計では本質的に得ることができない輝線強度を、加えることができた点である。

上で述べたように、干渉計は二つ以上のアンテナを合成することでフーリエ成分を得る。二つのアンテナの距離が、フーリエ成分の波数を決める。しかし、アンテナの物理的なサイズのため、そのサイズより小さい距離に対応するフーリエ成分は得ることができない。これはつまり、広がった天体の放射の分布は、干渉計では観測できない、ということになる。これを補って、短いアンテナ距離のフーリエ成分を埋めるのが、野辺山 45 m 鏡による観測である。

野辺山 45 m 鏡の観測は、放射強度を測るという点でも不可欠である。これまで、干渉計はフーリエ成分を集める装置である、ということの説明してきた。しかし、フーリエ成分は正弦曲線など、プラス・マイナスに振れる波なので、広い空間で積分すると（平均すると）、合計はゼロになってしまう。つまり干渉計として合成される放射の強度

はいつもゼロである。天体の放射強度の情報をもっているのは、アンテナ距離がゼロの成分、つまりフーリエ成分の中ではゼロ次の項なのである。この“ゼロベースライン成分”を与えるのが、野辺山 45 m 鏡である。つまり単一鏡の観測がないと、放射の強度を正確に測ることができない。

CARMA 干渉計による高分解能の達成と、野辺山 45m 鏡による広がった構造と放射強度の測定が、筆者らの大きな成果となった。

4. 銀河面全域に広がる分子雲の分布

CARMA と野辺山 45 m 鏡による観測では、M51 の銀河面全面にわたって、典型的な質量をもつ巨大分子雲の検出に初めて成功した。得られた分子雲の分布が、図 5 である。ここで気づくのは、次の 2 点である。

まず一点目は、渦巻き腕、インターアーム領域にかかわらず、銀河円盤のほとんどの場所に、典型的

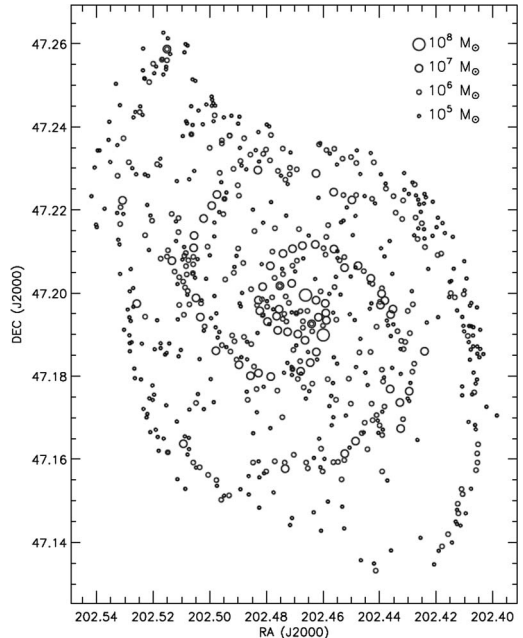


図 5 巨大分子雲の分布。質量毎に丸印の大きさを変えてある。巨大分子群はアーム上にもみ発見される。巨大分子雲はインターアーム空間にも多数発見された。

な質量の巨大分子雲が存在する。これらの巨大分子雲はどこで生まれたのだろうか。インターアーム領域は一般に密度が低いため、そこで巨大分子雲を形成するのは非常に難しい。特に、典型的な巨大分子雲の質量（40万太陽質量）ものガスを、そう簡単に1カ所に集めて分子雲を作ることはできない。そのため、これらの分子雲は少なくとも近傍の渦巻き腕の中で生まれ、そこから銀河回転に沿って流れ出てきたと考えざるをえない。

具体的に計算してみよう。非常に理想的な球対称ガス降着によって巨大分子雲を作る場合を考える。流れの速さは観測される速度の上限を超えることはできないから、せいぜい10 km/sである。平均的密度のガス（数粒子/cc程度）が外側において、半径10 p程度の領域（分子雲の体積程度の領域）に質量降着が起きるとする。40万太陽質量がこの体積の中に流れ入るには、10億年近くかかる。これは銀河回転タイムスケールよりも長い。つまり、分子雲形成に必要な時間は、ガスがインターアーム領域を通り抜ける時間よりもかなり長い。巨大分子雲を瞬間的に作って瞬間的に壊すという、短い寿命の考え方では、インターアームの巨大分子雲を説明できないのである。巨大分子雲の寿命が長く、渦巻き腕からインターアーム領域を通り抜けて、次の渦巻き腕へと流れていくと考えるほうが、自然なのである。

図5で重要な二つ目の点は、1,000万太陽質量を超えるような、超巨大な分子雲（あるいは巨大分子群）は、渦巻き腕にしか存在しない、ということである。つまり、巨大分子群は、渦巻き腕上で作られ、渦巻き腕を流れ抜けると同時に壊れてしまう。巨大分子群が壊されるといっても、標準モデルが言うように、星からの放射や超新星爆発によって壊滅的に壊されて原子ガスになるわけではない。図3で見たように、渦巻き腕を出た後も分子ガスの存在比は高いため、壊れた巨大分子群は原子ガスではなく、分子ガスとして残り、おそらくは分子雲としてインターアームへと流れ出す

のである。

5. 銀河ダイナミクスに起因する星間ガスの進化モデル

今回の観測から、星間ガスの進化モデルについては、再考の必要がありそうだ。実は筆者は本観測の前に、和田桂一氏（鹿児島大学）とともに、今回の観測結果を説明できる数値計算モデルを提案していた¹⁴⁾。この数値計算モデルと、新しい観測から得られた描像について、ここでは説明しよう。

5.1 数値計算モデルによる予想

筆者らの数値計算のきっかけとなったのは、当時まだ新しかったハッブル宇宙望遠鏡の渦巻き銀河M51の画像であった¹⁵⁾。画像には、星間ダストによって吸収されたダストレーンと呼ばれる線状の構造が多数写っている。渦巻き腕に沿って見られるダストレーンは以前からよく知られていて、渦巻き腕上の密度波によって集まった、密度の高い星間物質の分布を表すと考えられている。ハッブル望遠鏡の画像はさらに、インターアーム領域についても、高密度の星間物質による吸収を鮮明に映し出した。そこには、渦巻き腕から垂直方向に線状（フィラメント状）に伸びた、多数のダストレーンが写っていた。これらダストレーンは、後にスピッツァー望遠鏡による8ミクロンの画像で、さらに鮮明に輝線として写し出された¹⁶⁾。

筆者らはこのフィラメント構造の起源が、渦巻き腕上のガス構造の不安定性によるものと解釈した。渦巻き腕の重力ポテンシャルの中でのガス運動を数値シミュレーションすると、渦巻き腕上で流体力学的な不安定性が成長し、非常に質量の大きいガスの塊が作られる。このガス塊は上記の観測で明らかになった巨大分子群に非常に似ている。しかしこのガス塊は、腕上でできる速度勾配（シア）によって引きちぎられる。シア速度勾配はガス塊を一方方向にだけ引き伸ばすから、腕を通り抜けた後のインターアーム領域では、フィラメント状の構造を作る。数値シミュレーションを見ると、フィラメント

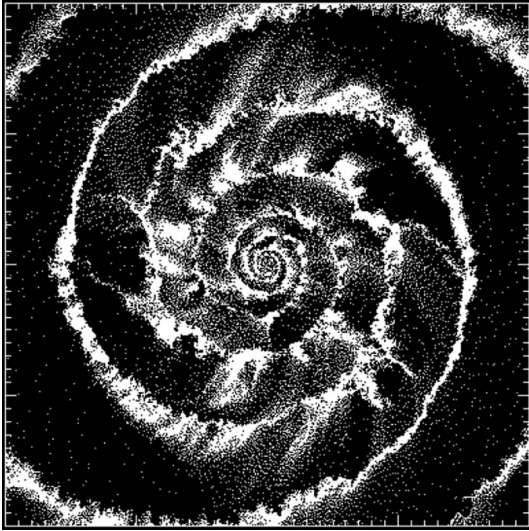


図6 渦巻き腕上での流体の不安定性の成長。数値シミュレーションからの1コマ。ハッブル望遠鏡によるダストレーンの観測、スピッツァー望遠鏡による観測で見られる、インターアーム領域の線状構造（フィラメント構造）が再現された。腕上でできた質量の高いガス塊（巨大分子群）が引きちぎられて、インターアームに伸びていったのがスパーク構造である。

構造は鮮やかに再現されている。

5.2 新しい星間ガス進化モデル

筆者らの新しい観測結果と、数値シミュレーションの結果を合わせて考えると、以下のような新しい星間ガスの進化の描像を描くことができる。まず、銀河回転に沿ってガスが渦巻き腕に入り込む前の、インターアーム領域には、すでに巨大分子雲が存在している。これら巨大分子雲は、渦巻き腕の密度波によってかき集められ、合体して、巨大分子群を渦巻き腕上に作る。これら分子群は、自己重力で自らを束縛せず、おそらくは渦巻き腕上のシア運動によって引きちぎられ、インターアーム空間へと吐き出される。引きちぎられた分子ガスは、より小さな分子雲の連なる鎖のような構造（フィラメント構造）となって、インターアーム領域に現れる。

CARMA と野辺山 45 m 鏡による観測では、分

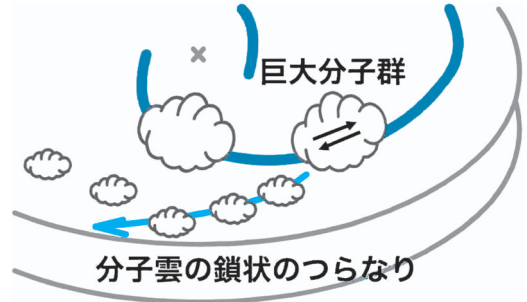


図7 新しく提案している星間ガスの進化モデル。ガスはインターアーム領域でも巨大分子雲として存在し、アームの疎密波によって集められた巨大分子雲が、巨大分子群を形成する。巨大分子群は自己重力では束縛されず、アームのシア運動によって引きちぎられる。引きちぎられた巨大分子群はインターアームに直線状に伸び、スパーク構造を作る。スパーク構造は巨大分子雲のつらなる“鎖”である。

子ガスの速度構造も解析できる。渦巻き腕のシア速度勾配によって巨大分子群が引きちぎられる時間と、自己重力崩壊するのにかかる時間を比較すると、ほぼ同じ程度となった。これは強い制限とは言えないが、渦巻き腕のシア運動が自己重力に打ち勝って、巨大分子群を引きちぎる可能性もありそうである。

標準モデルにあるような、星からのフィードバックによる分子雲の破壊は壊滅的で、分子ガスも壊して原子ガスにしてしまう。しかし、シア運動による破壊ならば分子ガスまで破壊することではなく、インターアーム領域でも分子ガスの存在比が高い、という観測事実を説明しやすい。

最新の CARMA ミリ波干渉計と野辺山 45 m 望遠鏡、および数値シミュレーションを組み合わせることで、星間物質進化、分子雲の進化の新しい描像が明らかになった。

6. 新しい銀河分子ガスサーベイ

もちろん、これですべての問題が解決したわけではない。特に、巨大分子雲の内部に若い星が見つからないという観測結果や、分子雲内部の超音

速のガス運動の起源については、さらに考察の必要がある。最近の観測では、若い星だけでなく、比較的年齢の高い星も見つかったという報告も出てきていて、この分野の研究者の間で合意に向かうのか、待ちたいところである。

これまでの議論は、M51 という一つの銀河について進めた。筆者は以前、天の川銀河についても同様の星間ガス進化を発見したことがあるが¹⁷⁾、天の川銀河では渦巻き腕の位置を特定するのが難しいため、最終的な決め手に欠けていた。さらに他の銀河でも同様の星間ガス進化が見られるかどうか、現在は新しい銀河分子ガスのサーベイ観測を、CARMA と野辺山 45 m 望遠鏡を使って行っている。まだ解析の途中ではあるが、多くの銀河で、同様の星間物質の進化が観測されている。

このサーベイは国際共同プロジェクトであり、昨年観測を始めた Herschel 宇宙望遠鏡による近傍銀河 KINGFISH サーベイ (Key Insights on Nearby Galaxies: A Far-Infrared Survey with Herschel) と連携している。われわれの分子ガスサーベイのすべての銀河が、Herschel 望遠鏡サーベイにより遠赤

外線でも観測されることになっている。また、Spitzer 望遠鏡による SINGS サーベイ (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey) により、中間赤外線でも観測されている。星間ガスとダスト、それから星形成の研究において、重要なデータセットができる予定である。

日本の若手研究者も多く活躍してくれている。その筆頭となるのは、東大大学院の福原将之君、百瀬莉恵子さんと、600 時間にも及ぶ野辺山 45 m 鏡での観測をやり遂げ、現在は星形成率の解析をするなど、着々と研究を進めている。それからカリフォルニア工科大学でオフィスを共にした江草 芙実さんは、このサーベイのデータを使った密度理論の検証を行っている。ALMA 干渉計の初期観測を前に、とても頼もしい。野辺山 45 m 望遠鏡による観測では、OTF マッピングモードという新しい観測モードを立ち上げた澤田剛士氏 (ALMA 観測所) にも、共同研究者として参加してもらった。澤田氏とは、CARMA 干渉計データと 45 m 鏡データを合成する方法を考える際にも、さまざまな議論をさせてもらい、深い洞察の

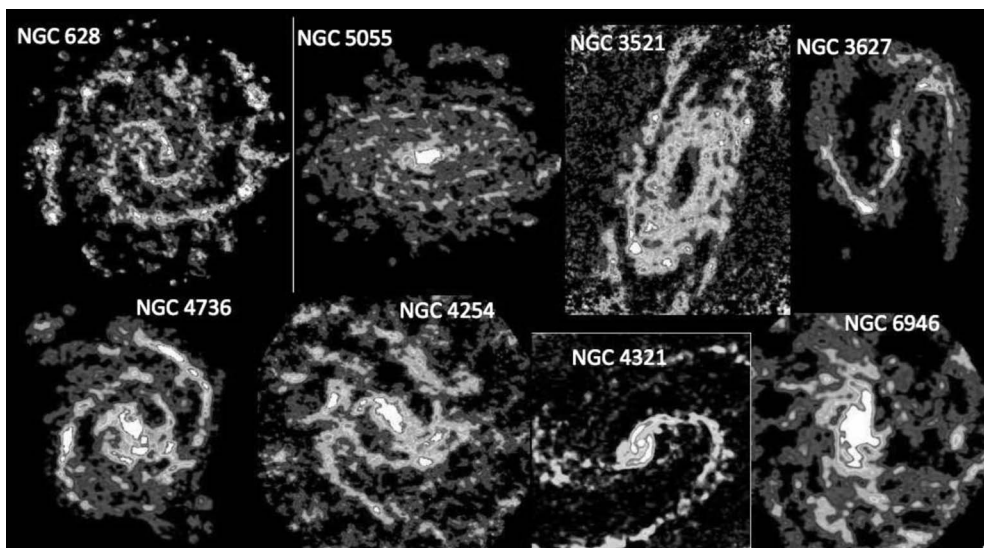


図 8 進行中の CARMA 干渉計、野辺山 45 m 望遠鏡による CO サーベイから、いくつかの銀河の分子ガスマップ。これまでのところ、M51 で見られた星間ガスの進化と同様の進化が、他の銀河にも起きているように見える。

あるアドバイスに助けられることが多くあった。

7. おわりに

この原稿では、CARMA ミリ波干渉計、野辺山 45 m 望遠鏡による近傍銀河 M51 の分子ガスの観測について紹介した。新しい望遠鏡と新しい技術による新しい観測で、これまでの星間ガス進化の描像を改めようとしている。それに続く近傍銀河の分子ガスサーベイで、この結果の普遍性を確かめようとしているところである。CARMA 干渉計は、運用の近づく ALMA 望遠鏡の、言わばプロトタイプとも言える望遠鏡である。建設から運用にかけて汗を流したものとして、そこから一定の成果が得られたことは、とてもうれしい。

日本が建設している ALMA コンパクトアレイの大切さは、世界ではまだそれほど認識されていないように思う。しかし今回の観測では、CARMA ミリ波干渉計と野辺山 45 m 望遠鏡の短い基線のデータとの合成が、科学的結果に結びつく鍵となった。ALMA コンパクトアレイの大きさが身にしみてわかった。特に、大きな構造（銀河の構造）と小さな構造（巨大分子雲）の相互作用が重要になる場合には、ALMA コンパクトアレイが大きく活躍すると思う。銀河以外にも、例えば銀河系分子雲内部で起こる星形成コアや、星からのアウトフローが及ぼす周辺ガスへの影響、それによる乱流の生成、星形成など、さまざまな応用が考えられる。ALMA コンパクトアレイの重要性については実際の運用が始まると、より広く理解され、より高く評価されることと思う。ALMA による観測の開始も、ほんとうにすぐそこに迫っている。ALMA による、どれほどの発見が待っているのか、とても楽しみである。

参考文献

- 1) Enoch M. L., et al., 2006, *Astrophys. J.* 638, p. 293
- 2) Kuno N., et al., 1995, *PASJ* 47, 745
- 3) Vogel S. N., Kulkarni S. R., Scoville N. Z., 1988, *Nature* 334, 402

- 4) Combes F., et al., 1995, "Galaxies and Cosmology," Vol. XVI, 407 pp. (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.)
- 5) Rand R. J., Kulkarni S. R., 1990, *Astrophys. J.* 349, L43
- 6) Rand R. J., Kulkarni S. R., Rice W., 1992, *Astrophys. J.* 390, 66
- 7) Hartmann L., Ballesteros-Paredes J., Bergin E. A., 2001, *Astrophys. J.* 562, 852
- 8) Goldreich P., Kwan J., 1974, *Astrophys. J.* 189, 441
- 9) Mac Low M.-M., Klessen R. S., 2004, *Rev. Mod. Phys.* 76, 125
- 10) Tachihara K., et al., 2001, *PASJ* 53, 1081
- 11) Scoville N. Z., Wilson C. D., 2004, *Molecular Gas forming Massive Star Clusters and Starbursts. in The Formation and Evolution of Massive Young Star Clusters.*
- 12) Aalto S., et al., 1999, *Astrophys. J.* 522, 165
- 13) Helfer T. T., et al., 2003, *Astrophys. J. (Suppl. Ser.,* 145), 259
- 14) Wada K., Koda J., 2004, *MNRAS* 349, 270
- 15) Scoville N. Z., 2001, *Astron. J.*, 122, 3017
- 16) Calzetti D., et al., 2005, *Astrophys. J.* 633, 871
- 17) Koda J., et al., 2006, *Astrophys. J.* 638, 191

CO(1-0) Observations of the Whirlpool Galaxy M51: New Scenario of Interstellar Gas Evolution in Galaxies

Jin KODA

Department of Physics and Astronomy, Stony Brook University, Stony Brook, NY 11794-3800, USA

Abstract: I present the CO($J=1-0$) observations of the Whirlpool Galaxy M51 using the Combined Array for Research in Millimeter Astronomy (CARMA) and the Nobeyama 45m telescope (NRO45). The new observations reveal the evolution of giant molecular clouds (GMCs) in large-scale galactic structure and dynamics. Most massive GMCs (Giant Molecular Associations GMAs) are assembled and then broken up as gas flow through spiral arms. The GMAs and their H₂ molecules are not fully dissociated into atomic gas as predicted in popular stellar feedback scenarios, but are fragmented into smaller GMCs upon leaving the spiral arms. I argue that the evolution of GMCs is driven by large-scale galactic dynamics, and not by stellar feedback. The new CO image is the harbinger of the millimeter-wave images that will become standard in the next decade with CARMA and NRO45, and Atalama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA).