

# おとめ座銀河団の CO 輝線サーベイ ——野辺山から ALMA へ——

祖父江 義 明

〈東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: sofue@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

銀河の骨格となる質量分布は、銀河研究の根幹である。それは銀河の回転を調べることで知ることができる。野辺山のミリ波干渉計で波長 2.6 mm の CO 分子線のドップラー効果を観測して、高分解、高感度で、銀河回転曲線を調べるプロジェクトが完了した。おとめ座銀河団の銀河 14 個が観測され、どの銀河の中心部にも半径 100 pc 以内に 10 億太陽質量の大質量コアが存在することが明らかとなった。また 6 個の銀河については、中心に極めて高密度の分子ガスが星形成を伴わずに閉じ込められている。強い重力ポテンシャル中の強烈な差動回転による安定化で星形成が鎮圧され、ガス降着が極限まで達している。星間物質としては特異な存在形態を示し、スターバースト前夜を見ているのかもしれない。

## 1. 天体の回転、銀河骨格の研究

天体の回転は天文学の永遠のテーマである。古代、人間が宇宙の中心にいて考えていた時代には天空の回転について研究が行われた。近世以降ガリレオ、コペルニクス、ケプラーといった偉人によって、地球や太陽の自転、衛星や惑星が公転していることが分かり、ニュートンにより天体の回転現象が、重力と運動の法則によって理解されることになった。

今世紀に入り、太陽系も夜空の無数の星と一緒に円盤形をした銀河系の一員であることが明らかになった。オールトの研究により星の視線運動や固有運動、あるいは中性水素ガスの 21 cm 輝線のドップラー効果の観測から銀河系の回転についても明らかになった。今日私たちは、太陽系が銀河中心から 2 万 5 千光年のところであって、2 億年かけて銀河系を公転していることを知っている。そして遠心力と重力(万有引力)の釣り合いから、太陽軌道の内側には太陽 1 千億個分の質量が

まっていることも分かっている。

1980 年代には、大望遠鏡や電波望遠鏡が動員され、水素の H $\alpha$  線や中性水素の 21 cm 線のスペクトル観測によって、系外の渦状銀河も銀河系と同じように回転していることが分かってきた。ヴェラ・ルービンらの活躍によって、銀河の円盤から外縁部の回転曲線が大量に測られ、全体的な質量分布や構造が明らかになった。こうしてダークマターのハロー(ダークハロー)が発見され、確立された。光や 21 cm 線では観測が困難だった銀河の中心部についても、90 年代に私たちのグループによって、野辺山のミリ波望遠鏡を駆使した CO 輝線の高精度回転曲線が求められるようになった。銀河の回転曲線に関する研究について詳しく知りたい方は、私とルービンのレビューを参照されたい<sup>1)</sup>。

銀河中心から外縁部に至る精度の良い回転曲線が求められるようになると、驚いたことにほとんどすべての銀河が実は私たちの銀河系と同じ回転法則を示すことが分かってきた。「系外の渦状銀

河の回転法則は天の川銀河系と本質的に同じである」ということが明らかになったのである<sup>2)~6)</sup>。実は、この当たり前のように見える事実が、詳細なデータと本格的な解析に基づいて実証されるまでに、銀河系や渦状銀河の回転が発見されてから実に半世紀を費やしたことになる。わが野辺山のミリ波高分解観測が大きな役目を果たし、またそれを補足するかたちで岡山 188 cm 望遠鏡による H $\alpha$  線分光観測が重要な役目を果たした。

ただここまでの研究では、数ある銀河の中で詳しいデータのあるものは限られていた。これまでに分かった回転法則がユニバーサルかどうかを多数の銀河について、より詳しく、かつ系統的に検証していく必要があった。そこで野辺山宇宙電波観測所ミリ波干渉計の長期共同利用観測を提案した。幸い採択され、1999 年度から 3 年間、全 700 時間の観測を行うことができた。

## 2. おとめ座銀河団の CO サーベイ

おとめ座銀河団の銀河を選んだ理由は、まずハッブル宇宙望遠鏡によって距離が 16.1 Mpc と精度良く求められていることである<sup>7)</sup>。距離に誤差が大きいと、半径の誤差となり、そのまま質量

の誤差に跳ね返ってくるからである。銀河団の広がりや考慮に入れると、各銀河の距離にはプラスマイナス 1 Mpc 程度の誤差はあるが、近傍のフィールド銀河に比べるとはるかに良い精度である。さらに、おとめ座銀河団は有名な銀河団なので、光や電波などデータが豊富にそろっていて、比較研究をしやすい。CO 輝線の全強度のカatalogも存在し<sup>8)</sup>、今回は CO 強度の大きなものから観測対象を選んだ。そのほか、銀河団ガスとの相互作用など、環境効果についても研究ができるのも魅力だ。もう一つ重要なことは、赤緯が 5 度から 15 度と低いため、南半球からもよく見える。これは、近い将来 ALMA を使った研究に直接結びつくので今後の研究に有利である。表 1 は今回観測された銀河のリストである。このうち NGC 4689 については良好なデータが得られなかった。

CO 輝線の特徴も挙げておこう。銀河の中心部の星間物質はほとんどすべて分子ガスになっているため、そこに含まれる一酸化炭素 (CO) の 2.6 mm スペクトル線は、中心部の回転を決めるのに最適である。中性水素の 21 cm 線は銀河の外側の観測に適しているのと対照的だ。CO 輝線は光と違ってほとんど星間塵による減光を受けないこと

表 1 観測した銀河と観測パラメーター

銀河の名前	アレイ配列	観測年	観測視野の中心		観測周波数 (GHz)
			赤経 (J2000)	赤緯 (J2000)	
NGC 4192	AB+C+D	2000–2002	12 13 48.30	+14 54 02.9	115.350000
NGC 4212	C+D	2000–2001	12 15 39.11	+13 54 04.8	115.286574
NGC 4254	AB+C+D	2000	12 18 50.03	+14 24 52.8	114.355710
NGC 4303	AB+C+D	2000	12 21 54.87	+04 28 24.9	114.659250
NGC 4402	AB+C+D	2001–2002	12 26 07.06	+13 06 45.7	115.200000
NGC 4419	AB+C+D	2000–2002	12 26 56.43	+15 02 51.1	115.286574
NGC 4501	AB+C+D	2001–2002	12 31 59.14	+14 25 12.9	114.407000
NGC 4535	AB+C+D	2000–2001	12 34 20.25	+08 11 52.2	114.507290
NGC 4536	AB+C+D	2001	12 34 27.07	+02 11 18.3	114.586000
NGC 4548	AB+C+D	2001	12 35 26.40	+14 29 47.0	115.098000
NGC 4569	AB+C+D	2000–2002	12 36 49.82	+13 09 45.8	115.286574
NGC 4571	C+D	2001–2002	12 36 56.40	+14 13 02.0	115.138000
NGC 4579	AB+C+D	2001–2002	12 37 43.53	+11 49 05.4	114.710000
NGC 4654	AB+C+D	2000–2002	12 43 55.74	+13 07 44.2	114.811630
NGC 4689	C+D	2000–2002	12 47 45.60	+13 45 46.0	114.659250

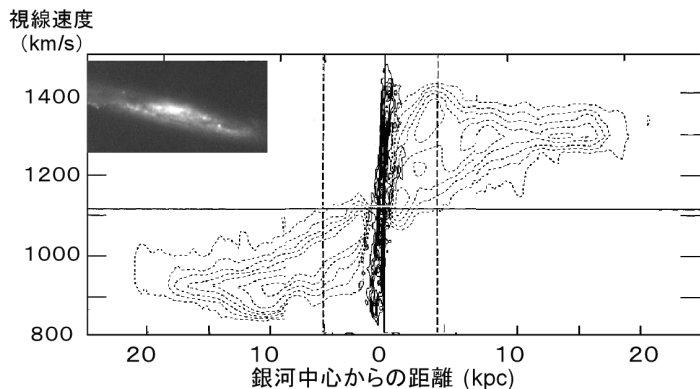


図 1 長軸に沿った位置を横軸，視線速度を縦軸に電波強度をプロットした位置速度図 (PV 図)．HI 21 cm (VLA, 点線) と，CO 輝線 (NMA, 実線) を比較すると，銀河中心域の観測に CO がいかに有効かが分かる<sup>9)</sup>．

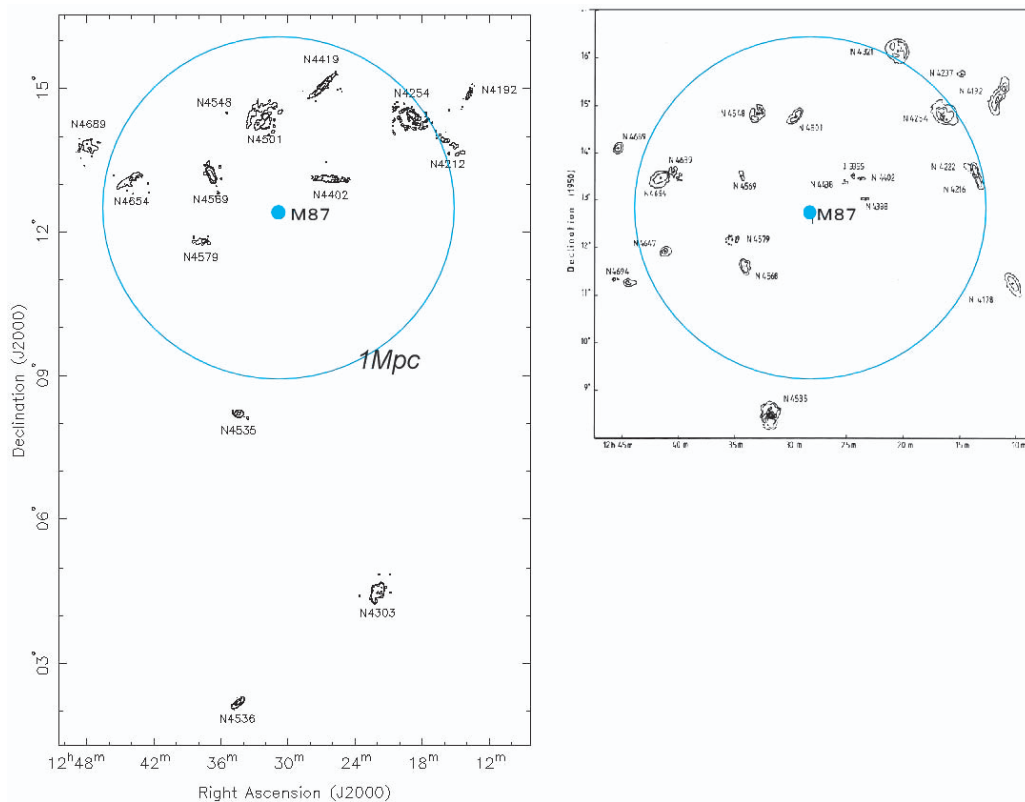


図 2 (左) おとめ座銀河団の CO サーベイによる CO 輝線強度分布を 50 倍して天球に描いたもの．+印が銀河団中心の楕円銀河 M87. 大きな丸は M87 から 1 Mpc の円. (右) 同じく HI ガスの分布を 20 倍して天球に描いたもの<sup>13)</sup>．

も中心部を観測するには重要だ．野辺山のミリ波干渉計など，強力な装置によって，角度分解能 2～3 秒という高分解が可能である．ALMA が使える

ようになれば 0.1 秒角あるいはもっと良い分解能も達成できる．さらに，ミリ波電波観測では，ラジオで使われているヘテロダイン受信器を使うの

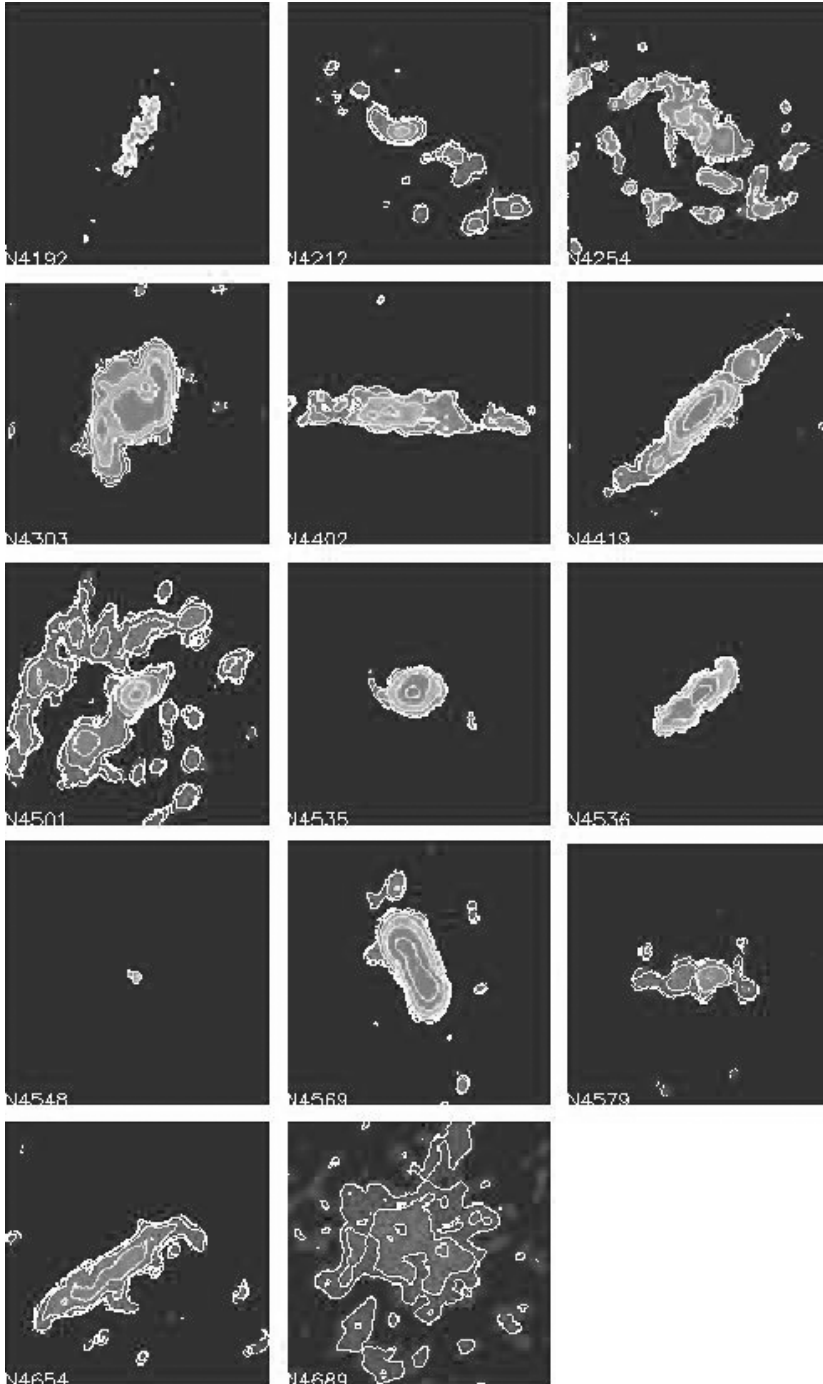


図 3(a) おとめ座銀河団銀河の CO 輝線強度の分布. サイズ, 強度ともすべて同じスケール.

で, 周波数分解が良く, したがってドップラー効果を利用した速度の測定精度と分解能が光学観測

よりもはるかに良い.

CO 観測が銀河中心部の回転曲線の研究にいか

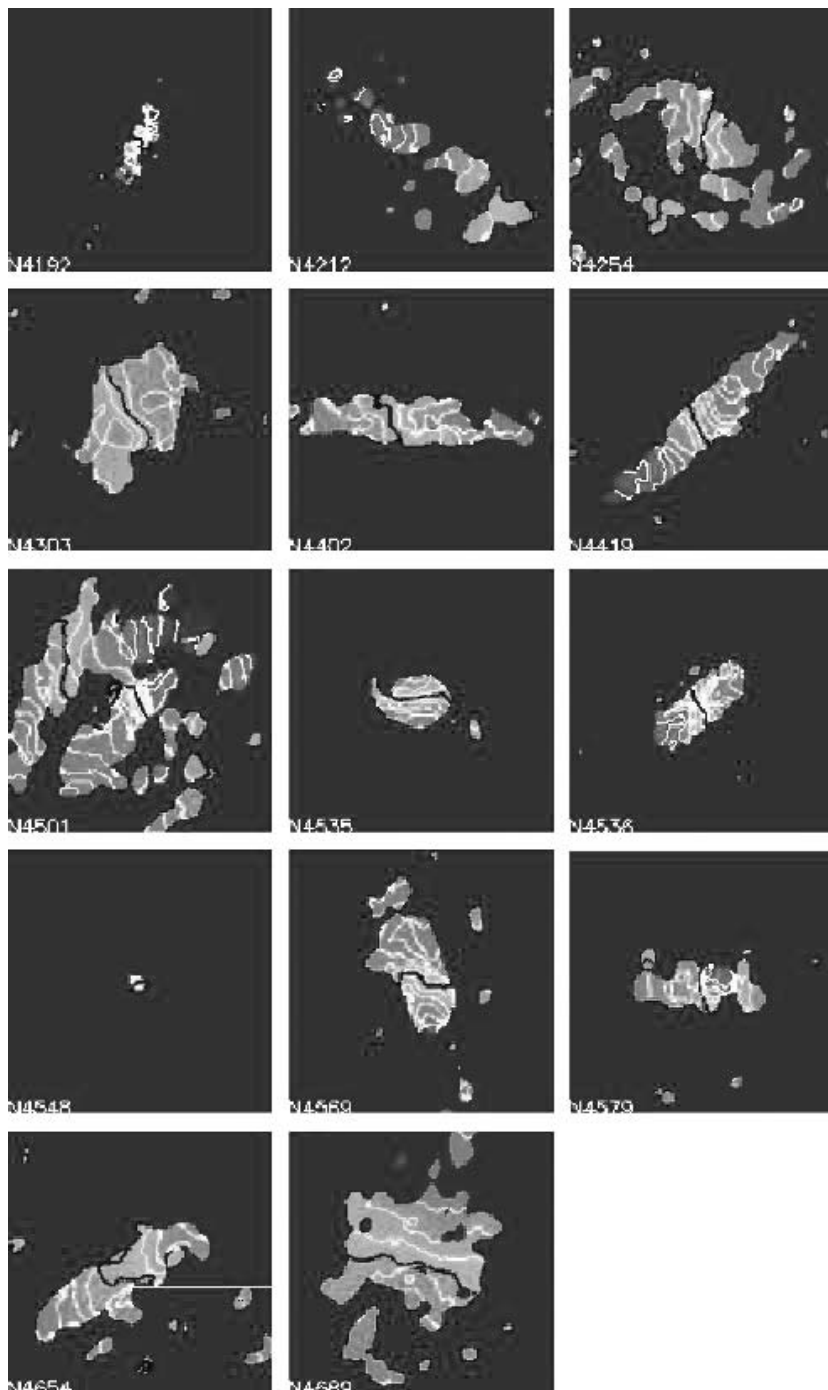


図 3(b) 同じく視線速度分布. 銀河の回転がよく分かる.

に有効かを示すために、図 1 にエッジオン銀河 NGC 3079 の位置速度図を示してある. 実線が野

辺山干渉計で得られた CO, 点線が VLA で得られた HI の観測である<sup>9)</sup>. エッジオンなので光では



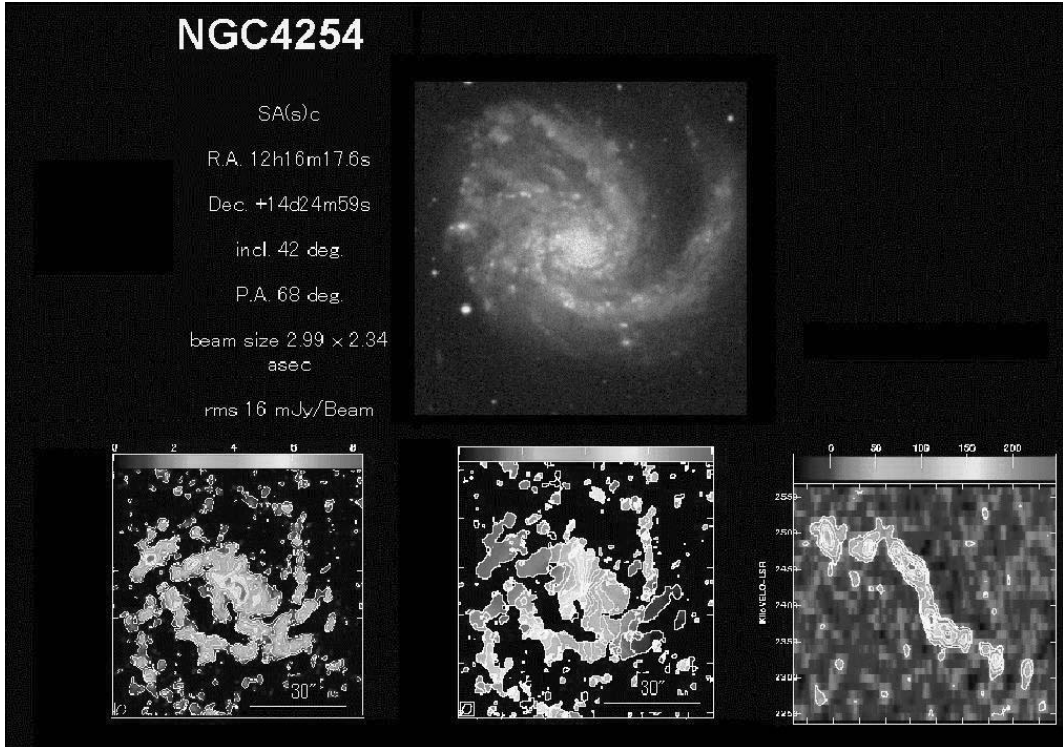


図 4(a) おとめ座銀河団 CO サーベイアトラスの一部. NGC 4254. 各銀河について, 光学写真 ( $5' \times 5'$ ), CO 強度図 ( $1' \times 1'$ ), 視線速度図, 位置速度図を示してある.

中心部は見えない. この図から, HI は内側を知るには不向きなこと, これに対して CO では中心部の高速回転成分が明瞭に観測されているのがよく分かる.

おとめ座銀河団の長期共同利用の観測は, 野辺山宇宙電波観測所ミリ波干渉計 (NMA) を用いて, 1999 年 12 月から 2002 年 4 月まで, 3 年度にわたって延べ 700 時間を費やして行われた. 参加メンバーは文末に記した. 周波数 115.27 GHz, 波長 2.6 mm の CO 輝線を使って, 14 個の銀河について, 中心部 1 分四方をマッピングした. 観測モードは AB (高分解), C, D (低分解) のアンテナ配列をすべて使い, 角分解能 2~3 秒を達成した. 観測した 15 銀河のうち 14 の銀河について良好なデータが得られ, CO 輝線の強度分布, 速度分布, 長軸沿いの位置-速度図などが得られた.

観測結果は「Virgo CO アトラス」として 2003

年の日本天文学会欧文研究報告 (PASJ) に一連の論文として出版した<sup>10)~12)</sup>. アトラスの一部を紹介しよう. 図 2 は CO 強度図を 50 倍に拡大しておとめ座銀河団の中心である楕円銀河 M87 (+印) の周りに並べたものである. 同図の右に示した HI (中性水素) ガスの分布 (20 倍に拡大)<sup>13)</sup> と比較してみると面白い. HI ガスは銀河の外側に広がっているので, M87 に近い, つまり銀河団の中心に近いほど銀河間ガスとの摩擦が大きく, はぎ取られている. 一方, CO ガス (分子ガス) は, 銀河の中心部にあるので, はぎ取りの効果が少ない. HI に比べて CO の方が, 銀河内部の回転やダイナミックスをよく表していることが分かる.

CO 輝線の強度分布を全銀河について同じスケールで表示したものをもう少し詳しく図 3 に示す. 同右図は視線速度の分布である. アトラスには, 各銀河についてのさらに詳しい強度, 速度の

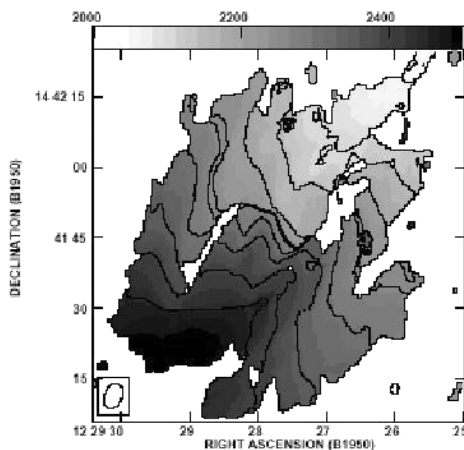
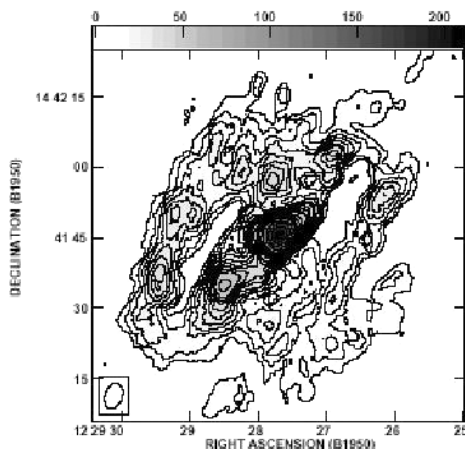
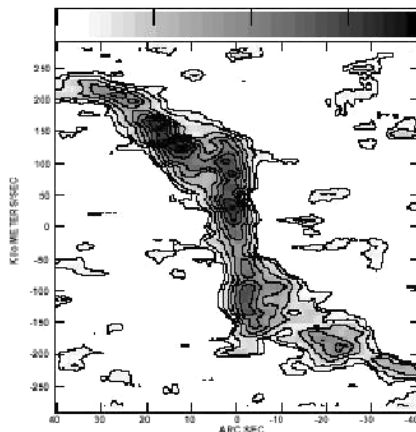
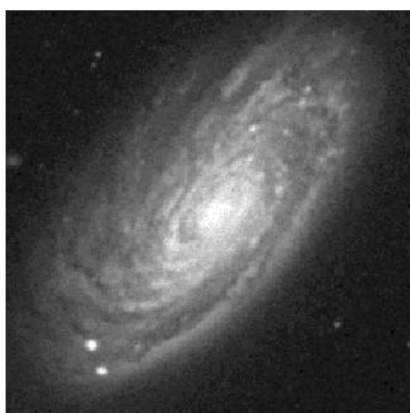
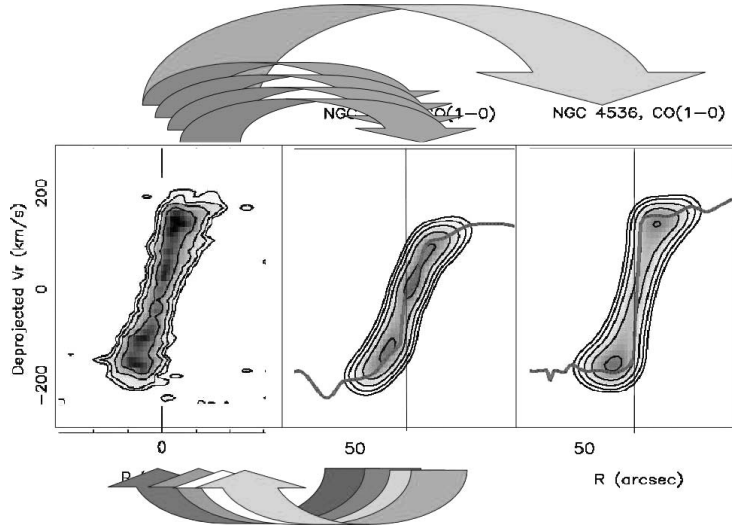


図 4(b) おとめ座銀河団 CO サーベイアトラスの一部. NGC 4501. 各銀河について, 光学写真 (5'×5'), CO 強度図 (1'×1'), 視線速度図, 位置速度図を示してある.

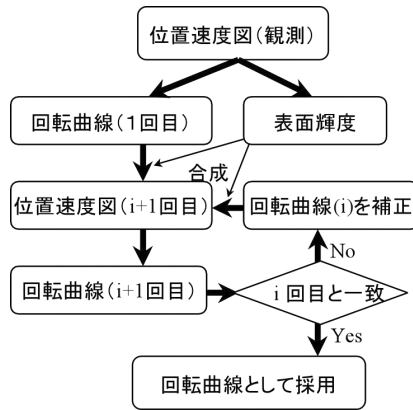
分布図, そして回転曲線を求めるのに必要な長軸に沿った速度図も載せてある. 図 4 はその一例である. ここに載せた光学写真は 5'×5' の領域, その中心の 1'×1' の領域を CO で観測している. アトラスにはこのほかさまざまなデータを集録し, またデータにアクセスしたい研究者のために, 私たちのホームページに FITS 形式のデータセットを公開しているのでインターネットでダウンロード可能である. (URL: <http://www.ioa.s.u.tokyo.ac.jp/~sofue/virgo.htm>, 又は <http://www.nro.nao.ac.jp/~sofue/virgo.htm>)

### 3. 銀河中心の大質量コア

アトラスで長軸に沿った位置-速度図 (PV 図) が得られたので, それをもとに目的とする回転曲線を求めよう. 求め方にはいろいろな方法が考案されているが, 最も精度の高い方法は, 私たちが提案した反復漸近法である<sup>14)</sup> (図 5). この方法では, PV 図からまずピークをなぞってピーク回転曲線をつくる. この回転曲線と, 観測された輝度分布から推定される銀河ディスク内のガス分布を使って PV 図を合成する. 合成 PV 図から同じ方法でピーク回転曲線をつくると, 最初の回転曲線



(a)



(b)

図 5 位置速度図から回転曲線を精度良く求めるための反復漸近法<sup>14)</sup>. (a) 概念図. (b) フローチャート.

と食い違いが起きる。この残差を最初の回転曲線に加えて、改良した回転曲線をつくる。この改良版と輝度分布からもう一度 PV 図を合成し、ピーク回転曲線を求め、また残差を求めて改良版にさらなる補正を加える。この操作を残差がなくなるまで繰り返し、最終的に得られた回転曲線を採用する。図 5 はそのプロセスのフローチャート、図 6 は PV 図の例と求められた回転曲線と再現された PV 図である。

この方法は手間がかかるが、銀河中心のように分解能ぎりぎり、しかも回転速度の変化が大き

なところでは絶大な威力を発揮する。いままで使われていた方法では、ピークをたどっただけ、あるいは強度で平均した速度などを採用するため、中心部の高速回転成分を見逃してしまう。反復漸近法では  $S/N$  比さえよければ、分解能を超えて銀河中心のダイナミクスに肉薄することができる。得られた回転曲線を図 7 に示そう。半径 3 kpc 以内のデータが今回の CO 輝線観測から得られた結果で、その外側は既存のデータにスムーズにつなげて描いてある。どの銀河も中心部 100 pc 以内ですどく立ち上がり、高速で回転する中心核円



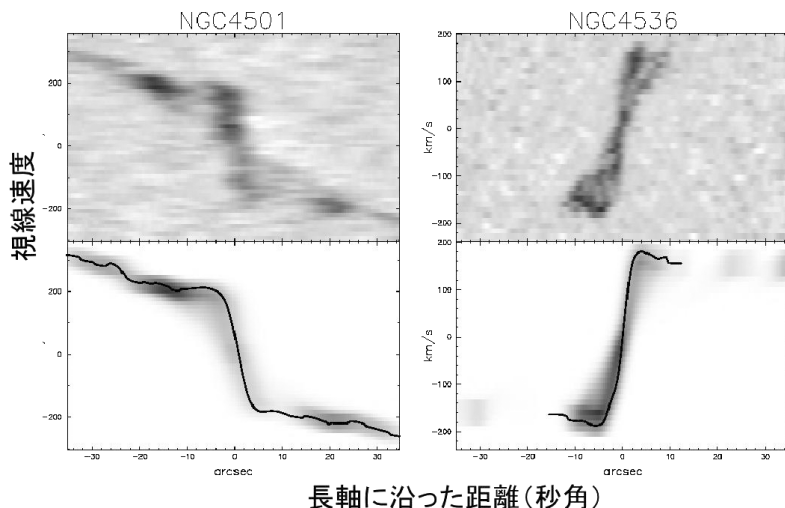


図 6 観測された位置速度図 (PV 図) (上) と、反復漸近法で求められた回転曲線と再現された PV 図 (下)。

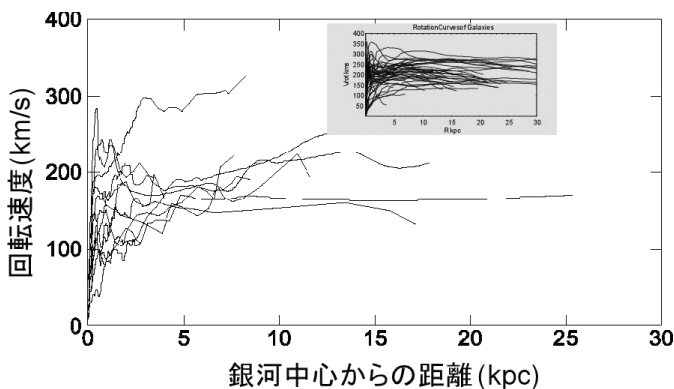


図 7 おとめ座銀河団銀河の高精度回転曲線。横軸が半径，縦軸が回転速度。挿入された小さな図は，その他の銀河について得られている回転曲線。

盤を示している。半径 100 pc での回転速度は 200 km/s 前後に達している。

回転速度が分かれば遠心力と重力の釣り合いから質量を推定することができる。すると、半径 100 pc 以内におよそ 10 億太陽質量という巨大な質量の塊が存在することになる。これほど大質量のコア成分は、通常のパルジの質量分布では説明することが難しい。私たちはこれを銀河中心部の「マッシュコア (大質量コア)」と名づけている<sup>15), 16)</sup>。

さて回転曲線が求められたので、それを使って質量分布を計算しよう。銀河の形を単純化して、

球対称と薄い円盤という二つの両極端な場合には、回転曲線から厳密に表面密度を計算することができる。両者がそれほど食い違っていなければ、実際の質量分布 (表面密度の分布) はその二つの分布の中間にあるはずだ。モデルを与えて厳密に両者を比較してみると、くい違いは大きくてファクター 1.5 倍程度であった。図 8 は実際に観測された回転曲線から求めた質量分布である。NGC 4536 の場合は球対称 (実線) と円板近似 (点線) の両者が示してあるが、両者ほぼ同じ結果を与えていることが分かる。他の銀河については円板近似の場合を示してある。

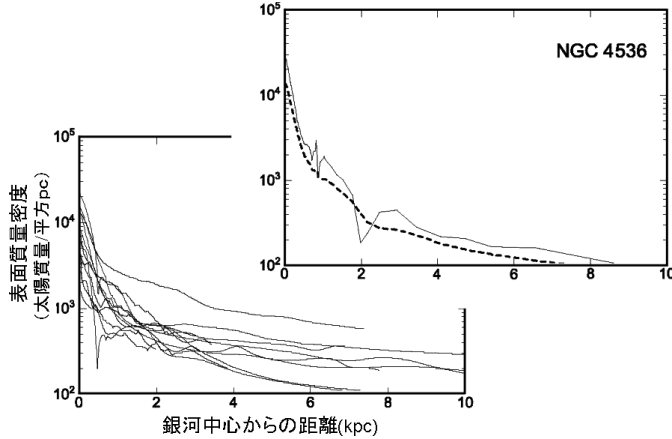


図 8 おとめ座銀河団銀河の円板を仮定したときの質量分布. NGC 4536 については円板 (点線) と球対称 (実線) を仮定したときの両者が比較してある.

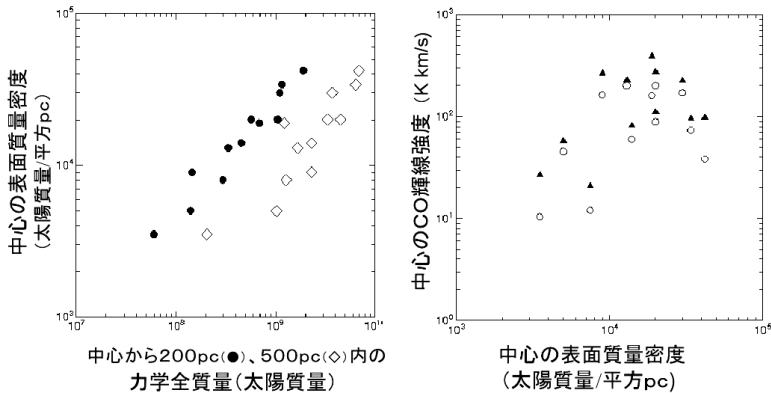


図 9 (左) マッシブコアの中心表面密度を, マッシブコア (●) とバルジ (◇) の総質量に対してプロットしたものの. (右) 中心の分子ガスの柱密度 (CO 輝線強度) を, 中心の質量表面密度に対してプロットしたもの. ポテンシャルが深いほど大量のガスが溜まる.

質量分布を詳細に検討してみよう. まず, どの銀河の中心部にも半径 100~200 pc のマッシブコアによるシャープなピークが存在する. そして周りに半径 300~500 pc のバルジ成分, さらに外側を指数関数的な分布をもつ半径 2~5 kpc の円盤成分が重なっている. 半径 10 kpc を超えると質量分布は滑らかに外側へと広がり, ダークハローの存在が見えてくる. このプロジェクトによって, 銀河研究の根幹をなす質量の半径分布が, 中心部を含めて, かつてない精度で求められたことは特筆に値する.

質量分布図から, マッシブコア先端の密度 (中

心の表面密度) が, コアの総質量, およびバルジの質量と良い相関をもっていることが分かる. 図 9(左)に, 中心の表面密度を, 半径 200 pc (マッシブコア) および 500 pc (バルジ) 以内の総質量に対してプロットしてみた. お互いの比例関係が見事に現れている. 中心の巨大ブラックホールの質量とバルジの間にも同じような関係があることはよく知られている. このことは, マッシブコアと巨大ブラックホールにも相関関係があることを示唆しており, マッシブコアは, 銀河中心とバルジを結ぶ力学構造として注目される. ただし, マッシブコアの実体は残念ながらまだ分かっていな

い。星でできているのか、あるいはダークマターのカスプの存在なのか、光や赤外線表面輝度の詳細な観測と比較して、質量-光度比の分布を求めるなど、今後明らかにしていかなければならない課題である。

#### 4. 深い重力井戸に溜まった高密度分子ガスのコア

銀河中心部の骨格である質量分布が分かり、10億太陽質量という巨大な質量が半径 100 pc という狭い領域に詰まっていることが分かった。そこは非常に深い重力の井戸である。ではそこに星間ガスはどのように分布しているのだろうか。CO 輝線の強度分布図(図2と3)を見ると、ガス分布は多様であるが、共通していえることは、分子ガスは HI ガスに比べて中心に集中していることだ。そして 14 個の銀河のうち 6 個までが、半径 100~200 pc の中心部に、非常に強い CO 強度の

ピークを見せている。さらに図9(右)に示したように、中心の質量密度が大きいほど、そこに溜まっている分子ガスの量も大きい。つまりポテンシャルが深いほど、ガスも大量に溜まっている。

ガスの中心への供給は、スパイラルアームやバー構造による星間ガスの衝撃波で起きる。このメカニズムによると、2本のバーやアームに沿った流れが、半径数 100 pc にあるリングと合流して、対称な2つの塊をつくるとされている。これをツインピークスと呼んでいる。同名の映画が流行ったころ、それを模した命名だったので妙に浸透してしまい、あたかも一般的な現象であるかのように受け取られている嫌いもある。ところが、今回の無バイアスの観測では、ツインピークは少数で、むしろ中心に「シングルピーク」で集中している場合のほうが圧倒的に多い。シングルピークのほうがより一般的なガス分布の特徴とって良いだろう。これを銀河中心の「高密度ガスコア」

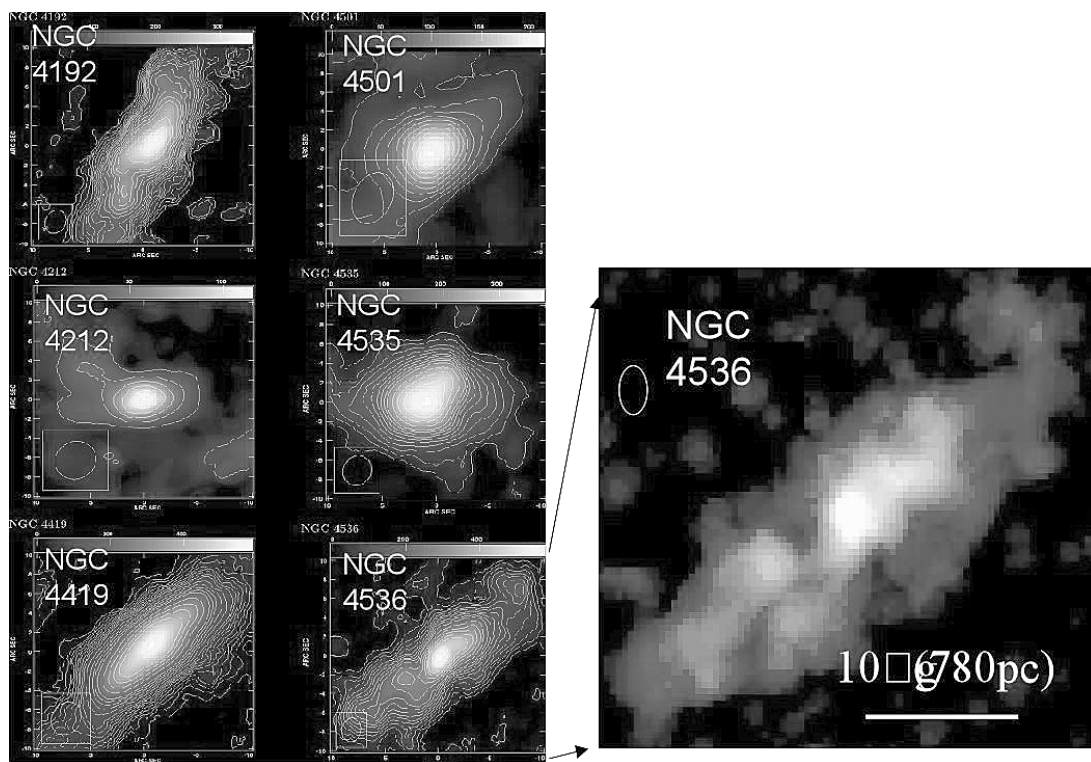


図 10 CO 強度のシングルピーク。14 銀河のうち 6 銀河に強い中心集中が見られる。高密度ガスコアの存在を示す。

と呼ぶことにする。

高密度ガスコアをもつ6個の銀河について、中心付近を拡大したCO輝線強度マップを図10に示した。NGC 4536については基線長の長いデータに重みをかけて高分解のデータ処理をしたマップも示した。いずれも中心の一極にピークをもち、分子ガスの柱密度は1平方センチ当たり水素分子10の23乗個という高密度である。奥行きを横の広がりと同じくらいと仮定すると、密度は1立方センチ当たり水素分子数1,000個という高密度である。これは巨大分子雲の平均密度にあたる。つまり、高密度ガスコアのガスの質量はおおよそ1億太陽質量、巨大分子雲100個がすきまなく詰め込まれた状態だ。このような状態は、星間物質の存在形態としては極めて特異で、高密度の極

限状態におかれていると考えてよい。

天体物理学としてさらに興味深いことは、これら高密度ガスコアでは、星形成が鎮圧されているらしいということである。ガスがこれほど高密度に溜め込まれたのだから、通常ならあっという間に星なり、スターバーストとして華々しく輝いて注目されているはずだ。ところがどういうわけか星形成は特別活発というわけではない。中心部におけるガスの降着とスターバーストの輪廻について、次のようなシナリオを組み立てることができる。ガスは中心から100~200 pcの半径の中に落ち込むと、深い重力ポテンシャルによる高速回転と速い摩擦運動で、自己重力による収縮ができず、星にならずに安定に保たれ、シングルピークの高密度コアとなる。図9(右)で見たように、ポ

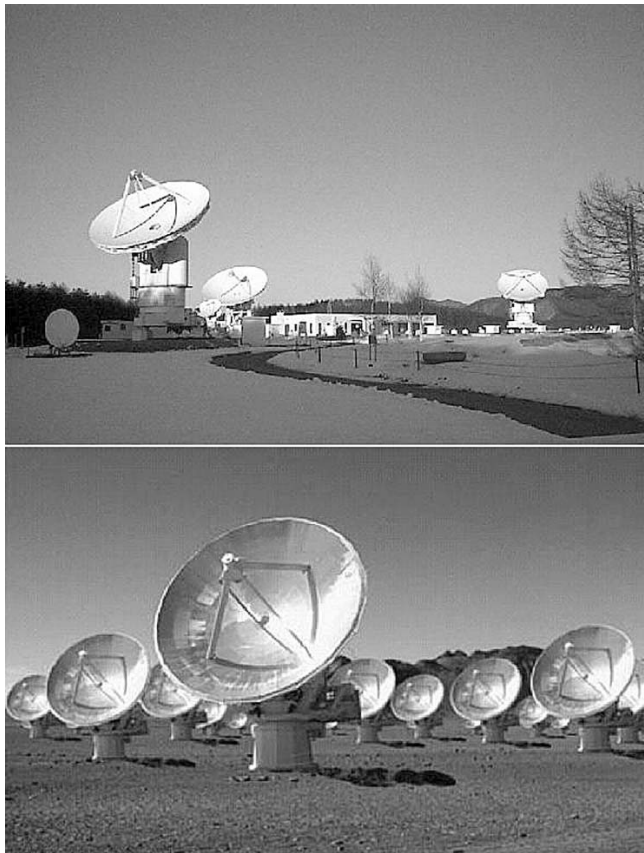


図 11 野辺山からアルマへ



テンシャルが深いほど、ガスは大量に溜まる。この時期、星形成は高速回転で鎮圧され、スターバーストの前夜、つまりプレスターバーストの状態にある。そしてガスの密度が臨界密度を超えると星形成が爆発的に進行する。ガスが星となって消費されたあとには、スターバーストの名残が強い  $H\alpha$  線を放出し、やがてバーストが終わり、星形成、ガス集中とともに弱々しいポストスターバーストの状態に落ち着く。

## 5. 原始銀河ダイナミクス

私たちの一連の銀河回転の研究によって、近傍の銀河についての回転法則や、銀河の骨格である詳細な質量分布が明らかになってきた。身近な銀河について詳細な研究が進むと、おのずとそこに至る進化の過程に興味がわいてくる。回転の法則が銀河の形成や進化とどのように関連しているのかという疑問がわくのは当然である。進化を知るには宇宙初期の銀河、すなわち赤方偏移が大きな遠方の銀河について回転曲線を求める必要がある。私たちの研究は、したがって銀河進化をダイナミクスの側面から回転曲線というツールを使って調べていくという興味深い研究テーマに直接結びついてくる。

巨大ブラックホールやバルジ、円盤、そしてダークマターなど、銀河の骨格の形成に関連した情報を得るには、中心付近の回転曲線が決定的な役割を果たす。それには光学や中性水素ガスの観測では不十分で、中心に集中する分子ガスについての観測情報が不可欠である。原始銀河は、高密度ガスの巨大な塊であり、ミリ波、サブミリ波が活躍する晴れ舞台である。建設中の ALMA、アンデス巨大サブミリ波干渉計はこの目的に最適の装置である。稼働が待ち遠しい。

## 6. 観測余話と謝辞、アルマへの道

まず最初に、長期にわたって優れた観測を可能にして下さった野辺山宇宙電波観測所の皆様に深

く感謝したい。ALMA を推進するなか、観測所の運営は困難を極めている。しかし共同利用の観測者の側から見れば、今の野辺山は世界に冠たるミリ波望遠鏡として絶好調のマシンであり、得られたデータはかつてないほど安定して良質である。多忙のなか、人手不足と老朽化を知恵と体力で補い、世界一のデータを出し続けている野辺山スタッフの皆さんには、ただ脱帽である。

野辺山 NMA はミリ波干渉計である。そして、ALMA はサブミリ波干渉計である。NMA は、ALMA にダイレクトに結びつく世界有数の装置である。NMA による研究がなければ、ALMA による研究も危うい。ALMA という究極のマシンによる観測が間近に迫るなか、自宅の庭で腕を磨き特訓ができるのは実に幸せである。このことは将来を担う大学院生や若手にとって特に有難い。

ここで、Virgo プロジェクトのメンバーを紹介しよう。幸田 仁、中西裕之、小野寺幸子さんらは、プロジェクトすべての局面で名実ともに強力な推進役であった。干渉計のエキスパート、河野孝太郎、奥村幸子さんには提案から観測、処理の方針などで重要な示唆と協力をいただいた。富田晃彦さんには光のエキスパートとして参加いただいた。以上は Virgo プロジェクト第一論文の共著者である。幸田君は、名実ともに推進役だが、進むだけでなく、PI の暴走を引き止め、全体をまとめていく事実上の PI であった。さっさと投稿してしまいそうな私をとどめ、論文の完成度を高めてくれたのは彼である。放っておくと大将が一騎敵陣に切り込んでしまうので、援護がたいへんだ、とは彼の言である。

和田桂一さんにはデータの解釈で優れた議論をいただいた。本間希樹、筒井芳典、高宮 努、日高 真の諸兄は、銀河回転という一貫したテーマで研究の基礎を固めてきた仲間である。阪本成一さんにはプロジェクト提案の段階で有益な示唆をいただいた。森田耕一郎さん、中西康一郎さんには観測上の問題で有難い助言をいただいた。改め



て皆さんに謝意を表したい。

観測は3年余に及び、それ以前の回転曲線研究と合わせると長期にわたった。Virgo以外の観測時間も多量にあった。ここ数年クリスマスは欠かさず野辺山でシャンペンをあけている。毎冬の観測シーズン、上記のような幸せを噛みしめれば極楽とも言えたが、院生にとってはひょっとして地獄だったかもしれない。しかし後から考えれば、楽しかっただろうと思う（と言ってくれている）。

「議論を深めるため」によく遊びもした。観測の合間の銀河スキーツアーは恒例となった。観測やリダクションと同じで、若者はあっというまに上達して師をしのぐ。小野寺さんなどは、初めてスキーを履いた翌日、蔵王の頂上から皆と一緒に平気で（もないか）滑り降り、翌年は志賀全山を走破した。大分前になるが、野辺山スキー場のレッドコースを思い出す。圧雪車が登れない35度のコブである。一級の私がためらっているなか、つれの猛者3名が見えなくなった。おそろおそろコブから乗り出して真下をのぞくと、はるか下方を三つの雪煙が落下していく。野辺山で鍛えてあれば、ALMAでも怖いものなしだろう。

### 参考文献

- 1) Sofue Y., Rubin V., 2001, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 39, 137
- 2) Sofue Y., Tutui Y., Honma M., Tomita A., Takamiya T., Koda J., Takeda Y., 1999, *ApJ* 523, 136
- 3) Sofue Y., Tomita A., Tutui Y., Honma M., Takeda Y., 1998, *PASJ* 50, 427
- 4) Sofue Y., Tutui Y., Honma M., Tomita A., 1997, *AJ* 114, 2428
- 5) Sofue Y., 1996, *ApJ* 458, 120
- 6) Honma M., Sofue Y., 1997, *PASJ* 49, 453
- 7) Ferrarese L., et al., 1996, *ApJ* 464, 568

- 8) Kenney J. D., Young J. S., 1988, *ApJS* 66, 261
- 9) Sofue Y., Honma M., Arimoto N., 1995 *A&A* 296, 33
- 10) Sofue Y., Koda J., Nakanishi H., Onodera S., Kohno K., Tomita A., Okumura S. K., 2003, *PASJ* 55, 17
- 11) Sofue Y., Koda J., Nakanishi H., Onodera S., 2003, *PASJ* 55, 59
- 12) Sofue Y., Koda J., Nakanishi H., Hidaka M., 2003, *PASJ* 55, 75
- 13) Cayatte V., van Gorkom J. H., Balkowski C., Kotanyi C., 1990, *AJ* 100, 604
- 14) Takamiya T., Sofue Y., 2002, *ApJ* 576, L15
- 15) Takamiya T., Sofue Y., 2000, *ApJ* 534, 670
- 16) Koda K., Sofue Y., Kohno K., Nakanishi H., Onodera S., Okumura S. K., Irwin., Judith A., 2002, *ApJ* 573, 105
- 17) Ho L. C., Filippenko A. V., Sargent W. L. W., 1997, *ApJS* 112, 315

### The Virgo CO-Line Survey with NMA: A Road to ALMA from Nobeyama

Yoshiaki Sofue

*Institute of Astronomy, The University of Tokyo,  
Mitaka, Tokyo 181-0015*

Abstract: We have completed a large-scale CO line survey of 14 spiral galaxies in the Virgo cluster of galaxies using the Nobeyama mm-wave Array. We obtained high-resolution rotation curves, and showed the existence of massive cores in the central 100 pc regions. We also found high-density molecular cores in the deep gravitational potential in six galaxies, where star formation is suppressed despite of the extremely high gas density. We discuss the anomalous interstellar condition in the central regions of these galaxies, and suggest a possible scenario of gas accretion-pre-burst-starburst-post burst cycle.