

我々の銀河系のバルジ

泉 浦 秀 行

〈東京学芸大学 〒184 東京都小金井市貫井北町 4-1-1〉

e-mail: izumiura@yamabuki.u-gakugei.ac.jp

円盤銀河の中央部に突き出たバルジ。我々の銀河系にもその存在が認められています。IRAS 点源カタログに基づき、野辺山 45 m 鏡を用いて行なった 3 年にわたる 300 天体を超す SiO メーザー輝線のサーベイにより、銀河系バルジの比較的中心に近い領域にある星ぼしの運動の様子を初めて垣間みることができました。我々の銀河系のバルジに関する理解が多方面から急速に進んでいる今、私達もちょっと面白そうなその姿を捕えつつあります。

1. はじめに

エッジオンで見えている円盤銀河の中央部には丸く膨らんだ明るい部分がたいていの場合に観察されます(図1)。その部分はバルジ(bulge: 英和辞典をみると「ふくらみ」とあります)と呼ばれるたくさんの星がぎっしり詰まっている興味深い場所で、天文学者の関心を銀河研究へと誘う魅力の一つとなってきました。天の川として見えている我々の銀河系の場合にも、我が国の赤外線天文学者の活躍によりバルジの存在が明らかにされてきており、その質量は太陽約 100 億個分くらいと現在は見積もられています。さらに赤外線天文衛星 IRAS の観測した点源の分布や、特に最近では宇宙背景放射探査衛星 COBE により提供された

銀河系全体の美しい近赤外線画像の中央部に、その存在が一層明瞭に示されています。

ところで一般に、それらバルジが個々の銀河の中で、主に回転で支えられている円盤部やランダム運動で支えられているハローなど、他の構成成分に対しどのように位置づけられるかという点に関しては、実はまだはっきりとした理解は得られていません。銀河バルジとはいったい何なのでしょう。この間は、個々の銀河形成の過程でバルジがどのようにしてできてきたのかといった問題に直接結び付き、つまりは、個々の円盤銀河がどのようにして造られたのかという問題に帰着します。そのためこれまでに数多くのバルジ形成のシナリオが銀河形成の枠組みの中で提出されてきました。たとえば、銀河がガス雲から重力崩壊でできた時に短時間に造られた中心の凝縮部がバルジとなったという説が長い間受け入れられて来た一方で、最近の研究の進展から、銀河がつくられていくなかで比較的長い時間をかけて小規模な天体(矮小銀河など)の吸収合併で造られたといった説や、銀河の基本的な部分が出来上がった後に銀河円盤中の星から生成されたといった説が提出されています。この最後の可能性は、銀河円盤中心部の棒状構造と深い関係にあり、特に最近盛んに研究されています。実際我々の銀河系の場合、バル

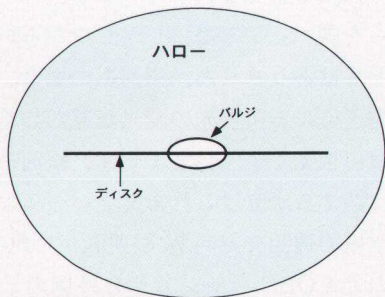


図1 円盤銀河の簡単な模式図。ハローには球状星団なども含まれる。

ジとして見えているものは、実はディスク成分の中心部が見かけ上バルジとして見えているもので、独立したバルジ成分の存在を特に必要としないうという研究結果も報告されています。バルジ形成の正しい筋書きを選り分けることは、銀河の形成過程を知ることに他ならず、距離的に言って個々の星まで詳しく調べることのできる唯一の存在である我々の銀河系のバルジはとても大切な存在です。

2. バー構造

さて、銀河系のバルジは当初お饅頭のような軸対称回転楕円体的な形をしていると考えられていました。その形を議論できるような直接的な観測結果がまだほとんど手に入らなかったからです。しかし1970年代には早くも中性水素21 cm輝線によるガス運動の様子を解析した結果から、銀河系中心部に非軸対称ポテンシャルの存在が我が国の研究者によって主張されました。その後しばらくの間くすぶっていた非軸対称性に関する思いは、1990年代になって一気に燃え上がり、近赤外光の輝度分布、IRAS天体の空間分布、一層詳しく明らかになったガスの運動の解析などから、銀河系のバルジ（あるいはディスクの中心領域）が軸対称形ではなく細長く伸びた3軸不等の形（バルジのバー構造）をしている可能性が次々と指摘され始めました。さらにCOBE衛星の画像を弱い光のレベルまで詳しくみると、その形は銀河面に沿ってピーナッツのように両端が膨らんで見えています。つまり話はもう少し複雑なわけです。そのような形は、系外銀河のバルジには早くから存在が指摘されていましたが、我々の銀河系でもそのようなかなあと誰もが思うようになったのはこのCOBE衛星以来のことです。

さて実際にバー構造があれば、その中の星の運動には回転楕円体的な場合とは異なる何らかの兆候が見えるはずですが、楕円銀河的な速度分散の非等方性が本質的に効いているのでしょうか。理論

的研究からは、バルジのバーを造りピーナッツ型に両端を膨らませるためには、(特殊で)特定の形をした軌道を運動する星の存在が必要だと考えられています。もしかしたらそれらの軌道にある星が実際に何らかの形で観測データの上に明らかになるかもしれません。また、円盤銀河のN体シミュレーションによれば、そのようなバルジの形は、円盤部中央にできた棒状の星の密度の濃い部分(円盤部のバー構造)によって、円盤部の星が円盤に垂直方向に散乱されてできる膨らみに形がよく似ています。その膨らみの形は見る方向によって、ピーナッツ型、箱型、一般的に見られる回転楕円体的なスムーズな形、といった具合に見かけ上変化し、系外銀河のバルジの色々な形を説明するのにも好都合となっています。そのためバルジ形成過程の有力候補の一つとして近年浮かび上がってきました。その場合にバルジは何か特定の速度構造を示すと考えられますが、実際のバルジではそのような兆しが見られるのでしょうか。また、バー構造があるかどうかは別にしても、箱型やピーナッツ型に見えるバルジを示している系外銀河のバルジは、その回転速度が円盤部からの距離にほとんど依存せず円柱的な剛体回転をしていることが観測的に知られています。ピーナッツ型に見える我々の銀河系でも、同様に剛体回転が見られるのでしょうか。銀河系バルジの詳しい運動の様子を明らかにすることは、バルジのバー構造を検証するためにも、今後の理論的研究の進展のためにもとても重要な意味を持っています。

それらを調べることは、しかしながら、そう易しいことではありません。銀河系の場合、円盤部内の塵粒子による可視光の減光が甚だしく、バルジ方向は可視光でよく見えません。銀河系バルジの運動に関する研究はこれまで「バーデの窓」などの光学域で透明な方向か、銀河面から角度10度以上離れたCOBEバルジよりも外側のところを中心になされてきており、COBEバルジの部分の系統的な観測的研究はほとんど存在していません。

ん。私たちの研究はそのような状況の中、銀河系バルジの中心部はいったいどのような運動をしているのだろうかといった素朴な疑問から出発しました。そして急速に発展してきたバー構造の議論に対する運動学的な答えを得ることを目標の一つに、野辺山宇宙電波観測所 45 m 鏡の能力を最大限に引き出しながら進んできました。私達の研究がどのような特色を持っているのかを紹介しながら、実際に見えてきた銀河系バルジの運動の様子を述べて見たいと思います。

3. バルジ IRAS 天体と SiO メーザー^{1),2)}

私達の研究の一つ目の特徴は、IRAS 点源カタログを用いてバルジに属すると考えられるある種の天体を完全に選び出すことにあります。まず私達が主に用いた波長 12 μm と 25 μm の測光データでは星間減光の影響が小さく、バルジ方向はすっかり透けて見えています。それらの測光データの比の値として得られる色温度と見かけの明るさを適当に選んでやると、IRAS 点源の分布がバルジの形を描き出します。また IRAS の 12 μm や 25 μm での検出感度は、固体微粒子のシェルに包まれたみかけ上が低温 (300 K 前後) の赤色巨星に関しては、バルジの向こう側まで届いていると考えられています。つまり、奥行き方向にもほぼ完全にサンプルされているそのような色温度を持つ赤色巨星の完全な位置のリストが、星間減光に影響されずに得られるのです。これはそれまでの光学観測に比較して大きな進歩でした。

私達の研究の二つ目の特徴は、周波数 43 GHz 付近にある二つの SiO メーザー輝線 ($v=1&2$, $J=1-0$) を上で選び出した IRAS 天体の視線速度のプローブとして使うことです。SiO メーザー輝線もまた星間減光とはまったく無縁な存在です。この SiO メーザーの利用は野辺山 45 m 鏡の大集光力と高分解能、高指向精度、それに広い速度範囲をカバーできる多数の分光計の存在によっ

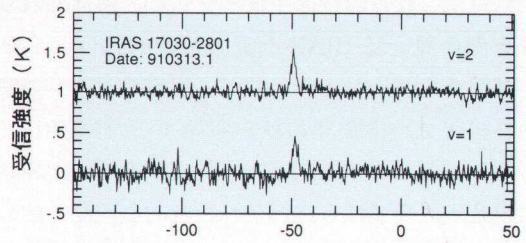


図2 検出された SiO メーザー輝線の例。横軸は局所静止基準系に対する視線速度 (km/s)。縦軸は受信強度 (K)。上が $v=2$, $J=1-0$ 、下が $v=1$, $J=1-0$ の遷移による輝線。

て可能となりました。従来このような視線速度の測定には OH メーザーが用いられてきましたが、二つの SiO メーザー輝線の同時受信 (図 2) は OH メーザーのダブルピークの輝線輪郭に匹敵する高い信頼度の特徴ある検出を保証してくれます。通常 SiO メーザーから得られる視線速度は 3 km/s 程の不定性を残すと考えられていますが、それは私達の目的には何ら問題がありません。また、後に分かったことですが、私達の課した条件を満たす IRAS 天体の間では OH メーザーにくらべ SiO メーザーの検出される率が 2 倍以上高いのでした。

私達の研究の三つ目の特徴は、南アフリカ天文台のグループによってマゼラン雲その他の観測から経験的に示された長周期変光星の変光周期と全放射絶対等級の間の関係 (周期-光度関係) を、観測した個々の IRAS 天体に適用してその距離を推定するところにあります。上で選び出したような IRAS 天体は一般に長周期変光星であることが期待できます。何らかの方法で変光周期が一旦得られれば、それを周期-光度関係にあてはめて絶対等級を求め、見かけの明るさと比較して距離の推定値を得ることができます。SiO メーザーから得た見かけの視線速度に奥行きの情報が付け加わるので、たとえばバルジ内部に銀河系中心周りの円運動から大きくずれた系統的な運動が存在すれば、それを容易に見い出すことが可能になります。

私達はこれらの特徴を宣伝文句に、銀河系バルジ方向に見える IRAS 点源の系統的 SiO メーザー輝線サーベイとそれに基づく銀河系バルジの運動の研究を、1991 年の秋から始まった野辺山 45 m 鏡の長期共同利用観測の第一期目の観測課題に申込み、幸運にも採択され系統的な観測を始められました。話はそれますが、この長期共同利用の申込は実に大変な作業で、野辺山ユーザーズミーティングの場でレフリーやプログラム委員だけでなく一般の参加者全員を目の前にして、口頭で内容を説明して最終的な評価を受けることが必要です。第一回目の公聴会の時の会場の一つ異様な興奮と緊張感は、私がそれまでに参加したどの研究会にもなかった刺激的なものでした（プロポーザルの締切り直前の 2 週間、実は筆者は共同研究者の山村一誠さんとある研究会に参加するためフランスはモンブラン山近くの Les Houches というところにいました。長期共同利用のプロポーザルの締切りは日本帰国前にやってきます。プロポーザルで日本を発つ直前まで頭が一杯で、パリのドゴール空港から市内へのリムジンバスに乗った時に初めて、自分がフランス語をまったく知らないのに気がつき一抹の不安を感じたのを今でも覚えていますが、プロポーザルの悩みはその後フランスにいる間も続いたのでした）。

4. すばらしい検出率³⁾

さて我々の長期共同利用観測は 1993 年 5 月に無事終了の運びとなりました。最終的に約 300 の IRAS 天体に望遠鏡を向け、そのうち約 200 から SiO メーザーを検出しました。これは銀河系バルジ方向で知られている SiO メーザー源の数を一挙に 10 倍にしたのみならず、銀河系全体で知られている SiO メーザー源の数を一挙に 2 倍に増やしました。私達のサンプルにおける SiO メーザーの検出率は、明るい方の天体では 80 % を超えており、暗い方でも 50 % を超えています。SiO メーザーは、星間吸収で隠された領域にある恒星集団の

運動学を研究するために非常に適した道具の一つであることが、 $12 \mu\text{m}$ のフラックス密度で 1 Jy の天体まで実証されたのです。また、我々の観測したカラー範囲にある IRAS 天体については、我々の SiO メーザーの検出率は既存の OH メーザーサーベイにおける検出率の 2 倍を超えることが明らかになりました。可視光では見えない領域では SiO メーザーが最も優れた視線速度のプロープとなったわけです。

そのデータをもとにバルジの回転速度とその銀緯依存性、速度分散とその銀緯依存性、回転軸の傾き、 $l-v$ 図上の非対称性などに関する情報が得られましたが、以下その中から二、三を取り上げてお話しします。

5. バルジ全体としての運動

さて、まず最初に気になるのはバルジ全体の大きな動きです。観測した星の銀経と視線速度との間の関係 ($l-v$ 図、図 3³⁾) をおおざっぱに見ると、銀河系中心までの距離 8.6 kpc を仮定して、平均回転速度 70 km/s/kpc (1 億年弱で一回転) で剛体のように回転するパターンがあり、そのパターンの中で星は約 80 km/s の速度分散を示すように動き回っているようです。その回転速度を実際

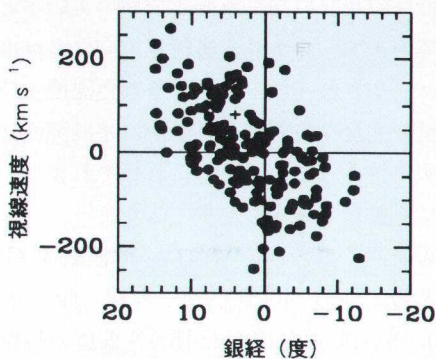


図3 $l-v$ 図の一例。横軸は銀河座標系での経度 (°)。縦軸は太陽系の銀河中心周りの運動の分を差し引いた後の天体の視線速度 (km/s)。 $12 \mu\text{m}$ のフラックスが 10 Jy 以下の天体を全て表示、全体として左上がりの傾向が明らか。「+」印の場所に注意。

に全てバルジのパターンの回転に帰するならば、バルジはかなり高速に回転していることになりませう。一方でバルジの星が一つの大きなパターンにのって動いていなくても、系統的な星の流れの場のようなもの（ストリーミングモーション）があれば観測された $l-v$ 図の傾きが説明できます。しかし、これまで私達が調べたところでは、強いストリーミングモーションを支持する結果は得られていません。やはりパターン回転が支配的なのでしょうか。

さらに回転の銀緯依存性も調べて見ましたが、私達が集中的に観測した銀河面からの距離が $4^{\circ}-5^{\circ}$ と $7^{\circ}-8^{\circ}$ の帯状の領域の間では精度の範囲内でその差は認められていません。一方、銀河面からずっと離れた銀緯 -12° から -20° の領域の光学観測による最近の研究からは平均回転速度として約 25 km/s/kpc が与えられていて、しかもその範囲でも銀緯依存性は認められないと結論されています。これらの値はそれぞれの 3σ の信頼区間を考えてもなお離れており、我々の観測した IRAS や COBE で明るく見えている部分とそれより外側の光学域でも詳しく観測できる部分とでは、バルジの平均回転速度が有意に異なっていることとなります。その理由はまだ明らかではありませんが、単純に2つの可能性が考えられます。一つ目は、両者で見ているものに何か本質的な差異が存在しているという場合、二つ目は、同一の対象を見ていても実際には銀緯依存性があるのだが精度が足りずそれを検出できていなかった場合。一つ目の考えでは少し（かなり？）飛躍がありますが、IRAS や COBE の見たものがディスクのバー構造により作り出されたバルジなのではないかという考えと結び付ける楽しみがあり、これからの研究の進展に期待がかかります。一方、系外銀河のバルジ研究により、箱型やピーナツ型を示すバルジの回転速度は、円盤面からの距離にあまり依存せず、円柱のような回転の様相を示すことが指摘されてきました。たとえば

NGC 4565 という業界で有名な銀河では、銀河面から 3 kpc （ハッブル定数 50 km/s/Mpc の場合）あるいは 1.5 kpc （ハッブル定数 100 km/s/Mpc の場合）の高さまでそのような運動が観察されます。それとくらべると、いずれの可能性の場合でも我々の銀河系のバルジの円柱回転の程度は弱いようです。

6. $l-v$ 図上のギャップ³⁾⁴⁾

さらに $l-v$ 図をつらつらと眺めているうちに銀経 $3^{\circ}-6^{\circ}$ の範囲で天体が現われない速度範囲があることに気づきました（図3の“+”の位置）。そのようなギャップが偶然現われる確率を上で触れた速度分散を考慮して簡単に見積ってみると $1/1000$ より小さくなります。そのギャップはかなり確からしいものようです。そしてそれは、速度的に異なる二つのグループがその視線に見えていることを意味します。このような $l-v$ 図上での速度方向のギャップはいったい何を意味しているのでしょうか。しかもなぜその方向にだけ顕著に？ これはとても不思議な結果です。現状では我々の結果と直接比較対照できるような理論的研究あるいはシミュレーションなどがほとんど存在していないのが残念です。私達はバルジ内のストリーミングモーションが遂に検出されたものではないかと考える一方で、ディスクのバー構造によって造られたピーナツ型バルジに特徴的な速度構造を捕えたのではないかと期待しています。極めて最近、系外銀河のバルジ研究により、そのような速度方向のギャップが $l-v$ 図上に現われるとの報告がなされて、私は個人的にドキッとさせられました。

これまで銀河系中心方向の物質の運動を広い範囲にわたり詳しく論じたものには、中性水素(HI)ガスの放射する波長 21 cm の輝線や一酸化炭素分子輝線の出す波長 2.6 mm の輝線があります。不思議なことに、私達の見いだしたギャップの位置とあたかも呼応するかのよう、HIガスの $l-v$

v 図上のほぼ対応する位置に同じような穴が見いだされるのです。実に不思議です。これらガスの運動と我々の観測した IRAS 天体の運動は必ずしも一致する必要がありません。我々が観測しているのは銀河面にある衝突系のガスではなく、銀河面から遙か離れた所にある（100%の確証は無いが）バルジを構成していると考えられる無衝突系の星なのです。この符合は全く偶然の一致なのかもしれません。しかし、もし実際のものであれば、それは銀河系中心方向の質量分布や運動学を考える上でとても重要なヒントになるはずで、 $l-v$ 図上に同様の効果をもたらす大局的な重力ポテンシャルが存在することを示しているのでしょうか。

7. おわりに

以上かいつまんでお話ししましたが、一言で言えば私達は世界で初めて我々の銀河系のバルジの中における恒星の運動の大局的な動きを見ることができました。しかし、情報は増えたものの、不思議の数は却って増えてしまいました。すぐに決着がつくかと思っていたバルジの運動に関する研究は、まだ始まったばかりと言わざるをえない状況に留まってしまったのです。

最近ではバルジ方向に見える個々の星の固有運動が光学観測から調べられています。今後バルジの個々の星の3次元的な運動が詳しく調べられていくことでしょう。また、ミリ波干渉計技術の進歩により、私達が検出したような弱い SiO メーザー輝線を将来高い位置精度で観測できるようになり、固有運動の研究が飛躍的に進歩するかもしれません。ここでは触れませんでした。分光観測に基づく元素組成解析の方面からもバルジの形成過程の研究はシミュレーションともども急速に進み始めています。一方では、 $4^\circ < |b| < 5^\circ$ の領域に関して南アフリカ天文台との共同研究により、赤外測光観測によるバルジ IRAS 天体の変光周期決定のプログラムが進行中です⁵⁾。近い

うちにそれら天体の距離が推定できることになり、バルジの速度構造について一層の理解が進むことでしょう。多方面からの研究の結果が、一致したバルジの描像に辿り着く日は意外に近くまで来ているのかもしれませんが。筆者個人としては、理論面からのバルジ研究の進展を期待してやみません。

最後に、この研究は、浮田信治、尾中敬、小野智子、関口和寛、出口修至、中田好一、橋本修、山村一誠（以上五十音順）、および Robin Catchpole（以上敬称略）との共同研究としてなされたことを記しておきます。観測を支援して下さった野辺山のスタッフの皆さん、ありがとうございました。

参 考 文 献

- 1) Nakada, Y., et al. 1993, PASJ, 45, 179-189
- 2) Izumiura H., et al., 1994, ApJ, 437, 419
- 3) Izumiura H., et al., 1995, in The Formation of the Milky Way, ed. E. J. Alfaro & G. Tenorio Tagle (Cambridge, Cambridge), in press
- 4) Izumiura H., et al., 1995, ApJ, in press
- 5) Izumiura H., et al., 1995, ApJS, 98, 271

Kinematics of the Bulge of Our Galaxy through SiO Maser Survey of the Bulge IRAS Sources

Hideyuki IZUMIURA

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University

4-4-1 Nukui-kita, Koganei, Tokyo 184

Abstract: About 300 color selected IRAS sources in the direction of the Galactic Bulge have been surveyed in the two SiO maser lines at 43 GHz with the 45 m telescope of Nobeyama Radio Observatory. The obtained line-of-sight velocities enable us to reveal some interesting features of the motion of stars inside the Galactic Bulge.