

銀河系の回転とダークマター

本 間 希 樹

〈国立天文台水沢観測センター，三鷹 VERA 推進室 〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail: honmamr@cc.nao.ac.jp

天体の回転は天文学や物理学の研究において歴史的に大きな役割を果たしてきたが、銀河の回転も銀河の構造やダークマターの研究と密接に関連しておりその例にもれない。ここでは筆者が行ってきた銀河系の回転とダークマターの研究について紹介し、さらに、銀河系全域の精密測量を目標に国立天文台が現在推進している VERA 計画がこの分野の研究に与える影響についても紹介する。

1. 天体の回転と科学

宇宙にある天体はその多くが回転している。その最も身近な例は地球であり、地球は自転し、さらに、太陽の周りを公転している。また、月も自転しながら地球の周りをまわっている。これらの地球や月の回転運動の周期は、太古の昔から1年、1月、1日という人類の生活リズムの基本尺度となり、「時間」という科学的に重要な概念を確立させた。また、地球を始めとする惑星の回転運動の研究は近代科学の進展においても大きな役割を果たした。惑星の公転運動の研究はケプラーの法則を生み、それを足がかりにしてニュートン力学が誕生した。また、木星の衛星の食は光速度の最初の測定に使われ、さらに20世紀に入ると、アインシュタインが相対性理論を確立する際に、水星の近日点移動が有力な証拠となった。

現代天文学においてももちろん天体の回転は重要である。例えば、恒星の多くは連星系をなしてお互いの周りを周回しており、その軌道運動は星の質量を測定する最も確かな方法を与える。また連星の一種である食変光星は、近傍銀河の距離の精密測定を可能にする天体として最近注目を浴びている¹⁾。さらに太陽系外の惑星の発見にも、回転運動による主星の視線速度変化が利用されている²⁾。また、連星パルサーの運動は重力波の存在を間接

的に示し、ブラックホール周りのガス円盤の回転は、銀河中心に存在するブラックホールの有力な証拠を与えた³⁾。これらの例に見るように、天体の回転は天体の性質やその物理を探る上で大きな役割を果たしており、その精密測定は天文学および天体物理学の今後の進展にも欠かすことができない。

2. 銀河回転とダークマター

回転の重要性は銀河の研究においても同様である。なぜなら銀河の回転は銀河における質量分布と密接に結びついており、銀河の構造や形成、あるいはダークマター（暗黒物質）の研究において重要な鍵を握っているからである。

銀河回転の存在は20世紀前半から知られていたが、その系統的な研究は70年代後半から80年代にかけて可視光や電波観測による回転曲線の測定という形で行われるようになった^{4), 5)}。回転曲線というのは銀河回転の速度を銀河中心からの距離の関数として表したものである⁶⁾。研究の結果、円盤銀河の回転は銀河中心距離によって回転の角速度が異なる「差動回転」であり、特に銀河系と同程度の明るさを持つ円盤銀河の回転曲線はほぼフラット（つまり回転速度が銀河中心距離によらずほぼ一定）であることがわかった^{4), 5)}。重力と遠心力が釣り合っているという仮定のもとでは、フラットな回転曲線は銀河の質量が半径に比例して増大し

ていることを意味し、銀河の外側にダークマター（暗黒物質）が大量に存在して「ダークハロー」として銀河円盤を包み込むように分布していることを示唆している。

ダークマターは質量的に銀河の主要な成分であり、その研究は銀河の構造や進化を理解する上で欠かせない。またダークマターは宇宙の物質の主要な成分でもあり、宇宙がこのまま膨張を続けるのかどうかという宇宙の運命もダークマターの総量次第である。さらに宇宙の大規模構造の形成や銀河の形成においてもダークマターが大きな役割を演じることが知られるなど、ダークマターの研究は現代天文学の様々な領域に影響を与える重要な課題となっている。

ダークマターの候補は、大きく分類すると次の2つのタイプに分けられる。一つは、素粒子物理学で予言されるミクロな粒子で、他の粒子とほとんど相互作用をしないために電磁波などで観測できない粒子である。一般にこのような粒子は Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) と総称される。このタイプのダークマターについては現在までのところ確実な検出例が存在しない。一方、もう一つのタイプは、星のような「天体」のうち何らかの理由で光を出さないものであり、その候補としては、ブラックホールや中性子星、褐色矮星（軽いために核融合がおきない星）あるいは冷たい原始ガス雲などがあげられる。天体タイプのダークマターは、十分コンパクトであれば、背景の星が受ける重力レンズ効果を利用して検出できることが知られており、このような重力レンズを起こすタイプのダークマターを MACHO (マッチョ: Massive Astrophysical Compact Halo Object) と呼ぶ。MACHO による重力レンズ現象はアメリカとヨーロッパの観測グループによって初めて検出され^{7), 8)}、それ以来数多くの検出例が報告されている。検出例があるため MACHO の研究は現在活発に行われているが、それにもかかわらず MACHO の正体ははまだ解明されていない。また MACHO だけで宇宙のダークマ

ターをすべて説明できるかどうかは定かではない。MACHO を含めたダークマターの正体解明は 21 世紀の天文学および宇宙物理学に残された最も大きな問題のひとつである。

3. 銀河系の回転曲線

私が銀河回転の研究を始めたのは修士の1年度も終わりに近づいた 1995 年初頭のことである。そのころの状況とはいえば、93 年に重力レンズ効果による MACHO の検出が報告され^{7), 8)} MACHO がダークマターの有力な候補として話題を呼んだ時期で、また一方では、連星パルサーによる重力波の間接的検証がノーベル賞を受賞し (93 年)、さらに NGC 4258 の超巨大ブラックホールの発見 (95 年 1 月) など³⁾、回転の研究の重要性が再認識されていた時期でもあった。ところが銀河系については、回転曲線の形ははっきり決まっておらず、銀河系のダークマターの分布についての詳しい議論ができない状態であった。そこで私は、銀河系の回転曲線を従来とは違う方法で精度良く決定し、そこからダークマターの分布や総質量に制限をつけられないだろうかと考えて、銀河系の回転の研究を始めることにしたのである。

我々の太陽系が銀河系の中にあるため、銀河系の回転曲線の決定は他の銀河に比べて難しい。それまで銀河系の回転曲線は主に、多数の星の距離と視線速度を測定することにより行われてきたが、この方法では観測天体が太陽近傍のものに偏ることと、天体の距離と視線に垂直方向の速度の測定が難しいことから、回転速度の決定誤差は非常に大きかった⁹⁾。そこで私は、個々の天体の測定によらない別の方法で回転速度を測定することを考え、銀河系円盤の幾何学的性質を用いて銀河系全域でのグローバルな回転運動を測定する方法を考えた。その方法とは、大雑把にいうと次のようなものである：銀河系円盤をバームクーヘンのようにリング状に切り出し、そのリングの高さをいろいろな方向で太陽系から観測したとする。すると

本来のリングの高さが一定だとしても、太陽系が銀河中心からずれているために観測する方向によって見かけの高さが異なる。このような幾何学的効果を利用すればリングの大きさや速度に関する情報が得られるので、これをさまざま大きさのリングに応用することで各場所での回転速度が求められる。

このような方法を用いて銀河系の中性水素ガスの観測データを解析し、その結果得られたのが図1に示した回転曲線である¹⁰⁾。銀河定数を既知と

すればこの回転曲線の誤差は外側で最大 30 km/s 程度であり、現在までに求められた回転曲線の中でも非常に小さい。さらに、他の回転曲線と比べて最も銀河中心距離の大きいところまで回転速度が決定されており、この回転曲線が既存の回転曲線の中で最も精度の良い部類に入ることがわかった。残念ながら後になって、同じ方法による解析が別の論文ですでに発表されていることがわかったが¹¹⁾、さまざまな回転曲線との決定精度の比較という形で、とにかく以上の結果を論文としてまとめた。その過程でわかってきた興味深いことは、銀河系の回転曲線が、銀河中心距離 R_0 と太陽近傍での銀河回転の速度 Θ_0 という2つの銀河定数（特に後者）に、強く依存していることである。実際図1に示すように、 Θ_0 が 220 km/s, 200 km/s, 180 km/s の場合で銀河系の回転曲線の振る舞いは大きく変化し、また R_0 によって動径方向のスケールが変化する。 Θ_0 が 180 km/s と 220 km/s の場合では、外側での回転速度の差は 100 km/s 以上になっており、

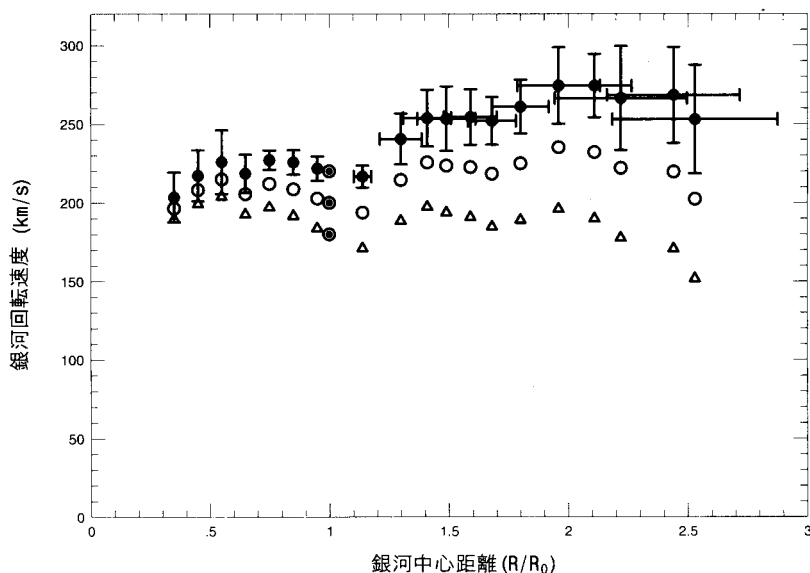


図1：中性水素ガスの運動から求めた銀河系の回転曲線。太陽近傍の銀河回転の速度 Θ_0 が 220, 200, 180 km/s の3つの値の場合について示してある。

220 km/s の場合は回転速度は銀河中心距離とともに増大するが、180 km/s の場合は外側では回転速度はゆるやかに減少している。なぜ銀河定数次第でこれだけ回転曲線の形が変化するかというと、太陽系自身が銀河回転によって運動しているためにその効果を補正する必要があるからである。その補正值である銀河定数 Θ_0 が現在のところ 200 km/s 前後で1割以上の不定性を持つために、このような事態になっているのである。

これだけ回転曲線の形が銀河定数によって変わると、銀河系内の質量分布の様子も銀河定数によって大きく変わってくる。物質の重力と遠心力が釣りあっているとすると、銀河系のある半径内の質量は $M(R) = RV^2/G$ と書け、質量は回転速度の二乗に比例する。従って、図1のように回転曲線に大きな不定性があると、銀河系の質量の推定値も大きくそれに影響される。実際、図2に3つの銀河定数の場合について上記の方法で推定される銀河系の質量を太陽円より外側で示してあるが¹²⁾、この図に示されるように銀河定数が 220 km/s の場

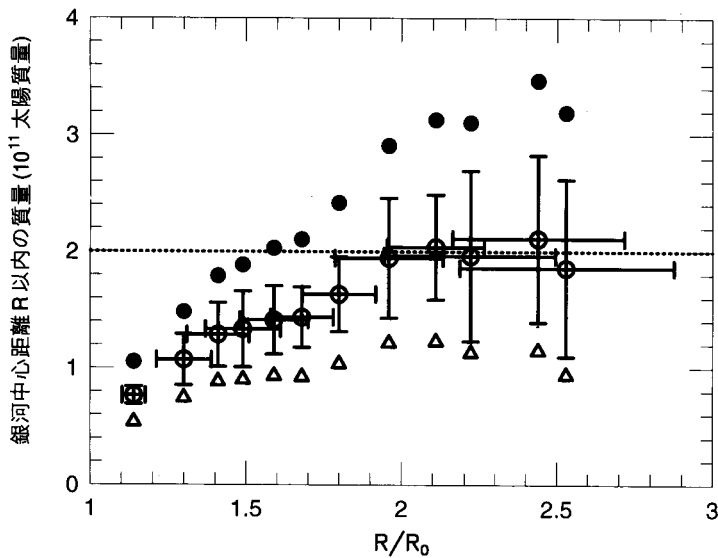


図2：ある半径よりも内側に含まれる銀河系の質量のプロット。図1の回転曲線をもとに、太陽円よりも外側について示してある。 $\Theta_0 = 220$ km/s の場合質量は半径とともに増大するが、 $\Theta_0 = 200$ km/s の場合質量が $2 \times 10^{11} M_\odot$ (点線) に収束するように見える。

合と 180 km/s の場合では、回転曲線から推定される質量は3倍も異なる。しかも、図2にあるように 220 km/s の場合銀河系の質量は距離とともに増大しており、一方 200 km/s や 180 km/s の場合質量は収束する傾向を見せるので、 Θ_0 が 180 km/s と 220 km/s の場合で銀河系の総質量の差は図2よりも大きくなり得る。これはダークマターの分布や総質量も現段階では極めて不確定であることを示しており、その分布や総量を求めるためにも銀河定数 Θ_0 を精密に測定することが強く望まれる。まず足元を固めなければ、銀河系の果ての様子はわからないのである。

4. MACHO の質量と銀河系の回転

さて、前章ではダークマターの分布や総量と銀河回転の関連性について述べたが、一方でダークマター研究における最大の問題はダークマターの正体である。特にダークマター候補のひとつである MACHO はすでに検出されているので、MACHO の

正体解明はダークマターの正体解明に向けた第一歩である（もちろん MACHO として観測されたものが実はダークマターでない可能性も否定できないが、いずれにせよ正体を見極める必要がある）。ところで、天体の性質はその質量によって大きく変わるので、MACHO の正体を知るためにはまず MACHO の質量を計る必要がある。しかし、残念ながら重力レンズの観測からは MACHO の質量はわからない。何故かといえば、MACHO までの距離と、MACHO がどれくらいの速度で動いているかを測定できないためである。では、今現在 MACHO の質量をどのように推定しているかということ、銀河系

のハローのモデルを導入して MACHO の距離や速度の推定値を与えているのであり、そのためハローのモデル次第では MACHO の質量の推定値は大きく変化する。銀河のハローのモデルは回転曲線から与えられるので、実は MACHO の正体の研究においても銀河の回転が重要な鍵を握っているのである。

1997年、アメリカの MACHO 観測グループは8例の重力レンズ現象の解析から、MACHO の質量を $0.5M_\odot$ 、ダークハローに MACHO が占める割合を 50% 程度と求め、MACHO は太陽よりも重い星が燃え尽きた後に残る「白色矮星」であるという説を提唱した¹³⁾ ($0.5M_\odot$ の普通の星は、明るく輝くのでダークマターにはならない)。しかし、各国の研究者はこの説に対し、MACHO が白色矮星だとすると多くの観測と矛盾する、と強く反論した。例えば、MACHO が白色矮星だとすると、過去にはそれらは普通の星だったはずであり、そのため昔の銀河のハローは明るく輝いていたことになる。ところが、宇宙の昔の姿は遠くの宇宙を観測すれば

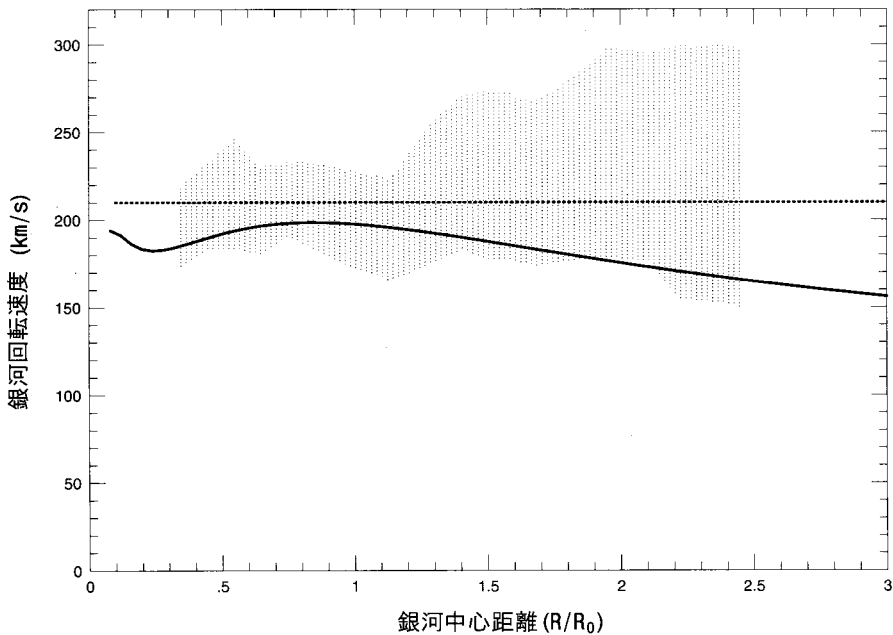


図3：MACHOの質量が $0.1M_{\odot}$ 以下となるような銀河系のモデルの回転曲線（実線）と、Alcock et al.(1997)で用いられたMACHOの質量が $0.5M_{\odot}$ となる回転曲線（点線）。青い領域は図1の回転曲線で許される範囲を示し、実線、点線とも観測とは矛盾していない。

わかるのだが、昔の銀河のハローが明るく輝いていたという事実はない。また、星が燃え尽きて白色矮星になるまでにはさまざまな重元素を放出するが、MACHOが白色矮星だとすると過去に大量の重元素が放出されたことになり、現在観測される重元素量と一致しない。さらに、ダークハローの50%が白色矮星MACHOからなっているとすると、残りの半分は何かという問題が生じる。もちろん素粒子型のダークマターを含めて可能性はさまざまであるが、いずれにしてもなぜ銀河のダークハローが、全く性質の異なる2種類（あるいは複数）の物質からなっているのかについても説明する必要がある。このように白色矮星MACHOには多くの問題点があり、現段階ではそのまま受け入れることは難しい。

ところで白色矮星MACHOという説は、その質量が $0.5M_{\odot}$ であるというところからきており、その

質量は 210 km/s のフラットな回転曲線を仮定して得られたものである¹³⁾。ところが先ほど述べたように銀河系の場合回転曲線の振る舞いは特に銀河系の外層部で不確定である。従って、銀河系の回転曲線を図1と矛盾しない範囲で変えれば、MACHOの質量も著しく変化する可能性がある。そこで、MACHOの質量がどこまで小さくなるかを調べるために、図3の実線で示したような回転曲線を与えてMACHOの質量を計算してみた。そのような計算を行ったところ、予想通りMACHOの質量は 0.5 太陽質量よりも小さくなるのだが、特に興味深いことに、ハローモデルによってはMACHOの質量が太陽の10分の1よりも小さくなり、また同時にハローの質量の内MACHOの占める割合がほぼ100%になることがわかった¹⁴⁾（図4）。太陽の10分の1よりも小さな星（より正確には太陽質量の8%程度以下の星）は質量が軽いために中心

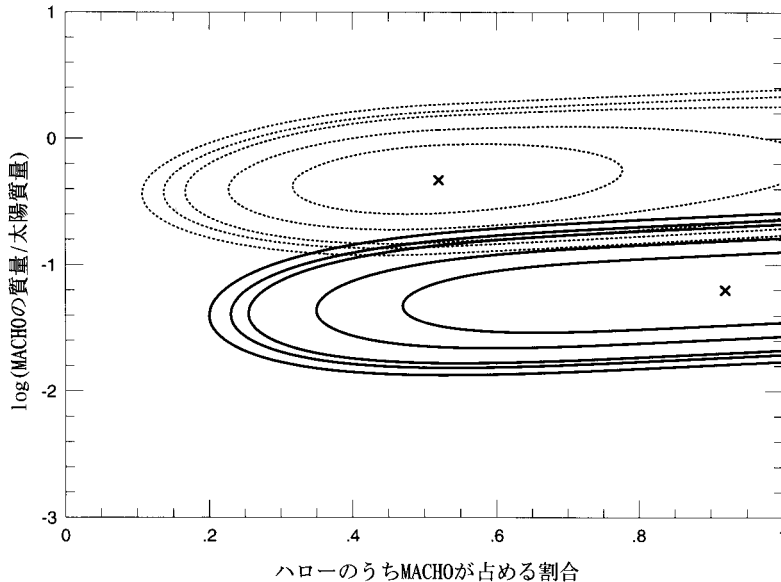


図4：図3の2つの回転曲線を用いた場合の、MACHOの質量（横軸）と、MACHOがハローの占める割合（縦軸）の推定値。実線は外側で落ちる回転曲線の場合で、点線はフラットな回転曲線の場合。等高線はそれぞれ、34、68、90、95、99%の確からしさを表す。

部で核融合反応をおこすことができない「褐色矮星」となる。褐色矮星は大変に暗いのでダークマターの有力な候補として古くから考えられていたが、我々の研究によって褐色矮星がMACHOである可能性が初めて定量的に示されたのである。MACHOが褐色矮星だとすると、白色矮星の場合よりも他の観測事実を矛盾なく説明できる。なぜなら、褐色矮星は生まれた当初から暗いために昔の銀河のハローは暗くて良いことになり、また褐色矮星は重元素を放出しないので重元素量の観測とも矛盾しない。さらに我々の結果からはハローのほぼ100%がMACHOからなっている可能性が示されており、白色矮星MACHO説のようにMACHOとその他の物質が混在するダークハローを考える必要がない。

このように褐色矮星MACHOは白色矮星よりも矛盾なくいろいろな観測を説明できるので、その意味では都合が良い。ただし、この研究から示されたことは、褐色矮星MACHOも十分に可能性があるということであり、MACHOが褐色矮星であると

確定したわけではない。その重要な鍵を握っているのが、銀河定数や回転曲線といった銀河系の回転を記述する量であり、今後MACHOの正体を明らかにするためにもその精密な測定が必要である。また、重力レンズの観測をさらに続けてMACHOに関する情報を増やすことも重要であり、欧米の観測グループだけでなく日本とニュージーランドの国際共同研究グループであるMOA (Microlensing Observations in Astrophysics)にも大きな期待がよせられている。

5. 銀河系の回転を測る VERA

以上に見たように、銀河系の回転はダークマターの分布や正体の研究においても重要な鍵を握っており、その研究は21世紀の天文学における大きな課題である。そのような中、現在国立天文台が進めるVERA計画は、銀河系全域の三角測量をもとに銀河系の回転を従来よりも高い精度で測るプロジェクトとして注目を集めている。

VERAとはVLBI Exploration of Radio Astrometryの略で、VLBIの手法による高精度位置天文を目指したユニークな計画である。VLBIとは電波干渉計の一種で、地球上で数千キロ離れた電波望遠鏡で同じ天体を観測することにより極めて高い分解能を達成する装置である。VERA計画では水沢、鹿児島、石垣島、小笠原父島の4箇所に口径20mクラスの電波望遠鏡を配置し、さらに相対VLBIという手法により大気揺らぎを補正することで、10マイクロ秒角という位置決定精度を目指している。近年位置天文学を始めとする様々な分野において大きな成果をあげたヒッパルコス衛星¹⁵⁾の位置決

定精度は1ミリ秒角であるから、VERAはその精度を一気に2桁あげてを狙っているのである。10マイクロ秒角の精度が達成されれば、 D kpc離れた天体の距離が $D\%$ の精度で求まり、また固有運動は $0.05 \times D$ km/sの精度で測定できる。従って、VERAでは銀河系のほぼ全域にわたって三角視差による直接測距が行えることになり、距離と固有運動と合わせて銀河系の運動の様子を精密に描き出すことができる。

例えば、VERAでは銀河中心距離 R_0 を三角測量により10%以下の精度で決定できる。また、太陽近傍の銀河回転の速度 Θ_0 については、太陽近傍や太陽円上の天体を数10個程度観測すれば、数km/s程度の精度で決めることができるであろう。銀河定数をこれだけの精度で決めることが出来れば、それだけでも銀河系の回転曲線の形はかなりはっきりしてくるはずである。VERAではさらに、太陽円より外側の銀河系にあるメーザー源を観測することにより回転曲線も正確に決定できる。例えば太陽円より外側の銀河系を10程度のリング状の領域にわけて、それぞれのリングで10天体程度を観測したとする。それぞれのリングのランダム運動が15 km/s程度とすれば回転速度の決定誤差は5 km/s程度となり、これは図2の回転曲線の誤差(最大でおよそ30 km/s)よりもはるかに小さい。この結果をVERAで得られる銀河定数と合わせることで、VERAでは最終的に回転曲線を最大でも10 km/s以内の精度で求めることができよう。

そのような結果が得られれば銀河系内のダークマターの分布を詳しく描き出せるだけでなく、先に述べたようにMACHOの正体についても強い制限をつけることができるであろう。

このようにVERAの目指している10マイクロ秒角台での位置天文学は、銀河系動力学やダークマターの研究に大きな成果をもたらすと期待され、今世界で注目を集めている分野である。実際日本のVERA以外にも、10マイクロ秒角台での位置天文学を目標にして、アメリカはSIM、ヨーロッパは

GAIAという光干渉計位置天文衛星を計画中で、2005年～2010年ころの打ち上げを目指している。21世紀初頭にはVERAを始めとするこれらの装置が高精度位置天文の新時代を切り開き、銀河系回転の精密測定から銀河やダークマターの研究において革新的な成果をもたらすと期待される。

この記事は筆者の博士論文をもとにまとめたもので、指導教官である祖父江義明教授に心より感謝します。また、4章のMACHOの研究は官谷幸利氏との共同研究であり、氏の協力に感謝します。

参考文献

- 1) Guinan E., et al., 1998, ApJ 509, L21
- 2) Mayor M., Queloz D., 1995, Nat 378, 355
- 3) Miyoshi M., et al., 1995, Nat 373, 127
- 4) Bosma A., 1981, AJ 86, 1825
- 5) Rubin V., et al., 1982, ApJ 261, 439
- 6) 祖父江 義明, 1997, 天文月報 90 巻第 3 号, 122
- 7) Alcock C., et al., 1993, Nat 365, 621
- 8) Aubourg E., et al., 1993, Nat 365, 623
- 9) Clemens D., 1985, ApJ 295, 422
- 10) Honma M., Sofue Y., 1997, PASJ 49, 453
- 11) Merrifield M., 1992, AJ 103, 1552
- 12) Honma M., Sofue Y., 1996, PASJ 48, L103
- 13) Alcock C., et al., 1997, ApJ 486, 697
- 14) Honma M., Kan-ya Y., 1998, ApJ 503, L139
- 15) 宮本昌典, 辻本拓司, 1997, 天文月報 90 巻第 8 号, 357

The rotation of the Milky Way Galaxy and the dark mater

Mareki HONMA

Mizusawa Astrogeodynamics Observatory, NAOJ, Mizusawa, Iwate VERA Project Office, NAOJ, Mita-ka, Tokyo 181-8588

Abstract: The rotation of the Milky Way Galaxy is of great importance in investigating the Galaxy and the dark matter. The shape of the Galaxy's rotation curve strongly depends on the Galactic constants, and thus the largest uncertainty in the rotation velocity is still of 100 km/s. The nature of MACHO is also uncertain depending on the shape of the outer rotation curve, and the brown dwarf MACHO is a potential candidate for the Galactic dark matter if the outer rotation curve is slightly declining. The VERA project is expected to resolve these problems concerning the Galaxy and MACHOs.