

マゼラン雲に探る変光星の周期光度関係

板 由 房

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: yita@ir.isas.jaxa.jp

変光星の周期光度関係は宇宙の距離尺度としてしばしば利用されています。しかし、意外なことに、それがユニバーサル（メタル量によらず）に適用可能な関係なのか、また、星の進化段階や種族、振動モードの違いが周期光度関係にどのように反映するかはわかっていません。私たちはこれらの事柄を調べるため、大小マゼラン銀河中に存在する変光星を長期間モニターしました。その結果、星のメタル量によって周期光度関係が変化すること、今までの通説では変光しないと思われていた進化段階で星が変光する可能性があることがわかりました。また、従来から知られていたミラ型星とは別の新しい周期光度関係を発見し、その関係をもつ星の特徴を調べた結果、それは 1st overtone mode で振動しているミラ型星であることがわかりました。

1. はじめに

夜空を見上げた時に、あの星までいったいどのくらいの距離なんだろう？ と思ったことは誰でも一度はあると思います。太陽近傍（数百 pc 程度まで）にある天体の距離は三角視差を用いた純幾何学的方法で精度良く決めることができます¹⁾。ですが、視差は天体までの距離に比例して小さくなり、測定がどんどん困難になっていきますので、より遠方の天体までの距離が知りたい場合には、別の方法を考えなくてはなりません。その方法の一つとして、変光星の周期光度関係があります。

1.1 脈動変光星の周期光度関係

変光星とは、その名のとおりに、明るさが時間変動する星のことを言います。宇宙にはさまざまな種類の変光星が存在しており²⁾、変光の機構もさまざまです。本稿では特に、脈動変光星のうちで、変光周期と自身の明るさ（絶対等級）との間に一定の関係（＝周期光度関係）をもつ変光星にスポットライトをあてたいと思います。今後特に断

わらない限り、本稿で変光星とは脈動変光星を指すこととします。

変光星の中でも、セファイド変光星の周期光度関係は特に有名で、天体までの距離を測る物差しとしてしばしば用いられています。どの程度までの距離をこの周期光度関係で決められるかと言いますと、Hubble 宇宙望遠鏡を用いた場合、遠方銀河中にセファイド変光星さえ見つければ数十 Mpc までの距離を決めることができます。

しかし、この周期光度関係には、実はまだ多くの未解決な問題が残っています。例えば、変光星の種類、種族 (I or II) や星のメタル量、振動モードの違いが周期光度関係にどのように反映されるかはわかっていません。これらの問題が未解決のままでは、誤った天体に誤った周期光度関係を適用してしまうことになり、距離を間違えて計算してしまうこととなります。有名な話に、Hubble 博士が種族 I と種族 II のセファイド変光星を結果として取り違えて周期光度関係を適用し、アンドロメダ銀河までの距離を現在考えられている距離（約 0.7 Mpc）よりも約 2.5 倍近く見積もってし

まっていた例があります。

1.2 大小マゼラン銀河

周期光度関係にまつわる上記の問題を調べる上で最適な天体は、大小マゼラン銀河です。この二つの銀河は、わりと小口径の望遠鏡でも個々の天体が分解できるほどに私たちの銀河から近く、それでいて、私たちから両銀河中の個々の星までの距離を良い近似ですべて同じと見なせるくらいには、ほどほどに遠い位置にあります。そのため、大小マゼラン銀河中の変光星を一様に観測し、その明るさと変光周期を測定することによって、簡単に周期光度関係を導くことができます。私たちの銀河中にある変光星は近くにあるため観測は容易ではあるのですが、三角視差が使える太陽の極近傍星を除いては距離（＝絶対等級）がわからないため、残念ながら簡単には周期光度関係の上のせることができません。

2. モニター（反復）観測

このような特徴をもった大小マゼラン銀河は、北半球からは見ることはできません。また、変光星を観測するためには長期間にわたって明るさの時間変動をモニターする必要があります。モニター観測は膨大な望遠鏡時間を要求することから、サーベイ専用望遠鏡が必要になります。そこで私は、博士課程の3年間で延べ1年間以上にわたって南アフリカに滞在し、IRSF/SIRIUSサーベイ望遠鏡を用いてモニター観測を行いました。半年間以上に及ぶ連続滞在も経験し、私の青春をすべて投入した観測です。余談になりますが、観測所の食事は基本的に毎日羊肉が出ます。数カ月間毎日羊肉を食べ続けていた時、ちょうどIRSFへ観測に来られたすばるの関口和寛さんと高田唯史さんが、鰻の蒲焼きの真空パック、せんべいや雑誌を差入れて下さいました。あの時はお二人が神様のように感じました。お二人にはこの場を借りてお礼申し上げます。ありがとうございました。

話を戻します。私たちはこのモニター観測を2000年12月に開始しました。その後、名古屋大学Z研の皆さんほか、さまざまな方々の協力を得て、今日まで約4年間にわたって観測を続けています。反復観測している領域は、大マゼランがバーに沿って3平方度、小マゼランが中心の1平方度³⁾とたいへん広く、これまでに、両銀河から合わせて約2万個の変光星を検出することに成功しています。また、可視では非常に暗く、赤外で非常に明るい赤外変光星も多数発見しました。赤外変光星は、太陽のような中小質量星が進化し、今まさにその一生を終えようとしている段階にあると考えられるため、星の進化を考える上で重要なサンプルとなります。これらの観測結果も楽しみなのですが、赤外変光星の変光周期は一般的に非常に長く（500日以上）、精度の良い変光周期を得るためにはさらに数年間観測を続ける必要があります。そこで私たちは、赤外変光星はデータ蓄積後に腕によりをかけて料理することにし、まずは重力レンズ天体探査計画（OGLE計画⁴⁾）の副産物として見つかった、可視でも明るい変光星（一般には赤外変光星に比べ周期が短い）のモニター観測データと、私たちがIRSF/SIRIUSで得た近赤外のデータを組み合わせたデータを用いて、変光星の周期光度関係について問題点を調べることにしました。

3. 観測結果

図1に、私たちが導出した大小マゼラン銀河中の周期光度関係を示します。縦軸はK等級、横軸は周期（日）のLogをとったもので、上段が大マゼラン、下段が小マゼラン銀河で得られた結果です。何本ものシーケンス（＝周期光度関係）が見られますが、これらは変光星の種類の違いと、脈動モードの違いを反映しています。また、各シーケンスに乗る代表的な変光星の種類と振動モードを表1にまとめました。以下、この図から読み取れる観測事実や、明らかになったことを項

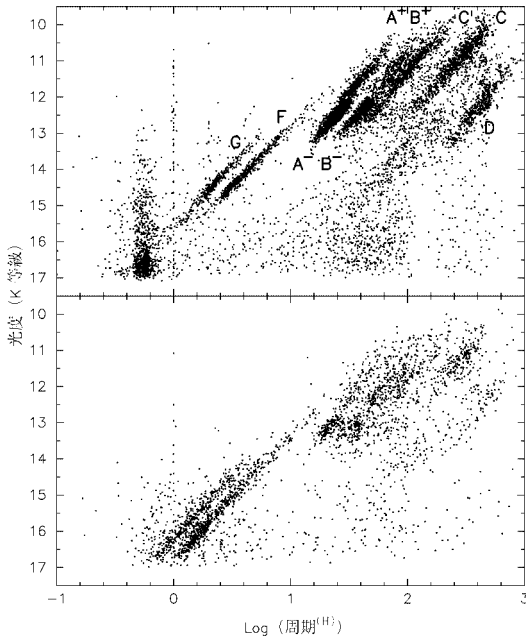


図1 大小マゼラン銀河で得られた周期光度関係です。縦軸はK等級、横軸は変光周期を表しています。上段、下段はそれぞれ大マゼラン、小マゼラン銀河についての図で、上段の図には周期光度関係ごとにラベルを付けました。このラベルの説明は表1を参照してください。

表1 図1の各シーケンスに乗る変光星の種類

記号	変光星の種類
A ⁻	RGB型変光星 & metal poor and/or old AGB 変光星
A ⁺	不規則 & 半規則型 AGB 変光星
B ⁻	RGB型変光星 & metal poor and/or old AGB 変光星
B ⁺	不規則 & 半規則型 AGB 変光星
C'	1st overtone モードで振動しているミラ型星
C	基準モードで振動しているミラ型星
D	赤外変光星 & 正体不明の変光星
F	基準モードで振動しているセファイド変光星
G	1st overtone モードで振動しているセファイド 変光星

目ごとに簡単に紹介したいと思います。

3.1 種族IIのセファイドがない!?

Hubble博士がアンドロメダの距離を間違えて見積もってしまった話の中で出てきた種族IIの

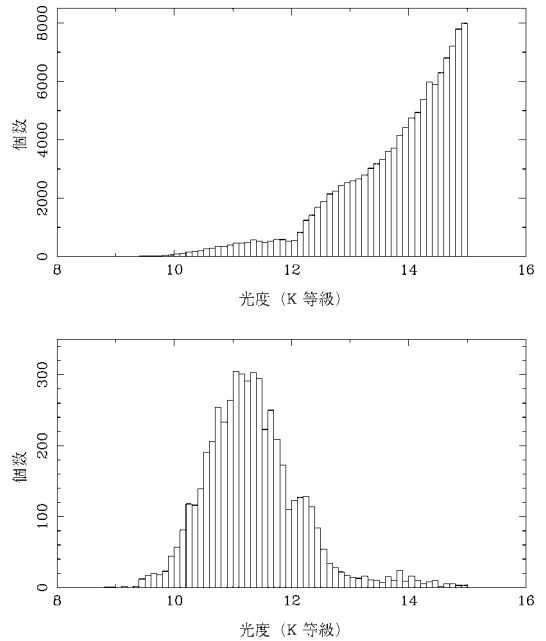


図2 上段: 大マゼラン銀河のバー部分に存在する星全部のKバンドの光度分布です。K-12等ところで急に星の数が増えています。この段差はTRGBの明るさに対応しています。TRGBより明るければAGB星、暗ければRGB星が、それぞれドミナントな成分であると考えてください。下段: 上段の星の中から、変光星のみを抜き出してKバンドの光度分布を作った図です。上段と比べると、ちょうどTRGBの明るさのところで変光星の数が増えることがわかります。

セファイド変光星が、マゼラン銀河中にも多数存在するとすれば、FとGの系列よりも1.5-2等程度暗く、短周期の位置に種族IIのセファイドの周期光度関係が見られるはずですが、図1から明らかなように、種族IIのセファイド変光星が少なくとも私たちが調べた大・小マゼラン銀河中の領域には多数存在していないようです。また、小マゼラン銀河のほうが、周期が短い(したがって、暗い)セファイド変光星が多いこともわかると思います。これらは二つの銀河の星形成史の違いや、平均メタル量の違いなどを反映していると考えられます。

3.2 周期光度関係のメタル依存性について

大小マゼラン銀河、これら二つの銀河の間には、平均メタル量に約2倍の違いがあることが知られています(大マゼラン>小マゼラン)。これら二つの銀河のメタル量の違いを利用して、私たちは周期光度関係のメタル量依存性を調べることにしました。これまで大小マゼラン銀河を使って周期光度関係のメタル依存性を調べた研究は多数ありましたが^{5,6)}、理論、観測ともに互いに矛盾するさまざまな結果が出ていました。その理由は、これまで一度に一つの種類の変光星(例えば、セファイド)の周期光度関係しか扱っていなかったからです。そのため、メタル量による周期光度関係の違いが、大小マゼラン銀河間の距離差(距離指数で約0.45等)に関する不確定性(距離指数で最大約±0.1等)にうずもれてしまっていました。そこで今回私たちは、これまでになく深い近赤外の測光データを取得し、大小マゼラン銀河中のセファイドと、赤色巨星という、二つの種類の変光星の周期光度関係を一度に直接比較しました。その結果、同じ変光周期で比べた場合は、セファイド変光星はメタル量が増えるとKバンドで明るくなり、ミラ型変光星はメタル量が増えるとKバンドで暗くなるという結果が得られました。

3.3 RGB段階での変光の可能性

太陽の0.8から8倍程度の質量をもった中小質量星は、主系列段階を終えると1度目の赤色巨星となります。この段階をRGB段階と呼びます。特に、約2太陽質量より小さい質量をもった星はRGBの最終段階(Tip of the RGB=TRGBと書きます)でHeの縮退コアをもち、その周りでHがシェル燃焼している内部構造をもちます。このRGB段階を終えると、水平分枝の段階を経て、中小質量星は再び赤色巨星に進化します。この2度目の赤色巨星の進化段階をAGB段階と呼びます。AGB段階では、C+Oの縮退コアの周りで

Heのシェル燃焼、さらにその外側でHのシェル燃焼という構造をもちます⁷⁾。AGB星とTRGB星は、燃焼シェルの数とコアを形成する原子こそ違いますが、両者とも縮退コアの周りのシェルで物が燃えているという構造は同じです。

中小質量星はAGBの末期に変光星となり、大規模な質量放出をすることがこれまでの観測でわかっています。このAGB末期段階にある星の典型的な例がミラ型変光星です。これまで、RGB進化段階にある星は変光せず、変光している赤色巨星と言えばそれはAGB進化段階にあるというように、変光はAGBの診断書と考えられてきました。しかし、私たちはこの通説は正しいのであろうかという疑問をもったのです。AGB星とTRGB星は似たような表面温度をもつことから判別が難しく、これまで両者を陽に分けて研究した例はありません。現在のところ、この2者を分ける最も有効な方法は、AGB星のほうがTRGB星よりも明るいことを利用した、絶対光度による方法です。TRGB星は縮退コアをもつことに基因した理由で、TRGBの明るさのリミットを超えられませんが、AGB星はTRGBを超えて進化するからです。

マゼラン銀河では、距離の問題から開放され、星の明るさを直接比較することができますから、私たちは単純に、変光星の光度分布を調べました。すると、それが二山になることがわかったのです(図2参照)。星の数の分布から考えて、明るいほうの山はAGB星、暗いほうの山はTRGB星からの寄与がドミナントであろうという解釈が自然です。しかし、まさに自然のいたずら?で、メタル量が少なくかつprogenitorが太陽質量程度の星はAGBでもTRGB付近の明るさまでしか進化できないことがわかっていますから⁸⁾、暗いほうの山の寄与がすべてTRGB星であるというように言い切れるわけではありません。

ですが、数から考えてすべてがそのようなメタルプアで古い星だとは考えにくいことも確かです

ので、私たちは、2太陽質量より小さな質量をもった星は TRGB で変光する可能性があることを初めて指摘しました。星の脈動による変光は質量放出のメカニズムの最有力候補として考えられていることから、TRGB 段階での変光のあるなしは、実は星の進化を考える上で重要なことなのです。

3.4 新たな周期光度関係の発見とミラ型星の脈動モード

Peter Wood 博士らの観測⁹⁾により、ミラ型星はシークエンス C に乗っていることがわかりました。ですが、ミラ型星の支配的な振動モードは基準振動なのか、それとも 1st overtone mode なのかは諸説あり、これまで数十年来議論が続いていました。振動モードを観測から知ることができれば、それは星の脈動理論への制限になるだけでなく、モード別に存在する周期光度関係を正しく使用することにもつながります。Wood 博士の研究では、シークエンス C' が B⁺ に埋もれて一つに見えてしまっていました。

私たちは、数万星にも及ぶ星の変光データを、手と目を使って一つ一つ丁寧に解析していった結果、C' は B⁺ とは別の系列であり、違う種類の変光星が乗っていることを発見したのです。さて、この新しく見つかった C' に乗る星は一体何者なのでしょう。私たちは、C' に乗る星の色、炭素星の割り合いや分布を調べたり、脈動理論計算¹⁰⁾との比較を行った結果、C' には C と同じ種類の星、つまりミラ型星が乗っていると結論づけました。また、C に乗っているミラ型星は基準モードで振動しており、C' のものは 1st overtone mode で振動しているミラ型星であるという結論も得ました。

この結果、ミラ型星には少なくとも二つ以上の支配的な振動モードがあり、基準振動しているものもあれば、1st overtone mode で振動しているものもあるということになり、数十年来続いてきた議論に終止符を打つことができました。

4. 今後—ASTRO-F への期待—

現在私がお世話になっている、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部が中心となって開発を続けてきた ASTRO-F 衛星は、2005 年度中の打上げを予定しています。この観測衛星は近 & 中間 & 遠赤外に感度をもつ観測装置を搭載しており、地上からは観測しにくい or 不可能な波長で宇宙を見ることができます。私たちはこの衛星を使って、大マゼラン銀河を中間赤外域で世界で初めて広域サーベイする観測を提案しています。もしもこの提案が実現されるとすれば、IRSF/SIRIUS のデータと組み合わせることによって、大マゼラン銀河に属する多くの星に対して、近赤外から中間赤外にかけての完全なデータが世界で初めてそろえることとなります。この完全データを用いることにより、変光と星の質量放出現象の関係などが明らかになることでしょう。ASTRO-F 衛星の活躍も期待しててください。

謝 辞

膨大な観測時間を快くくださった佐藤修二先生、長田哲也先生、田村元秀先生には本当に感謝しております。また、名古屋大学 Z 研の皆様が IRSF/SIRIUS のような素晴らしい観測装置、使いやすい観測システムを作り上げてくださったことに感謝します。本稿の内容は、私の博士論文の抜粋です。指導してくださった中田好一先生、田辺俊彦先生、本当にありがとうございました。また、いろいろと相談にのってくださった松永典之氏に感謝します。

この声は届かないと思いますが（日本語ですし）、南アフリカ天文台のスタッフの皆さん、サザerland 観測所で毎日羊料理を出してくれたおばちゃん方、ありがとうございました。サザerland 観測所のおばちゃんはみんな例外なくコニシキのような体格をしており、帰国時に別れのハグをもらった時は、私の腕のリーチをもってし

でも腕が彼女たちの体を一周せず、巨木にしがみついた感じがしたのが印象的でした。

最後に、南アに行く前までは下戸だった私に、南アの美味しいワインやビールの飲み方をご自身みずから実践（実飲）しながらスパルタ教育してくださいました加藤大輔氏に格別の感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Perryman M. A. C., et al., 1997, A&A 323, L49
- 2) Gautschy A., Saio H., 1995, ARA&A 33, 75; 1996, ARA&A 34, 551
- 3) Ita Y., et al., 2004, MNRAS 347, 720; 2002, MNRAS 337, L31
- 4) Zebrun K., et al., 2001, Acta Astron. 51, 317
- 5) Gascoigne S. C. B., 1974, MNRAS 166, 25
- 6) Wood P. R., 1990, in Mennessier M. O., Omont A., eds., "From Miras to Planetary Nebulae," Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette, p. 67
- 7) Habing H. J., 1996, A&AR 7, 97
- 8) Girardi L., et al., 2000, A&AS 141, 371
- 9) Wood P. R., 2000, PASA 17, 18
- 10) Wood P. R., Sebo K. M., 1996, MNRAS 282, 958

Period-Luminosity Relations of Variable Stars in the Magellanic Clouds

Yoshifusa ITA

*Institute of Space and Astronautical Science,
Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1
Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229-8150,
Japan*

Abstract: We have performed a cross-identification between OGLE-II data and SIRIUS near-infrared (NIR) *JHK* survey data in the Large and Small Magellanic Clouds. Based on these homogeneous data, we studied the pulsation properties and metallicity effects on period-*K* magnitude (*PK*) relations by comparing the variable stars in the LMC and SMC.