

II 型セファイドの周期光度関係 —距離指標としての確立



松 永 典 之

〈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: matsunaga@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

宇宙の大きさと進化を調べるために必要な「距離のはしご」. その1ステップとして、セファイド変光星が重要な役割を果たしている. セファイドと呼ばれる天体には、明るさの異なる2種類のグループが存在する. 明るい「古典的セファイド」が天文学の中心的話題として研究され続けてきた一方、暗い「II型セファイド」はあまり注目されてこなかった. その原因の一つには、個々の星がII型セファイドとして変光する期間が短く、そもそも観測で発見される個数が少ないこともあった. 最近行われた大規模な観測では、多くのII型セファイドが新たに発見され、定量的な議論も可能になってきた. 筆者らがこの数年行ってきた研究によって、距離指標としての基礎が確立され、この天体に対する研究は新たな段階を迎えようとしている.

1. 2種類のセファイドの分離

天文学において、ある天体までの距離を調べることは最も重要かつ困難な作業である. 非常に広い宇宙空間を対象とする天文学では、一つの方法を使うだけでは不十分で、いろいろな方法でだんだん遠くの天体までの距離を明らかにしていく. これを「宇宙の距離のはしご」と呼ぶ. その中で、セファイド変光星の周期光度関係を利用した距離決定法は、主に100光年から1億光年の範囲で使われる方法である. 現在でも、この「はしご」の1ステップを正確にしようとさまざまな研究が行われている. ところで、セファイドには大きく分けて二つのグループが存在し、これまでの研究で専ら脚光を浴びてきたのは、そのうちの明るいグループ（古典的セファイド）である. 本稿では、暗いグループ（II型セファイド）にスポットライトを当てる. まず、セファイドの周期光度関係と2種類のグループの区別がどのように明らかにされてきたかを振り返ってみたい.

1.1 リーヴィットの発見

セファイドの周期光度関係は、今から100年前にヘンリエッタ・リーヴィットによって発見された. ハーバード大学天文台の助手であった彼女は、小マゼラン銀河を撮影した膨大な数の写真乾板に目を通して変光星を探す作業を繰り返し、1,777個もの変光星を発見した¹⁾. その中で16個のセファイドについて、周期が長いものほど明るいということに気づく. セファイドは周期1日-100日程度で規則的な変光を繰り返す脈動天体で、その代表的な星であるケフェウス座デルタ星の名前をとってそう呼ばれる. 1912年には、25個のセファイドについて研究をまとめ、周期と明るさの間にはっきりとした関係のあることを示した²⁾. これは画期的な発見である. あるセファイドを見つけたときに周期を決定すればその天体に固有の明るさがわかるので、それを見かけの明るさと比較することでその天体までの距離を計算することができるからだ. リーヴィットは自分の発見した法則が宇宙の謎を解明していくのを見るこ

となく、1921年にその控え目な生涯³⁾を終えた。しかし、彼女の発見は、間違いなく天文学の新たな時代を切り開く大きな一歩であった。

1.2 ハッブルの活躍

こうして発見された周期光度関係を最も有効に活用したのはハッブルであった。1924年、周期光度関係を利用してアンドロメダ銀河(M31)までの距離を求め、われわれが住む銀河系に属さない独立した銀河であることを明らかにする。さらに、1929年には、遠い銀河ほどわれわれから速く遠ざかっているという、ハッブルの法則を発見した。その結果は、宇宙があるときに誕生して、現在も膨張を続けているというビッグバン理論へと発展していく。これらの成果については、数多くの書籍で紹介されている^{4),5)}。

ところで、ハッブルの発見から発展していったビッグバン理論には、当初いくつかの大きな問題が存在したが、その一つが宇宙の年齢に関する矛盾であった。当時の計算によると、宇宙の年齢は約20億年と求められた。ところが、それは岩石中の放射性元素などを利用して求められた地球の年齢よりも小さい。この矛盾の大きな原因であったのが、2種類のセファイドの存在である。

1.3 バーデらの解決

1944年、ウォルター・バーデは米国・ウィルソン山天文台の100インチ望遠鏡を使って、アンドロメダ銀河の中心部やその伴銀河M32、NGC205などを観測した。すると、それまで太陽の近くで知られていた青い明るい星とは異なる、赤い星の集団が検出された⁶⁾。これが、年齢や金属量に応じて星の色や明るさの分布が全く異なる恒星種族が存在するという新たなパラダイムへの転換点となった。1950年には、新しく建造されたパロマー山天文台200インチ望遠鏡ではっきりと恒星種族の違いを示した。そして、この2種類の恒星種族

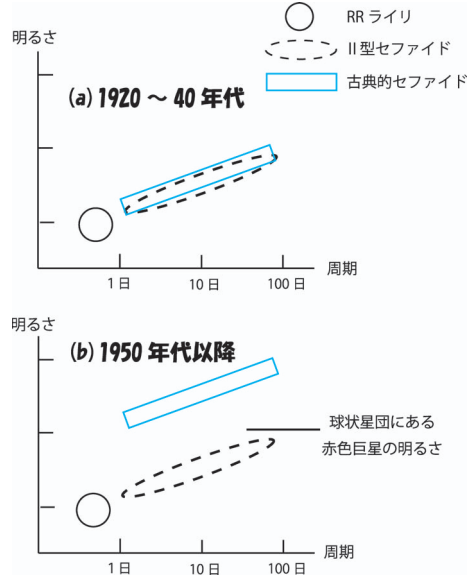


図1 2種類のセファイドの周期光度関係に関する認識の変遷。縦軸の上向きがより明るく、1日盛りごと約4倍異なる。ただし、1920年代当時は2種類のセファイドの区別は存在しなかった。最新のデータに基づく現在の描像は図3を参照のこと。

が2種類のセファイドの違いと密接に関係し、それによって距離に関する議論が混乱していたことを明らかにしたのだ。

図1の模式図をご覧ください。それまで、セファイドの周期光度関係の短周期側には、球状星団に多く見られるRRライリ(黒丸)が並んでいると考えられていた。それらは周期が0.3-0.8日程度であり、セファイドと同じ脈動不安定帯^{*1}に分布している。さらに、球状星団には、個数は少ないが周期1日-数十日のII型セファイド(点線の楕円, 黒)も存在する。当初は、このII型セファイドとマゼラン銀河などで見つかる古典的セファイド(青の四角)が同じ明るさをもつと思われていた。これが1920-40年代の状況である(図1(a))。

*1 セファイド、RRライリなどいくつかの脈動変光星は、表面温度と明るさのヘルツシュプルング・ラッセル図において、特徴的な帯状の領域に分布している。

その関係に従えば、すでに観測されているアンドロメダ銀河のセファイドよりも少し暗いところに RR ライリが見つかるはずであった。ところが、十分な感度をもつはずの 200 インチ望遠鏡でも RR ライリは検出されず、期待された等級で見えてきたのは赤色巨星であった。球状星団では、これに対応する赤色巨星が RR ライリより 4 倍ほど明るいところに存在する。1944 年の観測から異なる二つの恒星種族が存在することを確信していたバーデは、周期光度関係にも二つ異なるものがあるのだと結論づけた。それによれば、アンドロメダ銀河で観測されていたセファイドは、球状星団にある RR ライリと II 型セファイドよりも 4 倍ほど明るい周期光度関係をもつ (図 1 (b))。当時、RR ライリの固有の明るさがかなり正確に求められていたのに対して、古典的セファイドはそれまで考えていたよりも約 4 倍明るいことがわかったのだ⁷⁾。現在では、古典的セファイドは渦巻き腕や薄いディスクに付随する年齢 1 千万年–1 億年の天体であり、一方の II 型セファイドはハローや厚いディスクに付随する年齢 100 億年以上の天体であることがわかっている。

さて、バーデによるこの結論は 1952 年にローマで開催された天文学連合会議で報告されたが、ちょうど同じ会議でもう一つ決定的な報告がなされる⁸⁾。それは、南アフリカ・ラドクリフ天文台のアンドリュー・チャカレイによるもので、小マゼラン銀河にあると考えられる球状星団 NGC121 での RR ライリの発見である。その等級はセファイドの周期光度関係からやはり 4 倍暗いほうへずれていて、図 1 (b) のような状況にあることを決定づけた。さらに翌年、チャカレイは大マゼラン銀河にある球状星団でも同じことを確かめた⁹⁾。

これらの研究から、アンドロメダ銀河や大小マゼラン銀河までの距離が、それまでの推定よりも約 2 倍遠くにあることが判明した。これにより、宇宙の大きさ・年齢も 2 倍になった。その後、星間吸収のより正しい見積もりなどによって宇宙年

の推定値は徐々に大きくなり、現在では約 140 億年¹⁰⁾となっている。この値は、「距離のはしご」に依存しない宇宙背景輻射による研究 (特に WMAP 衛星) の結果¹¹⁾とも一致している。

2. II 型セファイドの周期光度関係の確立

さて、バーデらによって 2 種類のセファイドの存在が明らかとなると、天文学者はさらに遠くの銀河の距離を決めようと、古典的セファイドをさかんに観測するようになる。明るい古典的セファイドの方が、より遠くの銀河まで届くことは明らかだ。その一方で、II 型セファイドはほとんど見向きもされなくなってしまった。球状星団は現在も多くの日文学者の関心を集める天体であり、II 型セファイドもそこに存在するのだが、球状星団の距離は専ら RR ライリによって求められてきた。ずっと個数の少ない II 型セファイドを研究しようと思うのは、言い方は悪いが、少し変わり者の天文学者だけとなったのである (たとえば筆者のような…)

2.1 球状星団にある II 型セファイド

筆者らは、まず球状星団にある II 型セファイドに目をつけた。銀河系には約 150 個の球状星団が発見されている。2006 年当時、25 個の球状星団の中に、約 100 個の II 型セファイドが知られていた¹²⁾。しかし、それらのほとんどは写真乾板で発見されたきりであまり観測されず、誤差の大きな平均等級しか得られていなかった。そのため、II 型セファイドがどのような周期光度関係に従っているか、不定性が大きかった。

そこで、われわれは南アフリカ天文台に設置された IRSF/SIRIUS という近赤外線観測装置を用いて系統的な反復観測を行った。145 個の球状星団を 4 年間にわたって観測し続けた結果¹³⁾、10 個の新発見天体を含む 46 個の II 型セファイドの近赤外線等級が得られた。図 2 がわれわれの得た結果であり、II 型セファイドの K_s バンド (中心波

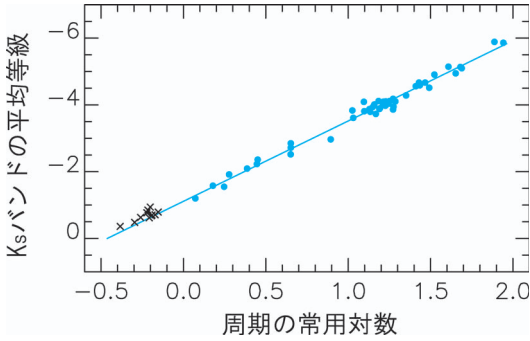


図2 球状星団にあるII型セファイドの周期と近赤外線Ksバンド等級との関係。●印がわれわれの得たII型セファイドの観測結果で、×印は球状星団NGC6341にあるRRライリ変光星。

長 $2.14\ \mu\text{m}$)での平均等級と周期との関係をプロットしたものである¹⁴⁾。各球状星団は異なる距離にあるので、その距離をRRライリによる方法で求めて、それを補正した絶対等級を使っている。直線の関係にたいへんよく従っていることがわかった。さらに、その関係はRRライリ(図2の黒の×印)がもつ周期光度関係¹⁵⁾とも一致することがわかった。また、球状星団にはいろいろな金属量のものがあるが、II型セファイドがどのような金属量の星団にあるかということに関係なく、図2で見つかった同一の関係に従うこともわかった。古典的セファイドの周期光度関係については、金属量によって全体的に暗くなったり明るくなったりする可能性がしきりに議論されているが¹⁶⁾、その結論は出ていない。

この金属量依存性の話題に関連して、赤外線観測の利点についても述べておこう。2種類のセファイドやRRライリなどでは、可視光よりも赤外線での等級を使ったほうが、周期光度関係がきれいになる。そして、金属量依存性も、赤外では(仮にあったとしても)たいぶ小さいことが知られている。セファイド不安定帯には温度の幅があるため、同じ周期であっても温度の違う天体が存

在するが、赤外線等級はその影響を受けにくいのがそれらの理由である。変光星を赤外線観測する大きな利点である。

2.2 大マゼラン銀河にあるII型セファイド

100年前、セファイドの周期光度関係が発見されたのが、ハーバード大学天文台によるマゼラン銀河の大探査の結果であったように、天文学においては大量の観測データが質的な飛躍を促すことがしばしばある。最近起こった顕著な例が、マイクロ重力レンズ探査によって引き起こされた変光星研究の進展であろう。ポーダン・パチンスキーがマイクロ重力レンズ現象の探査を提唱した後、1990年代前半から大規模な反復観測プロジェクトが行われている。その副次的な結果として、非常に多くの変光星が発見された。赤色変光星の複数の系列*2の発見¹⁷⁾など、その成果は枚挙にいとまがない。

2008年7月、筆者は英国・キール大学で大マゼラン銀河に関する研究会に参加していた。その一つの講演で、ポーランド・ワルシャワ大学のイゴール・ソチンスキーがOGLE第3期の初期成果について話し始めた。OGLEとは、ワルシャワ大学が中心となって行っているマイクロ重力レンズ探査Optical Gravitational Lensing Experimentの略称である。そして、新たに得られた多くの変光星に対する周期と光度の関係が投影された瞬間、目が釘づけになってしまった。すでに知られていた古典的セファイドや赤色変光星の系列に加え、ずっと暗いところまで何本もの系列がはっきりと見えている。その図について調べるだけで、変光星の研究が大きく進むことが明らかであった。その図の中に、はっきりとII型セファイドの周期光度関係も見えていたのである。その後、II型セファイドに関する論文が2008年11月に発表された¹⁸⁾。

ソチンスキーらの論文を読んだ筆者らは、さっ

*2 変光星の種類や脈動の励起状態が異なると、周期と光度の関係がずれて、互いに異なる関係としてグループをなす。これを周期光度関係の「系列」と呼ぶ。

そく II 型セファイドの近赤外線での性質を調べ始めた。これには、すでに刊行されていた IRSF/SIRIUS によるマゼラン銀河カタログ¹⁹⁾を用いた。実は、大マゼラン銀河の II 型セファイドについては、OGLE 第 2 期のカタログと 2MASS 全天カタログを使ってすでに調べたことがあった¹⁴⁾。しかし、このときは II 型セファイドの中でも周期が 10 日以上のものであつておらず、それに対する近赤外線等級も誤差が大きく、はっきりしたことはわからなかった。一方、OGLE 第 3 期と IRSF/SIRIUS のカタログの組み合わせは強力であつた。周期 1 日近くの暗い天体まではっきりとした周期光度関係が得られたのである。図 3 は、OGLE 第 3 期で見つかった II 型セファイドの周期と、それに対する K_s バンドの等級をプロットしたものである (青色●点)。両者にはきれいな直線の関係が存在し、その傾きは球状星団の II 型セファイドがもつ関係のそれと一致した²⁰⁾。さらに、古典的セファイドの周期光度関係も×印でプロットした。2 種類のセファイドの違いについては、第 3 節で議論する。

2.3 II 型セファイドの周期光度関係の較正

周期光度関係のゼロ点を決定するためには、太陽近傍で距離の求められている二つの II 型セファイド (V553 Cen と SW Tau) を利用した。これらの天体までの距離は、Baade-Wesselink 法という方法で求められている²²⁾。これは、脈動によって恒星表面が大きくなったり小さくなったりする速度を分光で調べ、半径の変化を絶対値として求めることで、通常は相対的な変化しかわからない膨張収縮を実際の物理量として評価する方法である。そうして絶対等級を得た二つの天体を利用して、II 型セファイドの周期光度関係の較正を行った。その関係式と図 3 の周期光度関係を比較すると、大マゼラン銀河までの距離は 160 万光

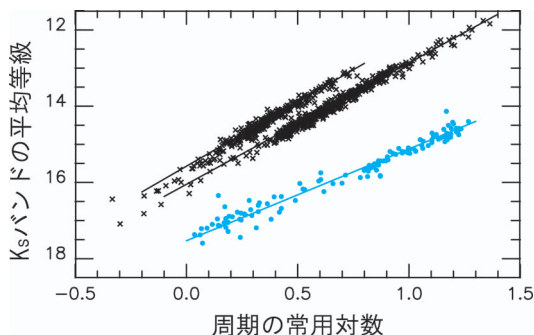


図 3 大マゼラン銀河の II 型セファイド (青色●点) と古典的セファイド (黒色×印) の周期光度関係。古典的セファイドのデータは Ita et al.²¹⁾ より。

年^{*3}と見積もることができた。この距離は古典的セファイドをはじめとして、いくつかの方法で最近見積もられている大マゼラン銀河までの距離と一致している¹⁰⁾。

以上で述べてきたとおり、球状星団と大マゼラン銀河という異なる環境下でも (ほぼ) 同じ周期光度関係が成り立つことを確認し、さらに太陽近傍の天体で較正を行った。これによって、II 型セファイドの周期光度関係を距離指標として確立できたと言える。

3. 2 種類のセファイドの周期光度関係

さて、大マゼラン銀河にある II 型セファイドの周期光度関係が得られたことの一つのご利益は、2 種類のセファイドの関係を直接比較できるようになったことである。本節では、2 種類のセファイドの相違点について述べる。

再び図 3 をご覧いただきたい。明るさの違い以外にも、いくつか両者の関係の異なる点に気づかれるだろう。まず、古典的セファイドの周期光度関係には 2 本の平行な系列^{*4}がある。これは、脈動の励起状態の違うグループが存在するというこ

*3 距離指数 18.46 等, 490 kpc.

*4 古典的セファイドの 2 本の系列のうち、周期が長い側は星全体がいっせいに膨張収縮を繰り返す基準モード、周期が短い側は変光星内部に一つ節ができる第一励起モードの星。

表1 2種類のセファイドのおおまかな性質

種類	古典的セファイド	II型セファイド
年齢	1千万年-1億年	約100億年以上
質量	3-10太陽質量 (長周期ほど大きい)	約0.6太陽質量 (周期に依存しない)
付随する 恒星系	薄いディスク, 渦巻腕	厚いディスク, バルジ, ハロー

とである。一方、II型セファイドでは1本の系列しか存在しない。観測が不十分なために励起モードにあるII型セファイドが見つかっていない可能性も含めて、その不在の理由はわかっていない。

次に、2種類のセファイドの周期光度関係では、傾きが全く異なっている。これは、二つのグループの質量分布に関係している。同じ半径の変光星があったとき、質量(すなわち平均密度)の大きい星ほど周期が短くなる。II型セファイドでは周期によらずほぼ一定の質量になっていると考えられる¹⁴⁾。一方、古典的セファイドでは周期が長いほど質量が大きく、質量一定の場合の直線から徐々に短周期の方向へずれていくため、傾きが大きくなるような分布となる。表1にそれぞれのグループのおおまかな性質をまとめた。図3のようなプロットを利用して2種類のセファイドの周期光度関係を直接比べることによって、上記のような違いを定量的に理解することが可能になるであろう。

4. 将来の応用

さて、このように確立されたII型セファイドの周期光度関係は、今後どのように応用できるであろうか。一つの役割は、古典的セファイドの物差しの正しさをチェックすることである。古典的セファイドの周期光度関係については、金属量による効果などいくつか不確定な部分が残されている。そのため、独立な別の方法でいろいろな銀河までの距離を求めて、古典的セファイドによる結

果が正確かどうかを検証する作業が続けられている。図2の結果¹⁴⁾などから、いまのところII型セファイドの金属量依存性は小さいと考えられているので、確認を行うための有用な道具になるだろう。

さらに筆者が期待をしているII型セファイドの応用は、文字どおりII型の恒星種族に対する物差しとしてのそれである。古典的セファイドは、I型の若い恒星種族にしか存在しないので、楕円銀河など年老いた星だけからできている恒星系では利用できない。最近、Ia型超新星にいくつかの異なるグループが存在することがわかってきて、楕円銀河に現れるIa型超新星は渦巻銀河に現れるものとは系統的に異なる可能性が指摘されている²³⁾。将来、II型セファイドで楕円銀河までの距離を調べることによって、そのような問題が解決されるかもしれない。近傍の銀河におけるII型セファイドの存在と距離の推定も報告されつつあり²⁴⁾、今後ますますの応用が期待される。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、2006年と2009年に筆者らが発表した投稿論文^{14), 20)}に基づいているので、詳しくはそれらをご覧ください。板由房氏、福土比奈子氏、高梨直紘氏と、編集を担当して下さった浅井 歩氏の各氏から原稿について有益なコメントを数多くいただいた。

参 考 文 献

- 1) Leavitt H. S., 1908, *Annals of Harvard College Obs.* 60, 87
- 2) Leavitt H. S., Pickering, E. C., 1912, *Harvard College Obs. Circ.* 173, 1
- 3) ジョンソン J. (楨原 凜訳), 2007, リーヴィット 宇宙を測る方法 (WAVE 出版)
- 4) ベレンゼン R., 他 (高瀬文志郎, 岡村定矩訳), 1980, 銀河の発見 (地人書館)
- 5) サイモン S. (青木 薫訳), 2006, ビッグバン宇宙論 (新潮社)
- 6) Baade W., 1944, *ApJ* 100, 137

- 7) Baade W., 1956, PASP 68, 5
- 8) Baade W., 1952, Trans. IAU 8, 682
- 9) Thackeray A. D., Wesselink A. J., 1953, Nature 171, 693
- 10) van Leeuwen F., et al., 2007, MNRAS 379, 723
- 11) Spergel D. N., et al., 2007, ApJS 170, 377
- 12) Pritzl B. J., et al., 2003, AJ 126, 1381
- 13) 松永典之, 2009, 博士論文 (東京大学)
- 14) Matsunaga N., et al., 2006, MNRAS 370, 1979
- 15) Del Principe M., et al., 2005, AJ 129, 2714
- 16) Bono G., et al., 2008, ApJ 684, 102
- 17) Wood P. R., 2000, PASA 17, 18
- 18) Soszynski I., et al., 2008, Acta Astronomica 58, 293
- 19) Kato D., et al., 2007, PASJ 59, 615
- 20) Matsunaga N., et al., 2009, MNRAS 397, 933
- 21) Ita Y., et al., 2004, MNRAS 353, 705
- 22) Feast M. W., et al., 2008, MNRAS 386, 2115
- 23) Mannucci F., et al., 2006, MNRAS 370, 773
- 24) Majaess D. J., et al., 2009, Acta Astronomica, in press (arXiv:0909.0181)

Type II Cepheid—A Newly Established Distance Indicator

Noriyuki MATSUNAGA

Institute of Astronomy, University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

Abstract: After 100 years since Miss Leavitt found the period-luminosity relation of Cepheids in the Small Magellanic Cloud, the period-luminosity relation of type II Cepheids has been established accurately. The author first reviews the history of the related investigations: the discovery of Leavitt's law, Hubble's famous findings, Baade's disentanglement of two types of Cepheids. Then described are recent two works, where the author and collaborators have confirmed and calibrated the period-luminosity relation of type II Cepheids. A prospect of their application as distance indicators is also mentioned.