

新潟大集中講義 2020 (物理学特論 V)

松永典之
(東京大学・天文学教室)

2020年12月15日更新

本資料は、2020年12月にオンラインで行う集中講義(新潟大学理学部「物理学特論 V」)のために準備したものである。講義に使用している図の多くは、それぞれの著作権者のために著作権法上保護されている。講義以外のための利用、再配布、インターネット・SNSなどで本資料の全部または一部を公開することは禁止する。

目次

I	講義登録内容	4
I.1	科目の概要	4
I.2	科目のねらい	4
I.3	学習の到達目標	4
I.4	学習方法・学習上の注意	4
I.5	成績評価の方法と基準	4
I.6	授業計画詳細情報	4
II	本講義のテーマ・目標	6
1	銀河、銀河系の発見 ~ 脈動変光星がいかに我々の宇宙観を変えたか	7
1.1	銀河系発見前史	7
1.2	セファイドと周期光度関係の発見	7
1.3	ハッブルによる銀河宇宙の発見	11
1.4	周期光度関係に関するパーデラの修正	13
1.5	その後の展開	16
2	距離測定の基本 ~ 距離に関する基本的な関係式とさまざまな距離推定法	19
2.1	年周視差とパーセクの定義	19
2.2	等級と距離に関する諸関係式	21
2.3	星の有効温度と色指数、輻射補正	23
2.4	HR 図と恒星進化	25
2.5	標準光源法	26
2.5.1	脈動変光星の周期光度関係	26
2.5.2	主系列	29
2.5.3	赤色巨星分枝先端 (Tip of Red Giant Branch)	31
2.5.4	レッドクランプ	32

2.5.5	Ia 型超新星	33
2.6	その他の原理に基づく距離測定法	34
2.6.1	実視連星	34
2.6.2	二重線食連星	36
2.6.3	銀河系中心の超巨大ブラックホールまでの距離	37
2.6.4	ライトエコーを示す天体	39
Q1	レポート問題 (第 1 回)	42
3	恒星の構造と進化 ~ どのような星がセファイド不安定帯に進化するか	43
3.1	恒星の構造に関する基礎	43
3.2	恒星の構造・進化の議論において参考になる基本原理	45
3.3	中間質量星の主系列からヘリウム燃焼段階へかけての進化	48
3.4	To Loop or Not to Loop (ループすべきか否か)	52
4	脈動変光星の構造 ~ 脈動する星の性質とセファイド不安定帯の理由	58
4.1	振動の周期と恒星の物理量	58
4.2	脈動の励起と減衰	60
4.3	κ メカニズム	62
4.4	セファイド不安定帯	64
Q2	レポート問題 (第 2 回)	68
5	周期光度関係の理解 ~ なぜきれいな周期光度関係が見られるのか	70
5.1	周期光度関係の成り立ち	70
5.2	2 種類のセファイドの周期光度関係の違い	72
5.3	周期光度関係の波長依存性とセファイド不安定帯がもつ幅の効果	75
5.4	周期光度関係をもつさまざまな脈動変光星	76
5.5	接触食連星の周期光度関係	80
6	周期光度関係の較正 ~ 年周視差などによる較正の注意点と実例	83
6.1	較正によって何を知らなければならないか	83
6.2	年周視差を用いない較正方法	84
6.2.1	散開星団にあるセファイドの利用	84
6.2.2	Baade-Wesselink 法	84
6.3	年周視差による較正の注意点	87
6.3.1	年周視差の統計誤差・系統誤差	87
6.3.2	年周視差の逆数 $\rho = 1/\varpi$ という推定値	88
6.3.3	データの truncation (切り捨て)	89
6.3.4	Lutz-Kelker バイアス	90
6.3.5	Astronomy-based luminosity	91
6.4	年周視差を用いた周期光度関係の較正の実例	92
6.4.1	ヒッパルコス位置天文衛星	92
6.4.2	ハッブル宇宙望遠鏡 (HST)	93
6.4.3	ガイア位置天文衛星	95

Q3 レポート問題 (第 3 回)

99

7 天の川銀河研究への応用 ~ セファイドで探る天の川銀河の構造と進化

101

I 講義登録内容

I.1 科目の概要

脈動変光星（特にセファイド変光星）の性質と宇宙物理学における応用について概観する。まず、宇宙距離尺度にとって重要なセファイド変光星の周期光度関係が変光星のどのような物理学的性質によって成立するのかを議論する。次に、セファイド変光星で天の川銀河の構造と進化を調べる研究を中心に、脈動変光星の観測を通して宇宙の成り立ちを探る応用例をいくつか紹介する。

I.2 科目のねらい

セファイド変光星は、天文学における最重要課題のひとつである距離の測定において、重要な役割を果たし続けている天体である。より基本的な距離測定法である年周視差の測定を大きく推進させるガイア衛星（欧州宇宙機関）の成果が得られつつある今日でもその重要性は変わらない。それらの脈動変光星がもつ周期光度関係の基礎と応用例について講義する。

I.3 学習の到達目標

宇宙の距離測定に利用される「ものさし」の一例として、セファイドの周期光度関係がどのような物理的性質から成り立っているのかを理解し、それが実際の研究でどのように応用されるかという流れを実例において学ぶこと。

I.4 学習方法・学習上の注意

天文学・宇宙物理学についての基本的内容からやや専門的な内容を扱う講義である。天文学特有の知識や記法については、その都度説明するつもりだが、授業中にわからないことがあれば積極的に質問し、それぞれのテーマを確実に理解していくことが重要である。

I.5 成績評価の方法と基準

授業への参加状況と理解度について総合的に判断する。

I.6 授業計画詳細情報

内容

- (1) 銀河、銀河系の発見 ~ 脈動変光星がいかに我々の宇宙観を変えたか
- (2) 距離測定の基本 ~ 距離に関する基本的な関係式とさまざまな距離推定法
- (3) 恒星の構造と進化 ~ どのような星がセファイド不安定帯に進化するか
- (4) 脈動変光星の構造 ~ 脈動する星の性質とセファイド不安定帯の理由
- (5) 周期光度関係の理解 ~ なぜきれいな周期光度関係が見られるのか

(6) 周期光度関係の較正 ~ 年周視差などによる較正の注意点と実例

(7) 天の川銀河研究への応用 ~ セファイドで探る天の川銀河の構造と進化

(全体の流れは変えていないが、章立てを変更した。)

準備学習

基礎的な物理学の内容について修得していること。

II 本講義のテーマ・目標

本講義では、セファイド変光星を主として、脈動変光星が銀河系(天の川銀河)や宇宙がもつ構造とそれら進化を理解するために、どのように役立っているかを紹介する。

天文学では、実験室または地球上の施設で対象物を直接調べられる物理・化学などとは違い、天体から届く信号(電磁波、高エネルギー粒子、重力波)を受動的に受け取ることでしか観測データを得ることができない。それでも、(時には大胆すぎる仮説を立てながら)宇宙について非常に多くの発見をしてきた。特に、20世紀から現在にかけて、人類の宇宙の理解は驚くほど進展した。その進展を可能にした最も重要な観測対象のひとつがセファイド変光星である。

セファイドでは、周期光度関係という距離を測定するために便利な関係が成り立ち、それを用いて銀河や宇宙の大きさを調べることができる。よく知られている周期光度関係であるが、脈動変光星がそのような関係を持つことは全く自明なことではない。どのような星がセファイドになるか、それらに対して周期光度関係が成り立つのはなぜか、ということを理解することが本講義の大きな目標のひとつである。さらに、周期光度関係を利用して、どのような発見がなされ、今後どんな応用が期待されるかということも紹介する。なお、セファイドには中間質量星($4\text{--}10 M_{\odot}$)が進化して生じる古典的セファイドとも呼ばれるグループの他に、小質量星($\sim 1 M_{\odot}$)が進化して生じるII型セファイドなども存在する。これらのグループの違いについても議論するが、本講義の主な対象は古典的セファイドであり、特に断らない限りそのグループを単に「セファイド」と呼ぶ。

まず、第1節では、20世紀までに行われた研究によって、銀河や宇宙の基本的な性質が解明された様子と、その中でどのようにセファイドが使われたかを概観する。次に、セファイドなどを用いて、どのようにして天体までの距離が測定できるのか、距離や等級に関する計算方法の整理も含めて第2節で紹介する。第3節では、セファイドになる星がどのような進化をたどるのか、恒星の内部構造と進化について基礎的な理論も含めて述べる。第4節では、どのような星が脈動変光星として観測されるのか、脈動変光星の周期がどのように説明できるかという点を探る。これら2つの節の重要な結論は、セファイドの質量-光度関係(第3節)と半径-光度関係(第4節)である。これらの関係を組み合わせて初めて周期光度関係がなぜ存在するかを理解できる(第5節)。第6節では、周期光度関係の較正について、誤差や注意すべき点があるかを説明する。特に、周期光度関係を較正するためにガイア衛星が与える年周視差は決定的な役割を果たすと期待されるが、さまざまな制限や注意すべき点があるのも事実である。最後に、銀河系の研究においてどのようにセファイドが利用されてきたかを、最近の論文を事例として第7節で紹介する。

本講義全般に関して参考になる教科書

- 「銀河系と銀河宇宙」、岡村定矩 著、東京大学出版会(1999年)
- シリーズ 現代の天文学、日本評論社(特に、「恒星」および「銀河II—銀河系」)
- “Stellar Structure and Evolution”(2nd Edition), R. Kippenhahn, A. Weigert, A. Weiss, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2012)
- “An Introduction to Distance Measurement in Astronomy”, R. de Grijs, John Wiley & Sons Ltd (2011)
- “Pulsating Stars”, M. Catelan, S. A. Horace, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. (2015)

1 銀河、銀河系の発見 ~ 脈動変光星がいかに我々の宇宙観を変えたか

1.1 銀河系発見前史

銀河系(天の川銀河)は、数千億個の星があつまる棒渦巻銀河である。地球を含む太陽系はこの銀河の中にあり、中心から約 8 kpc の距離に位置する星のひとつである。周囲にある星も全て銀河系の中の星ということになり、有史以前から人類が肉眼で見てきた 6 等級程度までの天体は、太陽系中の月、惑星、彗星を除けば、ほぼ全て銀河系の中にある恒星ということになる。少ない例外は、大小マゼラン銀河、アンドロメダ銀河のように銀河全体が一つの天体として見える場合である。ただし、これらの天体が銀河であること、さらには銀河というものが存在するという自体、20 世紀に入るまでは全く知られていなかった(あるいは、想像の産物に過ぎなかった)。本節では、セファイドなどを利用して、人類が銀河を今のかたちで認識するようになった歴史を簡単に紹介する。表 1 に関連する年表を示す。

肉眼で見える以上の天体観測を切り拓いたのは、16 世紀から 17 世紀にかけて天文学・物理学・数学の諸分野で幅広く活躍をしたガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei、イタリア) である。ガリレオは、当時発明された望遠鏡を改良し、天体観測に初めて利用した。木星の衛星の発見、太陽黒点の発見など数多くの発見をしたが、天の川と呼ばれる淡い光の帯が無数の暗い星の集まりであることに気づいた。紆余曲折がありながらも、天動説から地動説へと移行するのもガリレオが活躍した時期からその後数十年に及ぶ発展の中である。太陽と同じような恒星が無数に存在し、それらがどのように分布して宇宙が形作られているかということ、望遠鏡による観測にもとづいて議論をする基礎を築いたのがガリレオであると言えるだろう。

実際に、天の川を構成する星の分布を科学的に調べる先駆けとなったのは、18 世紀から 19 世紀にイギリスで活躍したウィリアム・ハーシェル (William Herschel) である。ドイツで生まれたハーシェルはもともとオーボエ奏者として音楽を生業としていたが、趣味が高じて本格的な観測を行うようになり、1781 年に天王星(古代から知られていた土星までよりも遠くに人類が初めて発見した惑星)を発見した後に天文学の研究に専念するようになった。それ以後も数多くの発見をしたハーシェルであるが、宇宙に星がどのように分布しているかを(多くの素朴な仮定をおきながらも)科学的な手法で初めて調べた(図 1)。

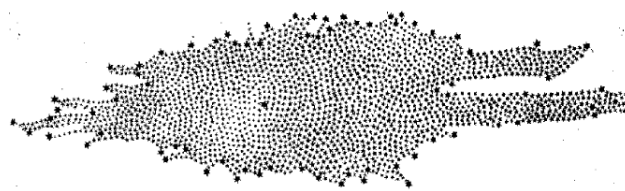


図 1: ハーシェルが得た宇宙の形。銀河系を円盤に垂直な面で切った断面図で、中央より少し左にある大きめの点が太陽の位置。右側に見えている裂け目は、さそり座からはくちょう座にかけて見える星が少なくなっている領域。

1.2 セファイドと周期光度関係の発見

ハーシェルが天王星を発見し、活躍を始めたちょうどその頃、本講義の最も重要な天体であるセファイド変光星が発見された。(月や惑星などとは違って)位置も明るさも変えないと考えられていた恒星の中で、明るさを変える星はすでにいくつか観測されていた。新星や超新星のように夜空に突然現れる星が歴史的に知られていたのに加えて、17 世紀初頭にはミラ (*o* Cet) が脈動変光星としては初めて変光が認識された。その後も、ミラ型変光星などいくつか長周期変光星が 17 世紀から 18 世紀にかけて見つかった。一方、短周期の変光星

表 1: 本講義に関わる主な歴史的発見など。(理科年表 平成 31 年度版「天文学上のおもな発明発見と重要事項」の項より抜粋)

西暦	事項	発明・発見者(国)
1609-10	天体望遠鏡による諸発見	ガリレオ(伊)、D. ファブリキウス(独)、J. ファブリキウス(独)
1610	「星界からの報告」出版	ガリレオ(伊)
1687	「プリンキピア」出版、万有引力の法則の公表	ニュートン(英)
1718	恒星の固有運動の発見	ハレー(英)
1781	天王星の発見	ハーシェル(英)
1781-84	メシエカタログ(星雲状天体のカタログ)の刊行	メシエ(仏)
1785	宇宙(銀河系)の形と大きさの観測的決定	ハーシェル(英)
1838-39	恒星の年周視差の測定	ベッセル(独)、ヘンダーソン(英)、シュトルーフエ(ロシア、米)
1850 頃	天体写真術の確立	ポンド(米)、ド・ラ・リュウ(英)
1888	ニュージェネラルカタログ(NGC)の刊行	ドライヤー(デンマーク、アイルランド)
1901	恒星スペクトルのハーバード分類の提唱	キャノン(米)、ピッカリング(米)
1905	巨星と矮星(星の区別)の発見	ヘルツスプルング(デンマーク)
1905	特殊相対性理論の提唱	アインシュタイン(独、スイス)
1908-12	セファイドの周期-光度関係の発見	リーヴィット(米)
1911	恒星のスペクトル型と絶対等級の関係(HR 図)の発表	ヘルツスプルング(デンマーク)
1915-16	一般相対性理論の提唱	アインシュタイン(独、スイス)
1924	渦巻星雲の正体の解明(セファイド変光星の発見)	ハッブル(米)
1927	銀河系の回転の観測	オールト(蘭)、リンドブラッド(スウェーデン)
1929	宇宙膨張に関するハッブルの法則の発見	ハッブル(米)
1930	星間減光の確認	トランブラー(米)
1934	超新星の性質の解明	バーデ(米)、ツヴィッキー(米)
1944	種族 I と種族 II(星の区別)の発見	バーデ(米)
1946	ビッグバン理論の提唱	ガモフ(露)
1948	パロマー山天文台 200 インチ望遠鏡完成	(米)
1948	定常宇宙論の提唱	ボンディ(英)、ゴールド(英)
1952	種族 I と種族 II のセファイドの周期-光度関係の違いの発見	バーデ(米)
1965	宇宙マイクロ波背景放射の発見	ペンジアス(米)、ウィルソン(米)
1990	ハッブル宇宙望遠鏡打ち上げ	(米、欧州諸国)
1992	宇宙マイクロ波背景放射のゆらぎの発見	スムート(米)他 COBE 衛星チーム
1998	銀河系中心にブラックホールが存在する証拠の発見	ゲッツ(米)、クライン(米)、モリス(米)、ベックリン(米)
1998-99	宇宙の加速膨張の発見	パールマター(米)、シュミット(豪)、リース(米)他
2001	ハッブル定数の高精度決定	フリードマン(米)他ハッブル宇宙望遠鏡キープロジェクトチーム