

連載

恒星天文学の源流【17】

星の進化論とHR図表 その6

～星団と星の進化～

小暮智一（元京都大学）

今回は散開星団、球状星団のHR図作成と、星の不均質内部構造論を通して星の進化論に大きく貢献したロバート・トランプラーとアラン・サンデージおよびマーティン・シュワルツシルドを中心に、1920年代から1950年代にかけての進化論の進展を辿ってみよう。

1. トランプラーと散開星団

1.1 ロバート・J. トランプラー（Robert Julius Trumpler, 1886 - 1956）の生涯

ロバート・トランプラーはスイスのチューリヒで生まれた。10人の子供の3番目という大家族であった。家は14世紀から続く事業家の家系で、教養ある父母のもとで子供たちは早くから事業家をめざす教育を受けていた。17歳で堅信式を受けた頃から、教会の日曜学校に通って宗教教育を受けているが、彼は教会の教えと日常の経験との矛盾に悩んでいた。

19歳でギンナジュウムを卒業したとき、子供時代の思い出と興味の移り代わり、悩みなどを丹念に書きつづっている。そのなかで彼が悩んだ3つの大きな疑問は、(1)神は存在するか、(2)人間は不滅の魂を持つか、(3)人間には自由意志があるか、であった。このうち、第1の疑問については「宇宙を支配する物理法則のすべて」が神であるとすれば納得できるとした。第2についてははっきりしなかったが、第3の自由意志についてはその存在を漠然とではあったが感じ取っていたという。多感な少年であった。

両親は彼を他の兄弟とともに実業家に成長

させたいと願っていたが、彼の内省的な性向はそれを好まず、次第に科学的研究に傾倒していった。

彼はついにチューリッヒ大学の物理学科に入学、さらにゲッチンゲン大学の大学院に進んで天文学を専攻し、星団の統計的研究に取り組む。このテーマで1910年に学位をとると、翌年にスイス測地調査所に職を得て、引き続き天文学の研究を進めることができた。

1913年、ドイツ天文協会の会合がハンブルグで開かれた折、彼は「プレアデス星団の星の固有運動について」と題した報告を行った。この報告はアレゲニー天文台長のフランク・シュレージンガー（Frank Schlesinger）の興味を引き、これが彼のアメリカ移住へのきっかけになった。

第1次世界大戦が始まるとスイス軍に徴兵されて軍務に付いたが、折よく、ピッツバーグ大学のアレゲニー天文台からの招聘状が届いた。シュレージンガーからの招きである。彼は早速、除隊を申請し、軍もアレゲニー天文台への受け入れを条件に軍務を解いた。こうして1915年にアメリカに渡り、そこで生涯の残りを過ごすことになる。

その後、1919年にリック天文台に移り、星団の観測を本格化させるが、一方、彼は天文教育の面でも大きく貢献している。1938年にカリフォルニア大学バークレー校の天文学教授に就任し、定年の1951年までその職に留まる。彼のもっとも大きな貢献は散開星団の観測的研究であるが、それ以外にも、1922

年にオーストラリアの日食観測でエディントンが1919年に見出したアインシュタイン効果を高い精度で実証したり、また、1924年の火星の衝の際は1700枚に及ぶ写真観測によってローウェルが運河と見なしていた表面模様が運河などでなく自然構造であることを見出したり、多彩な活動を行っている。

晩年の彼は家族とともにサンフランシスコの南、太平洋を望むサンタクルーズ近郷の丘に住んでいたが、白血病に侵され、70歳で生涯を閉じた。太平洋天文協会は彼の天文教育への功績を記念してトランプラー賞を設け、1974年から毎年度の優れた学位論文に対して贈っている。なお、トランプラーの伝記は主としてウイーバー[122]によった。



図41 トランプラーの肖像と署名 [122]

1.2 散開星団のHR図

トランプラーはゲッチングン時代から散開星団に注目していたが、渡米後、リック天文台に移った1919年頃から星団の本格的な観測的研究に乗り出した。散開星団を選んだ理

由は、球状星団がどれも遠方に分布するのに比較して、散開星団の多くは銀河系内で太陽の近傍にあり、測光、分光観測が比較的容易であること、星団内の星々はほぼ同じ距離にあると見なされるので、HR図の研究には最適の天体であることなどである。トランプラーはさらに、星団とは同じ起源を持つ星の集団であり、分光型の分布は星の進化の異なった段階を示すものと考えた。ひとつの星団の中に種々の分光型が存在する理由については2つの原因が可能である。第1は同じ場所に誕生したが誕生の時期は星によって大きく異なる、第2は、星々はほぼ同時期に誕生したが、その後の進化の速度が星の質量によって大きく異なるというものである。こうした問題点に立って星団の観測を行い、1925年にその成果が公表されたが[123]、そのなかで彼は第2の考え方を支持している。

リック天文台での彼の星団の観測は主に二つの望遠鏡で行われた。一つはクロスリー36インチ(91 cm)反射望遠鏡で、焦点面にスリットレス分光器をおき直径50cmの視野に多数の星のスペクトルを撮影するもので、原理は対物プリズムと同じである。露出時間を変えて星の明るさに対応させ、7時間の露出で限界の14等級まで達した。二つ目はリック36インチ屈折望遠鏡で、単一プリズム分光器を装備し、明るい星に対する精密な分光分類と視線速度の測定を行った。

星団の観測で問題になるのは星団メンバーの同定である。星団内に紛れ込む星野の星をどう識別するかであるが、それらの星はほとんどが微光の赤色矮星であり、星団のHR図と星団内の星密度分布の比較からある程度の除去は可能である。こうしてトランプラーは52個の散開星団に対してHR図の作成を行った。

その結果、トランプラーは星団のHR図上の星の分布に特定の傾向があることに気が付

いた。大きく分けると星の分布には

クラス 1 星が主系列上にだけ分布する

クラス 2 星が主系列星と巨星を含む

の 2 種類がある。さらに、これらのクラスを、分布する星のもっとも早期の分光型によってサブクラス b, a, f (それぞれ B 型、A 型、F 型) に分けることが出来る (b クラスには O 型星を含むこともある)。クラスとサブクラスを組み合わせるといくつかのタイプが可能であるが、トランプラーの観測した 52 個の星団ではそのうち、1b, 1a, 2a, 2f の 4 つのタイプのみ現れた。これらのタイプにおける星の分布の特徴を図 2 に示そう。

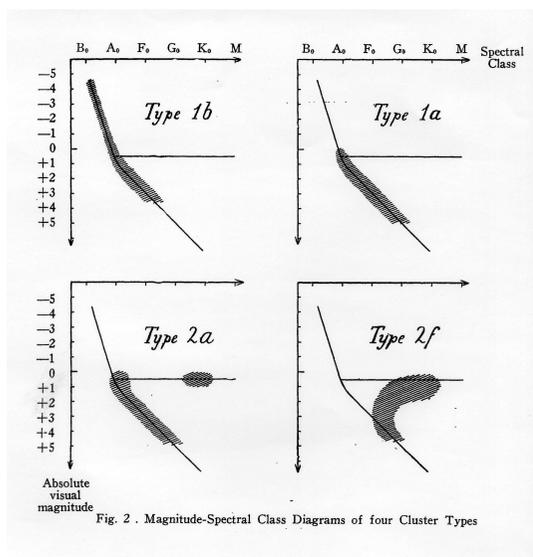


図 42 散開星団の HR 図における星の分布のタイプ (トランプラー、1925 [123])

また、観測された 52 個の散開星団の分類タイプと星団数および各タイプの主な星団例を表 3 に示そう。ただし、星団で無いと判定された 1 個の星集団は省いてある。

トランプラーはこの星団のタイプが星の進化と関係があると考えたが、それを説明するために次の仮定を置いた。

表 3 星団の HR 図上の分布タイプの頻度 [123]

タイプ	星団数	主な星団
1b	24	プレアデス、h and Per, M35, M36
1a	6	M34, M39, NGC 1647
2a	20	プレセペ、M11, M37,
2f	1	NGC 752

- (1) 星団の星は同時期に誕生した。
- (2) 星はその質量によって進化の速度が異なる。
- (3) B 型に達するのは大質量の星のみである。大質量星は進化が遅い
- (4) 主系列では重い星は一旦高温度へ向かい、次いで低温度へと向かう。中小質量星は低温度へと向かう。

この仮定に立つと星々が誕生するのは HR 図上のどこであろうか。トランプラーは誕生期の星々の分布を未知のタイプ 3 と呼んだ。そこから質量によって異なった進化を示し、星団のタイプとしては次のように進むと考えた：

3 2f 2a 1b 1a 1f

こうして星団はその後 1g, 1k, 1m のように主系列で次第に赤色矮星へと向かう。ここでタイプ 3 はこの経路線から想像すると明るい赤色巨星付近ではないかと思われる。上に挙げたトランプラーの仮定のなかで 1), 2) は良いが 3), 4) はいまから見ると誤っている。しかし、トランプラーが仕事をした 1925 年はエディントンの内部構造論の書かれる以前で、サブアトミックな熱源がようやく問題になり始めた頃であった。星団の HR 図を進化と結びつけたのはトランプラーが始めてである。1940 年代に入って、カフィー (James

Cuffey) [124]が散開星団 M46, M50, NGC 2324 の HR 図を作成したのを始めとして、それ以後、観測は急速に進展して多数の色等級図が描かれるようになる。しかし、星と星団の進化については 1950 年代の星の進化論まで待たねばならなかった。トランプラーは時代を先駆けたパイオニアであった。

1.3 散開星団と星間吸収

トランプラーはその後も散開星団の観測的研究を進め、星団の分類、星間吸収の発見、カタログの作成などで大きな足跡を残している。1930 年頃の彼の仕事を迎って見よう ([125], [126])。

(1) 散開星団の距離

散開星団の距離は、従来、星団の直径がほぼ同じと仮定して測定されていた。トランプラーは星団の直径は一定ではなく、星団のサイズ（星団を構成する星の数）によって異なることに注目し、同じサイズの星団の直径を同じとして距離を決定した。こうして 100 個の星団について距離および実直径 (pc) を測定した。しかし、これには星間吸収の補正が必要である。その補正については(3)項で述べよう。

(2) 散開星団の見かけによる分類

トランプラーは散開星団をその見かけから分類を行っているが、分類の基準は次の 3 項目である。

第 1 は中心集中度で 4 グループ

- I 集中度大
- II 集中度小
- III ほぼ集中度なし
- IV 低い星密度で直径大

(I~ III は直径 $D \leq 10$ pc、IV は $D \sim 20$ pc)

第 2 は星の光度分布で次の 3 段階に分ける。

- 1 : 星の明るさはすべて同程度
- 2 : 明るさの分布が中程度

3 : 暗い星の中で明るい星が際立つ

第 3 は星団の星数 (N) でこれも次の記号で 3 段階に分ける。

- p (poor) $N < 50$
- m (moderate) $N \sim 50 - 100$
- r (rich) $N > 100$

この基準によると星団の分類記号は中心集中度、光度分布、星数の順に示される。いくつかの例を表 4 に挙げて見よう。

表 4 散開星団の分類例

散開星団	分類記号
プレアデス	II 3r
ペルセウス (IC1805)	IV 3m
M36	I 3m
S Mon	II 3p

この分類法は分かりやすいので長い間標準的に使用されていた[127]。

(3) 星間吸収

星の絶対等級 M が分かると見掛けの等級 m との差からその星までの距離 r は次の式で求められる。

$$m - M = 5 \log r - 5 \quad (1)$$

ただし、ここでは星間空間は透明であると仮定されている。

星団の距離も(1)式で推定される。当時、星の絶対等級はすでに分光型毎に基準化されていたので、星団の明るい星について分光型から絶対等級を決めれば距離が求められる。

トランプラーは(1)式を用いて 300 個の星団の距離を測定したところ、遠方の星団の直径は近傍の星団に較べて 2 倍も大きくなることに気付いた。彼はこれを遠方の星団の距離が過大に見積もられているためと考え、その原因として星間空間に吸収物質が存在するためと考えた。星間吸収量は星までの距離に比例すると仮定して彼は(1)式に吸収項を加えて次のように改定した。

$$m - M = 5 \log r + k r - 5 \quad (2)$$

これを星団の距離に適用し、星間吸収率として

$$k = 0.79 \text{ 等級 / kpc} \quad (3)$$

を導いている。現在、星間吸収は星間ダストの量に依存することが知られており、ダスト量は銀河の方向によって異なるが、平均的な星間媒質の吸収量はほぼ 1 等級/kpc と見積もられているから、トランプラーの値はそれに近い。

こうして、トランプラーは星間吸収量(3)式に基づいて 334 個の散開星団の距離と分類型を導き、カタログにまとめている [126]。

(4) 散開星団の銀河系内の分布

このカタログに基づいてトランプラーはさらに銀河系内における散開星団の分布図を作成している。それを図 43 に示そう。これは太陽 (+) を中心に ±4kpc 平方以内に存在する星団の位置を銀河面に投影した分布図である。右端にわし座銀経 0° とあり、左側に一角獣座銀経 180° とあるのは古い銀河座標系(銀河面と赤道面との交差点を銀経 0° として北に向かう)による。また、星団は星座ごとに集団を示すので、主な集団 6 個を丸で囲んで示した。そのうち中央上部は上から「カシオペア星団群」「ペルセウス座星団群」、「おうし座星団群」、中央下部は「りゅうこつ座星団群」である。太陽の右は「たて座星団群」その右下は「いて座星団群」と呼ばれる。太陽の右やや上に「わし座吸収帯」、左下に「ほ座吸収帯」がある。太陽のすぐ下の小さい記号は NGC 3534 である。なお、目立った渦状構造も点線で示されている。この図は 1930 年当時の銀河図としていまも歴史的な意義を持っている。

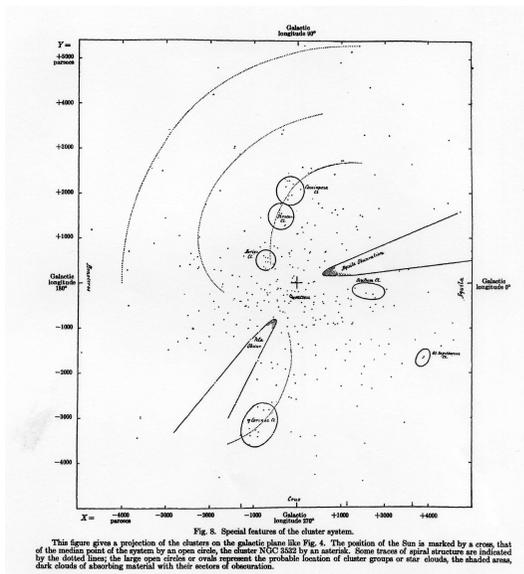


図 43 トランプラーによる散開星団の分布 (Trumpler 1930 [125])

太陽 (+) を中心に散開星団の分布を示す。

2. サンデーと球状星団 (Allan Rex Sandage, 1926 - 2010)

2.1 サンデーの生涯

アラン・サンデーは 1926 年、アイオワ市で一人息子として誕生した。父、チャールス (Charles Harold Sandage) はマイアミ大学の経営学教授、母ドロシー (Dorothy Briggs Sandage) は音楽家で一時、父と同じ大学に勤めていたこともある。両親とも科学に関心はなかったが、幸い、アランには小学校時代に、望遠鏡を持つ友人と一緒にスカイウォッチングを楽しむ機会が多かった。それが機縁となって天文学に興味を持つようになり、父から望遠鏡を買ってもらって、太陽活動の継続的観測を始めたりにしている。

地元の高校からマイアミ大学に入学し、物理学はエドワーズ (Ray Edwards)、数学はアンダーソン (Anderson) から薫陶を受ける。しかし、2 年後に海軍に入隊し、第 2 次大戦

中はエレクトロニクス スペシャリストとして勤務していた。戦後はイリノイ大学物理学科に入学し、1948年に卒業すると、天文学を専攻してカリフォルニア工科大学の大学院に進む。ここはウイルソン山天文台と提携して天文学プログラムを始めたばかりのところであった。

彼の指導教官はウォルター・バーデ (Walter Baade) であったが、翌年にはエドウィン・ハッブル (E. Hubble) の助手としてパロマー天文台での観測実習を始める。「パロマーでは巨大望遠鏡の観測法をボルトとナットのこなし方の体験から始めた」と彼はあとで回顧している。この頃、ハッブルは1929年に100インチ鏡で発見した系外銀河の後退速度の観測を再び200インチ鏡で行い、宇宙膨張速度の測定を精密化する計画をもっていた。しかし、1953年に心臓発作のために死去し、その計画は中断する。サンデーはハッブルの志をついで系外銀河の観測を続けるが、同時に、1948年以来、バーデの指導で始めた球状星団の観測を発展させる。1953年に球状星団の観測的研究によって学位を取得するが、それについては次節で述べよう。



図44 サンデーの肖像、1991年、パロマー天文台にて ([129] Dennis Overbye)

サンデーは1960年代以降、ハッブル定数の改定、宇宙減速パラメータの決定など観

測的宇宙論の分野で生涯活動を続ける。彼はライトマンとブラウアー (Lightman and Brawer) によるインタビュー [128] のなかで自らの宇宙論観測の仕事について詳しく述べているが、ここではサンデーの心情に迫る最後の質問にだけ触れておこう。

ライトマン:「(最後に)一つだけ哲学的な質問をさせてください。もしあなたが(宇宙を創造した神のように)宇宙をデザインできる立場にあったとしたら、あなたはそれをどのようにされますか?」

サンデーはそれに対し、次のように答えている。

「もし私が創造の立場にいたとしたら、私は創造主に良いアドバイスを与えたい。それは、私はどんなミステリーも打ち壊したくないということです。最大のミステリーは無以外の何者かが存在すること、そして、最大の「何者か」とはわれわれが生命と呼んでいる存在です。」

「あなたは私が別の世界を創造しようと思っておられるかも知れませんが、それではあなたに伺いますが、あなたは科学の分野でどんなことを知りたいと思っておられるのでしょうか。」

「私にとってもっとも知りたいのは生命の意味です。私が見る限りでは、現在の宇宙は生命の存在を可能にする唯一の形態です。別の宇宙を創造することは生命の絶滅につながります。それは人間論的宇宙論かもしれませんが、私は、現在の宇宙はこの上なく微妙にすべてが調整されている、と思うのです。…、ですから、あなたの質問への私の回答は「現在の宇宙を少しも変えたくない。」ということです。それが私の創造主へのアドバイスです。」

サンデーはわれわれの生命を愛し、宇宙の存在に敬虔さを感じ取っていたのである。このインタビューの主題は宇宙論的観測の

成果と貢献であったが、彼は一面では「星を愛した人」とも言われている。球状星団の観測、非均質モデルに基づく星の進化論などを通して星の進化論にも大きな足跡を残したのである。

サンデーは 1997 年に定年になってからも妻のマリー・ロイズ (Mary Louis) とパサデナに暮らし、最後の年まで論文を書き続けていた。2010 年春にケフェウス型変光星の論文を書いてから体調を崩し、その年の 11 月に膵臓癌で亡くなった。享年 84 歳であった。

伝記は主にオーバーバイ (Overbye) [129] と wikipedia [130] によった。

2.2 球状星団の HR 図

球状星団の色等級図の観測は 1917 年から 1920 年にかけてハロー・シャプレーによって行われたのが最初である ([131], [132])。シャプレーは 1917 年にウイルソン山天文台に新設された 100 インチ (254 cm) 望遠鏡を用いて球状星団 M3, M13 の写真色測光を行った。しかし、当時はまだ写真乾板の感度が低く、限界等級も 15 等程度であったから、色等級図も赤色巨星の明るい部分に限られていた。そのため、「球状星団は赤い星が卓越し、色指数が減少すると (青くなると)、暗くなる傾向を示す。」と指摘するにとどまっていた。その後、1940 年代に入っていくつかの星団の色等級図が観測されているが、すべて明るい赤色巨星域に限られていた。

1948 年に大きなブレイク・スルーがあった。パロマー天文台に 200 インチ (5.08 m) の反射望遠鏡が完成し、翌年から研究者に開放されたのである。最初の観測の栄誉はウォルター・バーデ (Walter Baade) に与えられたが、サンデーはバウム、アープとともに 3 人組として観測時間を獲得し、球状星団の観測に

取り組むようになった。ここでひと言、3 人組について触れて見よう。3 人は年長順にウィリアム・バウム (William Baum, 1924 年生)、サンデー (1926 年生) そして、ハルトン・アープ (Halton Arp, 1927 年生) である。

バウムはオハイオ州の田舎で生まれた。ローチェスター大学の物理学科で光学を学び、光学機器開発を通して天文学に寄与する。3 人組では機器開発担当である。

アープはニューヨーク市生まれ、ハーバード大学に学び、1949 年に天文学の学位を得ている。3 人組の観測はアープにとってはポストドク時代であった。1953 年からカーネギー研究所の研修員、1955 年から研究助手となり、ウイルソン山およびパロマー山天文台に勤務するようになる。3 人組はそのままパロマー天文台で研究を続け、バウムは観測機器開発に (Baum 1964 [133])、アープとサンデーの 2 人は観測的宇宙論へと進む。宇宙論の 2 人は互いに異なった研究スタイルをもっていた。サンデーは「The Hubble Atlas of Galaxies, 1961」[134] を著わしてからハッブル定数の決定、クエーサーの発見など、いわば、正統派の観測家であった。それに対し、アープは特異な形態を持つ活動的な銀河に興味をもち、「Atlas of Peculiar Galaxies, 1966」[135] の出版後は、ハッブルの形態分類に乗らない特異な活動銀河の観測に進んだ。彼はクエーサーの大きな赤方偏移を宇宙論的とせず比較的近傍の銀河から放出された特異な銀河であると主張するなど、主張の多くは認められなかったが独自の道を貫いている。

話を球状星団に戻そう。200 インチ望遠鏡は大口径で集光力が大きいだけでなく、3 人組は観測に当たって 2 つの武器を手に入っていた。1 つはバウムによって開発された、主焦点に装着する高感度の光電測光器で、青色

波長域で限界等級は 21.2 等に達していた。もう 1 つは当時開発されたばかりの黄色に大きな感度を持つ写真乾板である。こうして 3 人組は球状星団に対し、P 等級（または m_{pg} 等級）（青、photographic magnitude）と V 等級（黄、photovisual magnitude）を組み合わせ、V, P の 2 色による色等級図の観測に取り掛かった。

観測目標は望遠鏡で美しい姿を見せる星団 M3 と M92 である。M3 はりょうけん座にあって視直径 6 分角、M92 はヘルクレス座にあって視直径 10 分角、星の密集度はどちらもシャプレー分類 [136]による IV 型である。密集度は I から XII までの 12 段階があり、密集度が最も高いのは I 型である。

サンデーが主に担当したのは M3 であった [137]。写真実視等級 $m_{pg} < 21.2$ の星について選択された星の色測光を行って色等級図を作成した。始めに極限等級付近の選択星の同定図を図 45 に、また、星団の色等級図を図 46 に示そう。

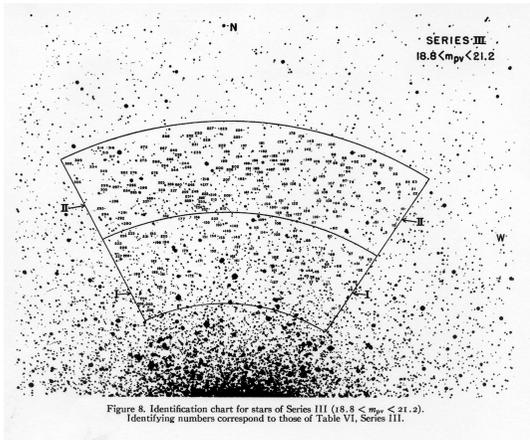


図 45 M3 の写真実視等級 18.8 - 21.2 間にある星の同定図 (Sandage 1953 [137])

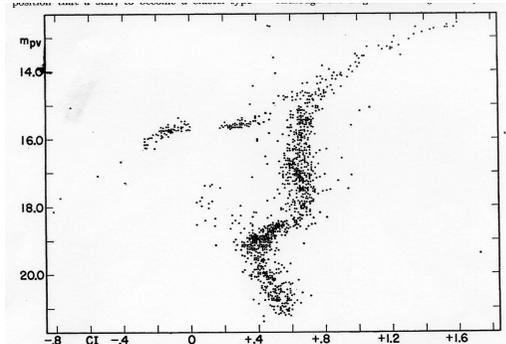


Figure 4. The color-magnitude diagram for M3. All known variable stars were excluded from the photometry. The ordinate and abscissa are on the magnitude and color system of the photographic materials. The transformation to the Z and V system of Stobbs, Whitford, and Johnson may be made by use of the color equations 1, 2, and 3 given in the text. The diagram does not represent a homogeneous sample. The density of points does not, therefore, give a relative luminosity function.

図 46 球状星団 M3 の色等級図 (サンデー 1953, [137])

M92 についても図 46 と同様の色等級図が得られている ([138], [139])。こうした 3 人組の観測によって球状星団の色等級図の状況が明らかになってきた。とくに注目されるのは

- (1) 主系列星との接続が完成して赤色巨星の位置づけがはっきりしたこと。
- (2) 赤色超巨星へ延びる系列の存在（現在の漸近巨星分枝）
- (3) 水平分枝とよばれる赤色巨星から青色に向かう系列の存在
- (4) 水平分枝の途中に欠けた部分がある。この部分は星団型変光星の存在域である。

星団型変光星は RR Lyr 型星とも呼ばれ、平均の絶対等級がほぼ 0 等級なので星団の距離測定などに重要な役割を發揮する。

それでは球状星団の色等級図は星の進化とどのように関係するのであろうか。ここで星の内部構造論における非均質モデルが登場し、マーティン・シュワルツシルドの出番となる。また、その中でサンデーも大きな役割を担っている。

3. 非均質モデルと星の進化論

3.1 マーティン・シュワルツシルド(Martin Schwarzschild 1912 - 1997)の生涯

マーティンはカール・シュワルツシルド(源流 [14])の息子である。父カールがポツダム天文台長をしていたときにポツダムで生まれた。母がユダヤ系であったため、後にナチスに追われるが、当時の父は熱心なプロシヤの愛国者で、第1次大戦に東部戦線で疾病にかかりそのために命を失った人である。マーティンが4歳のときであった。父なき後、家族はゲッチンゲンに戻り、そこで成長するが、幼いときから父の志をついで天文学者になりたいと決心していたという。気まぐれな気質の彼は人によく「私には父と異なった職業につく選択の余地などなかった」などと語っている。

ゲッチンゲン大学で天文学を学び、1935年に学位をとり、オスローの天体物理学研究所のリサーチ・フェローとして研究を続けるうちにドイツ国内のユダヤ系市民への抑圧が高まり、彼はついに家族とともにアメリカに亡命する。

アメリカでは最初にハーバード大学天文台の講師に任命され、1940年代にはコロンビア大学、1950年にプリンストンに招かれ、終身そこに留まることになる。彼の仕事は脈動星理論、星の内部モデル、自転、乱流、化学組成など恒星天文学の広い分野にまたがっているが、そのなかでよく知られているのは星の構造と進化の理論である。彼がプリンストンで研究を始めたころ、当時の理論家たちに横たわっていたのは、ワイツゼッカーやベーテの項でも述べたように(源流 [16])、赤色巨星の内部構造と進化の問題であった。

第2次世界大戦が始まったとき、彼はアメリカに協力し、空軍中尉として欧州戦線に参加して、対空攻撃の計算システムの開発など

に携わっていた。後年、ウイールト (Weart) 「140」のインタビューを受けたとき、彼は「イタリアの戦線からの帰還の途次に、広島に原爆の落とされたことを知りました。私にとってそれは大きな衝撃でした」と述べている。彼は先輩でもあり、共同研究者でもあったライマン・スピッツァー (Lyman Spitzer) がオッペンハイマー (J. R. Oppenheimer) やテラー (E. Teller) たちの推進するマンハッタン計画についても参画していたので、スピッツァーを通して原爆製造の話は聞いていた。「私もその計画には十分注意していました、しかし、私はボランティアとして空軍に参加しヨーロッパの空を飛びまわっていたので、(その計画に)参加することは実際上困難でした。」「機会があれば参加することも可能と考えていました。計算技術の方で寄与できるのではないかと考えていました。」「しかし、広島爆撃を聞いた後では、私は一切の原爆兵器の仕事は決して携わらないと決心したのです。」

こうして戦後、シュワルツシルドは軍務を離れ、星の内部構造と進化論の研究に専念する。その成果は1958年にモノグラフ「星の構造と進化」[141]として出版され、進化論の基本的なテキストとなった。筆者にも思い出の多い著書である。1979年に定年退官すると妻のバーバラ・チェリー (Barbara Cherry) とパサデナに住んで、恒星系の理論的研究に没頭し、没年の前年まで、縦長のオブレート楕円銀河や横長のプロレート楕円銀河の構造、銀河ハロー内の星の軌道計算など、銀河問題に取り組んでいる。1997年に85歳で死去した。

シュワルツシルドの生涯はウイールト [140]、トリンブル [142]、ヘニエイ [143] を参照した。



図 47 マーティン・シュワルツシルドの肖像 [147]

3.2 非均質モデル

星の内部構造の非均質性とは化学組成が星の内部で一様であるかどうかを表わす用語である。星の中心部で水素からヘリウム合成が進むと、当然、中心部では水素欠乏になるが、対流が星内部で十分に進んでいれば、中心部には絶えず水素が供給されて化学組成の一様性は保たれる。しかし、実際には対流の存在は限られているので、内部で化学組成の変動が生じる。これが非均質モデルである。

本格的な非均質モデルの研究はマーティン・シュワルツシルドの主導するグループによって 1952 年に始まるとされているが、実はそれより前の 1938 年にエルンスト・エピーク (Ernst Öpik, 1893 - 1985) による先駆的な研究がある ([144],[145])。始めにそれについて紹介するのがフェアであろう。エピークは生涯の前半をエストニアのタルトゥ天文台 ([146]) で、後半を北アイルランドのアーマー天文台 ([147]) で送った人である。エピークは 1938 年に続けて 2 つの大きな論文を書き、そのなかで非均質モデルとそれに基づく進化論を要旨次のよう論じている。

星の中心部で水素が枯渇すると、ヘリウムを主体とする対流核が形成され、熱源は殻状

になる。その外側を放射平衡を主体とする外層部が包む。エピークの理論の特徴は星の進化を中心密度 ρ_c と平均密度 ρ_m との比

$\rho_c : \rho_m$ と関係付けるところにある。主系列星ではこの比は 6 ~ 265 程度であるが、赤色巨星へと進化すると、中心温度が高まり、中心部が凝縮して ρ_c が増加し、星の大気は膨張して ρ_m は低くなる。そのため、密度比

$\rho_c : \rho_m$ は 5×10^5 から最終的には 4×10^{21} へと増大する。こうしてベーテやワイツゼッカーらが赤色巨星の熱源に困惑していた時期にすでに赤色巨星への進化を中心核の凝縮と外層部の膨張として、正しく理解していたのである。しかし、エピークはまだヘリウム燃焼などの重元素反応までは想いが及んでいなかった。

ここで話をシュワルツシルドに戻そう。彼を中心に 1952 年に「非均質な星のモデル I, II」と題した 2 つの論文が公表された。第 1 は「対流核と化学的不連続面を持つ星のモデル」(Oke and Schwarzschild [148])、第 2 は「重力的に収縮しつつある枯渇した核構造を持つ星のモデル」(Sandage and Schwarzschild [149]) である。両者の違いは星内部における吸収係数の違いにあると説明されている(前者はクレマーの吸収係数、後者は電子散乱による吸収係数を取り入れる)が、2 つの論文は星の内部構造や非均質構造の扱いについても異なっている。論文の主題も、前者が、ヘリウム合成が進むと星はなぜ赤色巨星になるのかという、その機構の説明にあるのに対し、後者は散開星団を含めた星団の進化の説明を試みたものである。両者の内部構造の違いを比較すると、第 1 論文では星は水素リッチな外層部と水素プアーな内部に分かれ、内部はさらに対流核とその周りの放射平衡転移層に分かれる。水素プアーといっても水素は十分に残されており、主要熱源としての役割をまだ担っている。一方、第 2

論文では、星は水素リッチな外層部と水素の枯渇した内部に分かれ、両者の境界に薄い殻熱源が存在する。この殻内の温度は 3000 万度で水素・ヘリウム反応を生じ、内部は水素の枯渇した等温のヘリウム核になる。ヘリウム核は重力的に次第に収縮し、そのため中心温度も徐々に高まっていく。

ここまでの段階で星の進化を計算すると、2 つの論文の進化経路はほぼ同じになるので、論文 I による進化を図 48 に示そう。これを見ると球状星団の星の分布、とくに高光度の

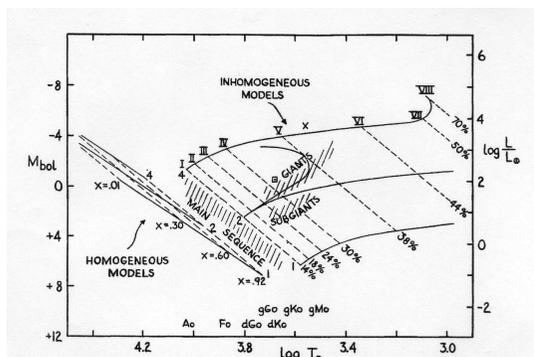


FIG. 3.—The Hertzsprung-Russell diagram for the models in terms of bolometric magnitude and effective temperature. The three heavy lines marked 1, 2, and 4 in the right part of the diagram represent the models of the second series applied to stars of 1, 2, and 4 solar masses. (The extra thin solid curve shows, for comparison, the line for 2 solar masses for the first-model series.) Each dashed line represents a specific model, which is marked by its Roman numeral and its percentage of the total mass in the hydrogen-poor interior. The solid and dashed lines to the left denote the corresponding homogeneous models. The hatched areas represent, approximately, the normal observed Hertzsprung-Russell diagram. The square and cross represent, respectively, the observed positions of Capella and Arcturus.

図 48 HR 図上における星の進化経路(その 1) 水素プアー核の燃焼による進化 (Oke and Schwarzschild 1952 [148])

HR 図上における星の進化経路。斜線部は主系列、巨星、準巨星の分布、左は均質モデルによる進化(ガモフ参照)、主系列から赤色巨星にのびる 3 本の実線は質量が太陽の 1、2、4 倍の星の進化を示す。それに交わる破線はモデル番号 1, II, ...、に対応し下側に星の質量に対する水素プアーの中心核の質量比を示す。質量 2 の星が 2 本に分かれているが、上の曲線はガスの混合作用が十分働く場合で均質モデルに近い場合を示す。

赤色巨星の分布が説明できない。この困難をどう乗り越えたらよいであろうか。

このときサンデーラの頭にひらめいたのは星の高い中心温度であった。ヘリウム核が収縮していくと中心温度は 1 億度を越し、1.8 億度に達すると推測された。当時、ヘリウムが核反応を起こして重い元素に変換するのは約 2 億度と見積もられていたもので、ヘリウム燃焼の可能性が開かれてきたのである。サンデーラは早速それを取り入れて再計算して見た。その結果、期待したような球状星団の分布に沿う進化経路が得られたので、それを図 49 に示そう。太陽質量の 1 から 4 倍までの星の進化経路とともに、星が主系列で誕生し、35 億年後に到達するまでの星の進化経路も太い実線で示してある。

こうして、非均質モデルの進展によって現代的な星の進化論の姿が見えてきたのである。

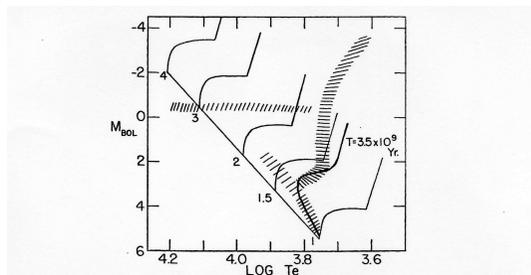


FIG. 4.—Speculative evolutionary tracks for stars of various masses with an assumed temperature of 1.1×10^8 K for the helium burning. The schematic globular cluster H-R diagram is shown for comparison. The heavy line is the theoretical appearance of the diagram 3.5×10^8 years after the formation of the stars.

図 49 HR 図上における星の進化経路(その 2) ヘリウム燃焼を加えた進化 (Sandage and Schwarzschild 1952 「49」)

主系列上の数字は星の質量、ヘリウム燃焼の開始する温度を 1.1 億度と仮定してある。球状星団の模式的な星の分布を斜線で示してある。進化時間として主系列から 35 億年までの計算が図に示されている。

3.3 非均質モデルの基づく星と星団の進化

サンデー (1955) は太平洋天文学協会の広報リーフレットのなかで星団の進化論を次のようにまとめている [150]。そのなかには1955年までに得られた成果と、理論の限界とが示されている。

(1) 星団の年齢 散開星団と球状星団を含めた星団の色等級図を図 50 に示そう。星団の年齢は主系列に並ぶ星の中でもっとも早期型の星の年齢から推定する。この年齢は折れ曲がり点年齢 (turn-off age) と呼ばれ、現在でも使われている。最も若い星団は O 型星を含むペルセウス座の $h + \chi$ 星団で 1 千万年以下と見積もられる。ヒヤデスやプレセペ星団は数億年の年齢を示し、最も古い星団は M67 で約 50 億年と推定された。この頃、宇宙膨張から推定された宇宙の年齢は 50 億年であったから、M67 星団は宇宙初期に誕生したと考えられたのである。

(2) 主系列から赤色巨星への進化 星は絶えず重力とガス圧+放射圧とのバランスをとりながら進化する。中心核で水素が消費され、ヘリウムが蓄積されてくると、中心核が相対的に重くなる。そのためバランスをとるには星は膨張しなければならなくなってくる。これが非均質モデルの特色である。ヘリウム核が成長し、星が膨張すると表面温度は低下し赤色に向かうが、表面積が増加するため、星の光度は次第に高くなる。これが赤色巨星への進化である。

(3) 星の誕生と最後 当時、星は主系列星として誕生すると考えられていた。前主系列星という概念はまだなかったし、星形成の過程も未解明であった。おうし座 T 型星は 1945 年に ジョイ (A. H. Joy) によって、新しい型の変光星として発見されていたが [152]、その進化上の位置づけはまだ不明であった。一方、エネルギー源の枯渇した赤色巨星の進化の先もまた不明であった。サンデーは恐らく短期間で白色矮星へと進化するに違いないと想像していたがその道筋は明らかでなかった。

こうして、サンデーは最後に「星の進化に関するわれわれの知識は完成からは程遠い。しかし、上に述べた、進化論のいくつかの示唆はこの問題の解決への第一歩となるであろう。」と述べて、非均質モデルによる進化論への自信と、将来への期待を表明している。これが 1955 年頃の到達点だったのである。

第 3 話「星の進化論と HR 図の成立」はこれで終わり、次回から第 4 話「星と銀河」に入ります。

文 献

[122] Weaver, H. F. 2000, National Acad. Sci., Biographical Memories No.78, p.1 - 23, National Acad. Press, Robert

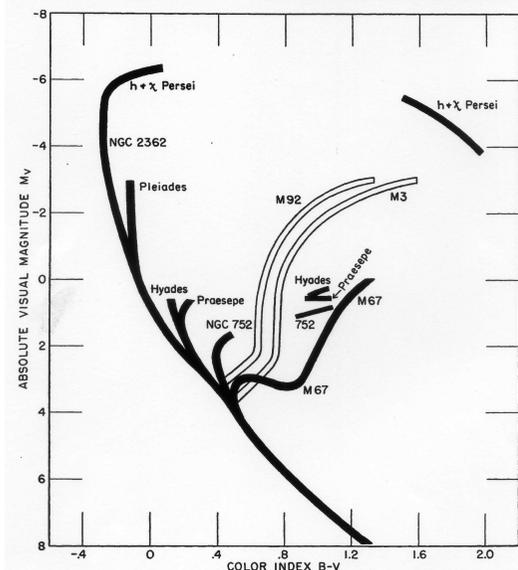


FIG. 6.—Comparison of the color-magnitude diagrams for seven galactic clusters and two globular clusters.

図 50 散開星団と球状星団を含めた星団の色等級図 [151]

- Julius Trumpler. (トランプラーの伝記)
- [123] Trumpler, Robert Julius, 1925, PASP, 37, 307 - 318, Spectral type in open clusters. (散開星団のHR図と星団の進化)
- [124] Cuffey, James, 1941, ApJ, 94, 55 - 69, The galactic clusters M46, M50 and NGC 2324. (散開星団の1940年代初期の色等級図)
- [125] Trumpler, Robert Julius, 1930, Lick Obs. Bull., No. 420, 154 - 188, Preliminary results on the distances, dimensions and space distribution of open star clusters.
- [126] Traumpler, R. J. 1931, PASP, 43, 145 - 148, Star clusters: A review.
- [127] Ruprecht, J. 1966, Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia, 17, 33 - 44, Classification of open star clusters. (散開星団の分類)
- [128] Lightman, A. and Brawer, R. 1990, Origins, Harvard Uni. Press. (宇宙論研究者へのインタビューでサンデーほか20数人を含む)
- [129] Overbye, Dennis 2010, The N.Y. Times (11月17日付)、Allan Sandage (追悼文)
(http://www.signallake.com/innovation/Allan_Sandage1926-2010.pdf)
- [130] Wikipedia Allan Sandage (伝記)
(http://en.wikipedia.org/wiki/Allan_Sandage)
- [131] Shapley, H. 1917, ApJ, 45, 118 - 141, Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. (球状星団の初の色等級図)
- [132] Shapley, H. and Davis, H. N. 1920, ApJ, 51, 140 - 178, Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. XVI. (M3に対する色等級関係)
- [133] Baum, W. A. 1964, Ann. Rev. of Astron. & Astrophys., 2, 165 - 184, Photosensitive detectors. (光学的測光機器の開発)
- [134] Sandage, A. R. 1961, The Hubble atlas of galaxies, Washington, Carnegie Institution.
- [135] Arp, H. C. 1966, Atlas of Peculiar Galaxies, California Inst. Technology, (ApJ, Suppl., 14, page 1 - 20, Plate 1 - 57にも掲載されている)
- [136] Shapley, H. 1920, Star Clusters, Chapter 2, McGraw-Hill Book Com.
- [137] Sandage, A. R. 1953, AJ, 58, 61 - 74, The color-magnitude diagram for the globular cluster M3.
- [138] Arp, H. C., Baum, W. A. and Sandage, A. R. 1952, AJ, 57, 4 - 5, The H-R diagram for the globular cluster M92 and M3
- [139] Baum, W. A. 1952, AJ, 57, 222 - 226, Globular clusters I. Photometric and spectroscopic observations in M3 and M92
- [140] Weart, S. 1977, Oral History Transcript - Dr. Martin Schwarzschild, Niels Bohr Library and Archives (Weart と DeVokin による500ページを越す詳細なインタビュー、幼少から65歳までの伝記と交友)
(http://www.aip.org/history/ohilist/4870_1.html, 同 4870_2, 4870_3, 4870_4)
- [141] Schwarzschild, M. 1958, Structure and Evolution of the Stars, Princeton Uni. Press.

- [142] Trimble, V. 1997, PASP, 109, 1289 – 1297, Martin Schwarzschild (1912 – 1997) (伝記と追悼文)
- [143] Henyey, L. G. 1965, PASP, 77, 233 – 236, Award of the Bruce Gold Medal to Martin Schwarzschild (ブルースメダル受賞献辞)
- [144] Öpik, E. 1938, Publ. Obs. Astron. Of Tartu Univ., 30, No. 3, 1 – 118, Stellar structure, source of energy, and evolution.
- [145] Öpik, E. 1938, Publ. Obs. Astron. Of Tartu Univ., 30, No. 4, 1 – 48, Composite stellar models.
- [146] 小暮智一、2009, 天文月報、102, 614 – 620, 歴史的天文台バーチャル探訪、その3 古タルトゥ天文台
- [147] 小暮智一、2011, 天文月報、104, 38 – 45, 歴史的天文台バーチャル探訪、その8 アーマー天文台
- [148] Oke, J. B. and Schwarzschild, 1952, ApJ, 116, 317, Inhomogeneous stellar models. I Models with a convective core and a discontinuity in the chemical composition.
- [149] Sandage, A. R. & Schwarzschild, M. 1952, ApJ, 116, 463 – 476, Inhomogeneous stellar models. II. Models with exhausted cores in gravitational contraction.
- [150] Sandage, A. 1955, Leaflet No. 308, ASP, 1 – 8, The evolution of the stars
- [151] Johnson, H. L. and Sandage, A. R. 1955, ApJ, 121, 616 – 627, The galactic cluster M67 and its significance for stellar evolution. (50 億年と推定)
- [152] Joy, A. H. 1945. ApJ, 102, 168 - 195, T Tauri variable stars.

小暮智一 (元京都大学)

* * * * *