

連載

恒星天文学の源流【14】

星の進化論とHR図表 その3

～収縮進化説とHD図の成立～

小暮智一（元京都大学）

ここでは19世紀末から20世紀初頭にかけて収縮進化説に基づく観測的研究として、HR図の成立までを中心にノーマン・ロッキヤー、イーネール・ヘルツシュプルング、ヘンリー・ノリス・ラッセルの3人の足跡を辿ってみよう。



図 14 ノーマン・ロッキヤーの肖像

出典：Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Norman_Lockyer

7. ノーマン・ロッキヤー (Norman Lockyer, 1836 - 1920)

7.1 ロッキヤーの生涯

ノーマン・ロッキヤーは太陽スペクトルに新元素ヘリウムを発見したことで知られているが、星の分光観測と進化論でも大きな足跡を残している。始めにその生涯を辿ってみよう ([40], [41])

ロッキヤーは1836年5月、ロンドンからバーミンガムに向かう道の途中にある小さな町ラグビーで生まれた。ここはラグビー発祥の地であり、今では工業都市であるが、当時は鉄道開通前の小さな町であった。父のヨセフ・ロッキヤーは電信技師とも科学教育家とも言われているが、ロッキヤーは少年時代に父から科学、技術の薫陶を受けている。地元の私立小中学校を終えた後、自由の気風のあるフランス、スイスの私立大学で学び、帰国後、21歳で陸軍省の書記官に任官してロンドンに移っている。翌年には最初の妻ウィニフレッド (Whinifred) と結婚するが、この頃からアマチュア天文家として天体観測に取り組むようになり、自宅の庭に16cm屈折望遠鏡を設置した。彼が関心を持ったのは当時話題になっていた太陽黒点であった。1862年頃、黒点とは固体の太陽に浮かぶ雲のようなものと一般に考えられていた。黒点の正体を探るには分光観測が不可欠であると考え、彼は望遠鏡に分光器を取り付けると同時に、屋内に光学実験室を設け、種々の元素ガスに対するスペクトル線の測定を行った。

1860年、スペインで日食があった際、ウォーレン・デ・ラ・ルー (Warren De la Rue) は光球の縁に『赤い炎』とよぶ炎状構造(プロミネンス)を発見した。ロッキヤーは陸軍省では陸軍法規集の編集委員に任じられるなど、多忙な日程の中にあっただが、この頃、日食外でもこの構造を観測する方法を考案し、1868年には光球を取り巻く輝線層を発見した。『赤い炎』については赤い輝線層の海から飛び出

した波頭のものであったと述べ、赤い海を「彩層」(chromosphere)と名づけた。このとき彼は赤い輝線層のなかに未知の元素を見つけた。この年はちょうどインドで皆既日食があり、パリ天文台のピエール・J・ヤンセン (Pierre Joule Janssen) が同じ未知の元素を発見していた。ロッキヤーはその元素を太陽にちなんで「ヘリウム」(helium)と名づけたが、2人の発見はほとんど同時にフランス科学アカデミーに報告されたのでヘリウムの発見は2人に帰せられている。

こうした業績によってロッキヤーは陸軍省から科学文化省に移籍し、1882年から王立サイエンスカレッジの教授となり天体物理学を担当する。また、付属の太陽物理天文台の台長を兼任する。太陽観測と併行してロッキヤーは星の分光観測にも取り組み始め、1889年にはドーバー海峡に面した村に新しい家を建て、76cm反射望遠鏡を設置した。これは次項で述べるように恒星分光を目的とするものであった。

1901年に65歳で大学と天文台を退職したが、天文台と自宅での分光観測は続けていた。最初の妻ウィニフレッドはすでに亡くなっていたので、1903年に未亡人マリー・ブロードハースト (Mary Brodthurst) と結婚した。マリーはデボン州の出身で、海岸に広い土地を持っていたので、夫に天気が良く、天体観測にも適したデボン州で余生を送りましょうと提案した。ロッキヤーも環境のよさに満足し、1910年にシドマス郊外に家を建て、隣接するサルコンベの丘に天文台を建てた。ここをヒル天文台と呼び、順次ロンドンにあった自分の望遠鏡を移設した。1920年にロッキヤーが没すると天文台は息子と娘によって引き継がれ、名もノーマン・ロッキヤー天文台と改められた。2人が他界すると天文台はエクセター大学の管理に任されたが、ここは地磁

気の観測が主体となり、天文台としての機能が一時失われたこともあった。1984年にデボン州が土地を買い上げ、州の公共天文台として復活、整備を始めた。現在はノーマン・ロッキヤー天文台の名の下に開かれた教育普及のセンターとなっている [41]。

7.2 ロッキヤーの元素解析と星のスペクトル

星の分光観測にロッキヤーは2台の望遠鏡を用いた。一つは太陽物理天文台に設置された9インチ(23cm)と10インチ(25cm)の屈折望遠鏡を同架させた赤道儀(ケンジントン望遠鏡)である。9インチ鏡には頂角30度の対物プリズムが装着されている。2つ目は上に挙げた76cm反射望遠鏡で、スリット分光器が装備され、波長、相対強度など精密な測定に使用されている。

ロッキヤーは観測と同時に室内における分光実験に取り組み、アーク灯、スパーク灯などを用い、温度、ガス圧を変化させながら約20種の元素についてスペクトル線の同定と特性を調べた。その結果、ある元素、例えば鉄ガス(Fe I)のスペクトルを見ると、ある温度で突然、スペクトル線の現われ方が変化する。彼は変化後のガスをプロト鉄と呼び、高温の状態を示すと考えた。今でいえば1回電離鉄(Fe II)である。ヘリウムや他の元素についても同様であった。1つの元素がプロト元素という別の形態をとることは当時の化学者から大きな反発を招いた。彼らは、原子は単一構造をもち、別の状態に移ることはありえないと考えていたからである。しかし、ロッキヤーは自説を貫き、実験室のスペクトルを星のスペクトルと比較した。代表的な星のスペクトルとスペクトル線同定図を図15に示そう。上段に元素およびプロト元素名、下段に波長、両脇に星の名前が記されている。

星は上から下へと温度が低下するように配列されている。こうした配列において、彼が最も注目したのは星のスペクトルの化学組成による相違である。この観点から星の分類を行い、これを「星の化学分類」と名づけた ([42], [43])。

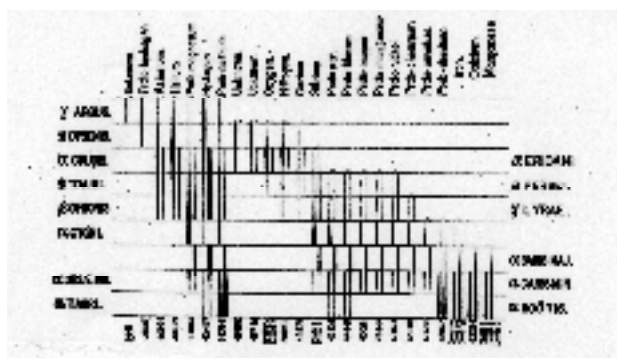


図 15 星のスペクトルにおける元素同定と星の温度系列との関係図 [46]

彼の分類法は一風変わっていて、代表的な星の名前から名づけており、例えば α Tau 型の星は Taurian、アンタレス型の星は Antarian、などである。温度系列を最高温度から最低温度まで 10 段階に分け、各系列を上昇、下降の 2 つのグループに分けている。合計 16 種に分類し、それを図 17 のように配列した。最高温度の Argonian (ζ Pup, O5Ia) や Alnitamian (Alnitam = ϵ Ori, B0Ia) はグループに分かれていない。同じ温度段階の星をグループに分ける基準ははっきりしないが、目安としてプロト金属線が水素線より強い場合は上昇期、その反対は下降期の星と呼んでいる。こうしてロッキヤーは 470 個の星の分類を行い、カタログを公刊している [44]。

彼の分類を図 16 に示そう ([45], [46])。この図は 1914 年になって書き改めたもので、アーチの両側に分類型、内側に主な特徴、左側に温度段階が示されている。1910 年代にはすでにハーバード天文台での分光分類が広く知られていたが、ロッキヤーは自らの「化学

分類法」による命名法にこだわっていた。しかし図では分光型に彼の分類法と並んでハーバード分類も併記されているのでわれわれには分りやすい。

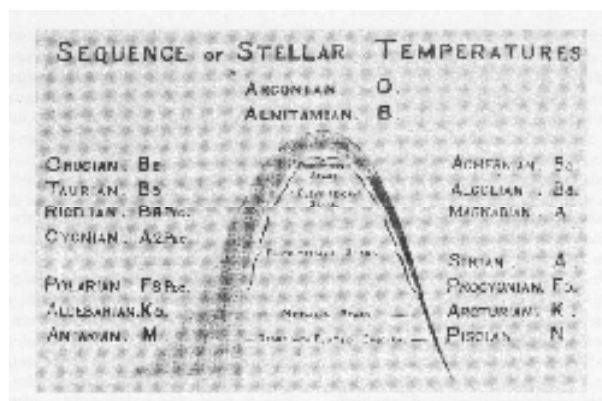


図 16 ロッキヤーのアーチと星の進化 [46]

7.3 星の進化論

ロッキヤーは上にあげた分光分類の論文では直接触れていないが、星の進化については 1887 年にすでに「流星説」を唱えている ([47], [4] p.87)。星の誕生について彼は

「天空上で自ら輝く物体は、もともとは冷たい隕石または流星物質の集合からできている。それらが重力によって流星雨のように凝集し、落下の熱によって輝き始めたものである。」

と述べており、星は冷たい物質から生まれたと主張した。原始星雲の収縮がすすむと星は次第に高温になり、色やスペクトルも赤色星から白色星へと移っていく。やがて、収縮による加熱は放射熱とバランスしなくなり、星は収縮しながら赤色星へと向かう。これが概念的ではあったがロッキヤーの二方向進化説である。進化経路の概要は図 16 の分類図にも見ることができる。この説は当時のウィリアム・ハギンスやヘルマン・ボーゲルらの一方向進化説、つまり星は高温星として誕生し、収縮によって次第に暗く、赤くなるという説と対立するものであった。ロッキヤーの説は

異端の説として長く認められなかったが、ロッキヤーはその後も絶えず改良を加えながら自説の進化論を発展させていった。彼の説が認められるのは 20 世紀に入ってヘルツシュプルングとラッセルによるものであったが、それについては次節以降で述べよう。



図 17 ヘルツシュプルングの肖像

出典 : Encyclopedia Britannica

<http://www.britanica.com/EBcheck.ed/topic/263944/Enar-Hertzsprung>

8. イーネール・ヘルツスプルング (Ejnar Hertzsprung, 1873 - 1967)

8.1. 生い立ちと生涯

イーネール・ヘルツシュプルングは 1873 年 10 月、いまはコペンハーゲン市内の静かな住宅街になっているフレデリクスベルグ (Frederiksberg) で生まれた。その頃、近くには小高い丘や森も広がり、少年時代の彼を星空へと誘っていた ([48], [49])。

父のセベリン・ヘルツシュプルング (Severin Hertzsprung) は大学では天文学を学んだが、経済的な理由でデンマーク財務

省の官吏となる。息子のイーネールに天文の手ほどきをするが、天文学で職を得ることの難しさから、息子にはアマチュア天文を楽しむように勧めた。イーネールは父の勧告に従って、技術者の道を選んだ。1898 年にコペンハーゲンのポリテクニク・インスティテュートを卒業すると、ロシアに渡りサンクトペテルブルクでアセチレン燈工場の技師として働いた。3 年後コペンハーゲンに戻るが、その帰途、数ヶ月間、ライプチヒに留まり、ウィルヘルム・オストワルド (Wilhelm Ostwald) のもとで写真化学を学んでいる。これは後に天体写真分光観測を進める上で大きな力になった。

1902 年にコペンハーゲンの自宅に戻った彼は、母、妹と暮らしながら定職には就かず、アマチュア天文家としての道を歩み始めた。コペンハーゲン大学天文台や、ウラニア天文台 (Urania Observatory) に通って、精力的に星の分光観測を進める。ウラニア天文台は 1897 年にビクトール・ニールセン (Victor Neilsen) によってコペンハーゲン近郊に設立された私設天文台で主望遠鏡はメルツ製の 27 cm 屈折望遠鏡、それには 16 cm 屈折写真儀や 20 cm シュミット・ニュートン反射望遠鏡も同架されている (図 18)。分光器についての記載はないが、ヘルツシュプルングは分光器を持ち込んでこの望遠鏡で星の分光測光観測を行ったのであろうか。この頃の彼の所属はウラニア天文台となっている。付言すると、この天文台はコペンハーゲン付近の観測条件が悪くなったため、1971 年に望遠鏡と共にユトランド半島北部のオルボア市に移された。オルボア市立ウラニア天文台として整備され、いまでも市民に親しまれている。

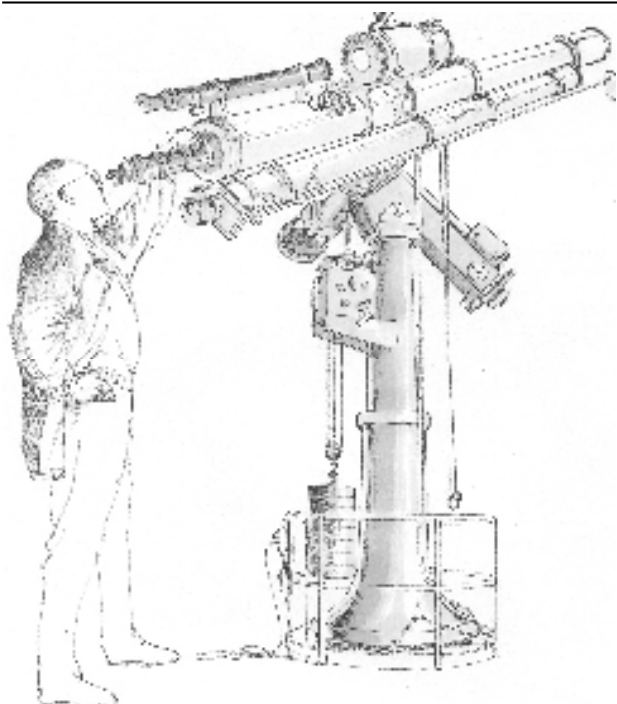


図18 ウラニア天文台の27cm主望遠鏡と同架望遠鏡

建築家アルツロ・ハモ (Arturo Hamo) によるスケッチ。

(ウラニア天文台ホームページより転載
<http://www.nafa.dk/Historie/Urania%20history.htm>)

ヘルツシュプルングが研究者へとすすむ糸口になったのはウラニア天文台で得られた観測結果をゲッチング大学天文台のカール・シュワルツシルト (Karl Schwarzschild) に送った論文である。これは雑誌『写真科学』に掲載されたものであるが、観測された星の吸収線特性を固有運動の大きさと比較した研究である[50]。この論文はシュワルツシルトの高い評価を得た。

1909年、第2論文を携えてゲッチングにシュワルツシルトを訪ねると、思いがけず天文台客員教授の申し出を受けた。話は進んだが、その年の暮れにシュワルツシルトがポツダム天文台長として赴任したため、ヘルツシュプルングも同時に招かれてポツダムに移り、天文台のシニア・アストロノーマーの職

に就く。26才であった。こうしてアマチュア歴は終わるが、その年から10年間、ポツダム天文台でシュワルツシルトとともに観測にあたる。その間に第1次世界大戦が勃発し、前回(第6節)に述べたようにシュワルツシルトは砲兵隊中尉として前線に赴き、前線で病を得て、1916年に没したしまった。

シュワルツシルトはヘルツシュプルングと同じ1873年生まれであるが、ヘルツシュプルングにとって、彼は良き先達であり、良き友人でもあった。こうして、シュワルツシルトを失ったヘルツシュプルングは1919年、招聘されてライデン天文台に移る。

ライデン天文台では1944年まで台長職を勤め、その後はデンマークに戻ってコペンハーゲンから50kmほど離れたテーレーズ (Töllöse) で余生を送った。彼を引き継いだヤン・オールト (Jan Oort) 台長は退職送別会の席上で、要旨、次のようにヘルツシュプルングの業績を挙げている[51]。

「彼はライデン着任以前に巨星と矮星の発見からHR図の作成へと大きな仕事をなしとげたが、ライデン着任以来、最高の精度で物理的観測を行うという精神から大きな発見を成し遂げた。その中にはプレアデスなど星団の精密なHR図を作成したこと、ケフェウス型変光星の絶対光度の決定によって小マゼラン雲の距離を精密に決定したこと、二重星に対する写真位置測定を1000分の数秒角にまで高めて二重星研究に大きく寄与したことなどが含まれている。」

故郷に戻ったヘルツシュプルングは自宅の庭に望遠鏡を設置して二重星の観測を続けている。1963年、90歳の誕生祝には多くの人が集まって賑やかであったという[49]。しかし、その後は次第に体調を崩し、1967年に死去した、享年94才であった。

8.2. 巨星と矮星の発見

ヘルツシュプルングの最初の関心は星の固有運動であった。統計的に見て固有運動の小さい星は遠方にあると推定することが出来る。彼はハーバード天文台のマウリー (A. Maury) によって指摘された、幅の狭い吸収線をもつ *c* 特性の星がどれもきわめて小さい固有運動を示すことに注目した[52]。それらの星が遠方であれば、星本体は大きな光度を持たなければならない。その光度を表すために彼は星をある基準距離から見たときの明るさとして絶対等級 (絶対光度) を定義した。このとき彼は基準距離として視差 1 秒角 (距離 1 パーセク) を採用したが[53]、この値は後にカプティンによって現行のように視差 0.1 秒角 (距離 10 パーセク) に改定された。

ヘルツシュプルングは星の絶対光度とスペクトル型との間に何らかの関係があるのではないかと想定し、これまでに公刊された視差、固有運動、分光型のカatalogを用いてその関係を調べた。「星の放射について」と題された最初の論文 ([50], [54]) がそれである。そのなかで結果を次のようにまとめている。

- i) 晩期型星 (G. K. M) は光度の異なる 2 つのグループに分けられる。
- ii) 光度の高い赤色星は巨大な星でなければならない。
- iii) 見かけの等級が 5 等級より明るい星のなかで、最も目立つのは *c* 特性をもつ赤い星である。残りの星では M 型星は少なく、黄色星が大部分を占めている。

彼はさらに高輝度の赤色星は低輝度星に比べて空間密度が極めて小さいことを指摘し、その理由として、高輝度星として存在する時間が短いためではないかとも示唆している。

晩期型星に絶対等級が異なった 2 つのグループが存在することについてハーバード天文台長のピッケリングの意見を聞くために台長

宛に論文[50] を添えて手紙を送った。1906 年 3 月 15 日付の日付のある手書きの手紙が残されているのでその一部を図 19 に示そう [55]。

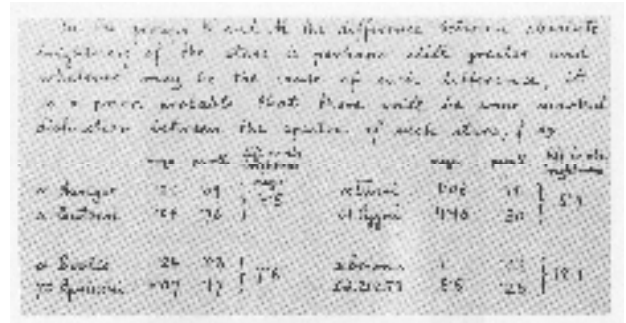


図 19 ヘルツシュプルングからピッケリング宛 1906 年 3 月 15 日付の手紙
各星で magu とあるのは見かけの等級、parall は視差、3 行目は絶対等級の差を示す。
(図の出典 : [55] の Fig. 6.2)

参考までに上図に列挙された星について現行の絶対等級と分光型を示しておこう。

名前	絶対等級	分光型
α Aur	0.09	G8 III
α Cen	4.35	G2 V
α Boo	0.24	K2 III
70 Oph	5.67	K0 V
α Tau	- 0.6	K5 III
61 Cyg A	7.58	K5 V
α Ori	- 5.6	M1 Iab
Lal.21258A	10.4	M2

この手紙に対するピッケリングの返答は「*c* 特性を特別視すべきではない」といったすげないものであった。ピッケリングは *a*, *b*, *c* 特性が分光学的にまだ確立されていないと思っていたからである。その返事はヘルツシュプルングを落胆させたが、しかし、それにもめげずに、さらに *c*, *ac* について踏み込んだ考察を進めている[56]。*a*, *b*, *c* 特性は金属線に当てはめると次のようになる。

<i>c</i> 特性	金属線が非常に鋭い
<i>b</i> 特性	金属線幅が最も広い
<i>a</i> 特性	線幅がその中間にある
<i>ac</i> 特性	<i>a</i> 、 <i>c</i> の中間にある

(*c*特性で吸収線幅が狭いのはガス密度が小さく、シュタルク効果などによる幅付けが小さいため、表面重力の小さい巨星の特性を表わしている。ハーバード分類では*c*は超巨星を表わす前添え字として使われている。)

マウリーのカタログ(681星)では*c*特性の星が18星、*ac*特性が17星含まれている[52]。ヘルツシュプルングは*c*星(*c*、*ac*の両者)と*b*星(*b*、*ab*の両者)との統計的な性質を視差と固有運動の2つの面から比較した。その結果、同じ分光型に属する星であっても固有運動は*b*星が年間5" - 30"程度を示すのに対し、*c*星では0".3から1".5程度と小さい。また、視差カタログの星についても同じように*c*星がはるかに小さい視差を示す。こうした統計的考察からヘルツシュプルングは結論として次のように述べている。

「こうして、われわれは次のように結論せざるを得ない。すなわち、*c*星は天空の中でも最も明るい星に属することが多いが、実ははるかに遠方であって、異常なほど大きな絶対光度をもつ星である。」そしてまた、この見解とともにピッケリングへの手紙に対する返事について次のようにも述べている。

「ハーバード天文台のピッケリング教授から簡単な返事を戴いたが、それは*c*、*ac*特性を特別視すべきでない。なぜなら、スペクトル線の幅などの特性は不確実で観測条件によって異なって見えることがあるから、というものであった。私はそれには賛成できない。*c*、*ac*特性はマウリーによって明白に示されており、それを無視するのは鯨と魚類を同一視するのと同じではないか。将来のスペク

トル解析は物理的に大きな意味を持つ*c*特性の検討を避けるべきではない。」

これを見ると、アメリカ大御所のピッケリングもデンマークに住む無名のアマチュア天文家に一本取られたというところである。また、こうした一連の研究がゲッチンゲン大学天文台のカール・シュワルツシルドに評価され、研究者への糸口になったことは前項で述べた。

シュワルツシルドとともにポツダム天文台に移ったヘルツシュプルングはその年(1909年)に星の空間分布の研究と共にプレアデス星団とヒアデス星団の星について等級と色指数との関係を図にまとめた。そのうち、ヒアデス星団の色等級図を図20に示そう。図では4個の赤い星が高い光度を示している。それに対し、プレアデス星団では高光度の星は青い星に限られていた[57]。こうして彼はヒアデス星団中の赤い星が実際に高光度の星であることを見出し、明るい星を巨星(Gigant = giant)、暗い星を矮星(Zwerg = dwarf)と名づけた。

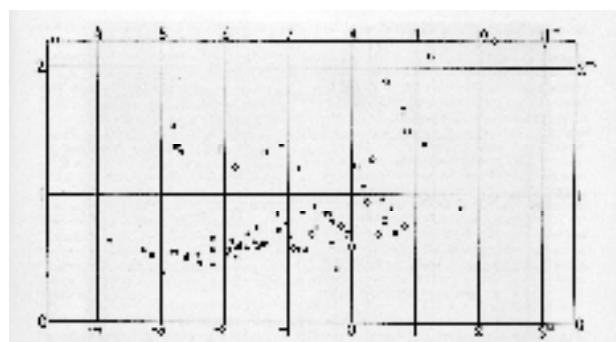


図20 ヘルツシュプルングによるヒアデス星団の色等級図

横軸は見かけの等級、縦軸は星の色を表わす指数で上ほど赤い。黒丸は星団星、白丸は星団星と推定される星。([57]、[55]のFig. 6.5)

1911年、シュワルツシルドはアメリカに旅行したおり、アメリカ天文学会に出席してヘンリー・ノリス・ラッセル(Henry Norris

Russell) の報告を聞いた。それはヘルツシュプルングがすでに得た結論と同じものであった。彼はラッセルにヘルツシュプルングと連絡することを薦めた。これがヘルツシュプルング・ラッセル図 (HR 図) の誕生する契機となったが、それについては次節で触れよう。

ポツダムにおいてヘルツシュプルングはシュワルツシルドと共同で統計的に星の空間分布の研究を進めようとするが、それは十分に果されなかった。前にも述べたようにシュワルツシルドは第 1 次世界大戦に出征して 1916 年に戦病死してしまったからである。

9. ヘンリー・ノリス・ラッセル (Henry Norris Russell 1877 - 1957)

9.1. その生涯

ニューヨークの東、ロングアイランド半島の入り江の町オイスター・ベイ (Oyster Bay) はニューヨークに近いが静かな町である。ラッセルはこの町で 1877 年に生まれた。父アレクサンダー・G・ラッセル (Alexander G. Russell) はルイジアナ州生まれの教会の牧師、母エリザ・ノリス (Eliza Norris) は彼女の父が駐ブラジル総領事であったころブラジルで生まれた。ヘンリーは 12 才のときプリンストンにある母方の親戚の家に移り、高校、大学に進学する。19 才でプリンストン大学を優秀な成績で卒業する。さらにヤング (A. C. Young) のもとで連星の軌道決定法、小惑星エロスに対する火星の摂動作用などの研究を進め、1902 年に英国のケンブリッジのキングスカレッジに留学する。その翌年、カーネギー研究所 (Carnegie Institute of Washington) の研究助手となり、ヒンクス (A. R. Hinks) とともに恒星の視差の写真測定観測を進めるが、この時期、体調を崩し、入院したりしてしばらく研究を中断していた。

1905 年にプリンストン大学に戻り、天文学

の助手を経て 1911 年に教授、1912 年からさらにプリンストン大学天文台長を兼ねる。1908 年にルーシー・マリー・コール (Lucy Mariy Cole) と結婚し、4 人の子供を得ている ([58], [59])。



図 21 ラッセルの肖像 [59]

1947 年からは大学を離れて台長に専念する。プリンストン大学に移ってからの 50 年間、彼は天文学と天体物理学の広い分野でアメリカの天文学を主導することになる。伝記を書いたストラトン [58] はラッセルの研究分野を次のように分けている：

- 1) 惑星 初期の研究、金星の周辺像から大気存在を予測、周期的彗星の起源が惑星によるとする理論を検証し、太陽系内に捕獲される条件として、彗星軌道面が黄道面に近いことが必要との指摘をしている。
- 2) 恒星視差 ケンブリッジおよびプリンストンでの視差の写真測定の結果、視差の測定によって得られた星の絶対等級と固有運動の間に大きな散らばりがあることに注目し、それを星固有の光度の違いが主原因であると見なした。その結果、特に赤色星は光度の高い星と低い星の 2 つのグル

ープに分かれることを示した。これが彼の星の進化論の第1ステップになった。彼はまた、連星系について力学的視差の概念を導入し、エディントンの質量光度関係を利用して1777連星の視差のカタログを作成している。

- 3) 連星系 最も初期の段階からの研究対象で多くの連星について軌道要素の決定を行っている。特に成分星（連星系を構成する星）の質量について質量光度関係から外れる星が存在するのは白色矮星やトランプラーの星（超巨星）などに起因することを指摘した。
- 4) 食変光星 アルゴル型について軌道周期と食の長さを比較して主星のガス密度は太陽の4分の1程度であり、高密度の中心核があるとすれば大気は著しく広がっていることを指摘。食連星の軌道要素の決定に光度曲線の非対称性から星の球面からのずれ、成分星からの反射光の効果などを取り入れた考察を進めている。また、光電測光技術による光度曲線の精密化に伴って、軌道決定法も従来のグラフ法から数値計算法に改定する必要があり、この面での大きい貢献もあった。
- 5) 星の進化論 恒星視差の項で述べたように、同じ分光型でも光度の著しく異なった2つのグループが存在する。同じ区別はヘルツシュプルングによっても指摘されており、こうした区別からヘルツシュプルング・ラッセル図（HR図）が作成される。その過程は次の項で述べよう。

ラッセルはその他、太陽物理学、恒星大気論、実験室分光学などに取り組んでいるが、そのなかで最もよく知られているのは太陽と恒星の分光解析から宇宙における元素存在比を提唱したことであろう。その組成比は長くラッセル・ミックスチュアと呼ばれ、宇宙組成の標準的な値として広く利用された。

1957年2月、長い病気のあとで他界するが、ラッセルの最初の弟子であったハロー・シャプレー（Harlow Shapley）は弔辞の中で次のように述べている。

「アメリカ天文学者の長老として、星の物理学や原子の構造について長期間、研究を続け、天文学の広い分野で、また、宇宙進化や、宇宙における人間の地位についての哲学においてわれわれに深い理解を示したのである。」〔58〕

9.2. HR図と星の進化論

星の進化に関するラッセルの関心は三角視差の統計的な性質から始まる。1902年から1905年頃にかけて星の視差の観測とカタログデータの収集を行っていた。その頃、注目していたのは「明るい星はすべての分光型に現われるのに対し、暗い星は晩期型の星に多く、星が晩期になるほど暗くなる傾向にある。」という見かけの分布の違いであった。ラッセルはこの観点から統計的研究を進め、1910年の8月、ハーバード天文台で開かれたアメリカ天文学会の会場で星の固有運動と光度との関係について次のような講演を行った〔60〕。

「G型より赤い星では2つのグループが存在する。1つは固有運動が小さく、光度の明るい星である。他はわれわれに近く、大きな固有運動と低い光度を持つグループである。光度の大きい星は、おそらく、星の進化の初期の段階にあると考えられ、この統計的性質はノーマン・ロッキヤーの進化説に近い。」

前述したように、この会場に出席していたシュワルツシルドは「ポツダムではイーネール・ヘルツシュプルングがすでに同様の結論を得ている」と紹介した。ラッセルもヘルツシュプルングの仕事を知らなかったし、会場のだれもヘルツシュプルングの名前を知らな

かった。ヘルツシュプルングの論文が天文に関係のない写真科学の雑誌に掲載されていたからでもある ([50], [53])。

シュワルツシルドは早速、ヘルツシュプルングに論文コピーをラッセルに送るように連絡した。論文を受け取ったラッセルは丁寧な礼状をヘルツシュプルングに送った。1910年9月27日の日付で残っている手紙をみると要旨は次のようになっている。

「貴方の興味深い、きわめて重要な論文コピーを受け取りました。・・・私も貴方より少し後れて、赤い星は2つのグループに分かれるという同じことを考えておりました。・・・そのテーマについてアメリカ天文学会の席上で報告しましたが、近く論文としてまとめる予定です。その中で貴方の早期の成果について触れたいと思っております。・・・シュワルツシルド教授によろしくお伝えください。・・・」
([61])

ラッセルはフェアな人柄でヘルツシュプルングの業績をよく理解していた。

この手紙で約束した論文は1913, 1914年に続けて公表されている ([62], [63])。そのなかに分光型と絶対等級との関係図があるので、それを図22に示そう。図の中で黒と白のドットはいくつかの視差カタログからカプタインの定義に従って絶対等級に換算したもの、黒いドットはいくつかの観測値の平均、白いドットは、1個のカタログ値によるもの、ドットの大小は測定誤差の違いで大きいドットは絶対等級が±1等以内の星である。また、大きい白丸は視差の小さい明るい星で絶対等級は統計的処理によって求めた星である。

図22についてラッセルはいくつかの点に注目している。

a) すべての白色星 (B, A型) は太陽よりはるかに明るい星である。逆に太陽の明るさ

の50分の1以下の暗い星はすべて赤い星 (K, M型) である。それぞれの分光型ではヘルツシュプルングも述べているように、明るさに下限がある。その下限は分光型と共に急速に下がっている。これについて1つだけ例外がある、エリダヌス座 σ^2 星である。この星は近傍にあるので絶対等級の誤差は小さい。しかし、主星が明るいいためスペクトルの観測が困難で、分光型Aは推定によっている。

- b) 赤色星には光度の大きい星が多く、A型星に匹敵するが、B型星より若干暗いかもしれない。各分光型について光度の上限と下限との光度差は赤い星ほど大きくなる。
- c) 赤色星で注目されるのはヘルツシュプルングがいみじくも名づけたように巨星 (giant) と矮星 (dwarf) がはっきり分かれることである。その中間の星が極めて少ない。

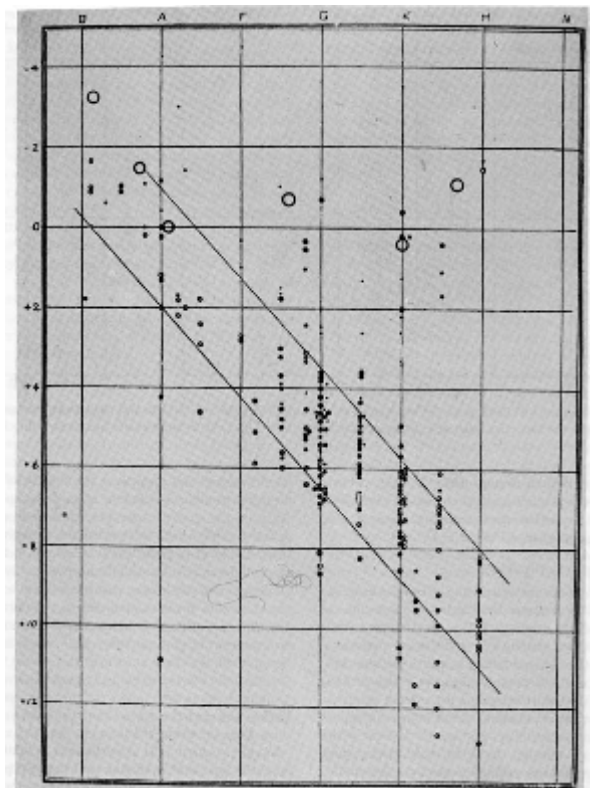


図22 ラッセルによって描かれた最初のラッセル図 [62]

図 22 はアメリカでは長くラッセル図と呼ばれ、ヘルツシュプルングの(色指数-等級)図は無視されていたが、それを掘り起こして「ヘルツシュプルング・ラッセル図」(HR 図)と名づけたのはデンマークのベンクト・シュトレングレン (Bengt Strömberg) である[64]。彼はそれを 1933 年にゲッチンゲンで開かれた天文学会の席上で披露した。同じデンマーク人として先輩への思いがあったのであろうか。いずれにしても、それ以来、HR 図の言い方が定着するが、ヘルツシュプルング自身は感想を訊ねられたとき、「なぜ色-等級図と叫びたいのかね、その方が誰にでも何を表すか分かりやすいのではないかな。」と述べるにとどまっていたという[61]。

続いてラッセルは連星系データから得られた星の質量分布について、1914 年に次のように指摘している[65]

- a) 分光型や巨星、矮星における光度の差は星の質量によるものではない。
- b) 星の表面輝度(単位表面積あたりの放射量)は赤い星ほど急速に低下する。
- c) 星の平均のガス密度は青い星から赤色矮星にかけて次第に増加し、巨星では A 型から M 型 にかけて減少する。赤色の巨星では太陽平均密度の 2 万分の 1 程度に過ぎない。

ラッセルは上述したような星の統計的性質(視差、固有運動、光度、質量)に基づいて星の進化経路を次のように推論し、ロッキヤーの二方向進化説を支持している([66])。

- a) 赤色巨星の存在は一方向収縮説では説明できない。
- b) B 型星は低温度ガスから収縮誕生した筈である。しかし、これまで誕生から B 型星に達するまでの仮定は明らかでなかった。誕生から B 型星まで観測されないほど短時間で進化したとは考えられない。有力な候補は色-等級図における赤色巨星である。
- c) B, A 型星がすでに充分進化した星である

ことは、それが中、晩期型星と連星を作ることから明らかである。

- d) 質量分布を見ると B 型星は A 型星より晩期の矮星よりも大きい。レーンとリターによって指摘されたように(恒星天文学の源流[13])、質量の大きい星ほど高い温度に到達することができる。

こうして星は赤色巨星として誕生し、質量に応じて早期型の星へと進化し、引き続いて収縮によって赤色矮星へと進むとラッセルは推論した。

この時期のラッセルは主に星の統計的性質から進化論を展開しているのでエネルギー問題には触れていないが、収縮説を引きついでいる。しかし、最高温度に達して、収縮、低温化に向かう理由には深く触れていない。

1919 年になるとラッセルも収縮エネルギーだけでは星の熱源として不十分であることに気が付いた[67]。星の内部には何か『未知の熱源』が存在しなければならないとして、その熱源の存在条件をいくつか挙げている。第 1 にその熱源は収縮エネルギーに比較して単位質量あたり莫大な熱量を発生しなければならない。恐らく実験室では得られない極限的な状態、例えば星の中心部の高温度、が原因であろう。第 2 に熱の発生量と星表面からの放射量とはほぼ均衡しているので、星の進化はきわめてゆっくりとしたものである。第 3 に、この熱源はやがて枯渇し、星は収縮しながら最後の冷たい固体へ進化する[68]。1926 年には質量がエネルギーに変換する原子核変換過程を取り入れているが[69]、それでも二方向進化論は変わっていない。熱源の条件に対するラッセルの指摘はきわめて適切なものであったが、ラッセルとしては熱源そのものまで踏み込めないもどかしさを持っていたようで、そうした思いが論文の中から伝わってくる。

こうして、ヘルツシュプルングとラッセル

によって HR 図表が成立し、レーン、リター、ロッキヤーによる二方向進化論が広く受け入れられるようになった。これらをまとめ、収縮説による星の進化経路を概念的に図 23 に示そう。収縮に未知の熱源を取り入れるようになったが、図のような二方向進化は 1920 年代から 30 年代にかけての星の進化論の到達点だったのである。

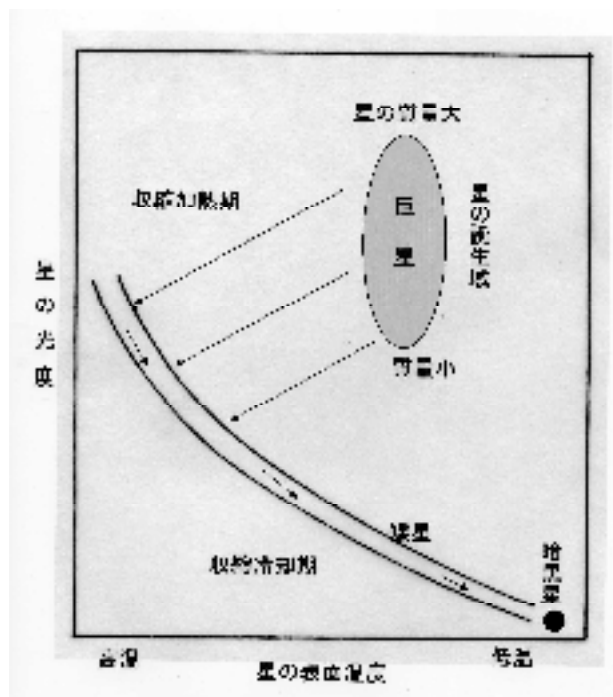


図 23 収縮説に基づく星の二方向進化経路

文 献

[40] Cortie, A. L. 1921, ApJ., 53, 233 – 248, Sir Norman Lockyer, 1836 – 1920. (追悼と伝記)

[41] 小暮智一 2009, 天文月報、102 巻、9 月号、488 -494、歴史的な天文台バーチャル探訪。その 2. ノーマン・ロッキヤー天文台。

[42] Lockyer, N. 1899, A.N., 149, 225 – 232, On the order of appearance of chemical substances at different temperature.

[43] Lockyer, N. 1899, AN, 149, 387 – 392, On the chemical classification of the stars.

[44] Lockyer, N. 1902, Catalogue of 470 bright stars classified according to their chemistry, Publ. of the Committee on Solar Physics, London.

[45] Lockyer, N. 1903, MN, 64, 227 – 238, Further researches on the temperature classification of stars.

[46] Lockyer, N. 1915, Nature, 94, 282 – 284, 618 -619, Notes on stellar classification.

[47] Lockyer, N. 1897, Proc. Roy. Soc. London, 43, 117 (文献 [4] 参照)

[48] Phillips, T. E. R. 1929, MNRAS, 89, 404 – 417, Address, (王立天文協会からヘルツシュプリングへのゴールドメダル授与式における会長挨拶) (伝記).

[49] Andrews, A. D. 1963, Irish Astr. Journal, 6, 150 – 151, Ejnar Hertzsprung's 90th Birthday (90 歳誕生日に対する祝辞)

[50] Herzprung, E. 1905, Zs. für Wissenschaftliche Photographie, 3, 429 – 442, Zur Strahlung der Sterne.

[51] Strand, A. A. 1947, Pop. Ast.55, 361 – 364, Ejnar Hertzsprung and the Leiden Observatory. (ヘルツシュプリング退官送別会でのオールト台長挨拶)

[52] 小暮智一、2010, 天文教育、7 月号、19、ハーバード天文台と HD 星表の成立、その 4、アントニア・マウリー。

[53] Herzprung, E. 1907, AN, 176, 49 – 58, Zur Bestimmung der

- photographischen Sterngrösse.
- [54] Herzprung, E. 1907, Zs. für Wissenschaftliche Photographie, 5, 89, Zur Strahlung der Sterne.
- [55] DeVorkin, D. 1984, Astrophysics and twentieth-century astronomy to 1950, Cambridge U. Press, 90 -108, Stellar evolution and the origin of the HR diagram.
- [56] Herzprung, E. 1909, AN, 179, 373 – 380, Über die Sterne der Unterabteilungen *c* und *ac*.
- [57] Herzprung, E. 1911, Publ. des Astrophys. Observatorium zu Potsdam, 22, 1, Ueber die Verwendung photographischer effective Wellenlangen zur Bestimmung von Farbenaequivalenten.
- [58] Stratton, F. J. H. 1957, Biographic Memories of Fellows of the Royal Society, 3, 173 – 191, Henry Norris Russell. (伝記)
- [59] Tenn, J. S. 1993, 1993, Mercury, 9-10 月号、19 – 21, Henry Norris Russell, The twentieth Bruce Medalist. (業績解説)
- [60] Russell, H. N. 1911, Carnegie Institute of Washington Publications, No. 147.
- [61] Hearnshaw, J. B. 1986, The Analysis of Starlight, p.212 – 216, Cambridge U. Press.
- [62] Russell, H. N. 1913, The Observ. 36, 324 – 329, “Giants” and “Dwarf” stars.
- [63] Russell, H. N. 1914a, Popular Astronomy, 22, 275 - 284, Relation between the spectrum and other characteristics of the stars I
- [64] Strömngren, B. 1933, Zs. f Ap, 7, 222 – 248, On the interpretation of the Hertzsprung-Russell diagram.
- [65] Russell, H. N. 1914b, Popular Astronomy, 22, 331 - 351, Relation between the spectrum and other characteristics of the stars II
- [66] Russell, H. N. 1914c, The Observ., 37, 165 – 175, On the possible order of stellar evolution.
- [67] Russell, H. N. 1919, PASP, 31, 205 – 211, On the source of stellar energy.
- [68] Russell, H. N. 1921, Popular Astronomy, 29, 541 - 545, Stellar evolution
- [69] Russell, H. N. 1926, Popular Astronomy, 34, 244 - 245, On the problem of Stellar evolution