

連載

恒星天文学の源流【13】

星の進化論とHR図表 その2

～ガス球論の発展～

小暮智一（元京都大学）

ここでは19世紀後半から20世紀初頭にかけてガス球論を発展させ、太陽および恒星の内部構造論と進化論の基礎を築いた研究者としてジョナサン・H・レーン、アウグスト・リターとロベルト・エムデンの3人を取り上げよう。

4. ジョナサン・ホーマー・レーン (Jonathan Homer Lane, 1819 - 1880)

4.1 レーンの生涯と人柄

ジョナサン・H・レーンは天文学の専門家でも、アマチュア天文家でもなかったが、19世紀に数学的立場から恒星内部の構造を初めて数理的に取り組んだ人としてその名を天文学史に刻んでいる。

レーンは1819年8月9日、ニューヨーク州のゲネシーで生まれた。父はマーク・レーン (Mark Lane)、母はヘンリエッタ・レーン (Henrietta Tenny Lane) である。農業を営む、裕福ではなかったが教養ある家庭であった ([22], [23])。8歳まで小学校に通ったがその後は農業を手伝いながら両親から教育を受けた。幼いときから技術的才能に優れ、村人のために工具類や時計の製作にまで当たっている。10歳台後半は小学校の教員を務めながら大学入学資格を獲得し、エール大学に入学する。ここではオルムステッド (Denison Olmsted) に師事し、数学と自然科学を学ぶ。オルムステッドは地球物理学者で、地球大気の乱流に対する熱力学的研究を精力的に進めていた。レーンは後に太陽研究における熱力学的手法についてオルムステッドから大きな

影響を得たと述べている。

1846年にエール大学を卒業、ワシントンの沿岸調査所に臨時のポストを得るが、翌年の1848年に特許局の調査官に任じられ、1857までその職にとどまる。当時の特許局では認可件数を稼ぐために審査を甘くする傾向があった。その中でレーンは調査に厳正な態度で臨んだのでやや異端児の趣があったが、周囲からは信頼を得ていた。

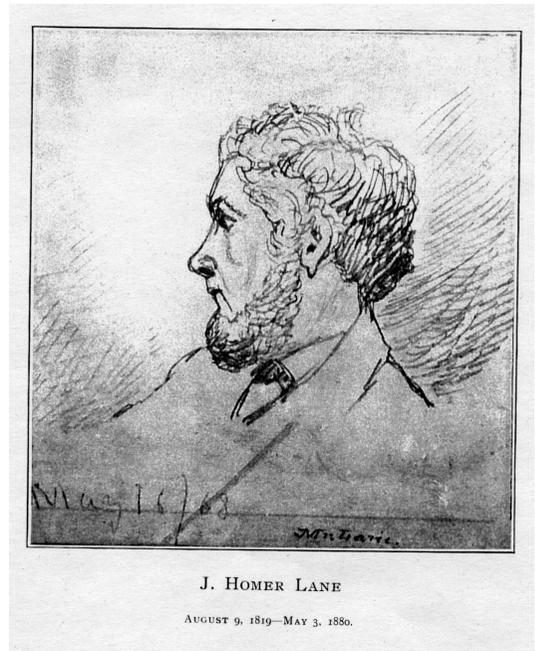


図7 レーンの肖像 ([22])

レーンの友人 E. W. Schaeffer によって1868年5月に描かれたスケッチ。ちょうど、レーンが太陽構造の問題に取り組んでいた頃である。

1857年には独立してワシントン市内に特許事務所を開き、特許関係の顧問や特許弁護士などの業務を始めた。業務の傍ら余暇には科学や、技術開発などへの興味を深め、電気機器の改良、とくに電気時計や電信機の開発などに取り組んでいた。

1860年に南北戦争が勃発すると、特許事務所の経営も不振になってきた。戦争を避け静かな生活を送るために、ペンシルバニア州北部の兄弟の住む村に移り、冷却用ガス膨張装置を用いた極低温装置の開発などに取り組んでいる。また、それと併行して天文学にも興味をもち、ひとりで文献に当たりながら太陽内部構造の研究に思いを深めていた。

太陽の進化についてはジョン・ハーシェルやケルビン卿の収縮説に興味をもっていたが、内部構造を数学的に扱っていない点がレーンには不満であった。そこで彼は太陽をガス球と仮定し、重力平衡と熱力学過程を基本にして内部構造に関する基本方程式を書き始めた。

南北戦争は1865年に北軍の勝利で終結し、平和が戻ったので1866年にワシントンに戻る。ペンシルバニアで過ごした7年間はレーンの生涯で最も実り豊かな時代であったという。太陽の研究についても基本的な構想が固まりつつあった。ワシントンでは再び特許局に勤務するが、同時にペンシルバニア時代の継続として極低温装置の開発と太陽温度の研究を平行して進めている。レーンはすでに40歳台後半になっていたが、この時期に2人の友人と知己になり大きな影響を受ける。1人は海軍天文台の編歴部に勤務するサイモン・ニューカム(Simon Newcomb)である。数理天文学の若き研究者としてニューカムは航海暦(American Nautical Almanac)の作成を主導していた。彼は天文学の立場からレーンに多くの助言を与えている。

もう1人は数学者のベンジャミン・パース

(Benjamin Peirce)である。10歳年上のパースはハーバード大学の数学教授で代数学、数論などで知られていた。彼はさらに天体力学を担当し、球面幾何学や航海暦関係の数学を講じていた。ガス球論の数理的扱いについて、レーンはパースから多くのことを学んだという。3人は互いに年齢は違っていたが親しい友人であり、時にはライバルでもあった。

こうした友人たちとの交流を深めながら、レーンは太陽研究に打ち込み、1870年によく「太陽の理論的温度」を公刊する。これは天文に関する彼の唯一の仕事であったが、その成果については満足していたらしい。この構造論については次節で述べよう。

レーンはその後も特許局に勤務していたが、最後の数年は病との闘いの日々であった。1880年5月に死去したが(享年61歳)、最後まで明晰な頭脳を持ち、死の数日前には友人と将来の計画やキリスト者として超自然の神について語り合っていたという。レーンを回顧する人は一様に彼の物静かな人柄に惹かれている([22],[23])。彼は大きな灰青色の目を持ち、人と話をするときも、遠くを見つめるようなまなざしで、ゆっくり喋ったという。

4.2 レーンのガス球論

レーンの論文[24]は「太陽の理論的温度」と略称されているが、実際は「太陽の理論的温度：ガス体としての太陽は内部の熱によってその体積が維持されているという仮定の下に、地上の実験室で得られた気体法則に依拠して導かれた温度」という長いものであった。この論文は自己重力のもとで球状に保たれるガス体の全体的平衡状態を取り扱った歴史的論文である。彼は太陽内部を完全気体と仮定したが、これは大胆な発想であった。当時はまだ、太陽内部は固体かあるいは液体と考え

られていた時代であった。

いま、完全気体を考えると、よく知られているようにガス圧 p 、温度 T 、密度 ρ は

$$p = R\rho T \quad (1)$$

で結ばれる。ここで R は気体定数である。

レーンは太陽ガス球として 2 つの条件を仮定した。第 1 は静力学平衡であり、第 2 は対流平衡である。静力学的平衡は

$$dp = -\frac{Gm(r)}{r^2} \rho dr \quad (2)$$

で与えられる。ここで r は太陽中心からの動径距離、 $m(r)$ は半径 r までに含まれる質量、 G は重力定数である。対流平衡は熱せられた高温ガスが上昇して冷却し、深部に戻る過程で表わされ、気体の状態変化はすべて断熱的に行われる。従って、近傍の 2 つの部分 1, 2 についての状態変化は

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^\gamma \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/(\gamma-1)} \quad (3)$$

で表わされる。ここで γ は定圧比熱と定容比熱との比である。これらの式を用いると内部構造は次式で与えられる ([4] の Appendix A 参照)

$$1 - \left(\frac{\rho}{\rho_c}\right)^{\gamma-1} = \int_0^x \frac{\mu(x)}{x^2} dx \quad (4)$$

ここで

$$\mu(x) = \int_0^x \frac{\rho}{\rho_c} x^2 dx \quad (5)$$

ρ_c は中心密度である。

レーンは (4), (5) 式を $\gamma = 5/3$ (単原子ガス)、 $\gamma = 1.4$ (空気と同じ組成のガス) について数値的に解いているので解曲線を図 8 に示そう。境界条件として必要な太陽中心密度については地球内部との類推から 28 g/cm^3 ($\gamma = 5/3$)、 7.11 g/cm^3 ($\gamma = 1.4$) を仮定している。中心密度の現在値は 150 g/cm^3 であるから、

レーンの見積もりは過小すぎたが、表面温度を 6000 K とすると中心温度は数 100 万度となる。後にジャクソン・シー ([25]) はレーンの計算をチェックし (1905 年)、適当な境界条件の下で中心温度は 970 万度に達することを示した。太陽内部に 100 万度以上の高温ガスの存在を示したのはレーンが最初であるから、その意味でも図 8 のもつ意義は大きい。

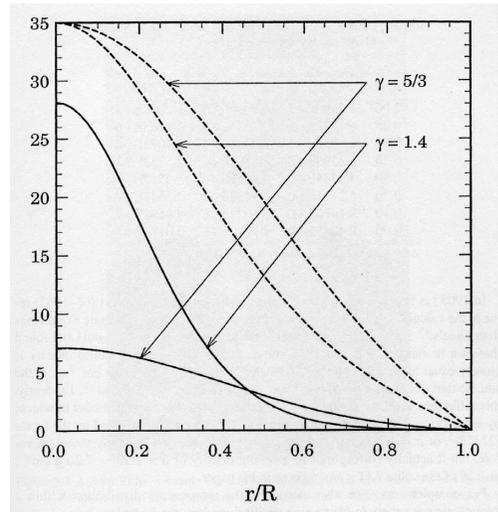


図 8 レーンによる太陽内部の構造 ([4], [24])

実線は密度分布、破線は相対温度分布を表す。

レーンは太陽の熱源として準静的な収縮を考えた。彼は収縮による熱は放射エネルギーを補うだけでなく、中心温度を上げ、従って、星の表面温度を上昇させる可能性を指摘した。当時、収縮によって開放されたエネルギーはすべて表面からの放射に費やされるというのが支配的な考え方であった。しかし、レーンの指摘は長い間無視され、ハギンスやセッキらの星の進化論の主流には影響を与えなかった。それを取り上げたのはノーマン・ロッキヤーである。ロッキヤーについては次回に紹介するが、彼は星を温度上昇期と温度下降期

に分けている。これはレーンの考察を基礎にしているが、ロッキヤーの考え方さえ、当時としてはまだ異端であった。

こうした、収縮によるエネルギーが放射熱と星本体の加熱(表面温度の上昇)の両者に使用されることは、レーンと次節で述べるリターによって詳しく吟味されたので、収縮進化論ではそれをレーン・リターの法則と呼んでいる。

5. アウグスト・リター (August Ritter 1826 - 1908)

5.1 リターの生涯

アウグスト・リターの生涯についての伝記は少ない。略伝 ([4],[26]) によると、彼は1826年にドイツのハンブルグの南、リュネブルグ (Lüneburg) で生まれ、1853年にゲッチンゲン大学を卒業している。1856年にハノーバーの高等工業学校講師として力学、機械工学の講義を担当し、1870年にオランダ国境に近いアーヘンのアーヘン工業大学 (現RWTH-Aachen) が開設されると、構造力学と一般力学の担当教授となる。構造力学について多くの業績があるが、そのなかでも橋梁工学でよく知られていた。彼は少年時代から天文学への興味をもっており、大学では工学講義の傍ら、数学と熱力学の観点から星の内部構造の研究を始める。その成果は次節で述べるが、天文学の研究は1878年から1883年に集中する。その後は本来の構造力学に戻り、1899年まで在任する。1903年には故郷のリュネブルグに戻り、静かな余生を送っていたが1908年2月、リュネブルグで他界した。享年82歳であった。

因みに1900年にアーヘン工業大学でリターを引き継いだのは ゾンマーフェルド (Arnold Sommerfeld, 1868 - 1951) である。彼は量子論の先駆者の一人であり、量子力学

を築いたウエルナー・ハイゼンベルグ (Werner Heisenberg)、オルフガング・パウリ (Wolfgang Pauli)、ハンス・ベーテ (Hans Bethe) らの指導者である。彼には多くの著書があるが、筆者にとって忘れがたいのは彼の「原子構造とスペクトル線」(1919)である。これは1950年代に分光学を志すものにとっては必携の書であった。しかし、ゾンマーフェルドがアーヘン工業大学に勤務していたのは1906年までの7年間で、この間、彼は古典的な流体力学の研究に専念していた。量子論の研究が本格化するのには彼がミュンヘン大学に移ってから後の話である。



図9 アウグスト・リターの肖像 ([4]の Fig.3.4)



図 10 アーヘン工業大学 (RWTH Aachen University) の建物

リターが初代担当教授を務めた一般力学研究所が付置されている。(RWTH = Rhineisch-Westphälische Technische Hochschule Aachen) (出典 <http://www.reth-aachen.de/go/id/xq1>)

5.2 リターのガス球論

リターは1878年から1883年にかけての6年間にウイーデマン年報の第5巻から第20巻まで、一般タイトル「大気の高さに関する考察とガス状天体の内部構造について」のもとに18編の論文シリーズを公表している([27],[28])。第I章から第XVIII章まで全体で300ページを越え、用いた数式は通し番号で659に及んでいる。

そのなかで彼はガス球の平衡、振動、安定性の問題に取り組み、自己重力にあるポリトロープガス球の平衡状態について先駆的研究を行っている。ひとこと、ポリトロープについて触れておこう。熱力学でポリトロープと呼ぶのはガス圧 p と密度 ρ または比容積 $V = 1/\rho$ に対し

$$p = K\rho^{1+1/n} \quad \text{または} \quad pV^n = K \quad (6)$$

の関係を満たすガス過程である。ここで K は定数、 n はポリトロープ指数と呼ばれ任意の数を取りうる。例えば、 $n=0$ は $p =$ 一定だ

から等圧変化、 $n=1$ は等温変化、 $n=\infty$ は断熱変化、 $n=0$ は等積変化を表わす。一部はレーンによっても考察されたが、リターは一般の n について星の内部構造を表す表式を導いた。それを簡単に示しておこう([4]の Appendix B)。

いま、完全ガスに対する(1)式、重力平衡を表わす(2)式と(6)式を組み合わせると

$$\rho = \rho_c \left(\frac{T}{T_c} \right)^n \quad \text{および} \quad p = R\rho_c T_c \left(\frac{T}{T_c} \right)^{n+1} \quad (7)$$

の関係が得られる。ここで添え字 c は星の中心における値を示す。この式と重力平衡式とを組み合わせると次の基本的微分方程式が得られる。

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{dy}{dx} + y^n = 0 \quad (8)$$

ここで $y = \left(\frac{T}{T_c} \right)$ 、 $x = \left(\frac{r}{a} \right)$ で a は次式で与えられる。

$$a = \left[\frac{(n+1)RT_c}{4\pi G\rho_c} \right]^{1/2} \quad (9)$$

式(8)にたいし、 $n=\gamma$ についてはすでにレーンによる数値解があるが、リターは種々の値について数値解を与えている。この式はポリトロープガス球の内部構造に関する基本方程式として、リターを引き継ぐエムデンやエディントンに大きな影響を与えている。

5.3 星の分光型と進化論

リターは長大な論文を書いたがそのうちの第16章[28]で太陽と星の進化を考察している。彼の考え方を辿ってみよう。いま、ポリトロープ球が準静的に収縮する場合を考える。例えば太陽は始めに地球軌道くらいの半径で誕生したとする。地球の軌道半径は太陽半径の215倍であるから太陽は1/215に収縮し

たことになる。ある星が半径 r から $r' = r/n$ に収縮し、表面温度が T から T' になったとする。表面からの放射量はステファンの法則に従い、温度の4乗に比例すると仮定すると、星表面の単位面積からの放射量は q から q' へ、全表面積からの放射量は Q から Q' へと変わる。ここで両者の間には次の関係がある。

$$\frac{q'}{q} = \frac{T'^4}{T^4} = n^{\left(\frac{8-4\gamma}{\gamma}\right)}, \quad \frac{Q'}{Q} = \frac{1}{n^2} \frac{q'}{q} = n^{\left(\frac{8-6\gamma}{\gamma}\right)} \quad (10)$$

従って、 $\gamma = 4/3$ のとき $Q' = Q$ 、 $\gamma > 4/3$ のとき $Q' < Q$ となる。

星の半径が10分の1、100分の1に収縮した場合を考え、 $\gamma = 5/3$ とすると上の物理量は次のようになる。

n	10	100	
T'/T	1.58	2.54	表面温度上昇
q'/q	6.3	39.8	単位表面積あたりの放射量増大
Q'/Q	0.063	0.004	表面積縮小のため全放射量減少

こうして収縮に伴って星は常に暗くなる。太陽がこのようなポリトロップ球として地球軌道半径から現在の半径までに準静的に収縮したとする。彼は太陽の現在の放射量から逆算して収縮に要する時間は約560万年と見積もった。リターはこの計算について「地球の歴史は地質学の推定より遥かに若いのである。」とのべ、収縮論への信頼を表明している。

ところで星はいつまでも表面温度上昇で収縮を続けられるであろうか。それは出来ない。希薄なガス体として誕生した星は全体として光学的に透明であったが、収縮と共に次第に不透明になり、物理状態も変化するので星は上記の収縮法則から次第に離れ、ある点で光

度最大、ついで表面温度最高になる。その後は加熱より放射優先となって星は緩やかな収縮を続けながら次第に暗く、また、赤くなっていく。太陽はいまの明るさよりあまり変わらない過去に順次最高温度期、最大光度期を迎え、現在はすでに温度下降期に入っていると見なされる。最大光度での明るさは星の質量に依存するので、セッキの分類したI型星(現行のB, A星)は太陽よりずっと大質量の星であると正当に推論している。

リターはボーゲルによる星の分類 [29] との関係について次のように述べている：

「星を表面温度に従って3つのグループに分けるとすれば、高温の白色星はボーゲルのクラス I、黄色星はクラス II、赤色星はクラス III に対応するが、赤色星については2つのグループに分けるべきである。第1は星がまだ最高温度に到達していない段階の星で、平均密度も低く、星の光度も大きい。それに対し、第2のグループはすでに最高温度を過ぎ、温度の低下段階にある星で密度も高く、光度も小さい。」

リターはまた、クラス I, II の星についてもクラス III の赤色星と同様に、最高温度に達する以前と以後の星を区別できるのではないかと示唆しており、星の分光型は表面温度のみならず、表面密度にも依存すると述べている。ここではまだ巨星、矮星といった言葉はでないが、リターの頭の中にはすでにHR図が概念的に描かれていたのではないかと思われる。

リターは「熱力学の天体諸問題への応用」と題した著書 [30] も著しており、彼のガス球論と進化論は19世紀に達成されたもっとも高いレベルに達していた。しかし、その後の評価は大きく分かれる。後に述べるエディントンは「内部構造論」のなかでリターにつ

いてほとんど触れていないのに対し、「恒星構造論序論」を書いたチャンドラセカールはリターについて多くの紙面を割いて評価している。

6 ロベルト・エムデン (Jacob Robert Emden, 1862 - 1940)

6.1 エムデンの生涯

エムデンはスイスの天体物理学および気象学の専門家で 1862 年にチューリッヒの東、ドイツとの国境に近いザンクト・ガーレン (St. Gallen) で生まれた。略伝[31]によるとフランスのストラスブール大学で学び、1887年に理学で学位を得ている。その後、ミュンヘン工業高等学校に移り、1901年に「太陽理論への寄与」という著書を出版し[32]、その要旨を 1902 年のアストロフィジカル・ジャーナルに英文で投稿している[33]。これは気象現象における熱力学を取り扱った著書で、海面と貿易風、対流圏と成層圏などの界面の熱力学に基づいて、地球大気一般循環論を論じ、それを太陽の大気運動の理論に応用した著述である。

1907年にミュンヘン工科大学の教授となり、この年に「ガス球論」(Gaskugeln)を出版した[34]。この書の序文で執筆の動機を 1901年に著わした前述の「太陽理論への寄与」にあるとしているから、その後に着想して著述を始めたのであろう。これらの業績が認められて 1920年にはバイエルン科学アカデミー会員に選ばれている。彼は生涯をミュンヘンで暮らしたいと思っていたが、生まれがユダヤ系であったため、ドイツへの国籍申請は長年認められなかった。1930年代にナチス政権になると迫害が強くなり財産没収の危機が迫ったため、ついに 1933年にスイスに戻り、チューリッヒで晩年を送る。彼の妻クララ (Klara Schwarzschild Emden) はカー

ル・シュワルツシルド(Karl Schwarzschild)の姉である。

エムデンは K. シュワルツシルドの一家と親しい関係にあったが、2人は共にストラスブール大学で学んでおり、また、兩人ともある期間、ミュンヘンに勤めていたこともあった。こうした経歴の中でシュワルツシルド家と親しくなったのであろう。両家が共にユダヤ系であったことも一因かもしれない。エムデンがミュンヘンにいた頃、シュワルツシルドはゲッティンゲン大学天文台に務めていたが二人には研究上の交流もあり、そうした中で、エムデンはクララと出会ったのであろう。

カールはユダヤ人であったが、熱烈なドイツ愛国者であり、1914年に第1次世界大戦が勃発するとドイツ軍の砲兵隊中尉として参戦している。1915年に東部戦線で悪質な天疱瘡に罹り、病院に送られる。療養中も彼は研究を止めず、翌年に他界するまでに2編の重要な論文を書き上げている。1つはアインシュタインによって提唱されたばかりの一般相対論に基づいて質点周辺の重力場の厳密解を導いたもの、第2はスペクトル線系列の量子論的考察である。シュワルツシルドに師事したイーネール・ヘルツシュプルングは師の死を惜しんで

「カール・シュワルツシルドの死は科学にとって大きな損失である。彼を知るすべての人にとって、彼が“充分な年月”を待たずに逝ってしまったことに悲しみが絶えないであろう。」

「彼の特性をひとことで言うならば、それは彼の柔軟さにある。彼の人やものを見る眼はすばやく、鋭く、そして、いつもほぼ本質を突いている。しかし、彼はあるとき、私は私を尊敬する人とは一緒に暮らしたくないね、などと言ったことがある。彼を取り巻く暖かい雰囲気は特別なものであった。」

と弔辞を送っている [35]。

第1次大戦後、ドイツ国内ではユダヤ人に対する迫害が徐々に強まり、カールの息子のマーチン・シュワルツシルドの時代にはナチス政権によって過酷なユダヤ人迫害が激しさを増していた。マーチンはついに1935年にアメリカに亡命している ([36])。マーチンも恒星物理学の道に入り、プリンストン大学天文台で星の構造と進化の研究に進むようになるがその背景には父カールと伯父エムデンの影響があったであろう。

エムデンはスイス移住の前、1930年に創刊された天体物理学誌 (Zeitschrift für Astrophysik, Zs.f.Ap) の創設にもかかわり、チューリッヒに移った1933年以降も編集を続け、編集者として最後の年になった1936年には同誌に「光球表面における回転則について」[37]という論文を寄稿したりして、太陽への関心はなお続いていた。その後は静かな晩年を送っていたが、1940年に病を得て78歳で他界した。



図11 カール・シュワルツシルド家の家族写真

左から2人目がカール、その他の人は同定されていないがエムデンも同席している筈である。カールより9歳年上という年齢から推定すると中央に座った人がエムデンで彼の左隣がクララ夫人であろう。[38]

6.2 エムデンのガス球論

「ガス球論」([34])は正式には「ガス球論、熱力学理論の宇宙論的および気象学的諸問題への応用」と題した、450ページを越す大著で、その内容は2つの部分から出来ている。

第1部は基礎理論で13の章からなり、完全気体の熱力学から始まってポリトロープガス球論を丹念に構成していく手法は見事な建築物を見る感じである。その過程でレーンやリターの導いた表式や法則も現われてくるが、出所には触れていない。リターの項で述べた基本方程式 ((8)式) もそのままの形で再度導かれており、通常、エムデンの微分方程式と呼ばれている。エムデンはこの方程式に基づいてポリトロープガス球の詳細な解析と数値計算を行っている。計算例の一つとして半径無限大のポリトロープ球内の温度分布のパラメータによる違いを図12に示しておこう。ここで注目されるのはエムデンが半径無限大のポリトロープ球を考えていたという点である。それについては後述する。

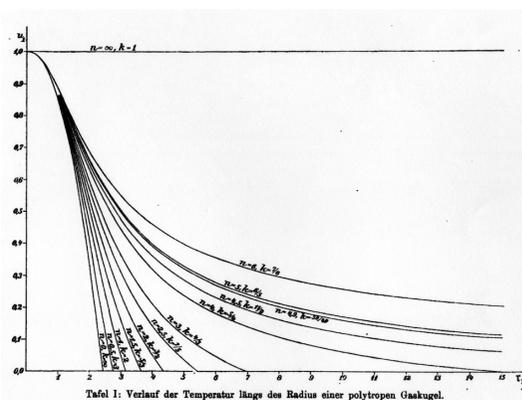


図12 エムデンの無限の広がりを持つポリトロープ球内の相対的溫度分布の計算例
パラメータは n はポリトロープ指数、 k は比熱比 にあたる。[34]

第2部は「諸現象への応用」と題して5つの章からなっている。そのうちの第4章が「地球とその大気」、第5章が「太陽」である。「太陽」はさらに「静かな太陽」、「回転する太陽」、「振動する太陽」の3節に別れている。太陽を扱った「静かな太陽」ではポリトロープ指数を $n = 1.5$ と $n = 5$ の場合について詳しく解析している。こうした解析から彼は $n = 1.5$ の場合について太陽中心の状態を

$$\text{中心密度 } \rho_c = 8.27 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{中心圧 } p_c = 81.69 \text{ 億大気圧}$$

$$\text{中心温度 } T_c = 1200 \text{ 万度}$$

と推定している。ここで1000万度を越す太陽中心温度が初めて現われてくる。

リターらと異なり、エムデンはガス球半径を有限の場合と無限の場合を併行して考察している。当時、光球の外側に彩層やコロナなど外側空間につながる現象が知られており、外側(星間空間)は真空で温度0と考えられていたので半径無限大のガス球の必要性を考えたのであろう。実際、無限半径のポリトロープ球ではある半径で温度が0となり、密度も0に近づいて外側空間と接続する解もえられている(図12)。また、太陽が半径無限大から準静的に収縮したとして、その年令を数百万年と推定しているが、リターほどには年令にこだわっていない。また、太陽の項では内部構造のみならず、太陽面現象やフラウンホーフ線線の形成なども取り扱っており、太陽が幅広い面から考察されている。

最後に「歴史的ならびに批判的」と題した章が設けられており、そのなかでは「ガス球論」著述の背景となった当時の研究成果を広く紹介し、それぞれに対し批判的解説を行っている。その中で星の構造論を築いた人として、レーン(1870年)、その9年後のリター(1878年)、さらにその9年後のケルビン卿(1887年)の3人を挙げ、19世紀後半の恒星

進化論を切り開いたマイルストーンとして高く評価している。



図13 エムデンの「ガス球論」の表紙 ([34])

エムデンの基本的考え方はレーンやリターと変わっていないが、理論が整備され、応用例が多いことからガス球理論の集大成と呼ばれ、4版を重ねて、星の内部構造論の基本的テキストとなって広く知られるようになった。

なお、アメリカに渡ったエムデンの甥、マーチン・シュワルツシルドは1958に著書「星の構造と進化」[39]を著わしているが、この書で歴史的なマイルストーンの研究者として、順にエムデン、エディントン、チャンドラセカールの3人の名前を挙げている。時代はすでに核融合に基づいた「恒星物理学の黄金時代」に入っており、ポリトロープ球論はすでに時代遅れになっていたが、シュワルツシルドはポリトロープ球にも触れ、エムデンの微分方程式を紹介している。ただし、リターやエムデンと異なり、ポリトロープ指数が星内部で中心からの距離に依存する例を挙げている。しかし、この著書の本題はすでにポリト

ロープではなかった。ポリトロープガス球論の時代はこのマーチン・シュワルツシルドの著書を持って終幕したのである。

文 献

- [22] See, T. J. J. 1906, Popular Astr. 14, 193 – 206, Historical sketch of J. Homer Lane. (伝記)
- [23] Powell, C. S. 1988, JHA, 19, 183 – 199, J. Homer Lane and the internal structure of the Sun. (伝記と業績)
- [24] Lane, J. H. 1870, Amer. J. Sci. & Arts, 50, 57 – 74, On the theoretical temperature of the Sun : Under the hypothesis of a gaseous mass maintaining its volume by its internal heat, and depending on the law of gases as known to terrestrial experiment
- [25] See, T. J. J. 1905, AN, 169, 321 – 364, Researches on the physical constitution of the heavenly bodies.
- [26] August Ritter -Wikipedia, http://de.wikipedia.org/wiki/August_Ritter
- [27] Ritter, A. 1878 – 1883, Wiedemann's Annalen Vol. 5 – 20, Researches on the height of the atmosphere and the constitution of gaseous celestial bodies
- [28] Ritter, A. 1898, ApJ, 8, 293 - 315, On the constitution of gaseous celestial bodies.
これは ApJ 誌の編集者が Ritter の論文 18 編のうち、第 XVI 章を英訳したものである。恒星スペクトル分類に焦点を当てた論文で Vogel の分光型を理論的に導いた最初の論文として注目される。
- [29] 小暮智一「天文教育」2009 年 7 月号、25(表 4)
- [30] Ritter, A. 1882, Anwendungen der mechanischen Wärmetheorie auf kosmologische Probleme, H. A. L. Degener, Leipzig.
- [31] Robert Emden、http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Emden (エムデンの略伝)
- [32] Emden, R. 1901, Beiträge zur Sonnentheorie, B. G. Taubner 社刊 (太陽理論への寄与)
- [33] Emden, R. 1902 ApL, 15, 38 -60, Contribution to the Solar Theory ([32]の英語簡約)
- [34] Emden, R. 1907, Gaskugeln,-Anwendung der Mechnischen Wärmetheorie auf Kosmologische und Meteorologische Probleme (ガス球論)
- [35] Hertzsprung, E. 1917, ApJ, 45, 285 – 292, Karl Schwarzschild (弔辞)
- [36] Karl Schwarzschild, <http://www.nndb.com/people/713/000168209/>, (家族関係)
- [37] Emden, R. 1936, Zs.f. Ap, 12, 233, Zum Rotationsgesetz der photosphärischen Schichten. (太陽光球層における回転法則について、論文)
- [38] Suhendro, I. 2008, Abraham Zelmanov Journal, Vol. 1, 14 – 19, Biography of Karl Schwarzschild. (カール・シュワルツシルドの伝記)
- [39] Schwarzschild, M. 1958, Structure and Evolution of the Stars, Princeton Univ. Press

小暮智一 (元京都大学)