

連載

恒星天文学の源流【15】

星の進化論とHR図表 その4

～内部構造論の発展～

小暮智一（元京都大学）

今回は太陽、恒星から宇宙論まで天体物理学の分野で大きな足跡を残した 20 世紀前期の 2 人の巨人エディントンとチャンドラセカールについて、内部構造論の発展という視点からその生涯と仕事を振り返ってみよう。

10. アーサー・スタンリー・エディントン (Arthur Stanley Eddington, 1882 - 1944)

10.1 生涯と人柄

アーサー・スタンリー・エディントンは湖水地方に近いウエストモールランド州ケンダル(Kendal)でストラモンゲイト学校を経営し、校長でもあった父のアーサー・ヘンリー・エディントンの長男として 1882 年 12 月に生まれた。しかし、スタンリーが 2 歳のとき父が他界したので、母サラ・アン・スタウトはスタンリーと 4 歳年上の姉ウィニフレッドとともに義母のラーシェル・エディントンを頼ってブリストル水道に面したウエストン・スーパー・メアに移る。一家は収入が少なく切り詰めた生活を送っていた。しかし、スタンリーは明るい少年として育ち、幼少の頃から多彩振りを発揮した。数学、科学への興味と同時にスポーツ(クリケット、フットボール)、ゲーム(特にチェス)にも積極的に参加していた。また、サイクリングにも熱心でこれは生涯続けられる。一日に 100km 以上走行した記録が晩年までに 10 回もあったというから驚きである。スタンリーはまた大きな数を数えたり、計算したりするのが好きで 24 行×24 行の掛け算を暗記して自由にこなしていたという。10 歳のときには小学校の校長から

借用した 8cm 望遠鏡で天体観測に興味をもち、天文学への目が開かれた。エディントンにはヴィバート(Vibert) [70] による詳しい伝記がある。

1893 年に地元のブルメリン・スクールに入学、優秀な成績によってサマーセット郡の奨学金 60 ポンドが得られたので、マンチェスター大学のオーウェンズ・カレッジに入学した。物理学を専攻し、流体力学で著名なホレス・ラム(Horace Lamb, 1877-1957)の指導を受ける。ここでも抜群の成績によっていくつかの奨学金を獲得し、1903 年にケンブリッジ大学のトリニティ・カレッジに入学する。



図 24 チェスにくつろぐ若き日のエディントン [70, Fig. 5]。

姉の見守る中を母と対戦中、ウエストン・スーパー・メアの自宅にて。

1904年にトリニティ・カレッジを卒業し、同校の特別研究員として天文学の研究生活に入る。2年間の研修の後、グリニジ天文台に助手として移り、実地天文学のルーチンワークとともに、独自に統計星学の研究を進める。当時、問題となっていたのは恒星の統計的運動の解釈で、ヤコブス・カプタインの提唱する二星流説と、カール・シュワルツシルドの提唱する楕円体説との間に論戦があった。前者は太陽近傍の恒星には2つの系統的運動があるという説、後者は1つの楕円体で近似できるという説である。エディントンとはカプタインとの親交を深めながら二星流説を支持し、その立場から1914年に「恒星の運動と宇宙の構造」と題した最初の著書を公刊している[71]。

出版より少し早く、1912年にエディントンはジョージ・ダーウィンの後任としてケンブリッジ大学のブルーミアン教授職(天文学)に就任する。1914年からはケンブリッジ天文台長を兼任し、亡くなるまでの30年をこの職に留まった。

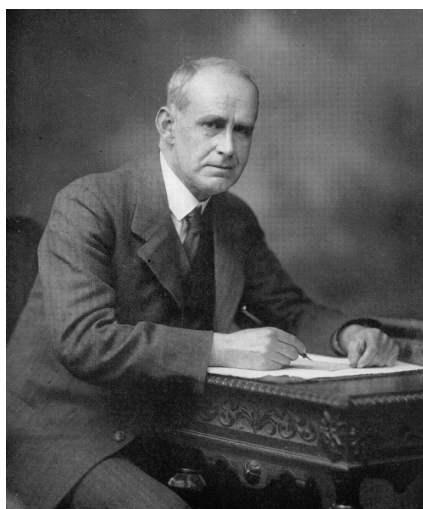


図25 エディントンの肖像 1931年ケンブリッジ天文学教授時代 [70, Fig. 13]



図26 1930年代のケンブリッジ天文台、ドーム、正面入り口と建物 [70, Fig. 4]

ケンブリッジにおけるエディントンの天体物理学の研究は広い分野にわたっているが、主な領域をおよその年代順に並べると

1916 – 1920 放射平衡、ケフェウス型変光星、相対性理論

1920 – 1931 星の内部構造、エネルギー源

1930 – 1944 宇宙論、恒星大気論、基本理論

今回の連載では1910年代後半から20年代後半にかけて進められた内部構造とエネルギー源の研究を取り上げ、次項で紹介しよう。

エディントンの最後の年、1944年は病との闘いの日々であった。彼は痛みを堪えながら「基本理論」(Fundamental Theory)の執筆に専念していた。これは量子論と相対論と重力理論を統一しようとする壮大な試みであった。9月、医師は彼に手術を勧めたが、すでに手遅れの状態にあった。11月2日最後の筆を絶ち、22日に姉のウィニフレッドに看取られながら死を迎えた。享年61歳11ヶ月は惜しまれる年齢であった。「基本理論」は友人によって1946年に出版された。生涯独身であった。

10.2 内部構造論

エディントンは1916年頃から1920年代にかけて内部構造の研究を進め、放射平衡論の

確立、質量光度関係の発見と説明、星の進化論における進展などに顕著な足跡を残している。その成果は「星の内部構造論」(1926) [72] としてまとめられた。また、1927 年に出版された「星と原子」 [73] は「内部構造論」の解説を中心に巨大な星と微小な原子との深い関係を解説した優れた啓蒙書で邦訳もある。ここではエディントンの内部構造論の概略について順次紹介しよう。

(1) 内部構造論

エディントンの内部構造論の出発点となったのはカール・シュワルツシルドによって指摘されていた星の大気における放射圧の効果 [74] と、エムデンによる詳細な内部構造論 (恒星天文学の源流 [13]) であった。

シュワルツシルドは星の大気構造に対して放射圧の効果を考察したが、エディントンはそれを星の内部構造にまで拡張した。また、エムデンは星をポリトロップ球として表し、対流平衡によってその形状が保たれると考えたが、エディントンは放射圧の効果とともに放射平衡にあるポリトロップ球を解析している。星内部の放射輸送についても輸送方程式を水平大気から球状大気へと拡張した。

星の内部が完全気体と見なせるかどうかについては当時まだ問題があったが、エディントンは半径が大きくガス密度の希薄な巨星ならば完全気体と見なせるとして状態方程式

$$p = \frac{R\rho T}{\mu} \quad (1)$$

を採用した。ここで R は気体定数、 μ は平均分子量である。こうして修正されたエムデン方程式を用いて内部構造を考察しているが、内部の温度と密度分布はエムデンによって導かれたポリトロップ球の指数 $n=3$ のタイプになっている。

エディントンは最初、星の内部ガスの平均分子量 μ として 54 を仮定したがこれは星

の内部が鉄蒸気のような原子組成を示すと考えていたからである [75]。しかし、星の内部ガスは著しく電離されているとジーンズ (Jeans) らによって指摘されたので、その後は $\mu=2\sim 2.5$ を採用している [76]。

リターやエムデンの構造論との大きな相違点はガス圧に対する放射圧の効果の導入である。放射圧効果は基本的には星の質量に依存し、質量とともに増大する。エディントンはそれを表にまとめているが [72]、ここでは見やすくするように図で表わしてみよう (図 27)。図では個々の星の内部ではガス圧と放射圧の比は一定とし、平均分子量は 2.5 としている。星の質量(単位はグラム)は 10 のべき指数 n で表してある。太陽では $n=33.30$ であるから、放射圧とガス圧が拮抗するのは太陽質量の前後の 1 桁くらいである。質量の大きい星では圧倒的に放射圧が卓越し、小質量星はガス圧によって支えられる。放射圧の効果と放射平衡とはエディントンの内部構造論の基本になっている。

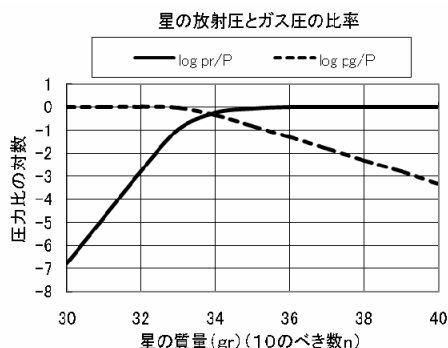


図 27 星の質量とガス圧(p_g)、放射圧(p_r)の全圧力(P)に対する割合 [72, p.16]
星の質量は 10^n グラム(gr)の n 数で示す。太陽質量は $n=33.30$

(2) 質量光度関係

内部構造論にとって質量は星の最も基本的な物理量である。エディントンは 1910 年代

後半から連星系の観測データに基づいて質量と有効温度、光度などとの関係を理論的に考察していた。そのなかで彼が見出したのは質量と光度の関係である。その関係は次の理論式で表わされる [77]。

$$L = \text{const.} \times M^{\frac{7}{6}} (1 - \beta)^{\frac{3}{2}} \mu^{\frac{4}{6}} T_e^{\frac{4}{6}} \quad (2)$$

$$1 - \beta = 0.00309 M^2 \mu^4 \beta^4 \quad (3)$$

ここで M は星の質量、 μ は平均分子量、 T_e は有効温度、 $(1 - \beta)$ は放射圧と(ガス圧+放射圧)との比を表し、 M 、 μ のみに依存する。この式から分かるように光度 L は質量と有効温度の関数として表される。彼は連星系のカペラ A を基準にとって(2)式の const. を決定し、有効温度としてカペラ A の 5200 K を採用した。こうして得られた理論曲線を 図 28 に示そう。この図には観測点として通常の連星(観測精度によって第 1 クラスと第 2 クラスに分ける)、ケフェウス変光星、食連星がプロットされている。観測星のなかには有効温度の異なる星も存在するので、それらについては理論式を用いて、5200K になるように補正してある。

この図を作成してエディントンの感銘を受けたのは、太陽質量の数分の 1 から 30 倍の星まで、見事に理論曲線に沿って分布している点であった。当時は完全気体として近似できるのは巨星に限られ、矮星は密度が高いため完全気体とは、ずれているであろうという推論が一般的であった。この図を見て彼は太陽を含む矮星も完全気体として近似できることを確信した。彼はさらに完全気体から外れるのは分子が有限のサイズを持つためであるとして、その考察を行い、矮星が完全気体から外れるのは太陽よりはるかに圧縮された白色矮星のような星であることを示した。従っ

て白色矮星は質量光度関係の考察から省かれる。

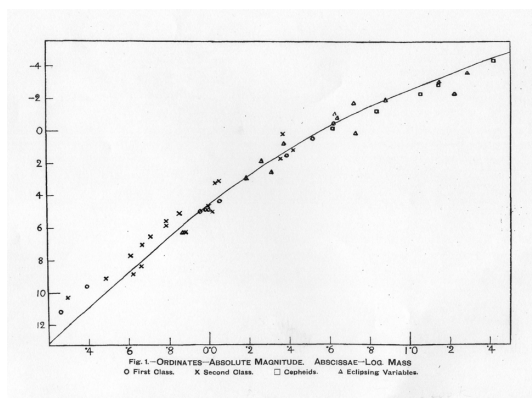


図 28 質量光度関係 [77]

横軸は太陽単位の質量の対数、縦軸は絶対放射等級

(3) 星の進化

1910 年代前半にはヘルツシュプルング、ラッセルによって HR 図が作成されていたが、この図上での星の進化は依然として収縮論に基づくものであった(恒星天文学の源流 [14], 図 23)。この説によると、星は赤色巨星域で誕生し、高温度星を経て主系列を赤色矮星へと進化していく。エディントンはこの”古典的収縮論“に対する批判を 2 つの機会に述べている。

第 1 は 1920 年に西海岸のカーディフで開かれた英国天文協会における「星の内部構造」と題する講演である [78]。この中で彼はまず内部構造における放射圧の効果を述べ、放射平衡に基づく構造論を述べた。その上で星の進化について要旨次のように述べている。

従来の収縮論によると太陽の年齢は 2000 万年程度であるが、誕生直後の赤色巨星ではそれよりはるかに短く、10 万年程度と見積もられる。このような短時間であれば進化による星の変動が観測可能になるはずである。例えば、われわれから 2 万、5 万、20 万光年の距離にある球状星団中の赤色巨星を較べると、

それは年齢の差を示すはずである。しかし、観測された星団の巨星はどれも良く似ており、変化の様子を示さない。これは赤色巨星の進化時間がはるかに長いことを物語っている。また、ケフェウス型変光星の脈動周期の変化率も巨星の年齢が古いことの証拠の1つとなる。巨星の年齢が数10万年程度であれば平均密度の増加率も大きく、変動周期の変化率も大きくなる。例えば δ Cep 星では年間40秒の減少になるはずであるが、観測では年間20分の1秒程度である。

こうして、彼は主として赤色巨星の年齢から古典的収縮説を批判しているが、この時期の彼は進化経路としては収縮論による、誕生—赤色巨星—高温度星—赤色矮星のプロセスを暗黙に認めていた。

第2は1924年の質量光度関係に基づくものである[77]。進化の途上で星の質量が大きく変化することはないとすると、M型の巨星と進化の後期に当たる赤色矮星とはほぼ同じ質量を持つはずである。しかし、質量光度関係によれば同じ分光型で巨星と矮星との光度の大きな相違の原因はその質量にある。従って両者には質量に大きな差があり、同一進化経路の星とは考えられない。さらにまた、矮星も完全気体であると認めるなら、太陽程度の星は仮に収縮のみによって輝くとしても、進化の方向はほぼ等光度で高温度側に進むはずである。これも収縮説では説明できない。

このようにしてエディントンは従来の収縮説の破綻を明確に示した。しかし、次に述べるように熱源の問題に入ると彼の思考は混乱し、再び後戻りする。

(4) エネルギー源

星の収縮による熱源説が破綻したあと、1920年代には新しい熱源としてサブアトムックなプロセスが期待されていた。しかし、

サブアトムックとは何であろうか。一般的に言えばアインシュタインの質量エネルギー関係によって原子内部で質量消失によるエネルギー発生を意味するものであるが、当時、サブアトムックとして3つの過程が考えられていた。第1は元素変換である。例えば4個の水素原子が融合してヘリウム原子を合成する変換によってエネルギーが生み出される。第2は質量消滅である。これは元素変換と異なり、プロトンと電子など陰陽粒子の衝突によって重い粒子も直接エネルギーに変換する。第3は星の温度や密度に関係しない放射性元素の放射能である。

エディントンは1920年のカーディフで行った講演の中でサブアトムックな反応として4個の水素原子が融合してヘリウム原子を合成する変換を述べている[78]。この変換によってヘリウム原子は120分の1の質量減少を生じ、それが熱エネルギーを発生する。もし、誕生した星の5%が水素で構成され、次第に融合反応によってエネルギーを供給するとすれば、熱源としては十分である、というものである。このときエディントンはこの熱源によって赤色巨星—高温度星—赤色矮星という収縮論と同じ進化過程が説明できないかと予想した。しかし、この予想は1924年に自ら発見した質量光度関係によって破綻する。主系列にそって質量が減少することが説明できないからである。しかし、その後、考えを改め、巨星から高温度星までは星は元素変換による熱源で輝くが、主系列に入ると、熱源が第2の質量消滅に移るのではないかと想定した。重い元素の粒子が消滅するので星の質量も次第に減少するわけである。しかし、これは膨大な熱を発生することになり、星が赤くなり光度が下がることを説明するのが不可能である。結局エディントンは星の進化については

「われわれの理論を十分に発展させることはできない。それはサブアトミックなエネルギー生成が温度と密度にどのように依存するかが知られていないからである。」

とのべて問題が未解決であることを告白している [77]。

エネルギー源が第3の放射性元素であると主張したのはエディントンと同時代のジーンズ (J. H. Jeans) であった [79]。彼は同じケンブリッジ大学の数学教授でエディントンの5年先輩である。彼は数学、量子論などの広い分野で研究を進めているが、1902年に星間媒質において重力収縮を引き起こす限界サイズを導いている。それは「ジーンズ波長」として良く知られている。ジーンズも1924年頃から星の熱源問題に取り組み、エディントンと大きな論争を繰り広げた。彼が星の熱源としたのは超放射性元素による強力な放射である。この熱源は星内部の温度や密度には関係しないが、星の進化過程と関係する。ウラニウムを超えた重い原子では原子核を取り巻く電子の基底状態は原子核に接近しており、電子が基底状態1から状態0への転移、つまり、電子が核内に飛び込んで陽子と質量消滅を生じる確率が高い。星が赤色巨星として誕生したときには多量のこうした超放射性物質が含まれており、星の高い光度を保つが、半減期は短く、次第に消耗しながら光度を下げ、それが枯渇した時点でHR図上の主系列と交差する。その後は不活性物質からなる密度の高い星となり、内部が液体となった液体星として主系列を赤色矮星へと向かう。この段階でどのようにして質量を減少させるのかについては明確ではないが、ジーンズの熱源説はメンゼル (D. H. Menzel) によっても支持されている [80]。

エディントンとジーンズでは見解が大きく異なっているので、エディントンも強く反論

しているが [81]、両者の議論は平行したままであった。しかし、どちらにせよ、主系列上の進化を赤色矮星へと向かうと考える限り、収縮論を認めても認めなくても、主系列星の質量が系列に沿って減少するという観測事実を説明するのは困難だったのである。

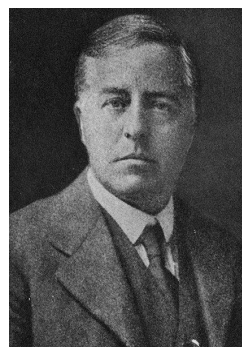


図 29 ジーンズの肖像 (出典:Wikipedia[ジーンズ])

(5) エディントン限界またはエディントン光度

エディントン自身の仕事ではないが、彼はじめて放射圧の重要性を指摘したことから、その名をとってエディントン限界、またはエディントン光度と呼ばれる限界について少し触れておこう。これはある質量の星で放射圧が優勢になり、重力に打ち勝って星を不安定にさせる限界現象を指している。それは次のように導かれる。

いま、星は静水圧平衡にあるとすると圧力勾配は

$$\frac{dP}{dr} = -\rho g = -G \frac{Mp}{r^2} \quad (4)$$

である。ここで M は星の質量、 G は重力定数である。一方、放射圧による圧力勾配は

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{\kappa \rho}{c} F_{rad} = -\frac{\sigma_T \rho}{m_p c} \frac{L}{4\pi r^2} \quad (5)$$

である。ここで κ は吸収係数でエディントン

は自由電子による散乱（トムソン散乱）を考えたので κ は σ_T としてある。重力が放射圧と釣り合うという条件から上の 2 式を等しいとおくと L が導かれる。このときの光度をエディントン光度と呼び L_{Edd} で表わすと次のようになる。

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GM_p c}{\sigma_T} \\ \approx 1.2 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{erg/s} = 3.3 \times 10^4 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) L_\odot \quad (6)$$

これが古典的なエディントン光度である。太陽の場合は現在の光度 $L_\odot$ の 33,000 倍がエディントン光度である。放射圧に対し、エディントンは電子散乱による連続光を仮定したが、現在、この光度は元素組成や吸収係数などで種々改良され、新星、超新星、ガンマ線バーストなどの理論に応用されている。例えば、連星系で伴星に主星からのガス流入が開始し、伴星の質量が急激に増加してエディントン限界に達すると、伴星から多量のガスが放出されて新星、超新星などの突発的現象を生じる。

10.3 エディントンと神秘主義

エディントンはクエーカー教徒であり、クエーカー教徒としての信念は生涯変わることはなかった。それは神秘主義として霊的な存在にかかわるものである。科学と神秘主義の調和を心の中でどのようにして図ったのであろうか。彼が 1929 年に『科学と目に見えない世界』と題して行った講演の中には宗教と神秘主義について次のような表現がある[82]。

「(科学的なものの考え方と、宗教的な考え方の間に)、何らかの形で充分な共感をもたらすための大きな障害となっているのは、宗教の信条であります。・・・私たちが活気付けている探求の精神は、い

かなる信条であれ、それを目的とすることを拒否します。・・・」

「信条を放棄するということは、生きた信念を抱くことと矛盾するものではありません。科学には信条は存在しませんが、私たちは信念を抱くことにためらいはしません。・・・この世には一人合点の自信とは全く異なる別の種類の確信が存在するのです。」

ここでは科学と宗教をはっきり区別しているが、一方で彼は神秘主義（ミスティシズム）に傾倒した心情を持っていた。

「クエーカー教徒として神秘主義の深い側面はひとごとではありません。・・・神秘主義には物理的世界を超えた経験に関するものがありますが、世界は（物理的世界に）閉じたものでなく、それを超えて開かれたものです。物理的世界はそれを説明しようと試みるべきではありません。・・・」、そして、また、科学の中で神秘主義的経験に当たるものとしては、例として「直観」(intuition) の不思議さを挙げている。

「科学研究の中で・・・われわれは時折、直観的に正しい解を確信する場合があります。それは霊的なものであつて説明することは出来ません・・・」

こうしてみると、エディントンの心の中には科学的思考と神秘主義的心情が複雑に入り混じっているが、霊的経験については踏み込むべきでないと割りきっていたようにも思われる。

11. サブラマニアン・チャンドラセカール (Subrahmanyan Chandrasekhar, 1910 - 1995)

11.1 生涯と人柄

チャンドラセカールの伝記を表したワリ (K.C. Wali [83]) は彼を「梯子（はしご）を登る人」に喩えている。それは実際、彼の年

代ごとに著した書名をたどるだけでもはつきりする。主なものをあげてみると

1939 年 「星の構造論序論」 (An Introduction to the Study of Stellar Structure)

1942 年 「恒星系力学原論」 (Principles of Stellar Dynamics)

1950 年 「輻射輸達論」 (Radiative Transfer)

1960 年 「プラズマ物理学」 (Plasma Physics)

1961 年 「流体および磁気流体安定性」 (Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability)

1983 年 「ブラックホールの数学理論」 (Mathematical Theory of Black Holes)

などである。これを見ると確かに彼が広い天体物理学の分野を一つ一つ梯子を上っている様子が眼に見えてくる。この源流シリーズでは星の内部構造と進化が主題なので、この観点から彼の人と天文学を辿ってみよう。

彼はまたインドから流出した偉大な頭脳の一人に数えられている[84]。インド政府はいくたびか、彼にインドへの帰国を誘い、ガンジー首相まで一役買ったが、彼はアメリカから離れることはなかった。当時のインドには彼が十分に活躍できる場がなかったのであろう。

彼は 1910 年 9 月、父の赴任先のパンジャブ州ラホール (Lahore) (現パキスタン領) で生まれたが、やがて一家とともにマドラス (現チェンナイ) に戻って、そこで成長する。父のイーヤル (C. Subrahmanyam Ayyar) は鉄道会社の役員、母のシタラクシミ (Sitalakshmi Balakrishnan) は文学者でイブセンの「人形の家」のヒンズー語訳者でもある。両親はともに敬虔なヒンズー教徒であった。チャンドラセカールは長男で 2 人の姉、3 人の弟、4 人の妹をもつ大家族の一員であった。当時、インドでは長男は祖父の名前を

名乗る習慣があったのでその名を父と組み合わせてサブ라마ニアン・チャンドラセカールとなる。チャンドラセカールとはヒンズー語で「月の保持者」を表わすという。

チャンドラセカールは高校卒業後マドラス大学プレシデンシャル・カレッジに入学、物理学を専攻する。彼は学部在学中に一つの論文を書き、それをケンブリッジ大学のファウラー教授 (R. H. Fowler) に送った。ファウラーはそれを高く評価し、それが機縁となってチャンドラセカールはケンブリッジ留学の奨学金を得た。その論文とは恐らく、量子統計学に関したものであったろう。それは、英国への航海の途中で白色矮星の質量に上限のあることを着想したということからも知られる。ところで、マドラス大学に在学中、同じ物理学科で 1 年下のクラスに優れた女子学生がいた。どちらが先に見初めたかは不明であるが 2 人は恋仲になり、チャンドラセカールがケンブリッジに向けてマドラスを離れるときに 2 人は婚約する。それが未来の妻ラリサであった。



図 30 新婚直後のチャンドラセカールとラリサ、1936 年撮影 [83, Fig.16]

ここでラリサ (Lalitha, Doraiswamy, 1911-1985?) について一言触れておこう [83]。ラリサは教養ある家庭の 4 人姉妹の 3 女として生まれ、幼少から優れた資質を示していた。マドラス大学のプレシデンシャル・カレッジではチャンドラと同じ講義を受ける機会も多かったが、彼女はいつも最前列、チャンドラは 2 列目であったという。チャンドラがケンブリッジに留学した後、彼に続いてケンブリッジに留学したいと願ったが、母は未婚女性をひとりで送り出すことに反対し、ラリサは仕方なくマドラスに残った。

マドラスでは物理学を教えていたが、その後バンガロールに移り、結婚前には女性校長にまで昇任していた。結婚後も研究を続けたいと思っていたが、夫の研究が第 1 と考え、サポートに専念することを決意した。チャンドラセカールは不満もあったが二人で協力して彼の研究生生活を推進することで互いに納得した。自伝の中で彼はラリサについて次のように語っている。

「彼女は私にとって動機の源泉であり、生命の力であった。彼女のサポートは定常的で揺れることなく、殊に、ストレスの大きいときや意気消沈したときに大きな力になってくれた。彼女は私の生涯の一部になっている。」 [83]

ケンブリッジではチャンドラセカールはファウラーの指導の下に、量子論と相対論の研究に打ち込む。ディラック (P. A. M. Dirac) の紹介で一年間をコペンハーゲンの理論物理学研究所に滞在し、ニールス・ボーア (Niels Bohr) の指導を受けたこともある。ケンブリッジではエディントンやミルン (E. A. Milne) とも知己になり、1933 年に学位を得る。優れた研究によってトリニティ・カレッジの特別研究員 (1933-1937) に選ばれ、生活は安定する。

1936 年に一時帰国してラリサと結婚し、ケ

ンブリッジに戻るが、翌年 1 月に、招聘されてシカゴ大学に移りオットー・シュトルーヴェ (Otto Struve) の下で助教授として理論的研究を始める。1952 年には理論物理学の教授となり、生涯をシカゴで過ごすことになる。

1983 年にノーベル賞を受賞しているが、受賞理由は多面的な彼の仕事の中で特に星の内部構造と進化論に対する業績であった。チャンドラセカール限界は、中性子質量限界からブラックホール研究への端緒を開いた画期的な研究成果だったのである。

1980 年の定年退職後もシカゴにとどまっていたが、1995 年に心臓発作のために死去した。ラリサとの間に子供は授からなかった。

11.2 内部構造論

(1) チャンドラセカール限界

星の研究でチャンドラセカールの名が最も良く知られているのが「チャンドラセカール限界」とよばれる白色矮星の上限の質量を表す限界値であろう。熱源を失った星はどこまでも収縮していくであろうか、その問いに答えたのが電子ガスの縮退圧の存在であった。パウリの排他原理という量子力学的効果によって電子は同じ量子状態に 1 個以上は入りえないため、電子を圧縮するとエネルギー状態の低いところから順次占領され、互いの圧力によって電子ガスは収縮できなくなる。この排他原理が重要な役割を果たしているような気体は「縮退した気体」と呼ばれている。このようなガス内では電子は光速に近い大きな速度で飛び回っており、それが大きなガス圧となって星を支えている。陽子など重い粒子は運動量が大きく、電子のように高速度になりにくいいため、縮退は軽い電子から始まる。電子の縮退圧が生じると潰れた星は質量に応じてある半径のところで平衡を保つ。これが白色矮星である [85], [86]。

電子が縮退状態にあるときのガスの状態方

程式は温度によらず、密度だけの関数になるが、状態は電子の運動速度によって非相対論的と相対論的の2通りの場合がある。ガス圧はそれぞれ次のようにあらわされる。

$$\text{非相対論的} \quad P = K_1 \rho^{\frac{5}{3}} \quad (7)$$

$$\text{相対論的} \quad P = K_2 \rho^{\frac{4}{3}} \quad (8)$$

ここで、 K_1, K_2 は平均分子量と物質組成によって決まる定数である。 ρ が比較的小さいときは非相対論的、大きいときは相対論的になり、白色矮星は後者に当たる。この場合にチャンドラセカールが導いた星の質量と温度との関係を図 31 に示そう [85], [87]。

この図は x, y 軸ともに無次元化してあるが横軸が質量、縦軸が半径である。図の実線が相対論的状态方程式に基づいた関係で線上の円は質量の大きい星ほど小さな半径を持つことを表わしている。この図で星の半径は $M/M_3 = 1$ において無限小になる。これが白色矮星の質量限界で、太陽質量に換算すると 1.44 倍となる。それ以上の質量では平衡解は存在しない。従ってそれより重い星は潰れても白色矮星として留まることができず、さらに崩壊を続ける。一方、図の破線は非相対論的状态方程式による関係で、ここでは限界質量は現れず限りなく収縮が続く。質量の小さい領域では相対論の効果がいいため 2 つの曲線は合一する。(なお、限界質量をチャンドラセカールははじめ太陽の 0.91 倍と見積もったが [86]、その後、1.44 倍に改められた。1.44 倍を超えて潰れた星は中性子星となるが、これにも限界質量があり、その限界は 1.5 倍から 3 倍の太陽質量程度と見積もられている。それを超えるとさらに圧縮が進み、最終的にはブラックホールになることが知られている)。

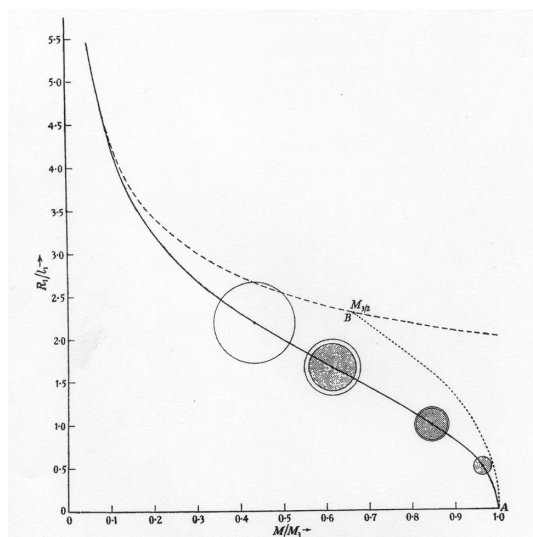


図 31 チャンドラセカールによる質量半径図 [85]

チャンドラセカールにとって不幸だったのは、ケンブリッジ大学で師ファウラーと同じ教授職にあったエディントンによって彼の理論が認められなかったところにあった。エディントンは相対論的な状態方程式(8)式を認めることが出来ず、したがって図 31 に示されるように白色矮星には質量の上限は存在しなかったのである。師のファウラーやディラックらはチャンドラセカールの状態方程式を認め彼を支持してくれたが、チャンドラセカールの心に受けた傷は大きく、それがケンブリッジを離れてアメリカに移住することの一つの契機にもなったという。しかし、彼はエディントンに個人的な反感を持っていたわけではない。それどころか、彼は著書の「真理と美」[88] のなかでエディントンを「同時代のもっとも偉大な天体物理学者」として、彼のために 2 つの章を設け、エディントンの業績を称えている。しかし、彼との見解の相違に関したところでは、両者の間で激しい論争があった。「真理と美」には次のように述べた箇所がある。

「エディントン教授にはつきり申し上げておきたいことがあります。もし彼が、今後自分で確かめられないからといって私の仕事に猛烈な攻撃を加えることを慎み、私の以前の仕事が役に立った場合には通常通り謝意を表することによって、私たちの宿年の不和の原因を取り除いてくださるならば、私の喜びはこれに過ぎるものはないだろうということです。」

ここには当時のチャンドラセカールの屈曲した感情が感じられる。論争は長く続いたが最後にはエディントンも自分の誤りに気づいて、チャンドラセカールの功績を称えている。しかし、それには 10 年という長い年月が必要であった。

(2) 内部構造論と HR 図

「星の内部構造論序説」[85] はチャンドラセカールの研究成果を系統だててまとめた著作で、12 章から構成されるが、内容は大きく前半 (1-4 章) と後半 (5-12 章) に分かれる。前半は本源流シリーズでも紹介したレーン、リター、エムデンらの古典的内部構造論の概要をまとめた箇所、ポリトロップ球の理論に新しい物理的意味づけを与えている。また、各章末の文献ノート欄ではこれら先人の業績の概要も紹介している。後半ではエディントンの内部構造論から始まって、放射平衡論、相対論に基づく現代的な内部構造論が展開する。その内、ここでは HR 図の解釈と関係の深い「星の外層部構造論」について一言触れておこう ([85], とくに[89])。

星の外層部 (stellar envelope) とは、星の内部を便宜上、深内部とそれを取り巻く外層部に分けた場合の後者である。両部分の境界を深内部の質量が全質量の 90% を占める面と定義し、その半径を ξ^* とする。 ξ^* が星の半径の 0.1 となる星は“高度に中心集中を

持つ星”となり、 ξ^* が 0.5 程度の星は $n=3$ に近いポリトロップ球で与えられる密度分布を持つ。

外層部に対してチャンドラセカールは次の仮定を置いた。

- (1) 外層部にエネルギー源はない
- (2) 外層部の質量は星全体の質量に対して無視できる。

この条件の下で、外層部における平衡式および放射圧勾配は次のようになる。

$$\frac{d(p+p_r)}{dr} = -\frac{GM}{r^2} \rho \quad (9)$$

$$\frac{dp_r}{dr} = -\frac{\kappa L}{4\pi cr^2} \rho \quad (10)$$

ここで p, p_r はガス圧、放射圧を表わし、全光度 L 、質量 M は仮定によって一定である。また、吸収係数 κ はストレムグレーン ([90], [91]) による次の公式が採用されている。

$$\kappa = 3.89 \times 10^{25} (1-X^2) \frac{\rho}{T^{3.5}} \quad (11)$$

ここで X は水素の質量存在比である。これらの 3 式を数値的に解くと ξ^* は星の基本量 (質量 M , 半径 R , 光度 L) をパラメータとして計算される。

ストレムグレーン [90] は (11) 式に基づいて、星の構造を解析し、連星系について (M, R, L) および星内部の平均分子量 μ を導いている。チャンドラセカールも彼の導いた基本量を採用し、主な星について ξ^* を表 1 のように推定した。

表 1 に示したのはサンプルであるが、こうした事例からチャンドラセカールは HR 図上の星についていくつかの結論を導いている：

(a) 主系列星では B8 付近から晩期で ξ^* はほぼ一定値 0.43 をとる。これはポリトロップの $n=3$ よりやや中心集中度が高い星に対応する。

(b) 主系列で B 型より早期では高温星ほど大きな ξ^* を示し、星は早期型ほど集中度

表1 主な星の質量と、質量の90%を占める半径比 ξ^* [89]

星	スペクトル型	質量/太陽 M/ M _☉	平均分子量 μ	水素存在比 X	半径比 ξ^*
Capella A	G0	4.18	1.01	0.3	0.48
同 B	F5	3.32	1	0.31	0.48
Sirius	A0	2.45	0.9	0.4	0.415
α Cen A	G5	1.1	0.96	0.37	0.411
同 B	K5	0.94	1.1	0.37	0.417
Sun	G0	1	0.98	0.37	0.405
V Pup 主+伴星	B1+(B8)	18.5	0.6	0.8	0.55
Y Cyg 主+伴星	O9.5+(O9.5)	17.2	0.6	0.8	0.51
u Her 主星	B3	10	0.6	0.7	0.44
同 伴星	B8.5	3.4	1.23	0.19	0.45
α Aql 主星	B3	6.2	0.86	0.42	0.44
同 伴星	B5	5.1	0.89	0.4	0.44
δ Per 主星	B8	4.7	0.75	0.53	0.43
δ Aur 主+伴星	A0+(A0)	2.38	1.18	0.205	0.43
TX Her 主星	A2	2.06	0.96	0.35	0.415
同 伴星	(F0)	1.77	0.97	0.35	0.415

注。スペクトル型、質量、平均分子量、水素存在比（質量比）はストレングレン [90]による。スペクトルはまだ MK 分類の始まる前の型である。

の低い均質的な星に近づく。

(c) 巨星は同じ光度の主系列に比較して大きな ξ^* を示す傾向がある。

(d) この表には示されていないが、当時、トランプラーの星と呼ばれた超巨星は ξ^* が 0.7 ~ 0.8 という大きな値を示し、星の中ではもっとも緩やかな密度勾配を示す星である。

HR 図上の星の分布についてストレングレン [90] はすでにそれが星の質量と水素存在量で決定することを示していたが、チャンドラセカールはそれを発展させ、HR 図上における星の分布を内部構造（密度分布）の面から理論的に解明したのである。

(3) 星のエネルギー源

チャンドラセカールは「星の内部構造論序

説」[85] の中で「星のエネルギー」について一章を設けている。序文を見るとこの章は 1937 年の秋に書かれ、ベーテやワイツゼッカーの理論には触れていないと断っているが、この段階で彼は星の熱源は核融合であることをはっきりと示している。彼の基礎となったのは彼が「ワイツゼッカーの仮説」と呼んだ次の過程である。

「星を構成するすべての元素の存在は元素変換にそのすべてを由来している。すべての元素は星内部での連続的な元素合成によって生成されるが、最初は水素のみの星から始まり、次第に重い元素を合成していくと仮定することが出来る。これが星の熱源である。」

この原理により軽い元素は陽子捕獲によ

ってより重い原子を合成していく。合成することによって合成前に比較して質量の一部が失われ、それがガンマ線放射となって熱源となる。その例として、チャンドラセカールはヘリウムからベリリウムに至る合成の連鎖を描き出している。一方、重い星では原子核の強い陽電気のため陽子の捕獲は困難になり、かわって電氣的に中性な中性子捕獲が元素合成の主役となる。彼は鉛（原子番号 82）より重い元素について合成過程を考察している。部分的には自動的触媒連鎖作用によってエネルギー生成のサイクル反応も考察しているが、1937 年の段階ではまだ熱源機構の説明には成功していない。まとめにおいて彼は「核反応については非常に多くの仕事が残されている」と述べるに留まっている。

11.3 科学者と美意識

チャンドラセカールは科学研究の中で科学者とは何か、また、科学者にとって美意識の重要性は何かなどにも深い思いを寄せていた。それは彼の講演集「真理と美」[88] の中でも示されている。講演の中からいくつか彼の言葉を挙げてみよう。

(1)「科学者」について

研究の動機は何かという設問に対し、自らの見解を次のように述べている。

「それは単なる実利的なものでもなく、自然の神秘を解明しようという好奇心でもありません。・・・実際に科学者の努力の実質をなし、これを動かしているのは、自分の能力の及ぶ限り自分の選んだ科学の進歩に積極的に参加したいという欲望であります。だから、科学者の活動の基礎にある主要な動機を一言で述べてみると求められたとしますと、私は「体系化」であると答えたいと思います。」

「科学者がやろうとしていることは、あ

る領域、ある側面を選び出して、それが整合性を備えたある一般的な体系のなかうまく収まるかどうかを調べることであります。・・・(ここで)『うまく』とか『一般的な体系』とか、これらのことばが芸術における美と同じように定義できないことばであることを認めるのにやぶさかではありません。」

また、科学者としての人生の意義はどこにあるのかという問いに対して彼は述べる。

「(科学者が意義を感じるのは) 知識に何事かを付け加え、もっと他人が付け加えるのを助けたいということです。そしてここにいう何事かの価値は、・・・偉大な科学者たちの、あるいは芸術家たちの、創造物の価値と程度の違いこそあれ、種類において違いはないのであります。」

こうした言葉から、チャンドラセカールは真理の探究と美の探究とが一体であるという心情に導かれており、その研究態度が極めて謙虚なものであったということが読み取れる。(2)「美、ならびに科学における美の探求」について

最初に彼が投げかけた設問は「美の探究がどの程度まで科学研究の目的になっているか」というものであった。それに対してはポアンカレの次の言葉に賛同している。

「科学者が自然を探究するのは、それが有用であるからではない。・・・自然の中に喜びを見出すからである。・・・単純さと壮大さとはどちらも楽しいからこそ、われわれは好んで単純な事実や壮大な事実を探索するのである。・・・」

続いて「真理は美しいか」とう設問に対しては次のように述べる。

「人間の精神がそのもっとも深く、もっとも奥まったところで美しいと感じることが、外部の自然界で現実化している、

ということは全く持って信じがたい事実であります。知性によって理解可能なものは、また美しくもあるのです。」

それでは「美しいものは真理であるか」という設問に対し Chandrasekhar は数学者 ヘルマン・ワイル (Hermann K. H. Weyl) の体験を引用している。ワイルが美のために真を犠牲にしたという話である。ワイルは彼の導いた重力のゲージ理論が重力理論としては正しくないと確信するようになったが、理論が非常に美しいものであったところから捨ててしまうのは惜しくなり、美しさを理由にしてこの理論を残しておいたのであった。後になってゲージ不変性の原理が量子電気力学に取り入れられたとき、ワイルの直観が正しかったことが明らかになった。科学者が美と感じるものはやはり真であるという良い例であった。美の根底に真理が存在するというのは Chandrasekhar の深く共感していたところであった。

そのほか、講演の中で Chandrasekhar は相対性理論や量子力学の歴史に現れた数多くの美と真理との体験や心情の例を挙げているが、それらのまとめとしてジョン・キーツの次の詩句を挙げている。

美は真理だ

美という真理こそ

きみがこの世で知るすべて

そして知る必要のあるのはこれのみ

ここでは講演集からいくつかの言葉を挙げて見たが、真理の探究と美の探究とが一体であるという心情は Chandrasekhar の生涯を通して変わらないものであった。また、講演からうかがえるのは彼の人物が極めて謙虚なものであったということである。

最後に 1920・30 年代に星の構造と進化を観測と理論から推進した人々の集合写真を掲

げたい。これは 1939 年 8 月にパリで開かれた「白色矮星と超新星」会議に参加した全メンバーの写真である [83]。この中にはこの「源流シリーズ」に関係の深い人が多く、読者になじみの顔ぶれもあると思うので名前の同定を行っておこう。



図 32 「白色矮星と超新星会議」(1939 年 8 月、パリ) の参加者 [83, Fig. 15]

前列左から: ストラットン (F. J. H. Stratton)、ペイン・ガポシュキン (Cecilia Payne-Gaposhkin)、ラッセル (H. N. Russell)、シャラー (A. J. Shaler)、エディントン、ガポシュキン (S. Gaposhkin)

後列左から: ビールス (C. S. Beals)、エドレン (B. Edlén)、スウィングス (P. F. Swings)、カイパー (G. P. Kuiper)、ストロムグレン (B. Strömgren)、チャンドラセカール、バーデ (W. Baade)、チャンドラセカールの手前が Lundmark (K. Lundmark)

文 献

- [70] Vibert, D. A. 1956, The Life of Arthur Stanley Eddington, Thomas Nelson and Sons Ltd. (エディントンの詳しい伝記)
- [71] Eddington, A. S. 1914, Stellar Movements and the Structure of the Universe. 「恒星の運動と宇宙の構造」

- (エディントン最初の著作)
- [72] Eddington, A. S., 1926, Internal Constitution of the Stars, (Dover Pub. Inc. 1959) (星の内部構造論)
- [73] Eddington, A. S., 1927, Stars and Atoms (和訳: エディントン著、谷本誠訳、「星と原子」、岩波書店) (内部構造論 [72]の一般向き解説書)
- [74] Schwartzschild, K. 1905, Göttingen Nachrichten, p.41 (恒星大気の放射平衡)
- [75] Eddington, A. S., 1916a, MNRAS, 77, 16 – 35, On the radiation equilibrium of the stars (星の放射平衡について) .
- [76] Eddington, A. S., 1916b, MNRAS, 77, 596 – 613, Further notes on the radiative equilibrium of the stars. (星の放射平衡、追記)
- [77] Eddington, A. S. 1924, MNRAS, 84, 308 – 332, On the relation between the masses and luminosities of the stars. (星の質量光度関係)
- [78] Eddington, A. S., 1920, The Obs., 43, 341 – 358, Internal Constitution of the Stars, (カーディフ市で行われた英国天文学会における総合報告)
- [79] Jeans, J. H. 1925, Nature, 115, 297 – 298, The ages and masses of the stars; Nature, 115, 494, The source of stellar energy. (星の質量、熱源、寿命)
- [80] Menzel, D. H. 1927, Science, 65, 431 – 438, The source of solar energy.
- [81] Eddington, A. S. 1925 Nature, 115, 419 -420; 117, 25 – 32, The source of stellar energy
- [82] Eddington, A. S., 1929, Science and the Unseen World (Swarthmore Lecture), MacMillan.N. Y. (「科学と目に見えない世界」、クエーカー教徒での集会の講演)
- [83] Wali, K. C. 1991, A Biography of S. Chandrasekhar, Univ. Chicago Press. (1989 年までの伝記、Wali によるチャンドラセカールへのインタビューも含まれている)
- [84] 三上喜貴 2009、「インドの科学者」(岩波科学ライブラリー)
- [85] Chandrasekhar, S. 1939, An introduction to the study of stellar structure, Dover Pub. Com. (星の内部構造論序説)
- [86] Chandrasekhar, S. 1931, ApJ, 74, 81 -82, The maximum mass of ideal white dwarfs. (理想的な白色矮星の質量上限)
- [87] Chandrasekhar, S. 1935, MNRAS, 95, 207 - 225, The highly collapsed configurations of a stellar mass. (Second paper) (高度に崩壊した星の構造)
- [88] チャンドラセカール著、豊田彰訳、2002, 真理と美：科学における美意識と動機、法政大学出版局 (原著は 1987) チャンドラセカール講演集
- [89] Chandrasekhar, S. 1935, MNRAS, 96, 647 – 660, The equilibrium of stellar envelopes and the central condensations of stars (星外層部の平衡と中心温度)
- [90] Strömgren, B. 1933, Zs. f. Ap. 7, 224 - 248, On the interpretation of the Hertzsprung-Russell diagram. (HR 図の解釈について)
- [91] Strömgren, B. 1932, Zs. f. Ap. 4, 118 - , The opacity of stellar matter and the hydrogen content of the stars. (星物質の不透明度と水素存在量)

小暮智一