

連載

星々の終末の姿【1】
白色矮星の発見

西村昌能（京都府立洛東高等学校）

1. 矮星とは

白色矮星とはなんとも奇妙な名前です。この白色矮星は White dwarf の翻訳で、dwarf とは「こびと」のことです。白い「こびと星」とは、一体何でしょうか。

恒星が giant と dwarf の 2 種類に分類されることを最初に示したのが、HR 図の H で有名なヘルツスプルング（1905 年，1907 年）でした[1]。この giant は巨星、dwarf は矮星という日本語に訳されていますが、日本語に翻訳した人は誰でしょうか。翻訳の経過は、今話題の dwarf planet の翻訳を考えるヒントにもなるかも知れません。さて、HR 図の R であるラッセルによると、この giant と dwarf の名付け親はヘルツスプルングだということです[2]。ヘルツスプルングの考えでは、矮星とは明るさが太陽の 50 分の 1、スペクトル型が K 型と M 型の赤い恒星を指し、一方、巨星とはアークツルスやアルデバラン、またシリウスのような A 型星と同じくらいの明るさをもつ恒星を指していました。つまり彼はこの 2 語で、K 型星、

M 型星には 2 種類の明るさをもつ恒星があるということを示したのです。矮星とは、現在の低温主系列星のことであったことがわかります。矮星は「暗い恒星」というほどの意味だったのです。

また、ラッセルは、B 型星、A 型星を white star としています。B 型星 A 型星を白色星と名付けていたのです。後にエディントンが White Dwarf という用語をつくります。つまり、白色矮星という天体は B 型から A 型星のように高い表面温度をもつが、明るさは K 型、M 型主系列星と同程度の暗さの天体をいうのです。

2. シリウス B の発見

2.1. シリウスの固有運動

1844 年、ベッセル（プロシア、ケーニヒスベルグ天文台）はシリウスの大きな固有運動にふらつきを発見しました[4]。普通、固有運動は直線として観測されるのですが、シリウスでは周期的な蛇行運動をしていたのです（図 2）。彼は 1755 年のシリウスの赤経（ブラッドレーの観測）を基準にし、約 90

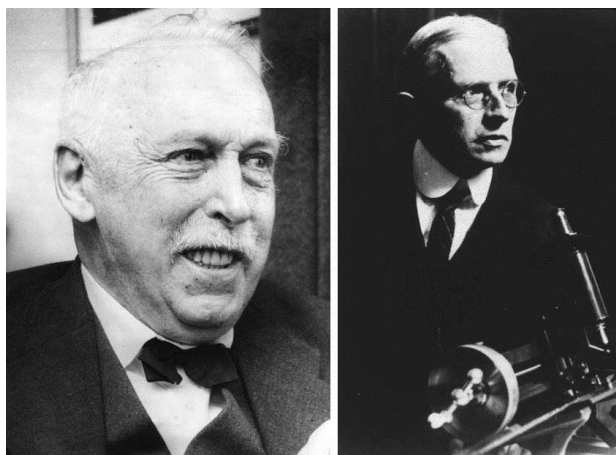


図 1 ヘルツスプルング（左）とラッセル（右）[3]

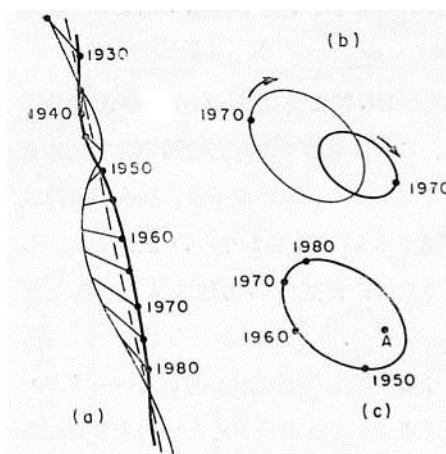


図 2 シリウスの固有運動[5]

年間の自身のものを含めた 12 の観測結果を研究に利用したのです。彼は、同時にプロキオンの赤緯の変化にも同様な現象を発見しています。

このような固有運動のふらつきは、連星であると理解しやすいです。主星は見えても伴星は見えない、つまり、彼は、両星に不可視伴星があることを示したのです。

そして 1851 年、ペテルスは、ベッセルの報告した過去の観測に幾つかのあたらしい観測を付け加え軌道計算を行い、公転周期を求めることに成功しました[6]。それは 50.093 年というものでした。続いて 1861 年に、サッフオードは、この伴星の離角の予報式を作成しました[7]。このように、徐々にシリウスの伴星が位置天文学と天体力学から追い込まれてきたのです。

2.2. シリウス伴星が見えた

さて、アメリカでは当時、元肖像画家で彫刻家でもあった A.クラーク（父）が、40 歳になったときから、望遠鏡を自作し、ヨーロッパの望遠鏡製作者や研究者と交流を始めていました。彼の望遠鏡はたいへん優秀で、2 重星をどんどん分解していったのです。これが当時イギリスで活躍していたドーズの目にとまりました。ドーズは彼を英国の著名な天文学者たちに引き合わせました。そして、ドーズはクラークの望遠鏡でたくさんの優れた観測を行いました。そのことが世界中に知れわたり、クラークはたくさんの注文を受けることになりました。

その中にミシシッピ大学のバーナードからの発注がありました。ハーバード大学のものより 3.5 インチも大きい口径 18.5 インチ (45cm) の屈折望遠鏡です。1860 年のことでした。このころ、クラークは手狭になった古い工場を売り払い、マサチューセッツに大きな工場を立ち上げようとしていたのです。この新工場は、アメリカ最初の望遠鏡会社に

なったのです。当時彼の仕事を二人の息子が助けていました。その一人が A.G.クラークです。18.5 インチの硝子材は新工場へ 1861 年に到着し研磨が開始され、1862 年 1 月 31 日、30 歳になったばかりの A.G.クラークは 18.5 インチレンズの仕上げテストでシリウスを観察しました。そうしたら、シリウスから離角 10 秒のところにも明るさ 8 等の暗い恒星を見つけたのです。最初、この暗い星像はレンズのゴーストではないかと疑い、レンズを磨き直したといいます。実はこのゴーストがシリウス伴星だったのです。彼は、この発見でフランスアカデミーからラランデ賞を授与されています。そして、このシリウス伴星の発見の知らせはハーバード大学天文台台長のボンドに送られました[8]。

ボンドは「シリウスの伴星」という題の短い報告を学会誌に投稿しました[9]。その一部を翻訳します。

「1 月 31 日の夕刻、シリウスの伴星の発見という興味深い出来事を、クラーク氏が 18.5 インチ屈折望遠鏡で行った。私は 15 インチ屈折望遠鏡でその伴星を観測することができ、次のように要素を求めた。1862 年 2 月 10 日 位置角 $85^{\circ} 15' \pm 1^{\circ} 1'$ 、離角 $10'' 37 \pm 0'' 2$ 。星像が落ち着いていたときは、伴星ははっきり見えていた。しかし、シリウスが低高度であったため、大気の擾乱を受けることがしばしばで、しっかり観測できる時間は少なかった。特に離角についての再観測は、まちがいの可能性はないのだが、実施すべきであると考えている。この発見は、新しい屈折望遠鏡の優秀さを示す証明書でもあったのだ。(後略)」

このとき、不可視伴星が人類の前に現れたのでした。

なお、1896 年にはアメリカのリック天文台のセベルレは、プロキオンにもたいへん暗い伴星があることを発見しています。

2.3. シリウス伴星の分光観測

1915年、アダムスは、クラークの発見したシリウス伴星のスペクトル撮影に成功しました[10]。ウイルソン山天文台の60インチ望遠鏡を用い、2年がかりで撮影したものです。シリウス主星からの光条を避けるのにたいへん苦労したために長い時間がかかりました。この光条は副鏡の支持金具の回折が原因でした。このようなシリウスからの散乱光と光条を避けるため、露光中は主星を黒い金属スクリーンで覆い、伴星の光をスクリーンに開けた窓から分光器に通したのです。10月18日はシーイングが良く、うまく撮影できました。彼の結果は、伴星の線スペクトルは主星と似ていてA0型だということでしたが、伴星の連続スペクトルは紫領域で明るさを落としているように見えたということです。

1920年、キャンベルは、2星のスペクトル型が等しいということは、この両星の単位表面積あたりの絶対光度が等しいことを意味する、そのことは恒星の有効温度が等しいことと同じ意味だと指摘しました[11]。さらに、彼はこのことをシリウスに当てはめて、主星は伴星の1万倍以上の明るさをもち、そして両星が同じ表面温度だとすると主星の表面積は伴星の1万倍となり、これを半径に直すと100倍、体積にすると100万倍になることや、伴星は太陽質量、主星は2太陽質量をもつことから、伴星の密度は主星の50万倍にもなることを指摘しました。そして、次のような驚きを隠しませんでした。「主星は巨星（当時の考え）、伴星は矮星だが、質量はどちらも平均的なものである、主星と伴星は同じ年齢なのか？ B型の巨星からM型の矮星に進化すると考えられているが、M型星からA型星に進化するのか？ それともM型星がB型星へ進化したあと、逆行してA型星になるのか？」

当時はまだ、恒星進化の道筋がどのような

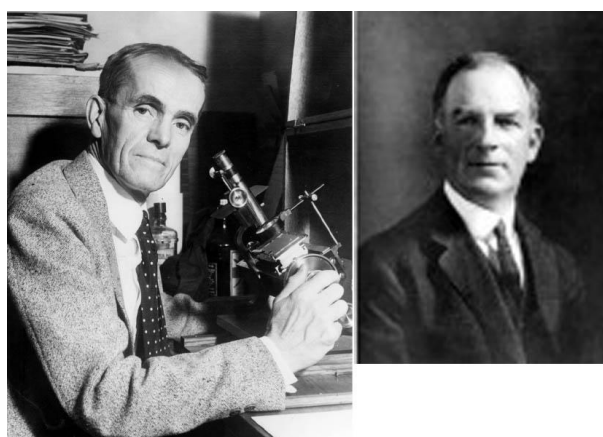


図3 アダムス（左）とキャンベル（右）[3]

ものであるか、わかっていませんでした。M型巨星から収縮して温度が上がり、早期型巨星（現在のB型A型主系列星）になる、その後冷却してM型主系列星に進化していくというのが一般に受け入れられていた考えだったのです。

2.4. 高密度星白色矮星の重力赤方変位

一方、1924年、世界的な天体物理学者であったケンブリッジ大学のエディントン卿は、連星の公転周期を利用するとそれらの質量がわかることから、恒星の質量と光度の関係（質量光度関係）を見つけました。彼はこの論文中で白色矮星（white dwarf）という言葉を用います[12]。

「シリウスとエリダヌス座O₂星（40番星）の白色矮星は質量光度関係の比較には使用しなかった。なかなか難しい問題をもっているからだ。

シリウス伴星のスペクトルはF0型で、温度に直すと8000°である。絶対等級は11.3等であるから、半径は1万9600kmとなる。天王星より小さい。質量は太陽の0.75から0.95倍の間だから、0.85太陽質量とみなした。そうすると比重は水の5万3000倍となる。ここに到達した観点からすれば、この密度は不合理なものではない。証拠が十分ならば、異議なく受け入れなくてはならな

いだろう。別の可能性のある話として、M型星くらいの低温ならば、熟練な観測者でもF型星のスペクトルの主な特徴に見間違えるかも知れない。この二者択一の議論は、十分検討されなければならないだろう。

というのは、他の著者が指摘するようにこの高密度が正しければ、20km/s ものスペクトルのアインシュタインシフトが観測される、これが問題の解決になるだろう。」

事実、1925年にアダムスは、100インチ望遠鏡に単一プリズム分光器をカセグレン焦点に取り付け、40分乾板に露光するという分光観測を行いました。スペクトルには、MgII 4481Å線のような主星で強く見える線もかすかにしか見えませんでした。輝線も水素のバルマー線もかすかでした。短波長域では、主星の光が強いため伴星のスペクトルが確認できませんでしたが、長波長側の連続スペクトルは主星と違ってF型に見えました。そのことが結果として、主星のスペクトルと伴星のスペクトルとをある波長域で区別することを可能にしたのです。連続スペクトルの観察で、「F0型である」というのは不確かな結論であること、弱い線スペクトルは天体の高温度を示すことが分かりました。

視線速度の測定は、 $H\beta$ 、 $H\gamma$ （水素のバルマー系列の2番目と3番目の線スペクトル）と、中性や一回電離した鉄、珪素、チタン、マグネシウムの金属線スペクトルで行われました。主星の散乱光の影響などを見込んで、視線速度は+21km/s、つまり4500Åで0.32Åの波長のずれが求まりました。これは、エディントンの重力による波長のずれの計算と大変よく合っていました[13]。この値から、伴星のスペクトル型をF0とすれば半径は2万4000km、比重は水の3万倍、A5とすれば1万8000km、6万4000倍となりました。

1915年から1916年にかけて、アインシュタインは一般相対性理論を発表しました。



図4 エディントン[3]

その中で、重力の強い天体から出る光の波長は、質量に応じたスペクトルの赤方変位（重力赤方変位）を示すことを予言しました。アダムスが発見したシリウス伴星のスペクトル線の赤方変位量は、白色矮星の物理量の確定とともに一般相対性理論の証明にもなったのです。

3. HR図とエリダヌス座40番星Bの発見

前述したラッセルは、視差の分かった恒星でいわゆるHR図を作成しました。彼は絶対等級をカプタインの定義した年周視差0.1"の恒星の等級としました。ちなみにヘルツスプリングは年周視差1"の距離の恒星の等級を絶対等級としています。

ラッセルのHR図は、現在私たちがよく目にするタイプのもので、HR図のことをラッセル図ともいいます。ラッセルが1914年に書いたHR図には現在の白色矮星の位置に一つの恒星がプロットされています。この星がエリダヌス座O²の伴星（O₂とも40番星とも書きます）だったのです。

この論文の中でラッセルは「この図（HR図）を見ればいろいろな事がわかる。白色星（B型星、A型星）は太陽より明るい。また、たいへんくらい星々（たとえば太陽の明るさの50分の1以下）はK型星、M型星の赤色星である。これらの星々はスペクトル型ごと

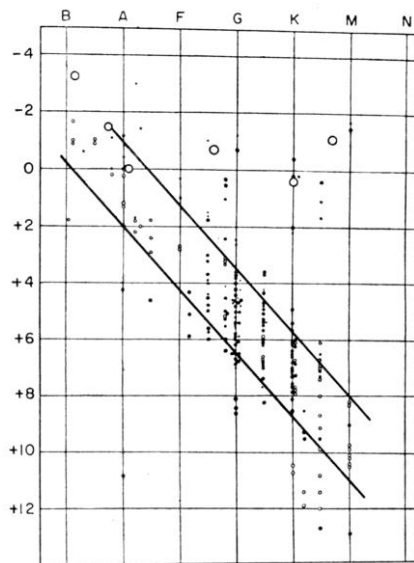


図 5 ラッセルの HR 図[14]。左下の白色矮星の位置にある恒星がエリダヌス座 40 番星 B ($=0^2B=0_2B$)。

に下限がある。ただ一つの例外はエリダヌス座 O^2 の伴星である。この星の年周視差や等級は間違っていないが、A0 というスペクトル型は主星 (K 型星) の明るさのため怪しい。」と主系列星の説明のところでエリダヌス座 40 番星 (O^2 星) についてたいへん不確かだと記述しています[15]。そのため、エリダヌス座 40 番星の伴星がラッセルに詳しく検討されることはなかったのです。

この星についてが一番初めの出来事は、1910 年にラッセルがハーバード大学を訪問したときに始まります。彼が年周視差を測定していた星のスペクトルを調べてくれるようにピッカリング教授に頼んだとき、好奇心からエリダヌス座 40 番星の伴星のスペクトルについて聞いたのでした。この 1 時間前、フレミング夫人は、この星が A 型星であることを記録していて、すぐにこの星のスペクトル型がわかりました。ラッセルもピッカリングもこのときすぐに、エリダヌス座 40 番星の伴星がおかしいと気づき、当惑していたのです[16]。ヘルツスプルングも 1913 年に、

ラッセルからこの星が A 型星であるという話を聞いています[15]。アダムスは 1914 年にこの星のスペクトルを測定し A0 型とし、その絶対等級を 10.3 等としました。このことは、ラッセルの書いた HR 図でエリダヌス 40 番星の位置が正しいということを意味します[17]。

1921 年、リンドブラッドはエリダヌス座 40 番星 B のスペクトルの撮影をしてこの星のスペクトル型を B9 と決めました[18]。彼の論文によると、「水素のバルマー線輪郭を見るとウイングがたいへん発達している。高次バルマー系列は見えていない。」

このことを現代的に解釈すると、エリダヌス座 40 番星 B の表面重力はたいへん大きく、光球中にある水素原子核のまわりを回っている電子と他の原子核や電子の距離が短い、つまり、たいへん密度が大きいことを示します。しかし、このスペクトル線の特徴が、白色矮星の高重力を示すことがわかるのはもうあと少し先のことでした。

4. 天体物理学の世界へ

このように観測された白色矮星内部の物理状態を研究した論文も現れはじめます。

エディントン卿は、名著「恒星の内部構造」で次の問を發しています[19]。

「私が知る限り、物質をぎゅっと押し詰めるには、物質を電離させるのに十分以上の温度である場合において可能である。恒星が冷却し、通常固体に結びついた正常な密度に回復するとき、それは膨張し重力に対して仕事をしなければならない。恒星は冷却するためにエネルギーが必要だろう。凝固中のシリウスの伴星は、その半径を少なくとも 10 倍膨張させなければならないだろう (つまり失った重力エネルギー Ω の 90% が置き換わらなければならないのだ)。電離エネルギーを含め、熱エネルギーは収支に

不足が生じないように Ω より少ない必要がある。我々には、恒星が逆に 90% 以上も保持するという十分な見通しを保証できそうもない。亜原子（電子や陽子）的エネルギーの供給が究極的に弱まる時、恒星は注意を要する状況になるように思える。放熱し続けるが、冷却するに十分なエネルギーをもたない物体を想像したまえ！ これは重要な問題で実際どうなっているのか奇抜な議論をたくさんしても良いだろう。」

この間に応じたかのように、ファウラーは 1926 年に、ほんの数か月前フェルミが公表した量子統計力学でいうところのフェルミ・ディラックの統計理論を用いて、白色矮星は縮退電子ガスの星であることを示しました[20]。

1931 年、インドからイギリスのエディントンの元へ留学の旅の途中であったチャンドラセカールは、「理想白色矮星の最大質量」という短い論文を書き、白色矮星の質量限界（チャンドラセカール・リミット）を見つけました[21]。彼が 21 歳の時でした。

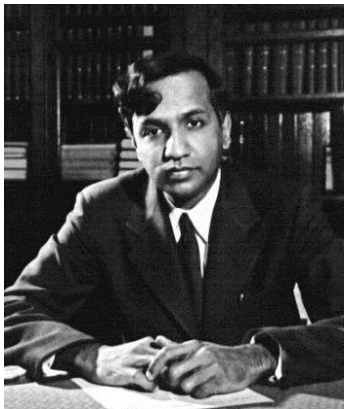


図 6 チャンドラセカール

これらの研究を通じて白色矮星の物語は観測から天体物理学へと舞台を移していったのです。

引用文献

[1] たとえば Hertzsprung, E., 1907, *Astronomische Nachrichten*, 176, 49.

[2] Russell, H. N., 1913, *The Observatory*, 36 No464, 324.

[3] <http://www.phys-astro.sonoma.edu/BruceMedalists/>

[4] Bessel, F. W., 1844, *MNRAS*, 6, 136.

[5] O. ストゥルベ、V. ゼバークス（小尾信彌・山本敦子訳）、1965、『20 世紀の天文学 2 星の世界』, p80, 白揚社.

[6] Peters, C. A. F., 1851, *Astronomische Nachrichten*, 32, 1.

[7] Safford, T. H., 1862, *MNRAS*, 22, 145.

[8] King, H. C., 1979, "The History Of The Telescope", pp255-257. Dover Pub., Inc.

[9] Bond, G., 1862, *Astronomische Nachrichten*, 57, 131.

[10] Adams, W. S., 1915, *PASP*, 27, 236.

[11] Campbell, W. W., 1920, *PASP*, 32, 199.

[12] Eddington, A. S., 1924, *MNRAS*, 84, 308.

[13] Adams, W. S., 1925, *The Observatory*, 48 No618, 337.

[14] O. ストゥルベ、V. ゼバークス、前掲書 [5] p25

[15] Russell, H. N., 1914, *Popular Astronomy*, 22, 286.

[16] Hearnshaw J. B., 1986, "The analysis of starlight, one hundred and fifty years of astronomical spectroscopy", pp352-360. Cambridge University Press.

[17] Adams, W. S., 1914, *PASP*, 26, 198.

[18] Lindbald, B., 1922, *ApJ*, 55, 85.

[19] Eddington, A. S., 1926, "The internal constitution of the stars"(2nd. ed. 1986), p170. Cambridge University Press.

[20] Fowler, R. H., 1926, *MNRAS*, 87, 114.

[21] Chandrasekhar, S., 1931, *ApJ*, 74, 81.

西村昌能（京都府立洛東高等学校）