

連載

星々の終末の姿【2】

白色矮星の観測史

西村昌能（京都府立洛東高等学校）

1. さて、前回に引き続き……

前回、白色矮星の発見について述べました。白色矮星の発見では、位置天文学、天体力学、天体分光学、相対論、量子力学などの各方面で、当時の最先端技術や理論が駆使されていたのがわかったと思います。言い換えれば、白色矮星の発見やその理解が新しい理論の証拠・証明ともなったのです。また、これらの発見は偶然の結果が多かったこともわかりませんが、これは単に偶然というだけでなく、発見というか学問の発展は、周辺科学のお膳立てがあつてのことであるともいえるでしょう。

さて、今回は白色矮星研究のその後について、観測面での研究の歴史を見てみたいと思います。

2. 高速度星の発見

科学は、分類に始まるといわれています。そのためにはたくさんの例が必要です。しかし、1930年には、白色矮星はたった3星しか知られていませんでした。シリウス伴星、エリダヌス座40番星B、それとファン・マーネン星（ファン・マーネン2番星）でした。シリウス伴星とエリダヌス座40番星Bの発見については前回詳しく書きました。

3番目に発見された白色矮星は、このファン・マーネン星です。発見者のファン・マーネンはカプタインの弟子でした。カプタインは宇宙（当時は銀河系）の形や大きさを調べる研究をしていました。余談になりますが、この頃の研究史を調べていますとオランダ人の名前がよくでてきます。この師匠と弟子もオランダ人です。

さてファン・マーネンは、カプタインの研究の一環で、ウイルソン山天文台で撮影され

た乾板を調べる作業をしていました。1917年、ランデ 1299 という固有運動の大きな恒星（1年間に1.4秒角）の高速移動する伴星を探索しようと、同天文台で撮影された2組の乾板を見て、別の高速で移動する暗い恒星を見つけたのです。まったくの偶然でした。

この星は、1年間に3秒角もの大きな角度で移動していました。この異常に大きな固有運動は、この星がたいへん近くにあることを意味しています。ところが、写真等級は12.91等で非常に暗いものでした。分光観測も行われ、アダムスの見立てによるとスペクトル型はF0ということになりました[1]。

1926年、アダムスとジョイ（図1）によって視線速度の測定が行われ、238km/sの速度で遠ざかっていることが明らかになりました[2]。視線速度が50km/s以上の59星の観測結果をリストアップした彼らの論文では、この星はvan Maanen No.2 dF3とあります。ファン・マーネンリストの2番星でスペクトル型がF3の矮星（dF3のdはdwarfの意味）としていたのです。この視線速度は文字通り宇宙記録の速度でした。このことと写真等級の暗さから、ファン・マーネン星も白色矮星の仲間と認められるようになったのです。

このように、高速度星（固有運動が大きいという意味）で見かけが暗い恒星は、近くにある表面温度の高い白色矮星である可能性が示されたのでした。



図1 ジョイ[3]

4番目に発見された白色矮星は、ファン・マーネン 1166 番星でした。この星は、ライデン天文台（オランダ）のオースタホッフによって、ペルセウス座の κ - χ 星団の中に発見されたものです[4]。

彼は分光観測の結果、有効波長から色指数を見積もりました。有効波長とは、20世紀初期に用いられた恒星の色（すなわち表面温度）を推定するテクニックです。望遠鏡の対物レンズの前に回折格子を置き、写真を撮ると左右に広がった同じ次数の回折像が写りますが、その間隔は一番感光に寄与した波長と関係があり、その波長を有効波長といいます。詳しくは、大沢先生の著書[5]をご覧ください。ヘルツスプルングが HR 図に用いた色指数も、この有効波長から得られています。この恒星の色指数は -0.1 等と見積もられました。固有運動の大きさは 0.173 秒角で、写真等級は 13.44 等でした。

A型星の絶対等級を 1 等とすると、空間運動の大きさは 2070km/s という高速度となります。これは、この星が遠くにあると仮定して見積もられた値で、常識的にはあり得ない速度です。そこで、この星は近いが暗い、つまり半径の小さな恒星であり、これは白色矮星に違いないと判断されたのです。

このオースタホッフの観測によって白色矮星ではないかと指摘されたファン・マーネン 1166 番星は、エーマンによって詳しく分光されました[6]。彼はストックホルム天文台の 40cm 天体写真儀に対物プリズムを取り付け、低分散分光写真乾板で撮影し、さらに 100cm 反射望遠鏡を用いてスリットレスの分光写真乾板で撮影しました。それぞれの乾板はマイクロフォトメーターにかけられ、ここに世界で初めて、白色矮星のスペクトルトレースが得られたのです。マイクロフォトメーターというのは写真濃度を光の強度に変換する装置です。このことは、白色矮星スペク

トルの定量解析が始まったことを意味します。

彼は $H\gamma$ と $H\delta$ （水素のバルマー系列の 3 番目と 4 番目の吸収線）の線輪郭が広くて浅いと報告し、この星は A 型星であるとなりました。後に彼は、バルマー線の輪郭の広さはウンゼルトらの研究からシュタルク効果によるものであると報告しました[7]。

原子はある強さの電界におかれると、その吸収線はいくつかの線成分に分離します。これをシュタルク効果といいます。恒星の光球のような圧力の高いところでは、光を放射・吸収する原子はまわりのいくつかの原子、イオン、電子の電氣的影響（電界）を受けます。そのため、たくさんの線成分が重なり合っただけで線幅が広がる、つまりぼやけて見えるのです。水素のような質量の小さな原子では、シュタルク効果の影響がたいへん顕著で、吸収線の輪郭は大きく翼を上げたようになります。富士山を逆さにしたような形になるのです。密度が大きいほどシュタルク効果の効き具合は大きくなります。白色矮星は恒星の中では、高重力で高密度です。そのため、水素の線幅はたいへん広く、ついで主系列星、巨星、超巨星という順に線幅は狭く、鋭くなります。これを水素線の絶対等級効果（絶対光度効果）といいます。水素のバルマー線の輪郭を調べると、恒星の階級がわかるのです。

このとき、リンドブラッド（図 2）が 1921 年にエリダヌス座 40 番星 B で指摘した水素の吸収線の形の物理的解釈がなされたのでした（[9]を参照）。



図 2 リンドブラッド[3]

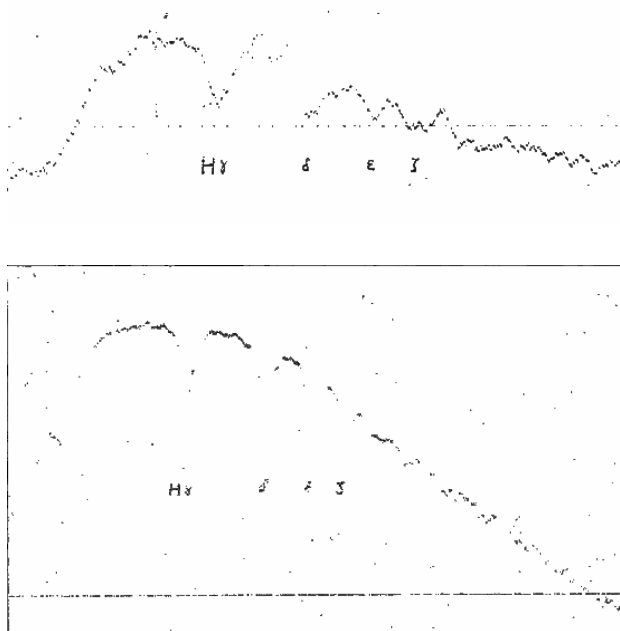


図 3 エーマンによって得られた白色矮星のスペクトルトレース[6]

上がファン・マーネン 1166 番星、下はエリダヌス 40 番星 B のもの。横軸は波長で、縦軸は写真濃度を光の強度に変換したもの。緩やかな山形の曲線が連続輻射（コンティニューム）、その中のへこみが水素のバルマー線である。原図は見にくいので白黒を反転した。

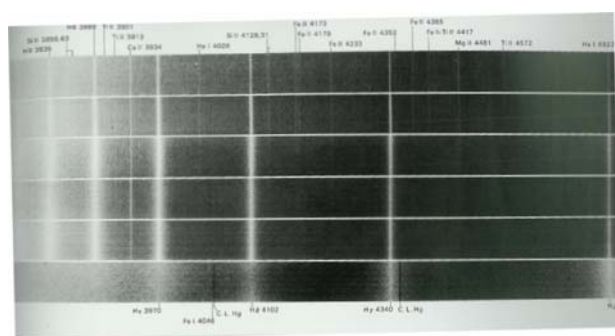


図 4 A0 型星の絶対等級効果[8]
強い吸収線が水素のバルマー線である。上段から HR1040 A0Ia、 η Leo A0Ib、 α Dra A0III、 γ Gem A0IV、 α Lyr A0V、一番下に白色矮星エリダヌス座 40 番星 B が見える。バルマー線のぼやけはシュタルク効果によるもので、表面重力加速度の大きい星ほど良く効く。

3. 白色矮星のスペクトル分類

現在では、太陽系外縁にある天体群の研究で有名なカイパー（図 5 左）も、1930 年代半ばには高速度星の研究をしていました。このころ、オランダ人カイパーは、ヘルツスブルグ門下で学位を取ったのち、リック天文台の 36 インチ望遠鏡を使って大きな視差をもつ恒星の分光観測を行っていました。その後、彼は、マクドナルド天文台の 82 インチ望遠鏡で 0.3 秒角の大きな固有運動をもつものを含めた暗い恒星の研究を始めました。

最初の成果は、1934 年に行った二つの白色矮星の発見でした。その後、1941 年には 38 個の白色矮星のリストを作成しました[10]。これらの星々の等級は 15 等程度までの暗さだったのですが、シリウス伴星以外は自前の観測でした。シリウス伴星については観測が困難であったためです。前回の図 2（「天文教育」2007 年 1 月号 2 頁）にシリウスの軌道を引用しましたが、ちょうど 1930 年代後半から 1940 年頃は主星と伴星の離角がたいへん小さかった時期だったのです[9]。

さて、38 個の標本があれば、誰でもそのスペクトルの様子の違いに目をやり、分類を試みるでしょう。カイパーも分類を行い、次のようにスペクトル分類しました。

Con (continuous の略)：低分散のスペクトルでは吸収線が見つからないもの。

wA：スペクトルがエリダヌス座 40 番星 B にたいへん良く似ているもの。水素のバルマー線で $H\alpha$ から $H\eta$ までが見えていて、他の吸収線は見えない。バルマー線はシュタルク効果で幅広くなっている。通常、バルマー端から始まる水素の連続吸収は $H\eta$ を超えたところから始まり、その強さは B3-B7 の中期 B 型星に対応する。大多数の白色矮星はこれに属する。

wAs：wA に似るが、バルマー線の幅は広

くない。sはsharpの略。

wA5 : 難しい状況で観測されたと思われるシリウス伴星のみ。wAsと同じものと思われる。

wF : 1回電離したカルシウム (CaII) のH,K線のみが見えている。ただし、通常のF型星より弱い。

wF5 : CaIIのH,K線は、通常のF型星と同じくらいの強度。付け加えて、波長3835Åに強い線(おそらくMgIの三重線)が見える。他の吸収線は見えない。

wG : CaIIのH,K線は強い。一方、紫外域での幅広いブロード(他の吸収線の重なり)はG型星に似る。

ご覧になっておわかりのように、wは白色矮星を表し、AFGはバルマー線やCaIIのH,K線などから考えた表面温度系列(スペクトル型)を、次の添え字は吸収線の鋭さや中間型を示します。

カイパーの分類ではConが7星、wAが22星、wAsが4星、wA5が1星(シリウス伴星)、wFが1星、wF5が1星、wGが1星(ファン・マーネン2番星)、不明が1星(プロキオンB)となりました。一つの恒星が一つのカテゴリーを作っているのは、著名な星がプロトタイプになっていて早くから研究されていたからだと思います。なお、プロキオンBは仮説的に白色矮星であるとしていますが、この星についてはエディントンが1924年に白色矮星ではないかと推定していました[11]。

その後、カイパー自身は、1944年に分光観測で木星の衛星タイタンの大気を発見したことを報告する論文を書いて以来、研究のほとんどを太陽系天文学に傾倒させています。

4. 白色矮星の大規模サンプリング

オランダ出身のロイテン(図5右)は、



図5 カイパー[12]とロイテン[16]

最初、リック天文台で低光度星の分光学的研究を始めましたが、銀河系の研究で有名なハーロー・シャプレーとの共同研究によって高速度星のサーベイに着手するようになりました。これはブルース固有運動サーベイと呼ばれるもので、南アフリカに設置された口径24インチのブルース反射望遠鏡を利用するものでした。この仕事は1928年に始まり1937年まで続けられました。

白色を示す高速度星の探査結果は1940年から出版され、1949年までに100個の新しい白色矮星の報告、1960年には400個の白色矮星が報告されるようになりました。1963年から始められたパロマー天文台のシュミットカメラ(図6)を用いた北天のサーベイでは、1970年に2934個の白色矮星と思われる恒星がリストアップされました。中には、高速度星の“中間物”または「準矮星」と呼ばれる恒星が含まれるのです。「白色矮星は発見しやすさでは一番だが、観測するには手強い」というロイテンの言葉には注目すべきです[13]。

ロイテンは82インチのマクドナルド望遠鏡で分光観測を行いました。そして、1952年、新しい白色矮星の分光学的分類を提案しました[15]。1945年、当時マクドナルド天文台の巨大望遠鏡の管理運営は、マクドナルドとヤーキス両天文台の台長オットー・スト



図 6 パロマー天文台のシュミットカメラ。
手前の人物はエドウィン・ハッブル[14]

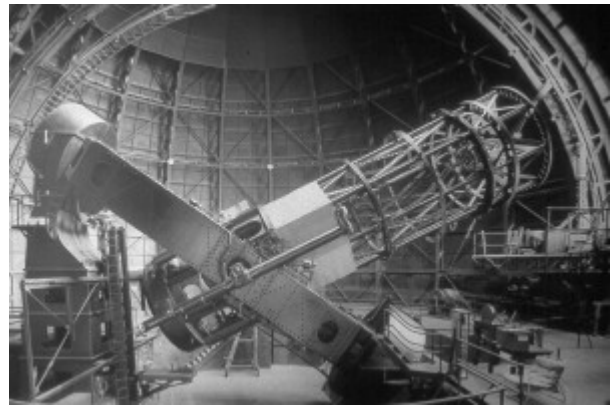


図 8 100 インチ フーカー望遠鏡[18]



図 9 オットー・ストルーフェ[3]



図 7 口径 82 インチのオットー・ストルー
フェ望遠鏡[17]

ルーフェが行っていました。ロイテンはストルーフェ台長にマクドナルド天文台の望遠鏡を利用させてもらったのです。マクドナルド天文台には、建設当時世界第 2 位の口径 82 インチ (2.1m) 望遠鏡、いわゆるオットー・ストルーフェ望遠鏡 (図 7) がありました (望遠鏡は 1933~1939 年に建設されました。現在でも現役の望遠鏡です) [17]。この望遠鏡と分光器で暗い白色矮星の観測をしたのです。その後も、82 インチ望遠鏡を利用して白色矮星の分光観測を行い、1950 年に

は 1948 年まで世界最大であったウイルソン山天文台のフーカー 100 インチ望遠鏡 (図 8) も利用して、合計 150 個の白色矮星の観測を行ったのです。

オットー・ストルーフェ (図 9) は、ドイツ系ロシア人で、天文学者の家系に生まれ、ロシア革命のとき、アメリカに亡命した天体物理学者です。恒星分光学の始祖の一人で、IAU の恒星スペクトル委員会の委員長 (後に IAU 会長) でもありました。そのため、ロイテンの白色矮星の分光観測研究にたいへん理解を示していたのでしょう。

ロイテンの分類は、基本的にはカイパーと差はありませんでした。分類記号は縮退星 (degenerate star) を意味すると思われる D と A,B,C,および F をつけたものでした。

DA : バルマー線が見えるもの。

DB : ヘリウム線のみが見えるもの。

DC : コンティニュームだけが見えているもの。

DF : CaII 線が見えているもの。

さらに、DA では0から7まで、DB では0と1の添え数字をつけて細分しています。彼の流儀でいくと、ファン・マーネン星はDF、エリダヌス座40番星BはDA-4となります。白色矮星より明るい“中間物”もしくは「準矮星」には、「半縮退星」(semi-degenerate stars) という意味をもつSDをスペクトル型の前につけるように仮の提案をしています。彼の論文には、Dを縮退のDからとったとは書かれていませんが、SDは半縮退という意味をもつと書かれた部分があるので、DはdwarfのDではなく、degenerateのDだと判断しています。

5. パロマーの巨人望遠鏡がこびとを相手にして

さて、グリーンシュタイン(図10)は、1958年、新しい分類を提案しました(さらに、1960年に少し改訂しています[19])。彼は、パロマー山の200インチヘール望遠鏡(図11)を使って、白色矮星の質量、光度、表面重力加速度、化学組成、磁場、重力赤方変位、固有運動などの研究をしていました。

さて、彼の分類は以下のようなもので、基本はロイテンのものと変わりません。

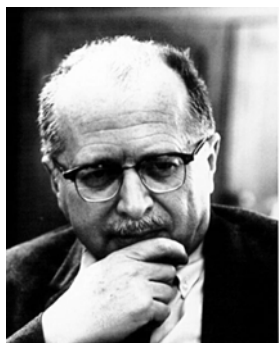


図10 グリーンシュタイン[3]



図11 パロマー200インチヘール望遠鏡[21]

DC : 連続スペクトルで、深さが10%以上の吸収線が見えない。

例 : W1516、L1363

DC,K : CaIIのH,K線が弱く見えている。

例 : W489

DO : HeIIの吸収線が強い。HeIとH(バルマー線)の両方もしくは片方が見える。

例 : H Z21

DB : HeIが強い。バルマー線は見えない。

例 : L 1573-31

DA : バルマー線はあり。HeIは見えない。

例 : エリダヌス座40番星B

DA,F : バルマー線は鋭く弱い。CaIIは弱い。

例 : R627

DF : CaIIはあり。バルマー線は見えない。

例 : L745-46A

DG : CaII、FeIはあり。バルマー線は見えない。

例 : ファン・マーネン2番星

λ 4135 : 幅広いミンコフスキー帯(未同定)が見える。

例 : AC+70° 8247

λ 4670 : 波長4670Åと5140ÅにC₂と思われる吸収帯が見える。

例 : L879-14

なお、添え字には、**p** : 特異型、**wk** : 弱い、**e** : 輝線、**s** : 鋭い、などとスペクトル線などの特徴を表す記号を付けます。また、恒

星名で、L は Luyten、W は Wolf、R は Ross、HZ は Humason-Zwicky など、それぞれのリストを表す記号です。

彼の分類で DO 型は、フマーソンとツビッキーの観測（1947 年）で見つかったものです。λ 4135 というカテゴリーは、1938 年 ミンコフスキーが AC+70° 8247 のスペクトルに発見した、波長 4315Å と 4475Å に見られるたいへん幅広く浅い吸収領域[20]を特徴とするものでした。

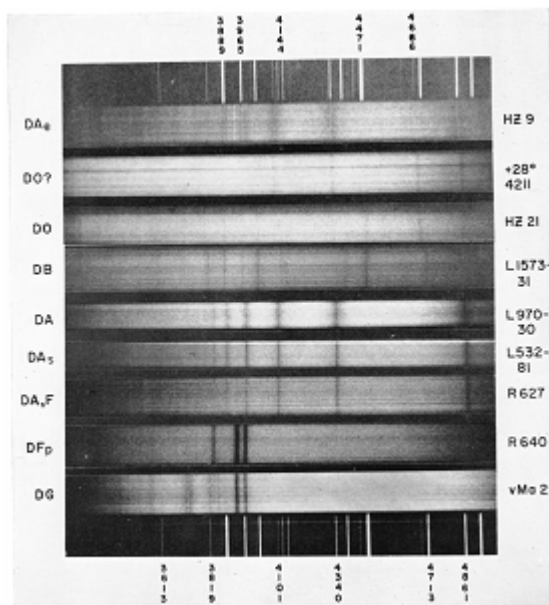


図 12 グリーンシュタインの白色矮星分類スペクトル[22]

6. 白色矮星の分類最新版

その後、1983 年、サイオン、グリーンシュタイン、ランドストリート、ウェグナーらは、スペクトルだけでなく、白色矮星それぞれで分類する方法を提案しました[23]。

- (1) 縮退星には大文字の D を使う。
- (2) 次に、可視域で見える主なスペクトル型を大文字で表す。
- (3) 第三に、二次的な分光学的特徴、もしくは（あれば）紫外域の分光学的特徴のような電磁気学的な様子を利用する。

(4) 温度インデックス：二次的な特徴の次に $\theta = 5040/T$ (T は恒星の表面温度) で定義される温度尺度 θ (ラッセルが提案。詳しくは、例えば文献[24]などを参照) を 10 倍したものを 0~9 でつける。つまり、 $10\theta = 50400/T$ の値を利用する。表面温度は無限から 6000K くらいまでを想定していることになる。

彼らの分類は次のようであり、現在でも利用されています。たとえば[25]のものは彼らの分類に基本的に同じです。

- DA** : バルマー線のみ見える。HeI や金属線見えない。
- DB** : HeI 線は見える。水素線や金属線は見えない。
- DC** : 連続スペクトル。電磁気的分光でも 5%より深い線は見えない。
- DO** : HeII が強い。HeI、水素線はあり。
- DZ** : 金属線のみで、HeI や水素線はなし。
- DQ** : 電磁気的分光で炭素の線や分子線が見える。

振り返って見ますと、White dwarf の w を使うのか、Degenerate stars の D を使うのか、研究者の切り口や思想、時代背景がその分類記号に見え隠れしますが、1941 年にカイパーが最初に行った白色矮星の分類のカテゴリーが、その後の再分類にも継承されていたことがわかります。何事も最初が肝心ということでしょう。

7. シリウス伴星の物理観測

さて、分類が一段落したところで、白色矮星の観測からわかる物理量の研究に目を向けてみましょう。

もっとも興味深いのは、最初に白色矮星と認められたシリウス伴星だと思います。一番

私たちに近い白色矮星だけに、数多くの研究者が目をつけています。それらの研究によって、時代とともにかなり表面温度の見積もりが変化しています。

前回ご紹介したように、1915年にシリウス伴星のスペクトルが撮影されました[9]。それによるとスペクトル型はA0型であり、10000K程度の有効温度だと考えられていたといつてよいでしょう。一方、1924年のエディントンの論文ではF0と書かれていて、温度も8000K以下になりました。その後、しばらく物理観測は他の白色矮星に振りかえられます。シリウスでは伴星が主星に近づいてきたからです。重力赤方偏移も1924年のアダムスの観測、1928年のムーアの観測以来、途絶えていきます。1935年から1950年まで伴星は主星に接近していたため、その間、伴星は見えませんでした。そして、徐々に伴星が再び現れてきたのです。

日本でも、白色矮星の物理観測が行われるようになります。1967年、後に国立天文台長になる小平桂一氏（現 総合研究大学院大学学長。図13）は、できたての東京天文台岡山天体物理観測所74インチ反射望遠鏡（図14）のクーデ高分散分光器を利用して、シリウス伴星のスペクトルを撮影しました。

スリット上で伴星が2mm主星から離れていましたから、主星をスリットから遠ざけ、副鏡の支持棒の回折光の間に伴星を置き、2時間露光しました。得られたスペクトルは、主星からの散乱光に挟まれる形で写っていました。そこで、主星の散乱光を除去した伴星のスペクトルから、 $H\gamma$ の線輪郭と等価幅を求め、そこから色指数を知るという手続きで、寺下・松島（1966）のモデル大気から有効温度17000Kと表面重力加速度 $\log g=7.2$ 、バイデマン（1963）のモデル大気からそれぞれ14800Kと8.0という値を、モデルとの比較から見積もることができました[26]。



図13 小平桂一[27]



図14 岡山天体物理観測所74インチ反射望遠鏡[28]。極軸の南側（写真では右）にクーデ分光器室があった。現在は、HIDESというエッセル分光器がおかれて活躍している。

1963年にオークは、パロマー山200インチヘール望遠鏡で、シリウス伴星のスペクトルを撮影しました。1971年にグリーンシュタインらは、このスペクトルから得られた $H\alpha$ と $H\gamma$ の線輪郭を理論モデル線輪郭と比較することによって、シリウス伴星の有効温度を $32000\text{K}\pm 1000\text{K}$ 、表面重力加速度 $\log g=8.65$ 、重力赤方変位の値を $89\pm 16\text{km/s}$ と求めました[29]。表面温度は一気に2倍になりました。これは大発見でした。余談ですが、表面重力加速度はcgs単位系で表した対数値です。実は今でも天体分光学ではSI単

位系ではなく cgs 単位系を利用しています。いや天文学全体が今でも cgs 単位系なのです。

1970 年頃、シリウス伴星は主星からもっとも離れるようになってきました[9]。ですから、このころたくさん論文が生まれました。1975 年にメーヴェらは、シリウスからソフト X 線が出ていることを発見しました[30]。ANS という X 線衛星の観測からでした。1977 年にケスターは、UBV3 色測光、*uvby* 測光から表面温度 $22500 \pm 600\text{K}$ 、表面重力加速度 $\log g = 8.85 \pm 0.27$ という値を推定しています[31]。

1978 年にゲイトウッドらは、「シリウスの研究」という論文を書きました[32]。彼らは、シリウスの主星と伴星のさまざまな物理量を自分たちの研究も含めてまとめました。表面温度については、地上観測で得られた測光データ、線輪郭、人工衛星による遠紫外域の観測などから $29500 \pm 4000\text{K}$ 、表面重力加速度 $\log g = 8.73 \pm 0.15$ としました。この時期に求められたシリウス伴星の表面温度は、 $22500 \sim 32000\text{K}$ までばらつきがありましたが、1980 年代後半には $26000 \pm 2000\text{K}$ に収束していきます。これは、他の DA 型星の表面温度が 1% 以内の精度で求まっているのに対して、誤差が大きすぎました。主星が明るすぎるため、その散乱光が観測や整約を邪魔していたことが原因だったのです。それを取り除くには、スペース（宇宙空間）に出ないでないといけません。

1985 年ころに、再びシリウス伴星は主星に近づきました。1998 年にホルバークたちは、主星と伴星が最接近している期間を挟んだ 1978~1984 年の IUE（国際紫外線観測衛星）と 1996 年の EUVE（極紫外線観測衛星）の紫外域のスペクトル観測から、シリウス伴星の表面温度を $24790 \pm 100\text{K}$ 、表面重力加速度 $\log g = 8.51 \pm 0.06$ と求めました[33]。IUE スペクトルでは、紫外域にある水

素のライマン α ($\text{Ly } \alpha$) の線輪郭や連続放射スペクトルの形、EUVE では連続放射スペクトルの形から求めたのです。また、彼らは、Hipparcos（高精度深宇宙観測衛星）の年周視差測定を利用して、シリウス伴星の質量を 1.034 ± 0.026 太陽質量、半径を 0.0084 ± 0.00025 太陽半径と求めました。

2005 年にバーストウらは、ハッブル宇宙望遠鏡の STIS（宇宙望遠鏡画像分光器）を利用して、表面温度 25193K 、表面重力加速度 $\log g = 8.556$ 、重力赤方変位を $80.42 \pm 4.83\text{km/s}$ としました[34]。重力赤方変位から求めたシリウス伴星の質量 = 0.978 太陽質量の値は、表面温度と重力加速度の測定を理論的な進化質量-半径関係に合わせることで求めた値 = 1.02 太陽質量によくあっているといえます。表面温度（有効温度）については、ようやく一定の値になったといえましょう。

ところで、『理科年表』に載っている「恒星の物理諸量(2)」では、シリウス伴星の表面温度は 14800K と出ています[35]。文献の記載が不十分なので、誰の研究からの引用かはっきりしませんが、かなり古いものだと思います。

シリウス伴星の質量はほぼ太陽のものと同じですが、これはチャンドラセカール限界に近い大きさで、知られた値では最大級のものでした。現在まで主星に近く観測に不適だったシリウス伴星も、2010 年ころには再び、私たちの前に姿を現し、白色矮星の代表例として、興味深い研究対象を提供してくれるでしょう。

引用文献

- [1]van Maanen,A., 1917, *PASP*, 29,258.
- [2]Adams, W. S. & Joy, A. H., 1926, *PASP*, 38, 121.
- [3]<http://www.phys-astro.sonoma.edu/BruceMedalists/>

- [4]Oosterhuff, P. Th., 1930, *Bull. Atrsr. Inst. vi.*, No.206.
- [5]大沢清輝、1984、『地人選書6 星の色』、地人書館、p.26.
- [6]Öhman, Ph. D., 1931, *MNRAS*, 92, 710.
- [7]Öhman, Ph. D., 1935, *STOCKHOLMS OBSERVATORIUMS ANNALER*, 12, 10.
- [8]Yamashita, Y., Nariai, K. & Norimoto, Y. 1976, “*An Atlas of Representative Stellar Spectra*”, University of Tokyo Press, p.51.
- [9]西村昌能、2007、天文教育、1月号、p.2.
- [10]Kuiper, Gerard P. 1941, *PASP*, 53, 248.
- [11]Eddington, A. S., 1924, *MNRAS*, 84, 308.
- [12]<http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/people/today/kuiper.html&edu=high>
- [13]Hearnshaw, J. B., 1986, “*The analysis of starlight, one hundred and fifty years of astronomical spectroscopy*”, Cambridge University Press, p.358.
- [14]<http://www.astro.caltech.edu/observatories/palomar/>
- [15]Luyten, W., J. 1952, *ApJ*, 160, 283.
- [16]<http://bob.nap.edu/html/biomems/wluyten.html>
- [17]<http://mcdonaldobservatory.org/news/facts/about.html>
- [18]<http://www.mtwilson.edu/vir/100/>
- [19]Greenstein, Jesse L., 1960, “*Stars and Stellar Systems, vol.6 (Stellar Atmospheres)*” (edited J. L. Greenstein) , chapter 19, p.689.
- [20]Adams, W. S. & Sears, F. K., 1938, *Annual. Report of the Director of Mt. Wilson Observatory*, p.28.
- [21]<http://www.astro.caltech.edu/palomar/images/p200.fisheye.jpg>
- [22]Greenstein, Jesse L., 1960, *ibid*, plate II
- [23]Sion, E. M., Greenstein, J. L., Landstreet, J. D., Liebert, J., Shipman, H. L. and Wegner, G.A., 1983, *ApJ*, 269, 612.
- [24]A. ウンゼルト (小平桂一訳)、1978、『現代天文学 第2版』、岩波書店、p.162.
- [25]<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/star-catalog/mcksion.html>
- [26]Kodaira, K., 1967, *PASJ*, 19, 172.
- [27]<http://wwwsoc.nii.ac.jp/arf/10kondankai.htm>
- [28]<http://www.oao.nao.ac.jp/public/telescope/>
- [29]Greenstein, J. L., Oke, B. and Shipman, H. L., 1971, *ApJ*, 169, 563.
- [30]Mewe et al. 1975 *ApJ*, 202, L67.
- [31]Koester, D., 1979, *ApJ*, 72, 376.
- [32]Gatewood, G. D. and Gatewood C. V., 1978, *ApJ*, 225, 191.
- [33]Holberg et al., 1998, *ApJ*, 497, 935.
- [34]Barstow et al., 2005, *MNRAS*, 362, 1134.
- [35] 国立天文台編、2006、『理科年表 平成19年』、丸善、p.121.

西村昌能 (京都府立洛東高等学校)