連載

恒星天文学の源流【20】

星と銀河　その３

～銀河と恒星系～

小暮智一（京都大学 OB）

銀河系構造の研究は 20 世紀になっても依然として困難な課題であった。基本的には遠方の星までの距離を知る方法がなかったからである。可能な手段は統計的な推測であった。今回は統計星学の基礎を作り、恒星系の構造解明に寄与したユーゴー・フォン・ゼーリガーとヤコブス・コルネリウス・カプタインの生涯と天文学を取り上げる。

1. ゼーリガーの生涯と天文学

1.1　その生涯

ユーゴー・フォン・ゼーリガー（Hugo Hans Ritter von Seeliger）（通称ハンス）（1849 -1924）は近代的な統計星学の基礎を築いた研究者である。まず、その生涯を辿って見よう [35],[36]。

ゼーリガーは 1849 年 9 月にドイツのシレジア地方（現在は大部分がポーランド領）の南西部ビールスコ・バイワ村で裕福な村長の息子として生まれた。隣町のテッシェン高校を卒業後、1867 年にハイデルベルグ大学に進学し、数学と天文学を学ぶ。さらにライプチッヒ大学に移り、カール・ブルーンス（Carl Shristian Bruhns）の指導で 1872 年に天文学の学位を取得する。ブルーンスはライプチッヒ大学付属天文台長も兼ねており、彗星観測と精密な軌道計算で知られていた。学位を得たゼーリガーはボン天文台の観測助手となる。ここはフリードリッヒ・アルゲランダー（Friedrich Whilhelm Argelander）がボン星表（Bonner Durchmusterung）(1863)を編集したところであったが、アルゲランダーは 1875 年に死去し、それを継いでボン天文台長のシェーンフェルド（Eduard Schönfeld）がカタログの南天への拡張の観測を続けていた。ゼーリガーが観測助手として働いていたのはこの頃である。1881 年にゴータ公爵設立のゴータ天文台（Gotha Observatory）に移って台長となる。しかし、それも 1 年間で、翌年の 1882 年にはミュンヘン大学 (Ludwig-Maximilian University of Munich) に招かれ、天文学教授と付属天文台長を兼ねる。この大学は現在でもドイツにおける大学教育の中心の 1 つである。ゼーリガーも生涯を天文教育に尽くし、この大学をヨーロッパにおける主要施設の一つに育て上げている。カール・シュワルツシルド（Karl Schwarzschild）も彼の指導を受けた一人である。シュワルツシルドは彼の師を尊敬し「いつも多くを触発された」と語っていたという。

ゼーリガーは 1892 年にドイツ天文学会会長に就任し、ドイツにおける天文学の重鎮となった。そのため、第 2 次世界大戦の終結後、ドイツは困難な状況にあり、彼は体調を崩していたが、請われて生涯を通じて大学に留まった。1924 年、9 月には彼の 75 歳の誕生日を記念して、記念文集も発行されたが、その後、急速に体調を崩し、その年の 12 月に他界した。

1.2　ゼーリガーの天文学

19 世紀から 20 世紀初頭にかけて、天文学の分野はまだ細分化されていなかった。ゼーリガーもその例に漏れず、太陽系天体、変光

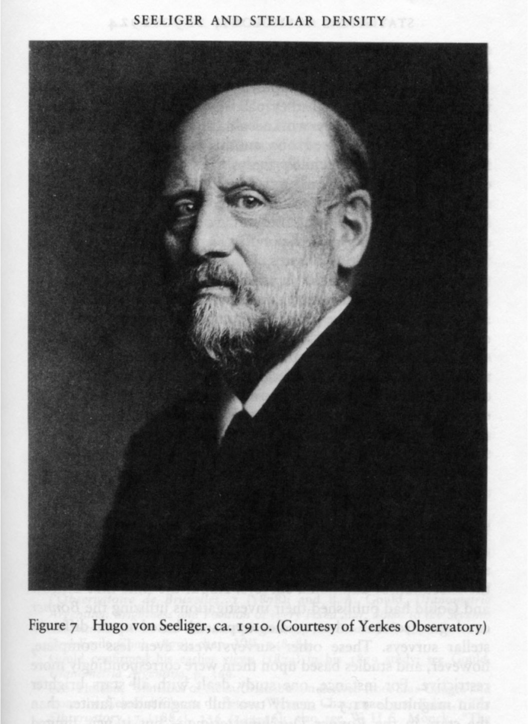

図 21　ゼーリガー肖像 1910 年頃の撮影 [35]

星や新星の研究、宇宙論から恒星系まで研究は広い分野にわたっている。

太陽系では土星の輪が微粒子の集合であるという、当時提唱されたばかりの仮説を検証するために、微粒子の反射率、微粒子相互の掩蔽などを考慮した輪の明るさの位相変化を計算し、土星、地球、太陽が一直線に並ぶとき明るさが最大になると予測している(1908 [37])。これは後にミュラー（Müller）の光電観測によって実証されたという。

また、水星の近日点移動の問題について、ゼーリガーは太陽面から延びた黄道光物質との摩擦によるという非相対論説を唱えて物議をかもした(1915 [38])。当時はアインシュタインの相対性理論による効果が広く認められていたが、彼は最後まで自説を曲げなかった。彼はまた、ニュートンの重力理論についても問題を提起している。もし、宇宙が無限であるとすれば、すべての物体には究極的に無限の重力がかかるので宇宙の崩壊は免れない。宇宙が平衡であるためにはニュートン理論に修正が必要であるとし、引力の法則には逆 2 乗のほかに遠方で効果的になる指数関数の因子が加わると仮定して、法則を修正した。修正の必要性はすでに 1825 年にシモン・ラプラスによっても提唱されていたが、19 世紀の天文学では重力と宇宙の無限性の矛盾は避けて通れない困難な課題であった。

2．ゼーリガーの統計星学と銀河系モデル

「ゼーリガーは統計星学と銀河天文学について数多くの論文を書いているが、ほとんどがドイツ語で、しかも、長大な数式の羅列になっているため、英語圏の研究者を悩ませてきた。」それは 1925 年に弔辞を書いたエディントンを嘆かせるほどのものであった[39]。しかし、それでも統計星学の先駆者としてのゼーリガーの仕事はその後の多くの理論を生み出した。この分野の仕事を辿ってみよう [35, Chapter 3]。

2.1　初期の星計測法

ゼーリガーが恒星系について最初に取り組んだのはボン星表の解析である。この星表はフリードリッヒ・アルゲランダー（Friedrich Argelander）によって 1859 年から 1862 年にかけて編集された星表で、赤緯−2 度から北天全域の、9.5 等級より明るい 324,186 星を含んでいる [40]。この星表を南天の −23 度までの拡張する仕事はアルゲランダーを継いだボン天文台長のシェーンフェルド（E. Schönfeld）によって行われ、133,659 星が追加されている(1886 年)。両者は合わせてボン星表と呼ばれている。この星表では星は赤緯毎の番号であらわされ、例えば BD+38°3238（ベガ), BD-4°3419 などと記され、星

の位置(赤経、赤緯）と実視等級が与えられている。暗い星については現在でもこの記法が使用されている。なお、それより南天はCordoba Dürchmuterung（CD）（1892 – 1932）,Cape Photographic Dürchmusterung (CPD) (1895 - 1900)に収められている。ボン星表は眼視観測によるカタログであるが、南天の星表はどちらも写真観測に基づいている。

ゼーリガーはボン星表に基づいて銀河系内の星の分布の解析を行った [41]。銀河座標を設定し、銀河面に沿う星の表面密度を導く作業である。しかし、32 万個の星の座標変換はそれだけでも大変な作業である。それを避けるため、ゼーリガーは天域を 1 度平方に区分し、その中心点を銀河座標に変換する。次に銀河座標上でも同じように天域を 1 度平方に区分する。赤道座標上の平方角の中心が銀河座標でどこに対応するかを読み取り、その領域での星の数を読み取るという統計的手法で変換作業を進めた。

これによって星の表面密度が銀河面から銀極まで銀緯とともに減少することが定量的に示された [42]。この傾向は肉眼星でも見られるがゼーリガーは同じ傾向が 9.5 等星まで見られることを確認したのである。この密度分布からゼーリガーは、銀河系は扁平な恒星集団であろうと推測し、1889 年に最初の恒星系モデルを公表したが [43]、まだ、推論の段階であった。恒星系の構造は生涯にわたって追求する課題となる。

2.2　統計星学の導入

ゼーリガーの次の仕事は銀河座標の天域ごとに星の統計を取ることであるが、その出発点はウイリャム・ハーシェルの仮定した 2 つの前提の見直しから始まる[35]。

(1) 「すべての星は同じ明るさである。」この前提に対して、星の明るさはある分布法則に従う、としてその法則を「光度関数」と呼んだ。

(2) 「星の分布は一様である。」これに対し、星の空間密度は一様ではないとして、その分布則を「密度関数」と呼んだ。

こうして 2 つの統計的関数が導入された。これらの関数を星の表面密度(明るさごと、分光型ごと)から導くために、ゼーリガーは積分方程式を用いた。積分方程式とは未知の関数が積分の中に入っている方程式で、大局的な振る舞いから内部構造を知るときに使われる。

ゼーリガーは銀河を軸対象、扁平な構造を持ち、星間吸収のない星系としてそれを「理想的恒星系」と呼び、大局的な振る舞いとして星の表面密度を採用した。基本的な積分方程式は次のように書かれる。

$$A_m = \int \Phi(M)dM \int D(r)dr \qquad (1)$$

この式は次の関数で結ばれている。

A_m :恒星比関数（Star-ratio function)とよぶ関数、天空のある方向の単位面積内で m 等級までの星の数

Φ(M) :光度関数、 M は絶対等級

D(r)： 密度関数、 r は太陽からの距離

ここで Φ(M)と $D(r)$は未知関数である。絶対等級は光度 L で表わされ、積分範囲は $L=0$ から無限大までとする。

A_m はある方向について観測から得られる関数であるがゼーリガーはこれを

$$\log A_m = s_0 + s_1 m \qquad (2)$$

で近似した。ここで s_0, s_1 は銀緯に依存する定数で,s_1 は一般に 0.6 より小さい。

光度関数と密度関数は未知関数であるが、ゼーリガーは適当な関数形を仮定して、そこに含まれる係数を決定するという手法をとっ

た。まず、密度関数については恒星系の中心は太陽と考えていたので太陽からの距離 r の関数として

$$D(r)=\lambda r^{-\gamma} \qquad (3)$$

を導入した。λとγは(1)式の解のなかで決定されるべき定数である。

光度関数 $\Phi(M)$ について、ゼーリガーは当初、ある光度で極大頻度になるガウス型誤差関数を仮定していたが、後に修正し、指数関数型に置き換えて暗い星ほどその数が増加するように改めている。ゼーリガーは銀河座標の各方向について、また、種々の分光型の星について(1)式による解析を進め、銀河モデルの構築を行った。彼は吸収効果に大きな関心を持ち、暗黒星雲近傍の星計測などから吸収量の推定を行っているが、その量は光度関数に影響するほどではないとして、彼の「理想的恒星系」では星間吸収は考慮されていない。

積分方程式(1)において A_m は単位天域ごとの m 等級までの星数を表したものであるから、基本的にはウイリャム・ハーシェルの「星計測法」(源流 [18])と同じである。(1)式はいわばハーシェル「星計測法」の近代版といえる。

2.3 銀河系モデル

ゼーリガーはすでに述べたように銀河系における恒星分布の研究を 1889 年から始めているが [43]、その後は光度関数、密度関数などの統計的処理の理論的研究を続け、銀河系モデルをまとめて公表したのは 1920 年の最晩年になってからである [44]。これは「理想的恒星系」をまとめたもので太陽を中心におき、星間吸収を無視している。彼によると恒星系は銀河面方向に直径 1 万パーセク、銀極方向に 4000 パーセクの広がりを持ち、ほぼ回転楕円体状になっている。それを図 22 に示そう。

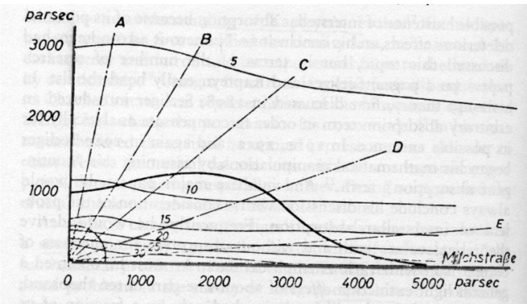

Figure 16 Seeliger's 1920 stellar system. The lines roughly parallel to the Milky Way – 30, 25, 20, 15, 10, and 5 – represent both planes of equal density and the degree (in percentages) of density vis-à-vis the Solar neighborhood (e.g., 30 = 30 percent of the density near the Sun). The lines A, B, C, D, and E refer, respectively, to the galactic latitudes 80°, 60°, 40°, 20°, and 5°.

図 22　ゼーリガーの銀河系モデル。「44」、「35、p.150」

この図で原点は太陽、横軸は銀河面に沿う太陽からの距離(pc)、縦軸は銀極方向の銀河面からの距離をあらわす。A,B,C,D,E は銀緯がそれぞれ 80°, 60°, 40°, 20°, 5° の方向を示す、また、銀河面に横に伸びる曲線は下から 30, 20, 15, 10, 5 となっているのは星の等密度面で太陽近傍の星密度に対するパーセントで表されている。原点近くの円弧内が詳しく観測された領域で、それより外側はゼーリガーが理論的に外挿して推定した値である。

2.4 イーストン（C. Easton）との論争

天空を流れる銀河は不規則な光の帯である。濃淡のさまざまな模様が天空を巡る大円を形成している。銀河の不均質性をどう見るか、それがゼーリガーとイーストンとの論争の要であった。ゼーリガーは上述したように、あくまでも恒星系の全体的な構造に着目し、統計的観点から恒星系は太陽からの距離と共に星の空間密度を減少していく体系である。それに対し、イーストン [45] は銀河の不均質性と星の分布との関係に注目する。

コルネリス・イーストン（Cornelis Easton, 1864 - 1929）は航海士 J. J. イーストンの息子としてオランダのドルトレヒト

（Dordrecht）で生まれた。パリのソルボンヌ大学で語学を学び、新聞や雑誌の記者となる。彼は少年時代からアマチュアとして天文学、特に銀河系の構造に興味を持っていた。銀河の明るさの分布を描き出し、銀河を幾多の領域に分けたスケッチを新聞に載せた。スケッチ集は「北天における銀河系」と題して1893 年にパリで出版された [46]。これらのスケッチはフローニンゲン大学のカプタインから大きく評価され、フローニンゲン大学から名誉学位が授与されている [45] 。

イーストンの次の興味は銀河のスケッチと星の分布との比較であった。そのため彼はボン星表に基づいて星数の計測を行った。その結果をスケッチと比較すると良い一致が見られたので、彼は銀河の構造について 1900 年に「銀河系は円環構造をもち、太陽は中心より外れたところにある」と仮定を立てた [47]。その後、さらに分析を進め、銀河のスケッチ模様が他の渦状銀河に似ているところから銀河系は渦状構造をもつという見解を発展させた [48]。彼の描いた銀河系の構造を図 23 に示そう。太陽は図の中心に描かれているが、銀河系の中心から離れている。周辺に主な星座が示されている。現代の銀河系像に似ているがイーストンでは銀河系の中心は白鳥座の方向にあった。

イーストンの論文[47]に対して、ゼーリガーは「銀河系内の星の分布が円環状であるとするアプリオリな理由はない。」と強い批判を行った [49]。「円環仮説は星の分布の統計的性質から見て誤っている」として、ゼーリガーはあくまでも太陽を中心とし、星の密度分布は太陽からの距離と共に減少していくという見解にこだわっていた。このため、太陽から離れた領域で星密度が増大する仮説は採用できないものであった。彼によれば銀河の明るい領域と暗い領域の存在は星の分布の統計的誤差の範囲を出ていない。ゼーリガーは星間空間の吸収体の存在を認めていたが、恒星系の統計には影響しないと考えていた。一方、イーストンもボン星表の星計測から始めているが、彼は全天の星をどの方向に二分しても、星の総数は等しくならないことから、太陽は恒星系の中心に無いと見なした。

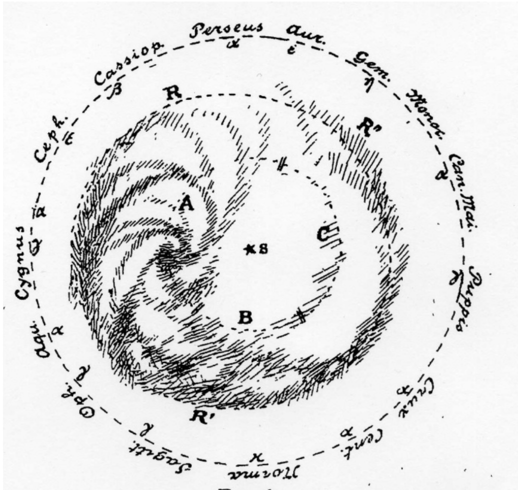

FIG. 6.

図 23　イーストンの銀河系構造、周辺に主な星座を示す。白鳥座の方向に銀河中心がある。[47]

ゼーリガーとイーストンの論争は平行線のまま終わったが、現代的な観点から見るとイーストンの円環説とそれを発展させた渦状説に利があるように見える。さすがのゼーリガーもアマチュア天文家に一本取られたという形であろうか。

3. カプタインの生涯

3.1　生い立ちから初期の研究

ヤコブス・コルネリウス・カプタイン（ Jacobus Cornelius Kapteyn, 1851 – 1922）は 1851 年 1 月、オランダのユトレヒ

トの東 40km ほどの小さな町バルネヴェルト（Barneveld）で生まれた。両親は寄宿学校の経営者で暮らしにはゆとりがあった。15 人の子供という大家族でヤコブスは 9 番目の息子である [1, Chapter 7]。

少年時代は愛鳥家であり、科学少年でもあった。14 歳の頃、妹の 1 人が星図を家に持ち帰ったことがある。彼はそれを見て、早速、夜空の探索を始めた。星ぼしの色や明るさの彩りに惹かれていた。父は星には関心がなかったがヤコブスのために小型望遠鏡を買って与えた。ヤコブスは熱心に観測をはじめ、市販の星図では満足できなくなって自分で星図の作成に乗り出した。これがヤコブスの天文学との関わりの始まりである。

17 歳でユトレヒト大学に入学し、数学と物理学を専攻する。大学院では当時、流体力学の新しい分野であった「膜の振動について」で学位を取得する。父はヤコブスが自分たちの学校経営を継ぐことを望んだが、ヤコブスは天文学への想いが強く、ライデン天文台に移って天文学を基礎から学ぶ。与えられた課題は恒星の年周視差の測定であった。ここで恒星天文学への目が開かれ、3 年間を過ごす。

1878 年（28 歳）、天文学および理論力学の教授としてフローニンゲン大学に赴任する。赴任にあたって、彼はユトレヒト大学時代の学友であったエリーゼ（Elise）と結婚する。エリーゼは陽気な娘であった。結婚の翌年から毎年、長女のヤコバ（Jacoba）、次女のヘンリエッタ（Henrietta），長男のガリット（Garrit）が相次いで誕生し、カプタイン家は急ににぎやかになる。父親のヤコブスは今で言えば子育てパパで、ベビーカーを押して市場に通うこともしばしばであったという。当時は大分人目についたらしい。なお、次女のヘンリエッタは後にイーネル・ヘルツシュプルングと結婚し、また、父カプタインの伝記も書いている [50]。カプタインは生来、飄逸で少々慌てものでもあった。あまりに傘の置き忘れが多いので、エリーゼから「もう傘は買ってあげません」と宣言されたこともあったというほどである。

彼の勤めるフローニンゲン大学は学生数 200－300 人程度の小規模大学であったから、予算の枠も限られていた。カプタインは 6 インチヘリオメータをもち、星の視差測定を目的とする天文台の設立を提案したが認められなかった。それから 10 年間、ライデン天文台に出張して観測を続け、視差の測定を行っていたが、成果は限られていた。ヘンリエッタによればそれは空白の時期であった。カプタインに転機をもたらしたのはケープ天文台のデービット・ジル（David Gill）の論文(1886 [51]）である。それは南天の写真掃天観測について、国際的協力を呼びかけるものであった。

カプタインはジルの呼びかけに応じて共同作業が始まり、ジルは観測、カプタインは乾板の測定を担当し、作業は 1892 年まで続く。その成果は 1896 年に南天の掃天カタログとして公表される [52]。こうして手元に北天のボン星表と南天のケープ掃天カタログが集まり、カプタインは本来の恒星天文学の研究に乗り出す。恒星系の研究にとってもっとも基本的な課題は星の距離の決定であった。恒星視差は 1838 年にベッセルらによって測定が始まって以来、少しずつ測定星の数が増えており、カプタイン自身も写真測定から 100 個あまりの視差を測定しているが、まだまだ数が少なく、また、測定された星も太陽近傍に限られていた。そのため、カプタインは統計的手法によって遠方の星の距離を推定する「平均視差」法を導入した。これはユトレヒト大学の数学教授であった兄のウイレム（Willem Kapteyn）との共同研究であった [53] 。

続いてカプタインは星の固有運動の統計的

研究を始め、1902年頃に星の固有運動が統計的に 2 つの方向に分かれることを見出した。これがカプタインの二星流説である。

1904 年にアメリカのセントルイスで世界万国博覧会が開かれた。会場の広大な敷地はフェスティバルホールを中心に世界中からのパビリオンが並び、夜は 50 万個のイルミネーションで飾られていた。その中で科学館はそれほど目立つ建物ではなかったが、ここでは世界各地から講師が招かれ、それぞれのテーマについて講演会が開かれていた。オランダからはカプタインが招かれたのである。

カプタインと妻のエリーゼはロッテルダムの港からアメリカへ向かった。これがアメリカへの最初の旅であった。

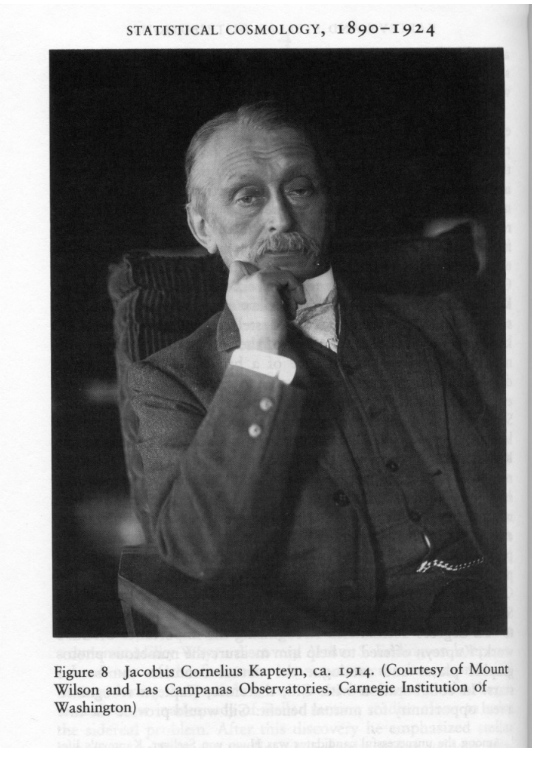

図 24　カプタイン肖像　1914 年頃の撮影 [1]

3.2　ヘールとの交流

ミズーリ州のセントルイスに到着したカプタインは万博科学館に集まった大勢の聴衆に、彼らしい軽快な口調で天文学の話題を紹介した。その中で彼が強調したのは彼自身の 2 つの見解であった。一つは二星流説、他は選択天域の選定と国際共同観測の提案である。

この講演会にはヤーキス天文台の若きジョージ・ヘール（George Ellery Hale、1868 - 1936）が出席していた。ヘールはシカゴ大学で写真観測用の観測機器の開発に取り組んでいた。1886 年にヤーキス氏（C. T. Yerkes）の援助をうけて 40 インチ反射望遠鏡をもつ、アメリカでも最も近代的なヤーキス天文台を創設した。彼は万博に参加した頃、太陽望遠鏡の建設を目指し、ワシントン・カーネギー協会へ資金の申請を行っていた。

ヘールがどういう経緯で万博講演会に出席したのかわからないが、彼はカプタインの講演内容と人間的魅力とに強い印象を受けた。特に興味を引いたのは二星流説が恒星系全体の立場から星の進化を捉えるという話題であった。これまでも星と太陽の進化については興味を持っていたが、銀河系内における進化という統計的視点は新鮮であった。

この万博での講演がきっかけとなってカプタインとヘールとの交流が始まる。ヘールはワシントン・カーネギー協会からウイルソン山に太陽天文台を建設する資金を得てウイルソン山に移り、太陽望遠鏡の建設に取りかかっていた。

1908 年にカプタインはヘールの招きによってウイルソン山に数ヶ月滞在するが、その後もしばしばウイルソン山を訪ねるようになる。その頃、彼は星間吸収の問題に取り組んでいた。星の統計から平均的な吸収量として 10pc 当り 0.016 等級という値を得ていたが、これはまだ信頼度が足りないと述べている

[54]（これは今から見ると 1 桁以上過少の見積もりである)。ウイルソン山で彼は星間吸収の測定に星の星間赤化が使えるのではないかと思いつき、ハーバード天文台の分光資料から赤化量として色指数（写真等級と眼視等級との差）を測定し、分光型、絶対等級別に統計を取って、確かに遠方の星ほど赤化量が大きいことを見出した[55]。しかし、赤化の原因ついては遠方の星に赤い星が多いためか、星間物質による散乱のためか、2 つの解釈が可能であった。このうち、ハロー・シャプレーは前者を主張し、カプタインも 2 つの可能性を認めた。どちらを取るべきか判断できないので、彼は「これ以上この問題に入らない」と宣言して星間赤化量の測定を断念してしまった。星間吸収量が少ない（[54]）という結果もあったので、カプタインはそれ以後、銀河のモデルでは星間吸収は無視している。

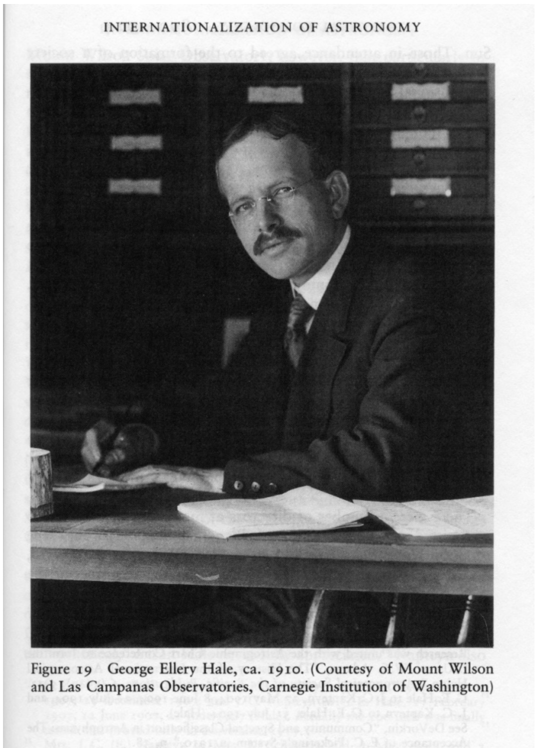

図 25　ジョージ・ヘールの肖像 [35]

1911 年、フローニンゲンのカプタインのところにポツダム天文台からヘルツシュプルングが訪ねて来た。それはヘールに紹介してほしいという依頼のためであったが、38 歳のヘルツシュプルングは娘のヘンリエッタと出会い、互いに愛情が芽生える。ヘルツシュプルングは 1905 年に晩期型星に巨星と矮星の区別を発見してから、その頃は HR 図の作成へと向かう時期であった（源流 [14])。しかし、星の分光型から視差を導くという分光視差の方法はカプタインの時代にはまだ生まれていなかった。

1912 年、カプタイン夫妻はヘルツシュプルングを伴って訪米の旅に出ることになった。ヘルツシュプルングは出発の前日にヘンリエッタとの婚約を宣言し、周囲を驚かせた。ニューヨークに着いた一行はハーバード天文台にエドワード・ピッケリングを訪ねる。ピッケリングとは選択天域の共同観測についての打ち合わせが主題であったが、その折、ヘンリエッタ・リービット（Henrietta Leavitt）に紹介される。彼女は 1904 – 1908 年に大小マゼラン雲の変光星を観測し、その中でケフェウス型変光星について周期光度関係を見出していた。これは有力な距離測定の手段になるが、当時はまだその段階に達していなかった。

1914 年に訪米した折、ヨーロッパでは第一次世界大戦が勃発し、航海の危険性のため、帰国できないという事態が生じた。しかし、オランダは中立国であったため翌年には無事に帰国する。これがアメリカへの最後の旅となった。

3.3　フローニンゲンと晩年の研究

フローニンゲンに戻ったカプタインは固有運動と視差に関する統計的考察に力を注いでいたが、1918 年頃から教え子であったファン・ライン（Pieter van Rhijn）と共同で銀

河系の構造の研究に集中するようになる。最初は恒星系における星の分布の研究であった。1920年にカプタインは定年退職するが､引き続き、ライデン天文台長のデジッター（Willem de Sitter）の招きでライデン天文台において研究を続ける。そして1922年に銀河系の構造を星の分布から恒星系の力学的構造まで議論を深めた試論を公表している。しかし、それは最後の仕事となった。前年にはロンドンで開かれた王立協会で講演を行っていた。1922年5月にハロー・シャプレーが銀河モデルについて議論するためフローニンゲンの自宅を訪ねたが、そのときはすでに病が篤く、面会できる状態ではなかった。こうして6月に永眠した｡享年71歳であった。

図 26　フローニンゲン大学本館の近影(2004)　出典 http://en.wikipedia.org/wiki/University_of_Groningen

なお、カプタインの研究室はその後、独立してカプタイン天文学研究所となり、現在に至っている。この研究所は観測装置を持たない理論的研究所としてはもっとも早い時期に創立されたものである。この研究所ではいまも銀河の大規模構造や活動銀河などの理論的研究が進められ、また、バーチャル天文台を通して大量のデータ集積と処理を行う国際的なセンターともなっている。

4. カプタインと銀河系

カプタインの仕事は3節で概観したように3つのテーマに分けられる。これらについてもう少し詳しく見てみよう。

4.1　恒星カタログの作成

カプタインはデービッド･ジル（David Gill, 1843 - 1914）との共同研究を通して南天の恒星カタログを製作する。

ジルはスコットランド出身、1878年（36歳）でケープ天文台長として赴任し、それ以後1907年まで南天の観測に当たる。1882年に乾式乾板による写真観測で彗星の鮮鋭な像が得られたことに大きな印象を受け、写真による全天のサーベイを開始した。ジルはパリ天文台長のムーシェ（M. I. Mouchez）宛の手紙という形で､国際協力を呼びかけた[51]。

この呼びかけに応えてカプタインはジルに､「ケープ天文台で撮影された写真の測定を試みたいので、写真ネガのサンプルを送って下さい。もし、測定に成功すればあなたに協力できると思います｡」と手紙を送った。ジルは早速､「協力の申し出をいただき､厚くお礼を申し上げます。互いの協力の中には科学における真の友情があると思います｡」と返信を送った。こうした交信を通して協力が始まり、1886年から1892年まで大量のネガがフローニンゲンに送られてきた。

カプタインは星の位置を写真乾板上から測定するのに、マイクロメータで測定する代わりに乾板を縦に置き、測量用経緯儀で数メー

トル離れたところから読み取ったという。こうして測定速度が著しく向上し、その速度はジルの予想を超えるものであった。こうして 1896 年に Cape Photographic Dürchmusterung (CPD)が完成する。南天の 454,875 星の位置と明るさを示すカタログである。これは北天のボン星表に当たるものであるが、ボン星表は星の位置をマイクロメータで計り、明るさを肉眼で推定している。それに比較し、ケープ写真星表は写真によって位置と明るさの測定精度を著しく向上させている。

4.2　二星流説と星の進化論

恒星系全体の構造を知るには視差、すなわち､星の距離の知識が不可欠である。しかし、年周視差で測定できる距離の範囲は限られたものであった。カプタイン自身も写真乾板上での測定を行っているが [56]、測定精度は 0.03 秒角程度であるから、100pc には達していなかった。(第 3 節で述べたように分光視差やケフェウス視差もまだカプタインの手元には無かった。)

そのため、カプタインが採用したのは統計的平均視差と彼が呼んだ値である。彼が注目したのは星の明るさと固有運動である。彼はまず、年周視差の知られている星について、星の固有運動μと視差 π との関係を表す次の公式を導いた。

$$\log \pi = A + Bm + C \log \mu \qquad (4)$$

ここで m は星の実視等級である。

この計算式を用いて、ある天域で固有運動の等しいm等星は同じ視差を持つとして、彼はそれを「平均視差」と呼んだ。この平均化によって視差の範囲は 500－1000pc に広がったと述べている。この測定法は当時ユトレヒト大学の数学教授であった兄のウイレムと共同で導いたもので、彼らは最初、太陽向点に向かう太陽の速度を差し引けば、すべての星の速度ベクトルはランダムな方向性を持つと仮定した。そのため、天球上で太陽向点を原点とする特殊な天球座標を用い [53]、この座標原点から同じ角度にある星の固有運動はランダムであるとして、μの平均をとり、実視等級mとあわせて(4)式の係数 A, B, C を決定するという手法で測定を行った。

ところが、平均視差の測定を種々の分光型や明るさの星について遂行してみると、天空の多数の方向についての結果に整合性が見られないという結果になった。太陽向点を原点とし、太陽の運動速度を補正すれば、すべての星はランダムに分布するはずであるが、そうはなっていなかった。

カプタインはそこで星の空間速度の方向はランダムであるという仮定を捨てて、再解析を行ってみた。その結果、空間速度には大局的に２つの方向があることを発見した。彼は星には２つの大きな流れがあると見て、それぞれを星流（star stream）と呼んだ。これがカプタインの二星流説である。カプタインはこの説を携えて 1904 年にアメリカのセントルイスに渡ったのであった。

２つの星流の１つはオリオン座方向に向かい、他はそれから 140 度離れたさそり座に向かう。現在はこれを銀河回転の見かけの運動として理解できるが、当時は恒星系の内部運動の発見として高く評価された｡1938 年に天文学の 40 年を振り返ったエディントンは「(カプタインの仕事は)恒星系に組織的構造の存在することを初めて示し、新しい時代を開く研究であった」と賛辞を送っている [57]。

その後、カプタインはヘールとの交流を進める中で、二星流の分光特性から星の進化論との関係を見出した。彼は 1914 年の論文 [55] で次のように考察している。

第１の星流はオリオン座に向かい、ヘリウム星が多い（分光型 O,B 星のことで、スペクトルに He を示す)、また、空間速度が遅い

という特質があり、年齢の若い星と想定された。一方、第2のさそり座に向かう星流は星の空間速度が速く、また、赤い星が多いので、この星流は古い星の群れである。

カプタインはさらに星雲の視線速度と運動方向との関係にも注目した。星雲を惑星状星雲と散光星雲とに区別すると、惑星状星雲、例えばウイリャム・ハギンスによって観測された猫の目星雲などは一般に大きな速度を示しており、第2星流に属する古い星の仲間とみなされる。これらは星の進化のエンドポイントに当たるのであろうとし、一方、散光星雲、例えばオリオン星雲などは星雲に結びついた星の速度が遅いことから、これらは第1星流に属し、星の誕生の場を表わすのであろうとした。こうして、カプタインは星の進化過程を次のようなシナリオで描いた。

> 「星は散光星雲の中でヘリウム星（O,B星）として誕生する。星は次第に表面温度を低下させながらK, M型へと進化し、最後に惑星状星雲になる。」

このシナリオは現在の進化論に近い、ただし、当時はまだ収縮進化論の時代であったから、星は主系列に沿って一方的に収縮に向かうという観点に立っていた。

4.3　銀河系モデル

カプタインは1920年のフローニンゲン大学定年退職の頃から、ファン・ラインとともに、国際的な選択天域観測で得られた大量のデータを用いて銀河系モデルの再検討を始めた。第1は「暫定モデル」と呼ばれる密度分布図（1920）、第2は「第1の試論」と呼ばれる銀河系構造論（1922）である。題目が示すように、これらはどちらもカプタインにとっては今後取り組むべき課題の序論をなすものであったが、その意図は彼の他界によって達成されなかった。これらのモデルについて次に述べよう。

(1) 1920年の「暫定モデル」[58]

これは恒星系の星の空間密度分布を星計測法から導いたモデルである。まず、銀緯±40°から銀極までの南北両天球の高銀緯の星について、選択天域の観測から得られた実視等級 $m = 12$ までの星に基づいて（4）式の係数を次のように導いた。

$$A = -0.691,\ B = -0.0682,\ C = 0.645$$

これは実視等級と固有運動から平均視差を与えるものである。

次に光度関数 $\Phi(M)$ （Mは絶対等級）についても経験的な関数形

$$\log\Phi(M) = A + BM + CM^2 \qquad (5)$$

を仮定し、同じ恒星データから係数を次のように導いた。

$$A = -2.304,\ B = +0.01858,\ C = -0.13450$$

これらの A, B, C の値は銀緯の高い天域に対するものであるが、さらに低い銀緯の星についても同様に平均視差、光度関数を導き、それによって銀河恒星系内の密度分布を求めた。それを図27に示そう。

この図で太陽は銀河面内の点Sにある。斜線は銀緯 30°, 60°, 90° の方向、曲線は等密度線で太陽近傍の平均密度との比 $\Delta\rho$ である。最も低い平均密度は $\Delta\rho = 0.01$ にとってある。この推定によると銀河は銀河面方向に中心から9000pc、銀極方向には3000pcまで広がっている。ここで銀極方向に凹みが見られるが、これは観測値の再検討によって後に修正された。

(2) 1922年の銀河モデル [59]。 恒星系の構造については暫定モデルの改良を行っているが、それに続いて、銀河系の力学的構造についても新しい構想を述べている。その概要は次のようにまとめられる。

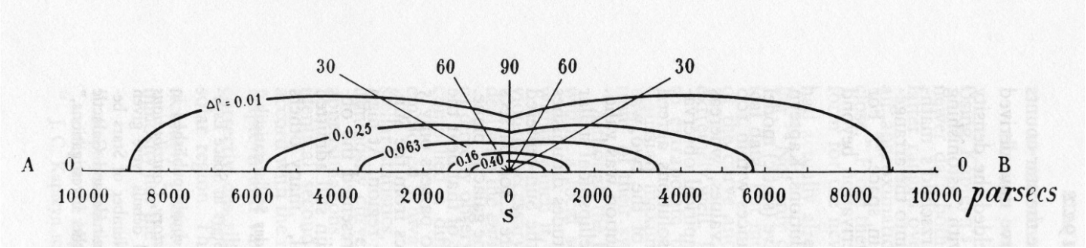

図 27　カプタイン・ファン＝ライン（1920）の恒星系モデル［58］

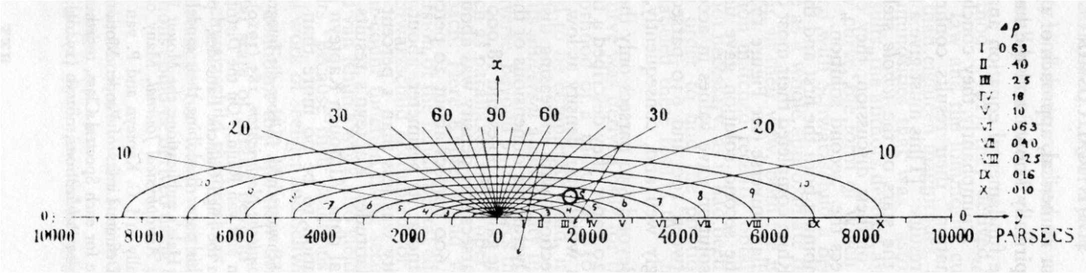

図 28　カプタイン（1922）の銀河系モデル[59]

1：銀河系の星密度の分布　恒星系は回転楕円体で近似できる。楕円体を 10 層に分け、太陽に近いところから I, II, ・・・X とする。その成層モデルを図 28 に示そう。銀極方向のへこみはすでに修正されている。この図で *x* 軸は銀極方向、*y* 軸は銀河面を表し、斜線はそれぞれの銀緯方向、曲線は等密度楕円体面の I から X 間での層に対応し、第 X 層の星密度は太陽近傍の 100 分の 1 である。図 27 で銀河は面内で中心から 9000pc、銀極方向は 1800pc まで広がっている。カプタインの銀河はゼーリガーに比べて銀河面でほぼ 2 倍に広がっている。

2：恒星系における重力の分布と恒星の総数。銀河を回転楕円体とみなし、星密度がわかると、星の相互間の重力加速度が計算される。星の平均質量をほぼ太陽並みと仮定すると、銀河を構成する星の総数は 476 億個と見積もられる。

3：銀河回転の可能性。星密度の分布が回転楕円体状であるとすると、銀河系は静止系ではありえない。必然的に銀極の周りを回転している。回転速度は第 III 層より外側では約 20 km/s である。しかし、星は同じ方向に回転するわけではない。その例は 2 つの星流に表れている。星流間の相対速度は 40km/s である。

4：銀河系の中心。太陽は銀河面から 650pc ほど離れている。

カプタインはこうした銀河系の構造論を展開しながら、「この構造論はまだ十分に整合されておらず、今後の検討が必要である」と述べている。しかし、その検討はついに果たされることはなかった。

5．おわりに

ゼーリガーとカプタインを比べてみるとその対比が面白い。2 人はともに恒星系の統計

的研究を主題としているが、前者は理論、後者は観測と手法はかなり異なっている。両者とも銀河構造を最晩年の仕事として取り組み、太陽をほぼ中心にすえたことや星間吸収を無視した点など、似たような銀河モデルを導いている。しかし、2 人の性格はまったく対照的である。ゼーリガーは厳正で少し近寄りがたいところがあるが、カプタインは飄逸で人に好かれるタイプである。2 人ともそれぞれの仕方で 20 世紀初頭の恒星系天文学に大きく貢献した。

文 献

[1] Belkora, Leila 2003, Minding the Heavens – The story of our discovery of the Milky Way, Inst. Of Physics Publ. (採録)

[35] Paul, Erich Robert, 1993, The Milky Way Galaxy and Statistical Cosmology, 1890 – 1924, Cambridge UP

[36] Hugo von Seeliger, Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Hugo_von_Seeliger>

[37] Seeliger, H. von 1908, AN, 178, 241, Über die Heiligkeit das Saturn bei verschwundenem Ring. (土星の輪の明るさ)

[38] Seeliger, H. von 1915, AN, 201, 273, Über die Anomalien in der Bewegung der inner Planeten. (水星の軌道運動の特異性)

[39] Eddington, A. S. 1925, MNRAS, 85, 316 – 318, Hugo von Seeliger （弔辞）

[40] Argelander, F. W. A., 1963, Astronomicshe Beobachtung auf der Sternwarte der Königlichen Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität zu Bonn, Bonn （ボン星表、改訂版）

[41] Seelilger, H. 1891, Neue Annalen der Koeniglichen Sternwarte in Bogenhausen bei München, Vol. 2, C1 – C4, Die Verteilung der in beiden Bonner Duchmusterungen enhalten Sterne und Himmel. (ボン星表に基づく恒星系密度分布)

[42] Seeliger, H. von 1886, München Ak. Sber., 16, 220, Über die Verteilung der Sterne auf der sudlichen Halbkugel nach Schönfeld's Durchmusterung.

[43] Seeliger, H. von 1889, München Ak. Sber., 19, 565, Betrauchungen über dei räumliche Verteilung der Fixsterne. （銀河系モデルの最初の論文）

[44] Seeliger, H.von 1920, München Ak. Sbr, 87 – 144, Untersuchungen über das Sternsystem. （晩年の銀河モデル）

[45] Easton, Cornelius, Encyclopedia, by Blaauw, A.,（弔辞） <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2_2830901275.html>

[46] Easton, C. 1893, La voie lactée dans l'hemisphère boreal, pp.71, G.Villars & f, Paris.（著書「北天における天の川」）

[47] Easton, C. 1900, ApJ, 12, 136 – 158, A new theory of the Milky Way.（銀河系の円環構造、太陽は円環の中心から離れた離心点にある。）

[48] Easton, C. 1913, ApJ, 37, 105 – 118, A photographic chart of the Milky Way and the spiral theory of the Galactic System.（銀河系の円環と渦巻き構造）

[49] Seeliger, H. 1900, ApJ, 12, 376 – 380, Remarks on Mr. Easton's article "On a new theory of the Milky Way" in the Astrophysical Journal for Sepember.

[50] Hertzsprung-Kapteyn, Henritta, The Life and Works of J. C. Kapteyn, (復刻版：1993, Kluwer Acad. Ubl.)

[51] Gill, D. 1886, Bull. Astron., 3, 161 – 164, Photographie astronomique. （パリ天文台長 M. I. Mouchez への公開書簡）.

[52] Gill, D. and Kapteyn, J. C. 1896, The Cape photographic durchmusterung for the equinox 1875, Darling & Son Ltd. London

[53] Kapteyn, J. C. and Kapteyn Willem 1900, Pub. Groningen Publications, 5, 1 - 87, On the distribution of cosmic velocities; 1906, Groningen Publ., 16, 13-19, Some useful trigonometric formulae and a table of goniometrical functions for the four quadrants. (平均視差の導入)

[54] Kapteyn, J. C. 1909, ApJ., 29, 46 – 48, On the absorption of light in space.

[55] Kapteyn, J. C. 1914, ApJ., 40, 187 – 205, On the change of spectrum and color index with distance and absolute brightness. Present state of the question.

[56] Kapteyn 1900, Pub. Astron. Lab. Groningen, Vol. 1, 1- 98, The parallax of 248 stars of the region around BD 35° 4013.

[57] Eddington, A. S. 1938, Forty years of astronomy, In Needham & Pagel (eds), Background to Modern Science, Cambridge Univ. Press, p. 167－178.

[58] Kapteyn, J. C. and van Rhijn, P. J. 1920, ApJ., 52, 23 – 38, On the distribution of the stars in space especially in the high galactic latitudes.

[59] Kapteyn, J. C. 1922, ApJ, 55, 302 – 328, First attempt at a theory of the arrangement and motion of the sidereal system」

小暮智一（京都大学 OB）

＊　＊　＊　＊　＊