

## 第99回アブダクション研究会開催のご案内

### アブダクション研究会

世話人 福永 征夫

TEL & FAX 0774-65-5382

E-mail : [jrfd117@ybb.ne.jp](mailto:jrfd117@ybb.ne.jp)

事務局 岩下 幸功

TEL & FAX 042-35-3810

E-mail : [yiwashita@syncreatep](mailto:yiwashita@syncreatep)

第99回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

(1) 第98回アブダクション研究会のご報告をします。

2014・9・27(土)に開催致しました、前回の第98回アブダクション研究会では、『『エドウィン・ハッブルの知見に学ぶ銀河の世界——ハッブル著・戎崎俊一訳「銀河の世界」(99・岩波書店)を解説発表する——』』というテーマで、**安平哲太郎氏にご発表をいただきました。**

安平氏には長期にわたる真摯な研鑽の成果を遺憾なく発揮されて、わかりやすく明快な解説発表をしていただきました。

発表の最後の部分では、安平氏から、宇宙論の基本的な事項にかかわる疑問の提起もなされて、出席者との間で交わされた議論も大変に有意義でした。

また、世話人がPCを使って、各種の銀河の壮大な映像を、皆様に見ていただくことも試みました。

まずは、すばらしい研鑽と探究の機会を得ましたことに対し、発表者にご出席の皆様にご心から感謝しお礼を申し上げます。

[1] ハッブル (Edwin Powell Hubble 1889-1953) は 1936 年に著わした、この「銀河の世界」(The realm of the nebulae) の第1章の冒頭で、

「宇宙の踏査は最近になって銀河の世界に突入した。

巨大望遠鏡の助けを借りて、それまで知られていなかった領域への前進がこの数十年ほどで達成された。

今は、宇宙の観測可能な領域が定まり、予備的な踏査が終わったところである。

これは、この踏査のいろいろな段階の報告である。」

と高らかに述べている。

[2] ハッブルが「イントロダクション」で記述する、科学研究論は自らの研究における実践に裏付けられた秀逸な見識と信念に満ち溢れており、後代に至るまで長く人口に膾炙するものとなるだろう。

ハッブルは、「観測家は一般に、一群のデータを蓄積するとともにその不確定性を評価しようとする。

データは、図で表わす方法によって研究され、いろいろな性質の間の関係が発見される。

理論家は、観測者が確立した経験則を調べるが、重要なのは、すでに観測された関係を説明する能力と、新しい法則を予言する能力である。」  
と述べている。

この著作の中では、随所で不確定性の評価に関する見解が示されているが、この点の的確さが、測定機器の精度の確保に困難を伴った時代において、ハッブルによる観測の成果を支えることになった要因の一つなのかも知れないと考えられる。  
この辺りの事実は、科学史研究における今後の解明を期待したいところである。

【3】「ハッブルの発見で最も重要なものは、ハッブル分類の発明、銀河内の変光星の発見と、それによる銀河の距離の測定法の確立、距離-赤方偏移関係および宇宙膨張の発見である。」（訳者の解説による）

【4】「赤方偏移-距離関係と宇宙膨張の発見は、わたしたちの宇宙観を根本からくつがえしたビッグバン宇宙論の「あけぼの」となる、極めて重要なものである。  
後退速度の解釈についての研究者の悪戦苦闘ぶりに注目してほしい。（福永注：このレポートの資料の中の 4. 速度-距離関係）  
銀河が太陽に対して乱雑な運動を持つなら、太陽に近づいている銀河と遠ざかっている銀河が、ほぼ同数になるはずである。  
ところが、遠ざかっている銀河の数が圧倒的に多いことが大変不思議だった。  
この事実を説明するために仮想的なK項が導入された。  
最終的にはハッブルによる距離の評価が決め手となって、このK項が距離にほぼ比例して増加することが明らかになった。」（訳者の解説による）

【5】ハッブルの「銀河の世界」は私たちが現代の宇宙論と複雑系の世界に誘ってくれるジャンプ台の役割を果たしてくれるだろう。

ハッブルの宇宙では、遠くの銀河が私たちから遠ざかっていき、アンドロメダのような近くの銀河は私たちに近づいてきている。  
このような宇宙の相補的な動きをどのように解釈すればよいのかは、今後の学術にとって大きな課題となるだろう。

【6】世話人はアレクサンドル・フリードマンがつとに示した（1922年）数理解に注目している。

「一般相対論の場の方程式を研究したフリードマンは、ハッブルが発見した形の膨張を予測する三種類の異なる宇宙の歴史を表現した、適用範囲の広い解を発見した。

その解のうち二つは、無限で境界のない宇宙を表わす。

それらの宇宙では、ランダムに選んだどの二点間の距離も、宇宙的時間が進むとともに大きくなっていく。

三番目の解は、膨張によって始まるが、やがて踵（きびす）を返して収縮しはじめる。

この宇宙では空間は有限で境界があり、ランダムに選んだ二点は最初は互いに遠ざかっているが、やがて接近してくる。

宇宙が実際にたどる道筋は、宇宙の膨張と、すべてのものを引き寄せる重力とのバランスによって決まり、そのバランスはたった一つの数で記述できる。

もし宇宙の質量=エネルギーの平均量（質量=エネルギー密度）がある臨界値より大きければ、いずれ重力が膨張に打ち勝ち、宇宙の膨張は減速していつか向きを変え、収縮に転じる。

しかし、もし宇宙の質量＝エネルギー密度がその臨界値より小さいと、宇宙は永遠に膨張し、薄まっていったらぼ空っぽになるだろう。

質量＝エネルギー密度が臨界密度と正確に同じであれば、重力によって宇宙の膨張は減速するが、その減速率は無限に遠い未来にちょうど膨張が止まる程度となる。」

(アダム・フランク＝水谷淳訳「時間と宇宙のすべて」(2012 早川書房)

〔7〕世話人が1996年以来提出している「ラティスの構造モデル」(Model of Lattice Structure)は自然や社会の系の相互作用一般を表わす相補性のモデルである。

これが論理的に示すところによれば、宇宙のシステムがサステナブルなネットワークであるための条件は、「膨張の力」と「収縮の力」が互いに拮抗する、ある臨界値を境にして、膨張が収縮に勝るといふ「膨張のフェーズ」と収縮が膨張に勝るといふ「収縮のフェーズ」が宇宙的な時間の流れの中で、相互に交代し循環することである。

\*\*\*\*\*

■主題に関するわれわれの現在および先行きの研鑽と探究、および実践のために資する糧とするために、『エドウィン・ハッブル著・戎崎俊一訳＝「銀河の世界」の知見に学ぶ』と題する資料を編集して、この案内状の最後部に掲載しました。

■この資料は、ハッブル著・戎崎俊一訳「銀河の世界」(99・岩波書店)を構成するイントロダクション＋全8章を、イントロダクション＋4章の範囲に絞って、次のように構成しました。

1. イントロダクション：科学の研究
2. 宇宙の踏査
3. 銀河の分類と性質
4. 銀河までの距離
5. 速度-距離関係

この著作の記述では観測データの明確化と外挿による事実の推定を基本に推論が進められているので、抜粋と引用に当たっては、割愛する部分を最小限に抑えて再録するようにしました。

■参考資料を次のように構成しました。

参考資料・その1 距離・等級・セファイド変光星

参考資料・その2 銀河は進化する

参考資料・その3 スペクトル型・温度・色

参考資料・その4 銀河の分布と構造

参考資料・その5 ハッブルの時代

参考資料・その6 ハッブルの法則

科学・技術の日進月歩の進展によりハッブルの時代の測定値には現在の測定値と異なる部分があり、数式の係数についても、また科学的な予測や見解についても同様です。

参考資料の目的の第一はこの点の補正です。

参考資料の目的の第二は構成の対象から外した他の4章の内容の幾分かの補いをすることです。

参考資料の目的の第三は科学者としてのハッブルの控えめの記述に補いをつけるとともに、

全体として分析的なハッブルの記述にある種の統一感をもたらすためのストーリー性を与えることにあります。

■参考資料の編成に当たっては、次の諸文献から必要な部分を抜粋し引用させていただきました。著者・訳者および関係の皆様のごすぐれた営みの数々に敬意を表し、深甚なる感謝とお礼を申し上げます。

桜井邦朋著『宇宙物理学入門』（2007＝講談社）

主婦の友社編『宇宙のしくみ』（2010＝主婦の友社）

スチュアート・クラーク著・水原文訳『宇宙』（2014＝ディスカヴァー・トゥエンティワン）

谷口義明著『宇宙進化の謎』（2011＝講談社）

アダム・フランク著・水谷淳訳『時間と宇宙のすべて』（2012＝早川書房）

ダニエル・フライシュ&ジュリア・クレグナウ著・河辺哲次訳『算数でわかる天文学』（2014＝岩波書店）

キース・J・レイドラー著・寺嶋英志訳『エネルギーの発見』（2004＝青土社）

\*\*\*\*\*

■皆様には、広域学の研究と研鑽のために、広域的な知識の多元的・多面的で包括的な研鑽と探究に、実りの多い成果を挙げられますようご期待を申し上げます。

■そのため皆様には、記述の各部分を相互に参照し、相互につき合わせ、相互に矛盾なく補完させ合いながら、積極果敢に、何度も繰り返して、整合的に読み取る、実行力を発揮して下さることに、心より期待しています。

\*\*\*\*\*

## （２） 各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします。

既存の領域的な知識をベースにして、新たな領域的な知識を探索し、それらを広域的な知識に組み換えて、より高次の領域的な知識を仮説形成的に創造することを目標に、アブダクション研究の飛躍を期して参りますので、各界、各分野、各層の皆様のご積極的なご参加をお願いします。

## （３） アブダクション研究会は、知識の広域化と高次化を目指し進化を続けて参ります。

1996年に設立されたアブダクション研究会は、地球規模の難題に真正面から対処するために、知識の広域化と高次化を目指し、いつまでも、真摯に、勇気を持って、粘り強く、積極的に、可能性を追求し、多様な探究を積み重ねて、一步一步進化を続けて参ります。

(4) 発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に、積極的にお申し出下さい。

皆様には、今後にも、ぜひとも発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に積極的にお申し出をいただきたく、お願いを申し上げます。お申し出は、通年的にいつでも、お受け入れを致します。上記の方向に沿うものなら、いかなる領域に属するいかなるテーマであっても、将来の可能性として、誠意を持って相談をさせていただき、実現に向けて調整を果たす所存であります。

## 記

◇ 日時： 2014年11月29日(土) 13:00~17:00(本会)  
17:15~19:15(懇親会)

◇ 場所： NEC企業年金会館 2階和室 (中山氏のお名前で申し込み)

東京都 世田谷区 代沢5丁目33-12 電話：03-3413-0111(代)

\* 当日の連絡先(岩下幸功・携帯電話)070-5541-4742

\* 小田急線/京王・井の頭線 下北沢駅 下車 徒歩約8分

\* 会場の地図は、グループメールのブリーフケース内「下北沢 NEC 厚生年金基金会館 Map」に記載。

<http://groups.yahoo.co.jp/group/abduction/files/>

◇ テーマ：

『ジノ・セグレに学ぶ「温度と宇宙・物質・生命」  
——セグレ著・桜井邦朋訳「温度と宇宙・物質・生命」  
(2004・講談社ブルーバックス)を輪読して新たな領域の  
知見を研鑽する——』

——解説発表の分担(敬称略)——

発表者は、A4・5枚程度の要約を出席者に配布してください。

要約文の文字の大きさは問いません。

- [1] 第1章 37.0度C 北村 晃男
- [2] 第2章 尺には尺を 中山 貞望
- [3] 第3章 地球を読み解く 大河原 敏男
- [4] 第4章 極限状況下の生命 八尾 徹
- [5] 第5章 太陽からのメッセージ 福永 征夫
- [6] 第6章 量子飛躍 福永 征夫

——発表の要領——

■解説発表 20分；質問 10分；計 30分です。時間を厳守してください。

■アブダクション研究会は、さらに新たな知識の領域に漕ぎ出します。  
会員の皆様には、積極的なご参加をお願いします。

\*\*\*\*\*

◇プログラム：

- (1) 解説発表[ PART-1 ] 担当：北村・中山・大河原 13：00～14：30  
    <小休止> 14：30～14：35
- (2) 解説発表[ PART-2 ] 担当： 八尾・福永・福永 14：35～16：05  
    <小休止> 16：05～16：10
- (3) 総合的な質疑応答： 16：10～16：55
- (4) 諸連絡： 16：55～17：00
- (5) 懇親会： <皆様の積極的なご参加を期待しています> 17：15～19：15

\*\*\*\*\*

第99回 アブダクション研究会（11/29）の出欠連絡

●11/24（月）までの返信にご協力下さい。ご連絡なしの当日出席も無論可ですが、会場や資料の準備の都合もありますので、できるだけ、ご協力くださるようお願いいたします。

FA X： 042-356-3810  
E-mail： [yiwashita@syncreatep](mailto:yiwashita@syncreatep) 岩下 幸功 行

●11/29(土)の研究会に、出席 未定ですが調整 します。●懇親会に、出席 未定ですが調整 します。  
欠席 欠席

ご署名 \_\_\_\_\_

\*\*\*\*\*

■次々回 2015 年 1 月度の第 100 回アブダクション研究会は、  
2015 年 1 月 24 日(土)に、NEC 会館 1F 中会議室で開催します。

■2015 年 1 月度の発表者とテーマは、次の通りです。

発表者 : 澤 宏司 氏

テーマ : 『アブダクションと「やわらかい論理」』(仮題)

発表者は、数学・論理学・哲学・自己組織性などの学術研究者であるとともに、日本女子大学付属高校の有力な教員です。

#### ＝参考文献のご案内＝

- (1) 世界の名著 パース・ジェイムズ・デューイ 中央公論社  
第四章 人間記号論の試み pp.128-167
- (2) 内部観測 郡司ペギオ-幸夫 松野孝一郎 オットー・E・レスラー  
青土社  
特に 適応能と内部観測 含意という時間 郡司ペギオ-幸夫  
(できれば松野孝一郎の論文2編もお読みください)

■皆様には、大いにご期待をいただき、奮ってご参加ください。

\*\*\*\*\*

#### <定例アンケート調査>

もしご協力がいただければ、という趣旨であり、必須ではありません。  
皆様のメッセージ集として他の会員にも伝達しますので、情報の交流に積極的に参画下さい。

- (1) 今、アブダクションの研究・実践と関連のある事項で特に興味をもって取り組んでおられること。
- (2) 研究会の議論の場を通して INTERSECTIONAL なアイデアや知見の INCUBATION が進んでおり、例会で発表したいと思っておられること。
- (3) これまで(第1回～第98回)の研究発表やなされた議論(「議事録」を参照下さい)に関して、さらに改めて質疑

や意見を表明したいと考えておられること

- (4) アブダクションの観点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
  - (5) 細分化された「知」の再構築を図るという視点から、注目すべき人・研究グループ・著書（古今東西不問）。
  - (6) 貴方ご自身がお考えになられている「知」の定義とは？
  - (7) その他のご意見、ご要望、連絡事項など。
- 特に他学会・研究会での発表内容や発表論文等についても是非お知らせ下さい。

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

\*\*\*\*\*

# 『エドウィン・ハッブル著・戎崎俊一訳＝ 「銀河の世界」の知見に学ぶ』

## 1. イントロダクション : 科学の研究

### 【1】観測的な方法を使う研究者の場合

◇科学の方法は、まず法則を発見し、その法則を理論で説明し、そして最終的には、私たちが住む、この世界の物理的な構造と作用を理解することを目標としている。

◇実際、研究はいろいろな方法で行なわれる。  
観測的な方法を強調する人もいれば、理論的な視点を強調する人もいる。

◇観測家は一般に、一群のデータを蓄積するとともにその不確定性を評価しようとする。  
データは、図で表わす方法によって研究され、いろいろな性質の間の関係が発見される。

◇例えば、データが銀河の見かけの明るさとそのスペクトルの赤方偏移を示しているとする。  
これらの言葉の意味は後で説明するので、ここでは単なる2つの観測量AとBだと考えてほしい。  
1つの性質がもう1つの性質に対して図にプロットされると、平均としては明るさが減少するにつれて赤方偏移が大きくなること、つまり、暗い銀河ほど大きな赤方偏移を持つことが明らかになる。

◇その結論は、たとえそれが定性的なものであったとしても重要である。  
その信頼性は、その正確な関係が数学的な形で表現されれば、一段と上昇する。

◇プロットされた点を通る多くの異なる曲線が引けるかもしれない。  
そのどれも特定のデータをかなりうまく説明している。  
観測者は、その曲線の中で、一般的な知識体系と辻褃の合う、最も単純なものを選ぶ。

◇今考えているような特別な場合では、後でわかるように、赤方偏移と、銀河の暗さによって示される距離の間の線形関係が選ばれた。

◇しかし、その関係は唯一のものではない。

真の関係は観測で測定された領域では線形に近いが、このデータの中で最も暗い銀河よりも暗い銀河の領域では、直線から大きくずれるかも知れない。

この可能性は、採用された関係を外挿、つまり、まだ観測されていない領域まで延長し、新しい観測と比較することで調べられる。

この時、しばしば最初の関係に対する、小さなあるいは大きな修正が必要なことがある。

このような場合、研究は漸次的な近似により進んでいると言われる。

◇しかし、赤方偏移の研究においては、はっきりとした修正は必要なかった。

線形関係は、度重なる検証を耐え抜き、少なくとも近似的には、現在の装置で観測可能なすべての領域では正しいことがわかった。

◇したがって、観測限界の距離の範囲外においても、赤方偏移は近似的に距離の線形関数であるという新しい法則が導かれた。

観測の限界より遠いところでは、その関数形は推測の域を出ない。

このため、この法則は経験的なものであり、ある確立された理論によって説明されるまでは、経験的なものであり続ける。

◇距離と赤方偏移との関係は、何人かの研究者によって、すでに適当な理論が定式化されており、そして彼らはそれが正しいと信じている。

このどれが正しいのかは、さらなる研究によって決められるだろう。

◇赤方偏移の特別な場合について長々と議論してきたのは、それが観測的な方法を示す、かなり適切な例であるためである。

それほど多くないデータが得られ、その結果が一般的な知識を背景として説明される。

そして、外挿と検証、さらに適切な修正という過程に入る。

観測と、その結果得られたデータの相関を説明する法則は、知識の体系に永遠に貢献する。

解釈と理論は、背景の広がりにより変化する。

研究は外に向かって進み、ある与えられた中心の周りの観測可能な領域、つまり確実な領域の知識は発達する。

その地平線を超えて推測の領域が広がる。

観測者が冒険に乗り出すのならば、経験則を海に放り投げ、別の観点からの矛盾を探すしかない。

## 【2】理論的な方法を使う研究者の場合

◇一方、理論的な研究者は、別の方法を使って研究する。

観測者が確立した経験則を調べる。

それらの間に共通の要素を抽出し、つまり観測されたいろいろな関係から推測して、ある1つの命題に集約する。

言い換えると、彼は法則を説明する理論を発見しようと努力するのである。

理論への前進は論理的思考、もしくは直感によって行なわれるが、どちらの方法が使われたのかは重要ではない。

重要なのは、すでに観測された関係を説明する能力と、新しい法則を予言する能力である。

◇基本的な理論と、それから着実に導き出される、いろいろな関係は、宇宙の特定の視点や宇宙全体そのものに適用できる矛盾のない知識体系を形成する。

モデルの創始者は、どれくらいよく現実と一致するかを見るために、モデルを自分自身の周りの世界に投影する。

もし彼が有能であれば、知られた経験的な法則を、その理論体系の中で自然と落ち着くべき場所に落ち着かせることができ、新しい法則を予言することができる。

この挑戦の成功は、その理論で予言された関係が観測によって確認されるかどうか大きく依っている。

もし、そのような検証が不可能ならば、その知識体系の価値は、これまで知られてはいたが関係ないとされていた関係に、どれだけたくさんの秩序と類縁関係を見出したかで決まる。

高いレベルの体系化がなければ、その理論は単なる推測と見なされる。

◇たくさんの理論が提案されるが、検証に生き残るものはあまり多くない。

一般に、知識体系は次第に増加していく知識と一致するよう、時々修正されなければならない。

理論化する能力は、きわめて個人的なものである。

それは、技能、想像力、論理、そして他の何かを含んでいる。

傑出した天才が、成功する新しい理論を発明する。

一流の研究者がそれに続き、同じモデルにおける他の理論を導き、発展させる。

比較的有能でない人は、予言の検証に苦勞する。

◇理論的な研究者は、周辺から核心へと向かう研究をする場合が多く、観測家は核心から周辺へと向かう研究をする。

後者は外に向かって探求し、前者はある意味においては内に向かって探求する。

両者が出合った時、彼らは一般的な知識体系の正しさについて確信を抱く。

◇理論と観測の区別がはっきりしている場合は少ない。

ほとんどすべての研究では、2つの方法が併用される。

それらの重要性も場合によってかなり違う。

研究者は、その好奇心を満足させようと試み、そして、目標に到達するのに必要な、理にかなった道具を使うように慣らされている。

そのいくつかの一般的な特性の1つは、確認されていない推測に対する健康的な懐疑主義である。

これらは、検証がなされるまでは議論の題材としかみなされない。

その後初めて、研究の対象となる資格を得る。

◇私は基本的には観測者である。

以下に続く章では、天文学の研究の新しい時代の発展、つまり銀河の世界の探求を記述している。理論的にせよ推測的にせよ、説明よりは観測データ、つまり確かな知識に記述の中心が置かれている。

◇テーマは新しく、データは荒く、発達期における議論のしすぎの危険性がいつも存在する。

したがって、取り扱う対象は一般に直接的なものに限定し、純化された定量的な研究でしばしば使われる、複雑な方法は使わないようにした。

例えば、データの解析は、数学的な手法よりは図を使った方法に依るようにした。

そのため、ある特定の専門用語が頻繁に現れる。

◇本書では、それらの専門用語は、距離と光度の単位と、ある特定の型の変光星に関するものに限られる。

\*\*\*\*\*

## 参考資料・その1 距離・等級・セファイド変光星

## 1. 星までの距離

■星までの距離の求め方で、もっとも基本となるのは、地球上での三角測量と同様に三角法を用いる幾何学的方法である。

例えば、100メートル離れた場所に立っている木の見かけの角度が30度だったとすると、木のてっぺんから根元までを直接物差しを使って測らなくても、三角比を用いて木の高さがおよそ60メートルであることがわかる。

逆に高さ60メートルの木が角度で30度に見えたとすれば、その木までの距離はおよそ100メートルである。

■星までの距離はたいへん遠いので、地球が太陽の周りを半周したときに星の見かけの位置がどれだけ動いたかを測定することで、導かれる。

星が動いた大きさ（角度）の半分を年周視差という。

■天文学者が天体の年周視差を観測し始めたのは16世紀、望遠鏡が発明される前のことだった。その時点では、星への距離の測定ではなく、ニコラウス・コペルニクスによって提唱された、地球は不動ではなく太陽の周りの軌道を回っているという根本的に新しい仮説の検証が目的だった。星々が見かけの位置を変えることを観測できれば、地球が動いていることが証明できると考えたのだ。

■地球が半年ごとに半年ごとに公転軌道の反対側に位置するために視差が発生する。

視点の位置がおよそ3億キロメートル、つまり地球の軌道の直径だけ変化することによって、星の見かけの位置がわずかに移動するのだ。

考え方は単純だが、実際にこれを検出することはなかなか難しい。

■多くの試みが行われたにもかかわらず、16世紀や17世紀には視差は観測されなかった。

ガリレオの望遠鏡でも、その後改良された望遠鏡でも、地球が動いているという確証は得られなかったのだ。

星はあまりにも遠いため、わずかな距離しか動かないことがその理由だった。

■しかし、ついに1838年になって、この現象が初めて観測された。

フリードリヒ・ヴィルヘルム・ベッセルが、白鳥座61番星の位置を繰り返し測定し、わずかな視差を示すことを発見したのだ。

これによって彼は、（三角法によって）この星が約93兆キロメートル、つまり9.8光年離れていると計算した。

■ベッセルの視差の測定からすぐに、他の天文学者たちによって、他の星についても測定が行われた。

すばらしい進歩ではあるが、この測定は非常に困難で誤差を伴う。

20世紀の最初の10年までに、天文学者が視差を測定できたのは約100個の星だけだった。

現在では、衛星での測定によって10万個を超える星々の視差が測定されているが、すべて天の川銀河内の、しかも1000光年未満の距離の星だ。

幸いなことに、これらの星の一部はセファイド変光星でもあるので、これによってセファイド変光星の絶対的な明るさを求めることができ、距離のはしごの最初の段をそれ以降の段と関連づけられるようになった。

■年周視差が1秒角（1/360度）だったとき、その星までの距離を1パーセクとする。

天文単位は、太陽と地球の平均距離で、1天文単位は、およそ1億5000万kmである。

天体の視差とは、天体の距離から見たときに、1天文単位によって張られる角である。

1パーセクの距離は、およそ20万6000天文単位になり、1億5000万kmを掛けると、およそ30兆8000億kmということになる。

1パーセクを、光が1年間で進む距離（これを1光年という）の単位で表わすと、およそ3.3光年である。

## 2. 見かけの等級

■たまにしか夜空を見ない人でも、星々の明るさに違いがあることには気づいているはずだ。2000年以上前、ギリシャのヒッパルコスが綿密に星々の位置と明るさの等級を記録し、850個の星のカタログを作成した。

彼は明るさを測定する機器は持っていなかったため、単純に肉眼で明るさを見積もった。

最も明るい星々を「1等星」と呼び、最も暗い星々を「6等星」と名付け、そして残りをその間の等級に割り振ったのだ。

驚くべきことに、天文学者たちは、この一見粗雑な等級システムを今でも使っている。

■しかし、測定機器の進歩によって、ヒッパルコスの6つの等級は拡張されることになった。

天体から単位時間（例えば1秒）、単位面積（例えば1平方cm）当りにやってくるエネルギー（これをフラックスという）の大きさをはかったところ、6等星のフラックスは1等星のフラックスのおよそ1/100であることがわかったため、現在、等級は以下に示すポグソンの式で定量化されている。

$$m - m_0 = -2.5 \log(f / f_0)$$

logは常用対数と呼ばれるもので、フラックスfが1/100になると $\log 0.01 = -2$ なので、等級の値は5だけ大きくなる。

非常に明るい星々には現在マイナスの値が割り振られている。

そして反対に、望遠鏡の助けを借りなければ見えない星々にも6以上の数が割り当てられている。

地上からは、最も性能のよい望遠鏡で24等級から27等級の星々を検出できるが、地球の大気による歪みの影響を受けない軌道上のハッブル宇宙望遠鏡では、30等級の星々を検出できる。

1等級ごとに明るさは、およそ2.5倍になるので、30等星は肉眼で見える星よりも35億倍も暗いことになる。

■上記の式を使えば、1等星よりさらに100倍明るい天体はマイナス4等星、6等星の1/100の明るさの星は11等星といったように、明るい側にも暗い側にも拡張することができる。

■さらに、1.0等星より1.1倍明るければ0.9等、1.01倍明るければ0.99等といったように、小数を使って等級の違いを細かく表わすことができる。

■現在の定義を使うと、例えば、北半球から見える星の中で一番明るいシリウス（おおいて座 $\alpha$ 星）の見かけの等級はマイナス1.44等、私たちが住む地球に最も近いケンタウルス座の $\alpha$ 星の見かけの等級はマイナス0.01等と表わされる。

なお、太陽の見かけの等級はマイナス26.78等である。

## 3. 絶対等級

■しかし、明るさを測定する際、発光体の明るさはそれ自身が実際に発する光の量の他に、観測者からの距離にも影響されることは忘れられがちだ。

つまり、非常に明るい星をずっと遠くで見ると、暗い星を近くで見たほうが、明るく見えるこ

とがある。

■この明るさの現象は「逆二乗測」と呼ばれる法則に従い、距離が2倍になると明るさは1/4となる。

距離が3倍になれば、明るさは元の1/9になるのだ。

■この区別をするため、距離の影響による補正を行う前の、測定されたままの明るさを「見かけの」明るさと呼ぶ。(見かけの明るさの等級が、見かけの等級)

その逆の「絶対的な」明るさとは、距離の影響による補正を行った明るさのことだ。(絶対的な明るさの等級が、絶対等級)

■ベテルギウスという赤い星は、見かけの明るさの等級では0.58だが、絶対的な明るさの等級では-5.14となる。

実際には非常に明るい星なのだが、比較的遠くにあるため、こうなるのだ。

逆に、太陽は非常に近くにあるため、見かけの明るさの等級は-26.7で、一番明るい天体となっている。

しかし、距離による補正を行うと4.8になってしまう。

別の言い方をすれば、偉大な太陽は地球の生命を育む上では重要だが、どこにでもある平均的な星に過ぎないということになる。

■絶対等級 M は、太陽から 10 パーセク (約 33 光年) の距離のところに星々を置いたと想定したときに、星々が示す見かけの等級 m であり、絶対等級と見かけの等級には、

$$M=m+5-5\log d$$

の関係が成り立つ。M は絶対等級、m は見かけの等級、d は距離を表わす。

## 4. セファイド変光星の周期—光度関係

■測量の原理ではどうしても測ることができない星までの距離は、まるで灯台のような道しるべとなる道しるべとなる星の発見によって、測定できるようになった。

■恒星の中には、周期的に明るさを変化させる変光星がある。

変光星には、さまざまな種類が、その中のセファイド(「ケフェウス座の」という意味)というタイプの変光星は、数時間~数十日の正確な周期で明るさが変わる。

■この種の星として最初に観測されたケフェウス座デルタという星が、1784年に若い天文学者ジョン・グッドリックの関心を引きつけた。

グッドリックはその明るさの増減を記録し、周期が128時間45分であることを突き止めたのだ。

■20世紀の最初の10年までには、変光周期の短いものから長いものまで、多くのセファイド変光星が天の川銀河の中に発見されていたが、距離と絶対等級を決めることが困難だった。

■この問題が解決される前に、小マゼラン銀河の中のセファイド変光星の中に、非常に高い信頼度で新しい性質が、ハーバード大学天文台で観測に当たっていたヘンリエッタ・リーヴィットによって発見された。

■小マゼラン銀河は独立な恒星系で、天の川銀河の非常に近くにあり、実際、伴銀河になっている。これは、観測者から、ほぼ同じ距離にある星の標本を研究できる、ほとんど唯一の機会を与えてく

れる。

この銀河の距離では、最も明るい星（巨星と超巨星）だけしか観測できない。

しかし、この欠点は小マゼラン銀河の中では相対的な見かけの明るさが、そのまま相対的な本当の光度になるという事実によって、埋め合わされている。

[福永注：

$M=m+5-5\log d$  において、同じ距離の2つの変光星、変光星1と変光星2の絶対等級  $M$ 、見かけの等級  $m$ 、距離  $d$  を代入する。

$$M_1 = m_1 + 5 - 5\log d_1 \quad \dots \quad (1)$$

$$M_2 = m_2 + 5 - 5\log d_2 \quad \dots \quad (2)$$

$$M_1 - M_2 = m_1 - m_2 + 5 - 5 - 5\log d_1 + 5\log d_2 \quad \dots \quad (1) - (2)$$

$$M_1 - M_2 = m_1 - m_2 \quad \dots \quad +5 \text{ と } -5 \text{ を消去し、} d_1 = d_2 \text{ なので } (-5\log d_1) \text{ と } (+5\log d_2) \text{ を消去する。} \dots \quad \{(1) - (2)\}$$

{(1) - (2)} から、 $m$  における差はそのまま  $M$  の差となり、 $M=m$ 一定数 となる。]

■すなわち、同じ距離の2つの変光星、変光星1と変光星2の絶対等級  $M$ 、見かけの等級  $m$  の間には、 $m$  における差はそのまま  $M$  の差となり、 $M=m$ 一定数 となる、という関係があるのだ。

■20世紀の最初の10年までに、天文学者が視差を測定できたのは約100個の星だけだった。幸いなことに、これらの星の一部はセファイド変光星でもあるので、これによって  $M=m+5-5\log d$  で、セファイド変光星の絶対的な明るさを求めることができた。そして、いくつかのセファイド変光星から、 $M=m$ 一定数 における定数の値が求められた。

■1912年、ヘンリエッタ・リーヴィットは、小マゼラン銀河の中のほぼ同じ距離にある複数のセファイドに着目し、変光周期と明るさの間に一定の関係（周期が長いほど絶対等級は明るい）を発見した。

この関係を周期—光度関係という。

この発見により、銀河系内や他の銀河にあるセファイドの周期を測定することで、絶対等級がわかるようになった。

そして、絶対等級を観測される見かけの明るさ（実視等級）と比較することで、星までの距離がわかるようになった。

■この事実は、英国の天体物理学者アーサー・スタンレー・エディントンがセファイド変光星の活動を説明したことによって、最終的に確認された。

外部への放射の一部が星の表面にとらえられることによって表面が膨らみ、その後放射が放出されることによって再び縮小する、というメカニズムをエディントンは解明した。

さらに、彼は星の密度で変光周期が決まることも示した。

つまり、たとえば5日半の変光周期を持つすべてのセファイド変光星は、互いにうりふたつで、同じ光度（絶対等級）を持つのだ。

■セファイド型の変光星は、私たちの銀河系の中にも、たくさんあるため、これらを調べることで、銀河系の大きさや、太陽系が銀河系の端に近いところにあることなどがわかった。

続けて、ハッブルがアンドロメダ銀河（M31）に12個のセファイドを見出し、M31が銀河系の外にあることを発見した。

■セファイドは、他のさまざまな銀河でも発見され、それらの距離の測定によって、全天に分布している渦巻き状の星雲（渦巻銀河）は、すべて遠く離れた銀河であり、私たちの銀河系は数多くの銀河のひとつであることがわかってきた。

そして、ようやく広大な銀河の全体像が考えられるようになる。

天文学にとってセファイドは、宇宙に散在する灯台のような存在として、宇宙像の解明の手助けと

なった。

■さらに明るい標準光源は、星の爆発であるIa型の超新星だ。  
この爆発は、死んだ星の燃え尽きた芯が、近くにある生きた星からガスを吸い寄せることによって起こる。

このガスが死んだ星の表面に降り積もり、質量を増大をさせる。  
この質量がチャンドラセカール限界（インド人物理学者の名にちなむ）と呼ばれる明確な閾値を超えると、その星はもはや自分の重さを支えきれなくなって崩壊し、巨大な爆発を起こす。

■このタイプの超新星はすべて、中心の星が、この質量限界に達して崩壊することによって起こるので、この天体の大爆発によって宇宙に放出されるエネルギー量はいつでも同一となる。

■Ia型の超新星はセファイド変光星よりもはるかに明るく、通常の星々を1000億個集めたよりも強く輝くので、宇宙全体から観測できる。

問題は、この天体の爆発が予測不可能で、実際に爆発が起こるまでどの星が爆発するかは天文学者にもわからないことだ。

統計的には、どの銀河でも1世紀に1個の割合で超新星が発生するので、見つけるためには常に見張っている必要がある。

■Ia型の超新星が見つければ、その銀河の距離は、同様の超新星爆発を示した他の銀河との相対値として計算できる。

これは、セファイド変光星を含む銀河同士の場合と同様だ。

したがって、これら2つのはしごの段を組み合わせるためには、セファイド変光星のある銀河で超新星を観測する必要がある。

より多くの銀河でこれができる、さらに精度を高めることもできる。

しかし、どちらの方法でも相対的な距離しかわからない。

\*\*\*\*\*

## 2. 宇宙の踏査

### 【3】銀河の領域に対する現在の大まかな認識

◇宇宙の踏査は最近になって銀河の世界に突入した。[福永注：この著作は1936年に出版された。]  
巨大望遠鏡の助けを借りて、それまで知られていなかった領域への前進がこの数十年ほどで達成された。

今は、宇宙の観測可能な領域が定まり、予備的な踏査が終わったところである。

この著作は、この踏査のいろいろな段階の報告である。

◇私たちが住んでいる地球は太陽系の一員で、太陽の周りを公転する惑星である。

太陽は天の川銀河という、何百万という星でできた集団に属している。

天の川銀河は宇宙に孤立して存在している。

私たちは、天の川銀河の中の星の群れを透かして、外に広がる広大な宇宙を見ることになる。

◇宇宙は、ほとんど空虚だが、膨大な距離をおいてあちらこちらに、天の川銀河と同じような恒星でできた系がある。

銀河は非常に遠いので、最も近いもの以外はそれらを作っている個々の星を見ることはできず、ぼんやりとした光の斑点として見える。  
それらは「星雲 (nebulae)」や「雲 (clouds)」とずっと昔に名付けられ、その性質についていろいろな議論が行なわれてきた。

◇しかし今、巨大望遠鏡の助けを借りて、銀河の大きさと明るさなどいくつかの性質がわかってきた。

また、その外観からは距離のおおざっぱな桁がわかる。

銀河は、望遠鏡で見ることができ空間にあまねく分布している。

大きくて明るい少数の銀河は近い。

より小さく、より暗い銀河まで見ると、その数は次第に多くなる。

それはより遠い場所を見ることと同じである。

最も大きな望遠鏡で検出できる最も暗い銀河を見たとき、知られている宇宙の端まで到達したことになる。

これが、私たちの観測できる宇宙の地平線である。

◇宇宙は、直径が約 10 億光年の巨大な球である。

この球の中にいろいろな進化段階にある、約 1 億個の銀河が散らばっている。

銀河は孤立している場合もあるが、群を作っている場合もある。

さらには巨大な集団を作っている場合もある。

しかし、大きな領域で平均すると、群れを作る銀河のこの傾向は打ち消される。

つまり、望遠鏡で到達できる限界の大きさで見ると、銀河の分布はほぼ一様である。

◇もう一つ、銀河の重大な特徴が発見されている。

それは銀河から私たちに届く光は、旅をしてきた距離に比例して赤くなっていることである。

この現象は速度—距離関係と呼ばれ、理論的には銀河が天の川銀河から、その距離に比例した速度で遠ざかっている証拠とされている。

#### 【4】後退する地平線

◇以上が、銀河の領域に対する現在の私たちの大まかな認識である

それはずっと昔に始まった研究の積み重ねの成果である。

天文学の歴史は地平線の後退の歴史である。

知識は打ち寄せる波のように広がる。

それぞれの波は、観測データの説明の新しい方法の発展を示している。

◇宇宙の踏査は次の3つの段階に分けられる。

最初、私たちの踏査は「惑星の世界」に限られていたが、次第に「星の世界」に広がり、最後に「銀河の世界」に突入した。

◇それぞれの段階の間には長い時間が必要だった。

ギリシャ人は月までの距離はよく知っていたが、太陽系の惑星までの距離は、17 世紀後半までわからなかった。

星までの距離が決められたのはほとんど正確に 1 世紀前であり、銀河の距離が決められたのは、私たちの世代においてである。

対象となる天体までの距離がわかるまでは、次への進歩は不可能だった。

◇初期の踏査は、近くの星まで広がる広大な空虚な領域を乗り越えることができず、太陽系の端で停止していた。

星の性質はあまりわからなかった。

星は、比較的近い小さな天体かも知れないし、遠くの巨大な天体かも知れなかった。

この空虚な領域に橋が掛けられ、少数の近くの星までの距離が実際に測定されるようになって、太陽系を超えた世界の住人の性質がわかってきた。

今や身近になった、星々についての確立された概念を使って、踏査は急速に天の川銀河全体に行き渡った。

ここで再び、より大きな空虚な領域に直面して踏査は停滞した。

◇しかし、観測装置と技術が十分に発展し、近くの銀河までの距離が決められるようになって、再び、この空虚な領域に橋が掛けられた。

一度その住人の性質がわかると、踏査は一気に銀河の世界に突入し、最も大きな望遠鏡の到達限界で停止した。

## 【5】島宇宙理論

◇この著作は踏査のものがたりである。

踏査は距離の測定を中心として行なわれ、事実についての知識を広げる。

踏査にはいつも推測が先行する。

推測は一度全領域に広がるが、その後次第に踏査に押しやられ、今やそれは望遠鏡の縄張りを超える、宇宙の暗黒の未踏査の領域でだけ残されている。

◇推測はいろいろな形をとっており、忘れられてから長い時間が経っている。

距離の測定のテストに生き残ったほんの少数の「推測」は、宇宙の大きな領域をとれば皆同じであるという一様性の原理を基礎としている。

この原理は星の距離が測られる前に星に適用された。

星は測定装置では測れないほど遠かったため、非常に明るくしなければならなかった。

当時最も明るい天体は太陽だった。

したがって、星は太陽のようなものだと仮定され、その距離はその見かけの暗さから見積もられた。

この方法を使って、孤立して存在する恒星集団としての銀河の概念が、1750年頃に成立した。

◇その著者はイギリスの器械制作者で、家庭教師のトーマス・ライト（Thomas Wright）であった。

しかし、ライトの推測は天の川銀河を超えて広がっていた。

宇宙の中にただ1つの銀河があることは、彼の哲学的な心を満足させなかった。

彼は、他の同じような系を想像し、「銀河」と呼ばれる未知の雲があるはずだと考えた。

◇5年後の1755年、イマヌエル・カント（Immanuel Kant）はライトの概念を発展させ、その後現在までの1世紀半の間生き伸び、基本的には変更を受けず継承される形にした。

カントの所見は、次のように、一様性の原理に基づいた理想的な推測のすばらしい例である。

◇『私はここで、私の体系のもう1つの部分について述べようと思う。

そして、それは創世についての高遠なアイデアを示唆しているので、私にとって最も魅力的なところである。

私をそこに導いた一連の考えは、きわめて簡単で自然である。

それは次のようなものだ。

天の川のように、共通の面に星が集まっている系を考えよう。

その距離があまりに遠いので、それを構成する星が区別できないとする。

また、その系までの距離と天の川の中の星までの距離の比が、天の川の大きさと、地球と太陽の距離の比と同じとしよう。

このような恒星の世界は、非常に遠い距離から観察している観測者にとっては、微かに輝く小さな斑点としか見えないだろう。  
その形はその面が視線に対して垂直ならば円で、そうでなければ楕円だろう。  
その光の弱さと形、そして見かけの大きさからこのような天体を、その周りにある孤立した星から区別できるだろう』。

◇カントは続ける。

『このような天体を探るように天文学者に頼む必要はない。  
それは、たくさんの観測者によって、すでに発見されている。  
彼らはその奇妙な姿に驚嘆し、ある時は最も珍妙な説明を示唆し、またある時はもっとまともな理論を提案した。  
しかしその理論も、しっかりした基礎を持っているものではなかった、という点では、前者と同様であった。  
私たちはこれを銀河と呼んでいる。  
より正確には M・ド・モーベルテュイ (M. de Maupertuis) が次のようにこの特別な種類の天体を記述した。  
「これらは小さな明るい斑点で、空の暗い背景よりほんのちょっとしか明るくない。  
その形は多かれ少なかれ楕円で、その光は天球上にある他の天体より、ずっと弱いという特徴を共通にもっている。」 』

◇カントはその後で次のように続ける。

『銀河が唯一のものではなく、孤立した太陽でもなく、非常にたくさんの太陽が集まってできた系だと考える方がより自然で理性的である。  
その距離があまりに大きいため、星は非常に小さい領域に集まっているように見え、個々の星からの光は区別できないが、全体としては星の数が多いので、弱く一様な光の斑点と見えることになる。  
私たち自身の銀河との類似性、その形が私たちの理論の予言どおりであること、その距離が非常に遠いことを意味するその光の暗さ、これらは、すべて驚くほどお互いに調和しており、一致してこれらの楕円の斑点は私たちの銀河、上に説明した天の川銀河とよく似たものであるという考えに私たちを導く。  
そしてもし、類似性と観測事実とが一致して支持しているこれらの仮説が、形式的な論証と同じ長所を持つならば、このような系の存在は論証されたと考えなければまらない……。  
よく似た星の集団（星雲状星、銀河）が無限に広がる宇宙に散らばっている。  
その無限に広がる壮観中で、その構成要素が、お互いに関係し合いながらどこでも1つの系に組織化される。  
……巨大な領域が発見を待っており、観測だけがその鍵を握っている。』

◇後世、島宇宙理論と呼ばれることになるこの仮説は、哲学的な憶測の中に不動の地位を獲得した。  
しかし、天文学者自身はその議論にあまり参加しなかった。  
彼らは銀河を研究した。  
しかし19世紀の終りになると、観測データの蓄積によって、銀河の本質の問題が目立つようになり、島宇宙仮説がその解決策として浮上してきた。

## 【6】銀河の性質

### 【問題の定式化】

◇いくつかの銀河は裸眼による観測者にも知られていた。  
そして、望遠鏡の発達によりその数は最初はゆっくりと、そして次第に急速に増えてきた。

銀河研究の最初の指導者であったウィリアム・ハーシェル卿 (Sir William Herschel) が掃天観測 [特定の領域を掃くようにしらみつぶしに観測し、特定の性質を持った天体を見つけ出す観測方法] を始めた時、出版されていた最も大きなカタログは、メシエによる 103 個の目立つ星雲と星団を収録したものだ。

これらの天体は今でもメシエ番号で呼ばれている。

例えば、アンドロメダ座の大きな渦巻銀河は M31 である。

ウィリアム・ハーシェル卿は 2500 個の天体をカタログに記載し、息子のジョン卿は望遠鏡を南半球 (南アフリカのケープタウン近く) に運んで、もっとたくさんの天体をカタログに記載した。

◇現在約 2000 個の星雲の位置がわかっており、多分その 10 倍の数の銀河が写真乾板上に認識できる。

カタログに記載された天体の数は、かなり昔から重要でなくなっている。

現在必要なデータは、天球の大きな領域において、いろいろな明るさの天体がそれぞれいくつあるのかということである。

◇ガリレオ (Galileo) は自分の最初の望遠鏡を使って典型的な「星雲」を分解し、星の集団であることを明らかにした。

より大きな望遠鏡による観測により、多くの明るい星雲が同様の運命をたどった。

ウィリアム・ハーシェル卿は、もし十分な望遠鏡の能力が得られたら、すべての星雲は星の集団に分解されるだろうと結論した。

しかし、彼は晩年に意見を変え、ある場合には本源的に分解不可能な明るい「流体」が存在することを認めた。

◇これらの例外的な場合を説明するために、いくつかの巧妙な試みがなされたが、ついにウィリアム・ハッギンス卿 (Sir William Huggins) が、1864 年に、分光器を使って、ある星雲は明るく輝くガスからできていることを証明した。

◇ハッギンス卿の結果は、星雲が 1 つの同じグループの天体で構成されているのではなく、それを整理して理解するためにはある種の分類が必要であることを示していた。

星に分解された星雲は星団と呼ばれることになり、別の研究分野で扱われるようになった。

つまり、それらは天の川銀河を構成する 1 つの要素と認識され、島宇宙理論で扱う範疇にはないものとされた。

◇分解されない星雲は、2 つのまったく違う型に分けられる。

1 つの型は塵とガスが混合された雲で、分解できないことがわかった星雲である。

この型の星雲の数は比較的少ない。

これらの星雲は銀河系内の星に付随している。

これらは普通天の川の帯の中にあり、星団のように天の川銀河の一員であることは明らかである。

この理由によりそれらは、「銀河内」星雲 (galactic nebulae) と呼ばれている。

それらはさらに「惑星状 (planetary)」星雲と「拡散 (diffuse)」星雲とに分類され、それぞれ「惑星状 (planetaries)」、「星雲状 (nebulosities)」と省略されて呼ばれることがある。

◇もう 1 つの型は、小さな、ある対称性を持った天体で、上記の「銀河内」星雲よりずっとたくさんある。

これらは天の川の帯以外のすべての場所で見られる。

渦巻構造が、すべてではないが大部分の明るいものに見られる。

それらはいろいろな性質を共有しており、1 つの単一の種族を構成すると考えられる。

それらは今、「系外」星雲 (extragalactic nebulae) として知られており、これからは単に「銀河 (nebulae)」と呼ばれることになるだろう。

◇銀河がどんな状態にあるかは、よくわからなかった。  
というのは、距離が全然わからなかったからである。  
それらは明らかに距離の直接測定できる範囲の外にある。  
そして、距離を決めるわずかな間接的な方法は、いろいろに解釈できた。  
銀河は比較的近い天体かもしれず、したがって天の川銀河の一員かもしれなかった。  
または非常に遠い、銀河系の外の天体で遠宇宙の住人なのかもしれなかった。

◇この時点で銀河研究の発達、島宇宙の哲学的な仮説と接触した。  
この仮説は、原理的には銀河までの距離の問題の1つの答を示していた。  
距離に対する疑問は、よく「銀河は島宇宙なのか」という形をとった。

### 【問題の解決】

◇状況は1885年と1914年の間に急速に進展した。  
M31 渦巻銀河に出現した明るい新星は、距離問題に対する新しい興味を巻き起こした。  
また、スライファー (V.M.Slipher) による銀河の視線速度の最初のリストも公表された。  
これは新しい種類のデータを提供し、問題の解決に向けての真剣な試みを喚起した。

◇解決は10年後にやってきた。  
この解決には、その間に完成した巨大望遠鏡、100インチ反射望遠鏡が大きな役割を果たした。

◇いくつかの最も明るい銀河は銀河系の外にあり、天の川銀河の外の空間にある独立した恒星の集団、つまり系外銀河 (extragalactic nebulae) であることが明らかになった。  
引き続き研究により、暗い銀河はより大きな距離にある同じような銀河であることが示され、島宇宙仮説が確立された。

◇100インチ反射望遠鏡は近傍の銀河を部分的に星に分解した。  
これらの星の中に、天の川銀河の中にもある、いろいろな型の明るい星と同定されたものがあった。  
それらの固有の光度は、ある場合には正確に、ある場合には近似的にわかっている。  
したがって、銀河の中に発見された星の見かけの暗さは、その距離が大きいことを示している。

◇最も信頼に足る距離の値は、セファイド変光星によってもたらされる。  
しかし、他の型の星からも距離の桁を決めることができる。  
それらは、セファイド変光星によるものとほぼ一致していた。  
最も明るい星の光度は、ある種の銀河ではほぼ一定のようなので、銀河の群れの平均距離を統計的に決めるのに用いられた。

### 【7】宇宙の住人

◇その中にある星から距離がわかった銀河自身を使えば、銀河全体から決まる距離の新しい指標を与えることができる。

◇銀河はほぼ同じ桁の光度を持つことが今やわかっている。  
いくつかは他よりも明るい、少なくとも半数の銀河の光度は、平均の光度の半分から2倍の範囲に入る。  
その平均値は、太陽の光度の8500万倍である。  
したがって、統計的には銀河の見かけの暗さから、その距離を推定することができる。

◇銀河の性質がわかり、銀河の距離指標が確立したので、その次に研究は2つの方向に沿って行な

われた。

まず、個々の銀河の特徴が研究され、次に観測可能な領域全体についての性質が研究された。

◇銀河の形の詳しい分類から、球状の銀河から扁平な楕円体形の銀河、さらには、渦巻が弱く巻き付いた（開いた渦巻腕を持つ）渦巻銀河へ続く一連の系列が導かれた。

◇回転対称な基本パターンが、系列に沿って次第に回転速度が増加しているように滑らかに変化する。

多くの性質がこの系列に沿って系統的に変化していることがわかってきた。

これは、銀河が1つの族を構成しているという最初の印象を確認することになった。

光度は、系列に沿ってほぼ一定である（平均値は前にも述べたように太陽の $8.5 \times 10^7$ 倍である）が、その直径は約1800光年の球状銀河から、最も開いた渦巻腕を持つ銀河の約1万光年まで次第に増加している [訳者注：今ではこの傾向はあまりはっきりしないことがわかっている]。

質量はよくわからないが、太陽の質量の $2 \times 10^9$ 倍から $2 \times 10^{11}$ 倍の範囲であろうと思われる。

## 【8】銀河の領域

### 【銀河の分布】

◇観測可能な領域全体の研究は、きわめて重要な2つの結果を導いた。

その1つはこの領域の一様性、つまり、大きなスケールにおける銀河の分布の一様性で、もう1つは速度-距離関係である。

◇小さなスケールでは銀河の分布はきわめて不規則である。

銀河は1つで、ペアで、いろいろな大きさの群で、さらには銀河団の形で存在している。

例えば天の川銀河は、大小マゼラン銀河とともに作る三重銀河系の最も大きなメンバーである。

この三重銀河系は、他の銀河とともに孤立した一つの典型的な小さな銀河群を作っている。

この局部銀河群の中の銀河は、最初に距離が決められた。

セファイド変光星による距離決定は、まだこの群の中の銀河についてだけでしか成功していない

[訳者注：1994年になってハッブル宇宙望遠鏡が局部銀河群の外にあるM100銀河にセファイド変光星を発見した]。

◇空の大きな領域、または空間の大きな体積を考える時は、この不規則性は平均化される。

つまり、大きなスケールでの銀河の分布はほぼ一様である。

空に投影した分布は、規則的に隔てられた標本領域における、ある定められた明るさより明るい銀河の数を比較することにより求められる。

◇銀河の分布は、天の川銀河内での吸収により歪められる。

天の川の帯の中には銀河は見られず、その境界領域でも銀河の数は少ない。

さらに、見かけの分布は、系統的に極 [福永注：天球の銀河北極と銀河南極のこと] から天の川の境界に向けてわずかに減少している。

この事実は天の川銀河の中、特に銀河面内に塵とガスの大きな雲が、散在していることで説明されている。

これらの雲は、遠くの星と銀河を隠してしまう。

さらに、銀河面に沿って無限に広がる、厚さが一様な希薄なガスの層の中に、太陽は埋まっている。

銀河極の方向に近い銀河でもその光の1/4は吸収されている。

そして、低銀緯ではこのガスの層の中を通る光路が長いので、さらに強く吸収される。

銀河吸収によるこれらの効果を評価し、取り除いた後に初めて、空の銀河の分布が、一様で等方（すべての方向に同じ）であるという結論が得られる。

◇深さの方向の分布は、ある明るさより明るい銀河の数を、別の明るさより明るい銀河の数と比べることによりわかる。

ある明るさより明るい銀河の数は、ある限界の距離以内にある銀河の数に対応していると考えられるからである。

銀河の数は体積とともに増加するので、その分布は一様なはずである（掃天観測が正しく行われる限り、たぶん望遠鏡のおよぶ距離まで）。

速度—距離関係によるこのような補正は、不思議な観測結果をうまく解釈するのに役立っている。

◇したがって、観測領域は単に等方なだけでなく、一様、つまりどこでもどの方向でも同じである。

銀河は平均 200 万光年、またはその平均直径の 200 倍の間隔でばらまかれている。

銀河 1 つをテニスボールに例えると、それらは 50 フィートくらい離れていることになる。

◇もし、銀河の間にある（知られていない）物質を無視すれば、宇宙の平均密度の桁も大ざっぱに見積もることができる。

もし、銀河物質が観測可能な領域にすべて分布していたら、平均化された密度は、1 立方センチメートルあたり  $10^{-29}$  から  $10^{-28}$  グラムである。

これは地球の大きさと同じ空間体積に、砂粒 1 個程度がある密度に対応する。

◇観測可能な領域の大きさは、定義によって違う。

矮小銀河は近い距離までしか検出できないが、巨大銀河は遠くまで検出することができる。

この 2 つをあらかじめ区別する方法はなく、望遠鏡のおよぶ限界は、簡略化のため平均的な銀河で定義されている。

100 インチ反射望遠鏡で検出された最も暗い銀河までの平均距離は、5 億光年の桁である。

そして、この距離までにある約 1 億個の銀河が、天の川銀河の中の吸収で観測できない場所を除いて観測できる。

天の川銀河の吸収が最も小さい銀河の北極近くでは、星と同じくらいの数の銀河が、たいへん長い露出をかけた写真に写っている。

[福永注：大きなスケールにおいて銀河の分布は一様であるという銀河の分布に関するハッブルの見解の内容は、現代の知見では変化してきている。「参考資料その 4・銀河の分布と構造」を参照されたい。]

### 【速度—距離関係】

◇これまで述べてきた観測可能な領域の様子は、ほとんどすべて写真から直接導かれた結果を基礎としている。

この領域は一様で、物質密度の桁がすでにわかっている。

次に議論すべき、そして最後の問題は、速度—距離関係である。

これは銀河のスペクトルの研究から得られたものである。

◇光がガラスのプリズム（または他の適切な装置）を通り過ぎると、その光に含まれていたいろいろな色が一続きの帯の形に広がる。

これをスペクトルと言う。

虹は、その最も親しみ深い例の一つである。

スペクトルは、使われる装置によって長くなったり短くなったりするが、色の順番は変わらない。

スペクトルの位置は大ざっぱには色で、そしてもっと正確には波長で測られる。

というのは、それぞれの色はその波長に対応しているからである。

最も短い波長の光は紫で、青、黄色と次第に波長は長くなり、最も長い波長の光は赤である。

◇光源のスペクトルから放射された光の特有の色つまり波長と、その強度比がわかる。

これらから光源の性質と物理的状態についての情報を得ることができる。

◇スペクトルには3つの型がある。

まず第一の型は、すべての色の光を放射する白熱した黒体のスペクトルである。それは紫から赤まで（さらにその外まで）連続的につながっているものである。このようなスペクトルを連続スペクトルと呼ぶ。

◇次の型のスペクトルは、白熱したガスが放射するもので、いくつかの特定の波長の光だけから構成されている。

この、いわゆる輝線スペクトルのパターンはそのガス固有のものである。

◇3つめの型のスペクトルは、吸収線スペクトルと呼ばれており、天文学的な研究では特別な意味を持っている。

これは、連続スペクトルを放射する白熱した固体（またはそれと等価な光源）が、より冷たいガスに囲まれているときに作られる。

ガスは、もしそれらが白熱していたとしたら放射するのとまったく同じ色の光を、連続スペクトルから吸収する。

この結果、スペクトルには連続的な背景の中に、吸収線と呼ばれる暗線ができる。

暗線のパターンから、吸収しているガスの存在がわかる。

◇太陽や星は吸収スペクトルを持っており、知られているたくさんの元素がその大気の中にあることが確認されている。

水素、鉄、そしてカルシウムは、太陽のスペクトルの中に非常に強い線を作っている。

その最も顕著なものは、HとKの略号を付けられたカルシウムの線である。

◇銀河は一般に、太陽のような星でできているので、太陽スペクトルに似た吸収スペクトルを示す。銀河の場合、スペクトルはあまり引き伸ばしてはいけない。

光が弱いので長く引き伸ばすと輝度が減って、写真に写らなくなるからである。

しかし、その中にカルシウムのH線とK線を見つけることはたいていはいはできる。

それに加えて、鉄のGバンドといくつかの水素の線は、多くの場合、見分けることができる。

◇銀河のスペクトルが恒星のそれと違う点は、近くの光源で発見される通常の場合に線がないことである。

比較用スペクトルと比べてみると、吸収は正常な位置より赤い方に偏移している。

◇その偏移量は赤方偏移と呼ばれている。

この赤方偏移は、平均的には銀河の見かけの暗さとともに増加する。

見かけの暗さは距離の目安なので、赤方偏移が距離とともに増加していることになる。

詳細な研究により、距離と赤方偏移の間に、比例関係があることがわかった。

◇赤い方向や紫の方向への小さな偏移は、銀河の中の他の天体のスペクトルにも存在することが長く知られてきた。

これらの偏移は、その天体の視線方向の運動（後退しているなら赤方偏移、接近しているなら青（紫）方偏移〔訳者注：現在では「青方偏移」という方が「紫方偏移」というより一般的〕の結果であると解釈されてきた。

◇同じ解釈を銀河のスペクトルの赤方偏移に適用すると、観測された赤方偏移と見かけの暗さの関係から「速度—距離」関係が導かれる。

この仮定により、銀河は私たちから距離に比例した速度で遠ざかっている、ということになる。

◇赤方偏移の、説得力がある他の説明はまだ見つかってはいない。  
速度による偏移の解釈はまだ仮説であり、実際の観測によって検証される必要がある。  
その重要な検証が、現存の装置でできる可能性がある。  
その高速で後退する光源は、同じ距離にある静止しているものより暗く見えるはずで、しかも望遠鏡の限界近くでの「見かけ」の速度が、この効果が検出可能なほど、大きいからである。

## 【9】宇宙の標本としての観測できる領域

◇赤方偏移を完全に満足できるように説明することは、非常に重要である。  
というのは、速度—距離関係は、観測可能な領域全体の性質だからである。  
その他に知られている重要な性質としては、銀河が一様に分布していることぐらいしかない。  
◇観測可能な領域は、宇宙の標本である。  
もしこの標本が適正なものであれば、その観測された特徴から宇宙全体の物理的な性質を決めることができる。

◇そしてこの標本は適正である可能性が高い。  
しかし、踏査が天の川銀河の中にとどまっている限り、適正な標本は得られない。

◇天の川銀河は孤立していることがわかっている。  
その領域を超えたところには、天の川銀河内の星がまき散らされている領域とは違う領域が広がっているはずである。  
私たちは今、天の川銀河と同程度の、恒星でできた系が一様に分布している、広大な球形の領域を観測している。  
外縁部で密度が小さくなっている兆候も、物理的な宇宙の果てがある兆しもない。  
したがって、一様性の原理を適用し、無作為に選ばれた宇宙の他の同じ大きさの場所も、観測できる領域と同じ性質を持っていると仮定しよう。  
銀河の領域は宇宙そのものであり、観測可能な領域はその適正な標本であると仮定しよう。

◇この結論は実証的な研究の結果に基づいており、推測を超えた議論をするための出発点となっている。  
銀河の領域を支配する宇宙論の理論については、この著作では議論しないで、大部分は経験的なデータや、実際の探求の結果や、その直接の解釈に限られるだろう。

◇観測と理論は一体となっており、2つを完全に分ける努力は無駄である。  
観測結果は、いつも理論を多かれ少なかれ含んでいる。  
純粹理論は数学には見られるが、科学においてはあまり見られない。  
数学は、存在が可能な、論理的に矛盾のない世界を取り扱うと言われている。  
科学は、私たちが住んでいる実際の世界を知ることが目的とする。  
そして、宇宙論によると理論的には、限りない数の宇宙があり得る。  
私たちの特別な宇宙が、そのうちのどれであるかを特定できない間は、観測者はその可能性を1つ1つ消去していただけなのである。

◇現在までに、私たちの宇宙を含むはずの宇宙は、ますますいろいろなものが考えられている。  
観測可能な領域の踏査は、この消去の過程に直接関与している。  
この踏査は宇宙の大きな標本を記述し、しかもその標本は適正であると思われる。  
この範囲において宇宙の構造の研究は、経験的な研究の段階に入ったと言える。

### 3. 銀河の分類と性質

#### 【10】共通のパターン

◇100万個もの銀河が、現存する望遠鏡のおよび範囲にある。  
しかし、詳しく研究できるほど十分に大きく明るい銀河の数は、比較的少ない。  
きわめて重要かも知れないが、はっきりしない特徴を使うと、分類できる銀河は少数に留まり、適正な標本を代表していないことになってしまう。

◇現在の分類方法は、数百個の明るい銀河から、それらが銀河一般の適正な標本であると仮定して決められた。

これらの天体は特徴的な性質を持つグループに分類された。

これらのグループは、1つの端から反対の端にまで系統的に並び系列を作る。

明るい銀河においては特徴的な性質を記述することができるが、暗くなるにつれてその特徴は次第にわからなくなり、最も顕著なものしか認識できなくなる。

これらの最後まで生き残る基準が、形式的な分類の基礎となる。

◇2つの分類システムが発展したが、どちらもかなり似ているので、ここでは1つだけを説明する。  
この分類は銀河の形に共通の基本的なパターンがあることを明らかにした。

このパターンは銀河の形の系列の中で連続的に変化する。

◇第1段階として、銀河は数が不釣り合いな2つのグループに分けることができる。

銀河の大部分を占めるものは「規則銀河」と呼ばれている。

それらは共通のパターンとして、明るい中心の核に対して回転対称性を示している。

残りの2～3パーセントの数の銀河は「不規則銀河」と呼ばれている。

というのは、それらが回転対称性や明るい核を持たないからである。

◇規則銀河は「楕円銀河」と「渦巻銀河」に分けられる。

それぞれのグループの天体は、一定の方向に並んだ系列を自然に作っている。

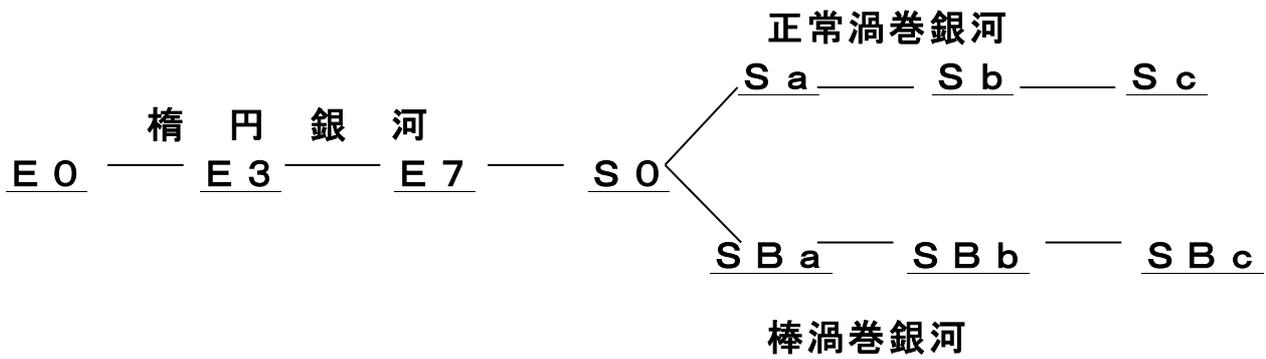
楕円銀河の系列の右端の銀河は、反対の渦巻銀河系列の左端の銀河に似ている。

したがって2つの系列は統合されて、規則銀河の中にあるすべてにまたがった、1つの大きな系列として記述できる。

零点は、楕円銀河の系列の端に便宜上設定された。

◇全系列は最もコンパクトな楕円銀河から、最も開いた渦巻銀河まで、拡散、もしくは膨張の系列で並んでいる [訳者注：現在では、楕円銀河が小さく、渦巻銀河が大きいということはないことがわかっている]。

◇この系列はジェームス・ジーンズ卿 (Sir James Jeans) によって発展された、銀河進化の最近の理論に示される進化の線とよく似ているので、それらについて考察するのは重要だと思われる。



### 【11】楕円銀河

◇楕円銀河は記号Eで表わされ、球状のものから、軸比が3対1のレンズ状の形をした極限形までの範囲に分布している。

この軸比より扁平な規則銀河はすべて渦巻銀河らしい。

◇楕円銀河は強く中心に集中しており、星に分解されている証拠はない。光度は、明るい恒星状の核から、はっきりしない境界まで急速に減少する。露出を長くかければかけるほど、直径と全光度は次第に増加する。ここから決めた銀河の「大きさ」や「全光度」にあまり物理的な意味はない。吸収物質の小さな斑点が明るい背景に対してシルエットとして見える場合がまれにあるが、たいていの場合この型の銀河は小さな構造を持たない。

◇さらに楕円銀河を分類するのに使うことのできる性質は、(a) 像の形、もしくはより正確には等輝度線（輝度が同じ場所を結んだ線）と、(b) 明るさの勾配、のみである。数字で勾配を評価するのは困難で、その測定には手のこんだ方法が必要なので、明るさの勾配はすばやく分類するときの基準には向いていない。

◇等輝度線の形は、単に写真を見るだけで確実に決めることができるが、もちろんそれは写真乾板に投影されたものであり、銀河の実際の三次元的な形を反映していない。円形に見える銀河は、本当は球状なのかもしれないし、たまたまその極軸が視線と一致した、より扁平な銀河なのかもしれない。円盤の方から見た、最も扁平な（レンズ状の）銀河だけが真の形を示している。この不確定性は深刻で不可避的である。この1つの場合を除いて、個々の銀河の真の形を決める方法はない。しかし、たくさんの投影された像の（無作為な方向に向いていると仮定した）統計的な解析により、個々の銀河の形はわからなくても、真の形の相対的な頻度を調べることができる。この解析により、真の形は球状からレンズまで分布しており、後者（レンズ状）の方が前者（球状）より多いことがわかった。

◇このような状況の中で、投影された像の等輝度線に基づいて仮の分類が行なわれてきた。等輝度線は楕円で [注：レンズ状銀河の等輝度線は、ほんの少し楕円からずれている。つまり、端が尖っている。しかしそのずれは小さいので、楕円銀河全体の議論の中では無視できる。]、1つの銀河の中でその形は皆同じである。言い替えると、露出時間が長くなるにつれて像が大きくなっても、その形は変化しない。

◇扁平率は  $(a-b)/a$  で表わされる。ここでaとbは、それぞれ長軸と短軸である。系列の中の位置は扁平度で、小数点を省略した形で表わす。つまり、円状の等輝度線（NGC3379のように見かけ上円形の銀河）はE0と表わされ、M31の

明るい方の伴銀河である M32 は、軸比が5対4なので E2 と表わされる。  
また、NGC3115 のようなレンズ状銀河は E7 である。  
この系列には端があり、E8か、それ以上に扁平な銀河は渦巻銀河に分類する。  
ただし非常に薄いレンズ状の天体を間違えて渦巻銀河としているかもしれない。  
後者の形は存在しているかもしれないが、たとえそうであったとしても、きわめて数が少ないはずである。

## 【12】渦巻銀河

◇渦巻銀河は2つのはっきり分かれた、平行な系列を作る、正常渦巻銀河と棒渦巻銀河とに分けられる。

これらはそれぞれ、S と SB の記号で表わされる。

この2つの系列の間にあるその混合型はほとんどない。

正常渦巻銀河においては、レンズ状銀河に似た中心領域の周辺から2つの腕がスムーズに出ており、外に向かって渦巻状に巻き付いている。

棒渦巻銀河では、中心領域を貫く棒の両端から2つの腕が突然出現し、正常渦巻銀河と同様に渦巻形を描きながら巻き付いている。

正常渦巻銀河の数は、棒渦巻銀河の数より2倍か3倍多い。

### 【正常渦巻銀河】

◇この系列の左端にある正常渦巻銀河は、明るい準恒星状の中心核を持ち、星に分解できない雲状の比較的大きな中心領域がある。

この中心領域はレンズ状銀河 (E7) によく似ている。

その周辺から現れる渦巻腕も星には分解できず、きつく巻き付いている。

系列が進み中心核が小さくなるにつれて、腕がはっきりし、渦巻腕は開いてくる。

最後には渦巻腕はほとんど開き、中心領域は小さすぎてほとんどわからなくなる。

その系列の中間か、少し早期型のあたりから、凝集が分解できるようになる。

まず、外側の腕が星に分解できるようになり、次第に中心まで分解できるようになる。

系列の右端 (Sc) では中心核まで凝集が分解できる。

### 【棒渦巻銀河】

◇棒渦巻銀河はまず、外側の領域に多かれ少なかれ同心円状の輪と、中心核の端から端に貫く棒を持つレンズ状銀河として現れる。

その外観はギリシャ文字のシータ、 $\theta$  に似ている。

系列が進むにつれて棒の2つの端のところで輪が切れたような形となる。

この渦巻腕は切れた輪の切れ端まで伸びる。

この後、系列の進展は正常渦巻銀河と同様に進む。

つまり、中心核領域が少なくなるとともに渦巻が発達し、渦巻の巻き付きは緩やかになる。

星への分解も、外縁部から始まって中心核へ進む。

系列の最後には、薄いよく星に分解された馴染み深い S の字型の渦巻腕となる (NGC7479)。

[注：渦巻銀河の系列は2つある。

1つの系列は正常渦巻銀河の系列で、もう1つは棒渦巻銀河の系列である。

どちらの系列も3つの部分に分割される。

これらは正常渦巻銀河を表わす S と棒渦巻銀河を表わす SB に a,b,c の添字を付けて表わす。

それらはそれぞれ、早期型 (a) , 中期型 (b) , そして晩期型 (c) とも言われる。

それぞれの系列における位置は、中心核領域の物質の量に対する渦巻の部分の物質の量の比と、渦巻腕の開き方、そして星への分解の度合で決められる。  
早期型渦巻銀河（Sa と SBa）はレンズ状銀河ときわめて近い関係にあるようである。  
E7から SBa への変化は滑らかで連続的だが、E7から Sa への変化は不連続的である。  
正常な渦巻銀河はすべて完全に発達した渦巻腕をもつ。  
E0から Scに向かう規則銀河の系列では、いろいろな量がこの全領域を通じて系統的に変化する。  
全光度（絶対光度）はほぼ一定だが直径は増加し、したがって、表面輝度は減少する。  
星雲成分を表わす色、スペクトル型、そして分解の度合も連続的に変化する。  
私たちの天の川銀河は、たぶん晩成型の正常渦巻銀河である。]

### 【13】規則銀河の系列

◇早期型渦巻銀河である Sa と SBa は、いろいろな点でレンズ状銀河に似ている。  
規則銀河の全系列は文字 Y のような形に、あるいは渦巻銀河の2つの系列はほぼ平行なので、音叉のような形にまとめられるだろう。

◇楕円銀河の系列は球状の天体（E0）から始まり、結合点のすぐ近くのレンズ形（E7）までで1つの系列を形成する。  
正常渦巻銀河と棒渦巻銀河の系列は、平行に2つ置かれ、いくつかの混合型銀河が見られる。  
この混合型銀河は普通、中心核のすぐそばの小さな領域で棒渦巻銀河の性質を持つが、他の部分は正常渦巻銀河に似ている。  
M83 や M61 がその例である。

◇3つの系列の結合点には、多少仮想的な型 SO が置かれる。  
したがって、SO は銀河の進化の理論すべてにおいて非常に重要な段階である。  
E7 と SBa の間が滑らかに遷移していることを観測は示しているが、Sa 銀河はすべてよく発達した渦巻腕を持つという意味で E7 と Sa との間には不連続がある。  
大きく引き伸ばした写真が集積され、もっと詳細な情報が集まるまでは、この不連続の原因を推測することは無益である。  
今は銀河の進化における臨界点での、劇的な現象が起こったことを示唆するにとどめよう。

[訳者注：著者は銀河は E0 から始まって Sc, SBc の方向に進化すると考えている。  
これは前に出てきたジーンズの重力収縮の理論を意識したものであろう。  
しかし、銀河の進化はそれほど単純ではないというのが [福永注：(現代の)] 通説で、その方向も逆の可能性がむしろ高い。]

\*\*\*\*\*

## 参考資料・その2 銀河は進化する

### 1. 銀河の形は進化の証拠

■エドウィン・ハッブルは、銀河を形によって形によって分類しました。  
さらに彼は、銀河を系統づけるための「ハッブルの音叉図」をつくっています。  
図によるとハッブルは、楕円銀河が E0 から E7 へと進化したあとにレンズ状銀河に進化し、渦巻銀

河と棒渦巻銀河に分かれると考えていたようです。

■しかし、楕円銀河よりも進化後の渦巻銀河の方が回転が速く、星間ガスの量が多いなど、両者に明らかな性質の違いがあることがわかり、この進化過程は誤りであるとされています。渦巻銀河の形成にはある程度の時間が必要であることは確かですが、楕円銀河がその原型ではない、ということです。

■現段階では、ハッブルが考えたような銀河の完全な進化系統ははっきりしていません。

## 2. 銀河は確実に進化している

■しかし、銀河が進化していることは間違いないようです。たとえば、銀河を構成する元素の種類は銀河の進化の度合いによって異なります。また、質量が小さくて星間物質を十分に引き止めておくことができない小さな銀河と大きな銀河とは、化学的な組成が異なるはずで、このような変化は銀河の化学進化といい、銀河の発達のしくみを考える手がかりのひとつとされています。

■また、新しい恒星が銀河内で誕生していくと、銀河の質量に占める恒星の割合が増えて星間ガスの割合が減り、青い色をした新しい恒星が増えるために、銀河は青く明るくなります。反対に、星間ガスがなくなって新たな恒星が誕生しなくなると、恒星が年老いて赤くなるため、銀河も赤く暗くなっていきます。

\*\*\*\*\*

### 【14】 その他の性質

◇規則銀河のいくつかの他の特徴について述べておく。

中心核は恒星状で、写真で研究するには小さすぎる。

中心核は、その周辺のわずかなもやもやとした雲に比べて、かなりはっきりしている。

晩成型の渦巻銀河（M33）の中心核は非常に球状星団に似ている。

中心核にどんなテストを適用しても、恒星と区別できない場合がまれにある。

一般にこのような中心核は比較的明るく、惑星状星雲と似た（ $N_2$ が  $H\beta$  より明るい）輝線スペクトルを示す。

したがって、その外観に関係なくそれらは、普通の言葉の意味で言う1つの星とは考えられない[訳者注：現在で言うセイファート銀河のことらしい。セイファート銀河では、銀河中心核の活動のせいでその中心核に輝線スペクトルが見られる]。

◇渦巻構造はわずかな、分解できない、もやもやとした雲の中に埋まっている。

この雲は銀河の本体よりずっと遠くまで広がっている。

吸収はかなり効いている。

塵かガスでできた吸収物質の帯は、早期型の正常渦巻銀河の周辺によく見られ、銀河を円盤に沿った方向から見ている時（NGC4594）、影として見える。

これらの帯は早期型棒渦巻銀河には見られない。

いろいろな大きさの、吸収の暗い斑点は晩成型で特に顕著ではあるが、正常渦巻銀河の方が棒渦巻銀河に対して、より顕著である。

この斑点は、天の川銀河の中の暗黒星雲とたぶん似たものだと思われる。

そして、その角直径の比較により、渦巻銀河の距離をおおざっぱに評価することができる。

◇銀河の形が異常で、その分類系列上の正確な位置がよくわからない時がある。

このような天体は研究者の判断に従って p の文字（異常 peculiar の意味）が分類の記号に添えられる。

添字 p が必要な銀河は全規則銀河の約 2 パーセントで、渦巻銀河より楕円銀河に適用される場合が多い。

M31 の暗い方の伴銀河や、M51 の伴銀河はどちらも Ep に分類されており、典型例といえるかもしれない。

## 【15】 不規則銀河

◇全銀河の 2 から 3 パーセントを占める銀河は回転対称性を持たず、したがって分類の系列に置く場所を決められない。

これらの天体は不規則銀河と呼ばれ、Ir の文字（不規則 Irregular の意味）で表わされる。

不規則銀河の約半分が均質のグループである。

マゼラン銀河はその典型例で、それらの重要性は、独立した型を与えるに足るものである。

それらの星の成分は晩期型の渦巻銀河と非常に似ている。

このため、それらは規則銀河の系列の最後の段階を示していると考えられることもある。

しかし、その物理的な状態については推測の域を出ていない。

はっきりとした中心核がないことの方が、回転対称性を持っていないことよりも、より基本的な性質かもしれない。

つまり、それは中心核が存在しないことの結果として回転対称性を持っていないのかもしれないということである。

◇残りの不規則銀河は、別の型と言うよりはむしろ、規則銀河の系列の中の特に特異性が強いものと考えられる。

NGC5363 や NGC1275 のような銀河は渦巻構造がない。

これらは渦巻構造が発達しないまま崩壊した楕円銀河と考えることができるかもしれない。

## 【16】 系列に沿って系統的に変化する特徴

### 【スペクトル型】

◇系列に沿って系統的に変化する性質は、スペクトル型、色、そして渦巻銀河においては恒星光度の上限（最も明るい星の真の光度）である。

◇スペクトル型は 150 個の銀河の中心領域で決められている。

太陽型、すなわち初期 G 型のものが大部分だが、たまに F 型や K 型も存在する。

スペクトル型が矮星の性質をもっていることは、かなり大きなスケール [スペクトル写真上の 1 mm に対応する波長の幅] で記録されたいくつかのスペクトルではっきりしているため、これが銀河の正常なスペクトルだと、暫定的に考えられている。

M31 と M32 の中心領域の最も良く調べられたスペクトルでは、吸収線の相対強度は絶対等級が +4、3 等の、dG3 の星のスペクトルで見られるものと同じである。

dG3 型の星は太陽とよく似ている。

◇比較的少数の、惑星状星雲に似た輝線スペクトルを持った「恒星状」核についてはすでに述べた。これらのスペクトルの意味はわからないが、その数は少ない。

他の型の輝線スペクトルは、不規則銀河と開いた（晩期型）渦巻銀河の外縁部にかなり普遍的に見られる。

これらのスペクトルは銀河の特定の場所に局在していて、天の川銀河内の拡散星雲（きわめて高温の近傍のガス雲、例えばオリオン星雲）によって作られるものに似ている。

これは、銀河と私たちの天の川銀河の間にたくさんある類似点の1つである。

◇輝線スペクトルを無視すると、銀河スペクトルの平均的な型は、分類の系列に沿って系列的に変化する。

つまり、早期型の楕円銀河は G4、開いた渦巻銀河は F9か、もう少し早期型のスペクトル型を持つ [恒星のスペクトル分類では、高温の O,B 型星を早期型、低温の K,M 型星を晩期型と呼ぶのが慣用である]。

変化の範囲は小さいが、相関のばらつきも小さいのできわめて明確に成立している。

得ることのできるすべての吸収スペクトルの平均は、大体 dG3 である。

## 【色】

◇スペクトル型は連続スペクトルの分布とは関係なく、吸収線で決められる。

一方、色は吸収線とは関係なく連続スペクトルの分布を反映している。

恒星では色とスペクトル型には明確な関係がある。

そして一方がわかると、ある確実さを持ってもう一方を推定できる。

正常な関係からのずれは、色欠損、あるいは色超過と呼ばれる。

[福永注：ブリタニカから引用：colourexcess 遠方にある恒星の光は、星間物質による吸収のためいくぶん赤みがかかり、色指数が増加する。その増大分を色超過といい、恒星のスペクトル型に相当する標準色指数を、観測された色指数から引くことによって求められる。これによって、その方向の空間にある吸収物質の量を推定することができる。]

後者は特に、天の川銀河の部分では一般的に見られ、天の川銀河内に広がって分布する星間物質による、選択的な吸収によるものだと一般に解釈されている。

◇しかし、銀河においては、色とスペクトル型の正常な関係は開いた（晩成型）渦巻銀河でしか見られない。

◇球状の銀河は O、3 等程度の顕著な色超過を示し、この色超過は系列を進むにつれて小さくなって、Sc に至って消えてしまう。

◇色超過とその変化自身の存在は確立したが、その原因はわかっていない。

色（80 個の銀河の）のきわめて精度の高い測定が、ウィルソン山天文台の大反射望遠鏡の焦点において、光電池で作られた青と黄色のフィルターを使って、ステビンス（Stebbins）とその仲間によって行なわれた。

◇また、色超過はおとめ座銀河団（銀経+75°）でだけしか系列の全領域にわたっては観測されていない。

しかし、銀経にも見かけの明るさにも有意な依存性を示していない。

したがって、色超過の原因はその銀河そのものになければならず、天の川銀河の中や、外にある広がった物質のせいではない。

たぶん、その銀河の中の広がった物質によるものであろうが、この推測には困難があり、まだ問題が残っている。

◇観測データは次の表にまとめられている。

ここで、ハマソンによる平均スペクトル型と、ステピンスによる平均色超過（巨星のスケールにおいて）が、分類の系列のいろいろな段階について与えられている。

銀河の型	スペクトル型	色型
E0—E9	G4	g6
Sa, SBa	G3	g5
Sb, SBb	G2	g4
Sc, SBc	F9	f7

\*\*\*\*\*

### 参考資料・その3 スペクトル型・温度・色

#### 1. スペクトル型と星の大気の温度

■太陽をはじめとして天体からの光を分光すると、連続スペクトルと線スペクトルとが見られる。連続スペクトルは前に述べた熱放射によるものである。

線スペクトルは特定の波長の光が暗くなったり（吸収線）明るくなったり（輝線）しているもので、吸収線あるいは輝線に相当する波長は、元素によって決まっている。

■多くの星についてスペクトルを観測して並べてみると、吸収線の見え方はさまざまであり、吸収線の見え方によって分類できることがわかる。

吸収線の見え方によって星を分類したものがスペクトル型である。

■吸収線の観測から、太陽、あるいは星にさまざまな元素が存在していることがわかった。

では、吸収線の見え方の違いは星の組成を反映しているのだろうか。

■もちろん組成の違いは吸収線のでき方に影響するが、スペクトル型の系列は主に星の温度を反映している。例えば電離したヘリウムの吸収線が観測できるのは、その星の温度がヘリウムを電離できる光子を十分に放射できるほど高いことを反映し、一酸化チタンという分子の吸収線が観測できるのはその星の温度が一酸化チタン分子が存在できるほど低いことを反映している。

スペクトル型		表面温度 (K)	恒星の色	代表的な恒星
O 型	電離ヘリウムの線がある。 O5型星の有効温度は 45000K。	30,000~	青	アルニタク、ナオス
B 型	水素とヘリウムの線。  中性ヘリウム線はこの型で最も強い。 B0型星の有効温度は 29000K。	10,000~30,000	青白	リゲル、スピカ プレアデス星団の星
A 型	中性水素の線（バルマー線）が最も強くなる。 A0型星の有効温度は 9600K。	7,500~10,000	白	シリウス、ベガ、 アルタイル

F 型	水素の線はやや弱まり、金属の線が次第に強くなる。 F0型星の有効温度は 7200K。	6,000~7,500	黄白	カノープス、 プロキオン
G 型	水素の線は目立たなくなり、カルシウムの線が強い。 G0型星の有効温度は 6000K。	5,200~6,000	黄	太陽、カペラ
K 型	カルシウムの線が最も強くなる。 K0型星の有効温度は 5300K。	3,700~5,200	橙	アルデバラン、 アークトゥルス
M 型	一酸化チタンなど分子の吸収線が見られる。 M0型星の有効温度は 3900K。	~3,700	赤	アンタレス、 ベテルギウス グリーゼ 581

[福永注：上において、スペクトル型と、表面温度・恒星の色・代表的な恒星とは、異なる文献から引用しているので、温度の数値に微妙なずれがある。]

■このように温度の高い側から低い側へ向けて、星のスペクトル型は O、B、A、F、G、K、M の順に示され、各型はさらに 10 段階に分けられている。

■例えば O5、F0 などのようにである。

ちなみに太陽は G2 型、シリウスは A1 型、こと座のアルファ星ヴェガ（織姫星）は A0 型に分類されている。

アルファベットはスペクトル中の輝線と暗線の特徴をあらわし、添字のアラビア数字は、スペクトルの型をさらに 10 段階に分けたもので、たとえば A0、A1、・・・、A9 と細分され、A9 の次が F0 となる。

\*\*\*\*\*

## 【星への分解】

◇多くの明るい渦巻銀河や不規則銀河の写真には、たくさんのノット [明るいかたまり] や凝集がある。

これらは個々の星、もしくは星群であることがわかっている。

銀河の中の星の同定は、きわめて重要である。

というのは、それは直接距離の決定につながるからである。

◇分解できるほど明るい星は早期型と中期型の中間、たぶん Sab [SBab] において初めて現われる。これより後期型の銀河では、星が次第に顕著になる。

より早期型の銀河で分解されていないことは、星が存在していないことを意味するわけではない。それは、銀河の中に星が存在していても、早期型渦巻銀河にある最も明るい星が、晩期型渦巻銀河にあるもっとも明るい星よりも、暗いことを意味しているにすぎない。

したがって、すべての銀河は星でできているが、その星の最大光度は分類の系列が進むにつれて系統的に増加し、Sab の近くで観測可能な閾を超えると考えることは不可能ではない。

◇この仮説が推測に基づいていることはあきらかであるが、近傍のおとめ座銀河団の中の銀河と星の、観測された光度の中にその証拠を見出すことができる。

この銀河団は数百個の銀河でできたコンパクトな集団で、すべての型の銀河（不規則銀河以外は）がある。

それぞれの型の平均光度は皆同じ桁にあるが、星は Sb[SBb]型渦巻銀河より Sc [SBc] 型銀河の方が系統的に明るく、Sa[SBa]型渦巻銀河では星をまったく検出できない。

◇これらのデータはさらに、分解できる星の光度の増加が分解できない星の光度の減少を補い、銀河の全光度をほぼ一定に保っていることを示している。

◇星と、分解されていない星を合わせた写真光度が、ほぼ一定である事実は、系列に沿っての色超過の減少に本質的に関係している。

開いた渦巻腕を持つ渦巻銀河（晩成型）の最も明るい星は青く、たぶん天の川銀河やマゼラン銀河に見られるような O 型超巨星である。

シアーズ（Seares）は 1922 年に、星への分解が最も顕著な開いた（晩成型）渦巻銀河の外側の腕は、中心核よりも青い（色指数が少ない）ことを発見した。

この現象は当時は説明できなかったが、後になって凝集が星であることがわかると、この色の効果は青い星のせいであろうということになった。

最後に個々の星の色が測定され、青いことが明らかになった。

これでこの説明の確かさが確認された。

楕円銀河には色の変化が見られないので、系列に沿っての色指数の系統的な減少は、青い巨星が次第に多くなっているためであることが明らかである。

### 【型の相対頻度】

◇最後に、銀河の相対的な頻度もしくはその数が、分類の系列に沿って系統的に増加していることを述べたい。

早期型銀河が多い大きな銀河団は例外である。

ほぼ完全に適正な、はっきりとした限界等級を持つ大きな銀河のカタログを使うと、孤立した銀河がある普通の領域においては、系列が進むにつれて銀河の数が増えることがわかる。

このときのただ 1 つの重要な必要条件は、分類が選択効果を生まないように、十分に大きなスケールの写真で行なわれることである。

この選択効果は一般に、早期型銀河を増やし、晩成型銀河を減らすようにはたらく。

◇現在の分類に基づいた最初のリストは、北天から観測された約 400 個の銀河について、ホレチックが作った。

もっと包括的なまとめは、全天をカバーした明るい銀河のハーバード掃天観測から得られた。

大きな反射望遠鏡の乾板に撮影され、分類された、600 個の銀河の相対頻度が次の表に与えてある。

銀河の型の相対頻度

型	頻度 (%)
EO—E7	17
Sa, SBa	19
Sb, SBb	25
Sc, SBc7	36
lr	2.5

---

系列に沿って傾度が増加する傾向が、見る角度の効果の少ない渦巻銀河に明らかに見られる。

\*\*\*\*\*

## 参考資料・その4 銀河の分布と構造

### 1. 私たちの銀河系

■まず、部屋の真ん中に立って足元を眺めてみますと、直径5m ぐらいの範囲が見渡せるでしょう。20mの高さからみおろしたとすると、直径50m ぐらいの宇宙が見えるはず。そして、見下ろす高さが地上数百 km に達すると、地球の丸さがわかり、まさに「宇宙」という光景に感じられるでしょう。

■視界を100万 km にまで広げると、地球と月が見えてきます。直径100万 km の視界を1万倍に広げ、視界100億 km に達すると、私たちの太陽系の全容が見えます。

■直径100億 km (約70天文単位) の視界をさらに1万倍して、視界100兆 km (約70万天文単位) に広げると、太陽系の外にある別の恒星の姿が見えてきます。ここまで距離が大きくなると、天文単位では扱いにくくなるため、「光年」を用います。1光年は光が1年かかって進む距離で、およそ9兆4600億 km = 約6万3240天文単位に相当します。この場合、視界の直径は約10光年となります。

#### 《太陽系を含む星々の雲》

■太陽系近傍を俯瞰する視野10光年をさらに広げ、視野1万光年に達すると、無数の恒星が、まるでひとつかたまりの雲の筋のように見えます。この雲の筋は何本か連なって、巨大な渦巻きである銀河系の一部となっているのです。

■私たちの太陽系がある筋には、ほかにオリオン座の大星雲M42があるため、銀河系のオリオン腕と呼ばれています。オリオン腕の外側にはペルセウス腕が、内側にはサジタリウス腕があります。

■そこから視野をさらに10倍に広げると、巨大な渦巻きが見えてきます。これが私たちの太陽系が属する銀河系です。銀河系は、天の川銀河とも呼ばれる、2000億個もの恒星の集団で、地上から見える天の川の真の姿です。

#### 《直径10万光年の銀河系》

■銀河系は主に、恒星が密集した円盤(ディスク)と、中心部の膨らみ(バルジ)、そしてこれらを取り巻くハロの3つの部分で成り立っています。ディスクの直径はおよそ10万光年で、その厚さは周辺で次第に薄くなっています。

大量の若い恒星や星間物質が渦巻き状に分布して、銀河系中心の周りを回っています。バルジには年老いた恒星が集まっており、星間物質はほとんどないと考えられています。一方、恒星の密度が小さく、星間物質も少ない領域がハロです。ここには、年老いた星が密集した球状星団が散在しますが、その運動から「直接観測できない質量」（ダークマター）が分布していることが予測されています。ハロの質量は銀河系全体の9割にも達すると考えられており、銀河系の“見えない本体”となっています。

## 2. 隣にある銀河たち

### 《銀河系を含む局部銀河群》

■視野をさらに広げて直径 400 万光年を見渡すと、銀河系の周辺にある銀河が見えます。宇宙に存在する無数の銀河は、互いの重力で引き寄せ合って群れをなします。このような銀河の群れの最も小さな単位が銀河群で、私たちの銀河系は局部銀河群と呼ばれる銀河群の一員です。

■局部銀河群は、銀河系から約 800 万光年離れた CR8 と呼ばれる銀河まで、大きなもので 40 数個の銀河を含んでいます。中でも最大の銀河は、太陽系から約 230 万光年離れたアンドロメダ銀河（M31）で、その直径は約 26 万光年と銀河系の 2.5 倍、恒星の数は約 1 兆個で銀河系の約 5 倍もの規模があります。局部銀河群の中では、アンドロメダ銀河とさんかく座銀河（M33）、銀河系の 3 つが飛び抜けて大規模です。

### 《銀河系に近い銀河たち》

■局部銀河群の中で銀河系に最も近いのは、約 4 万 2000 光年離れた「おおいぬ座矮小銀河」です。2003 年に発見されたばかりで、質量が銀河系の 200 分の 1 ほどと小さく、銀河どうしに働く重力の作用で引き伸ばされた楕円形をしています。

■また、銀河系から 16 万光年の場所には「大マゼラン銀河」があり、距離約 20 万光年の小マゼラン銀河とともに銀河系に伴う「伴銀河」とされています。このほか、局部銀河群には 1 万個を超える銀河があるとされ、現在も続々と発見されています。

■互いの引力で引き合うこれらの銀河は、現在でも距離を縮め合っています。大小マゼラン銀河などは次々に銀河系に合体吸収され、秒速数百 km で近づきつつあるアンドロメダ銀河はおよそ 30 億年後に、銀河系と衝突すると考えられています。

## 3. さまざまな銀河の形

### 《形で銀河を分類する》

■私たちの銀河系とアンドロメダ銀河は、似たような渦巻き構造をしています。しかし、大小マゼラン銀河には、はっきりとした渦が見られません。このように、銀河にはそれぞれに個性があり、形もさまざまです。こうした形状の違いで銀河を類別したのが、アメリカの天文学者ハッブルが提唱したハッブル分類で、銀河を楕円銀河、渦巻銀河、棒渦巻銀河、レンズ状銀河、不規則銀河に分けています。また、特異銀河を、銀河の分類に含めることもあります。

### 《代表的な銀河の形》

■楕円銀河は、はっきりとした内部構造が見られない楕円型の銀河で、どれだけ扁平になっているかで細分類されています。

年老いた恒星で構成され、新しい星をつくる物質はほとんど残っていません。

■渦巻銀河は、銀河系のようにバルジとディスクがあり、ディスクに渦巻き構造がある銀河です。ディスクには若い恒星が多く、星間物質が豊富で、新しい星が生まれています。

■棒渦巻銀河は、渦巻銀河のバルジ部分が引き伸ばされた状態になっており、この周囲に渦状のディスクが広がっている銀河です。

■レンズ状銀河は、バルジ部分の構造があるにもかかわらず、周辺部にディスクがない銀河です。星間ガスが極めて少なく、また若い恒星も見られない銀河です。

■これらのいずれにも当てはまらない銀河は、不規則銀河に分類されます。大マゼラン雲や、おおぐま座にある M82 などが不規則銀河の代表です。星間ガスに富んでおり、新しい恒星が激しく生まれています。

■なお、特異銀河は極めて大きな変形が見られるもので、衝突している銀河によく見られます。

## 4. 宇宙に広がる銀河の群れ

### 《局部銀河群の周りの銀河群》

■局部銀河群を見渡した視野をさらに広げて視界 1.5 億光年に達すると、局部銀河群の周辺に、さらに別の銀河集団があることがわかります。

■局部銀河群から 700 万～1000 万光年ほど離れたところには、ちょうこくしつ座銀河群やマフェイ銀河群があります。

■さらに、この周囲には M81 銀河群、M101 銀河群などの銀河群がありますが、5000 万～7000 万光年ほど離れた場所にはひととき大きな銀河の集団があります。

これは、最初期の星雲星団カタログであるメシエカタログを作ったフランスの天文学者シャルル・メシエによって発見された、おとめ座銀河団です。

■銀河団とは、銀河の集合であることは銀河群と同じですが、銀河群よりやや大きく、数百個から 2000 個程度の銀河を含む集団のことです。

### 《銀河群・銀河団でできた超銀河団》

■このような銀河群や銀河団は、これまでに 1 万個以上も発見されています。

これら銀河群や銀河団がさらに大きなグループをつくり、その大きさが 1 億光年以上の場合に、これを超銀河団と呼びます。

■局部銀河群や、近隣の約 100 個の銀河群・銀河団の集まりは、おとめ座銀河団を中心にした「おとめ座超銀河団」または「局部超銀河団」と呼ばれる超銀河団を形成しています。

その直径は 2 億光年で、視野 1 億 5000 万光年で見た宇宙の全域に広がっています。

■なお、銀河と銀河の間の空間は可視光線では何も存在しないように見えます。

しかし X 線を使った観測により、約 1 億度 C にも達する高温の電離ガスが、非常に薄いものの銀河

団全体を包みこんで広がっていることがわかってきました。  
このガスを「銀河団ガス」と呼んでいます。

## 4. 壁と空間がつくる宇宙

■宇宙にある銀河とその集まりは、宇宙全体に均一に広がっているのではなく、ある一定の決まった構造にしたがって分布しています。

《泡のような宇宙の大規模構造》

■地球のある銀河系を中心にして 20 億光年を見渡すと、銀河団や超銀河団といった巨大な銀河の集団が、宇宙に均一に広がっているのではないことが見えてきます。

■銀河団や超銀河団は平面に広がって分布しており、その構造を壁になぞらえて、「グレートウォール」と呼びます。

■一方、壁状に連なる銀河団の間には、極めて巨大なほぼ球形の空間が広がっています。この領域にはほとんど銀河が含まれないことから、超空洞（ボイド）と呼ばれています。

■壁状に連なった銀河団とボイドの限りない連続が、宇宙の最も大きな構造となっており、これを「宇宙の大規模構造」と呼びます。  
まるで石けんの泡のような構造をしているため、「宇宙の泡構造」と呼ぶこともあります。

《大規模構造の先にあるもの》

■宇宙の大規模構造についての観測で最も大きなプロジェクトが、スローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS) です。  
これは、全天の 25%以上の範囲について天体の距離を精密に測り、宇宙の大規模構造の姿を描き出すもので、第二段階 (SDSS-2) の観測により、20 億光年先までの約 100 万個の銀河を含む宇宙地図が作成されています。

■こうした宇宙の大規模構造は、約 70 億光年先まで続いていることが確認されています。

■それより先の「宇宙の果て」、そして「宇宙の広さ」がどのくらいかについては、さまざまな考え方があります。  
「宇宙の広さ」を考えるには、空間の広がりだけでなく、時間の広がりについても考える必要があります。

\*\*\*\*\*

## 4. 銀河までの距離

### 【17】距離がわからないという障壁

◇銀河の距離や大きさについての研究は、ずっと昔の写真の導入で始まり、研究の発展によく見られるパターンに従って発展した。

銀河が観測できる領域にほぼ一様に分布していて、互いに近親関係にある単一の種族を作っているという明確な描像が得られた時から、銀河の研究は探求の初期の段階に入ったと言える。

◇次の段階に入るための重要な手がかりは距離の尺度であった。  
銀河のデータは着実に蓄積されていたが、距離がわからないという障壁の前に積み上げられるのみであった。  
距離がわかる前に、さらなる進歩は不可能であった。

◇この問題の解決は、巨大望遠鏡の建設で達成された。  
望遠鏡と技術が進歩して最後にはある臨界点に達し、その当然の帰結として障壁は崩れ落ちた。  
突破口が開いた時、探求の波が一気に前進した。  
距離がわかったことにより、今まで蓄積されていた知識から新しい研究の方法が発展した。  
特に銀河のスペクトルの赤方偏移は、距離の問題の最初の解決法と匹敵するほど重要なものとなった。

◇銀河の絶対的な距離の研究は、2つの命題に基礎が置かれていた。  
まず最初のもは、その中の星の見かけの明るさから距離が決められるということである。  
もう1つは赤方偏移は距離の一次関数で表わせるということである。  
これらの結果は基本的なので、その発達と応用について議論する。

## 【18】距離尺度の発達

◇銀河の研究は急速に進んできた。  
その大きな進歩は3回あった。  
その中のどれもがその出発点と考えることができる。  
まず、1912年に銀河の視線速度の最初の測定がなされた。  
1917年に写真で新星が発見された。  
そして、1924年にセファイド変光星が発見された。  
このうち2つめ（1917年）が最も重要である。  
というのは、写真乾板上での新星の発見は、銀河の中の星の研究を始めるきっかけになったからである。  
星は、距離を導く手がかりであった。

◇典型的な銀河についての距離が遂にわかると、銀河は独立した恒星の集団であることが認識され、その一般的な性質が決まり、さらに銀河の領域が熱心な探求の対象となった。

◇この手がかりは尋常でない速さで適用された。  
1924年に信頼性の高い距離決定法が確立してからたった10年で、踏査研究は望遠鏡そのものの限界にまで達した。  
私たちの宇宙の標本である観測できる領域は、今や全体がよくわかっている。

◇観測の精度と完全性は、踏査研究の視野の外にある。  
距離スケールの改訂、詳細の追加、無視した因子の重要性を再認識することが次になされるべきことである。  
しかし、全体の輪郭は大雑把には描かれた。  
[訳者注：確かに、本書に書かれている銀河までの距離は、2倍から5倍短かすぎるものがその後の研究により明らかになった。にもかかわらず、本書に書かれている宇宙の成り立ちの大枠が、変更を受けていないのはすばらしいことである]。

◇1917年の状況は次のようだった。

系外銀河（渦巻銀河、または渦巻型星雲）は、すでに、天の川銀河内にあるガス星雲と認識されていた惑星状星雲や拡散星雲とは、区別されていた。

銀河の正体は、島宇宙に関する古い論争と関係していた。

1885年にM31[アンドロメダ銀河のメシエカタログ名]に起こった明るい新星が作った「銀河がかなり近い」という推測の波や、1895年にNGC5253に起こった新星による少し弱い同様の波はすでに収まっていた。

◇きわめて重大だと考えられたデータは、スライファーによって発見された極端に大きな視線速度と、ファン・マーネン（van Maanen）によって測定された、M101の大きな角度回転だった。視線速度が大きいことは、銀河が天の川銀河の重力を振り切って飛び出してしまうことを示しているが、一方で見かけの回転が見られるということは、距離が近いことを意味していて、M101は十分天の川銀河内にあることを示していた。

このように、観測結果は矛盾しその解釈は混乱していた。

## 【19】渦巻銀河内の新星

◇1917年7月にウィルソン山天文台のリッチー（Ritchey）は、渦巻銀河、NGC6946の写真の中に今まで記録されていなかった星（ $m=14.6$ 等）を発見した。

その後に撮られた低分散のスペクトルなどのデータは、それが新星であることを示していた。

◇リッチーとリック天文台のカーティス（Curtis）はすぐに、しまい込まれていたたくさんの渦巻銀河の写真調べ、この渦巻銀河に新星が現れていたことを発見した。

2つの特に興味深い天体が、リッチーが1909年に撮影したM31の一連の乾板において認識され追跡された。

その光度曲線は間違いなく新星型で、突然爆発的に明るくなり、ゆっくり暗くなった。

これは、再帰しない銀河系（福永注：天の川銀河のこと）内の新星と大変よく似ていた。

◇M31の天体はどちらも上昇期に発見されており、したがってその最大の明るさが $m=17$ 等であること、つまり肉眼で見える最も暗い星より2万5000倍暗いことがわかった。

その後の2年間に行なわれた組織的な観測の結果、M31にさらに14個の新星が発見されたが、他の渦巻銀河には発見されなかった。

これらの新星はすべて暗く、均質な1つのグループを構成していた。

リッチーの2つの新星はその典型例であった。

◇M31に1885年に起こった新星は、これらと比べる桁違いに明るかった。

その最大における光度は、渦巻銀河の全光度のかなりの割合を占めるほどであった。

この点から、より暗い他の渦巻銀河で検出された新星と似ていた。

◇新星には明るさが数千倍違う2つのグループがあることがわかった。

新しいデータの重要性は2つのグループ、暗い新星と明るい新星のどちらが銀河（福永注：天の川銀河のこと）の新星と同じものなのかという疑問に対する答に依存していた。

◇新星を2つのグループに分けるというアイデアは、カーティスやその他の研究者によって示唆され、1920年にランドマーク（Lundmark）によって確立された。

◇1917年においてはこの区別がはっきりと確認される前だったので、得られたデータは寄せ集められ、見境なく使われた。

シャープレーとカーティスは直ちに渦巻銀河の見かけの暗さは銀河の距離が大きいことを示して

おり、平均的には少なくとも銀河（福永注：天の川銀河のこと）内の新星より 50 倍（シャープレー）100 倍（カーティス）も遠いと指摘した。

◇カーティスはこの結論は島宇宙仮説の事実上の証拠だと考えた。  
シャープレーはそれが十分な証拠ではないとし、渦巻銀河が銀河系（福永注：天の川銀河のこと）の一員であるとの仮説を支持していた。

◇その後（1920 年）2 人の意見は彼らの手による「宇宙のスケール」についての国立科学アカデミーでの論争で十分に発展された。

◇同じ年にランドマークは大変な苦勞をしてデータを整理し、渦巻銀河と恒星系の関係を支持し、その距離を推定した。

彼の論文と上記の論争はその時点の問題点をまとめていた。

[注：ランドマークは彼の結論を次のように斜体で書いて強調している（1920 年の論文）。

「現在の研究は渦巻銀河が太陽系からかなり遠い距離になければならないという結果を与えている。それらがジーンズ（Jeans）が言う星形成中の系なのか、遠方の銀河なのかは決めることが困難である。たぶん現在知られている事実は後者を示唆しているのだろうが、渦巻銀河は、シャープレーの研究に従うと、天の川銀河の大きさとして知られる大きさほどの大きさを持つようには思えない。そして、渦巻銀河と同じような構造を天の川銀河が持っていることに関しては反対している人が多い。」彼は注意深く言葉を選んでいるが、彼の議論を見ると渦巻銀河が天の川銀河の外の天体である方向に明らかに傾いていたことが分かる。]

◇新星は重要な距離尺度であるが、それを使うためには銀河系（福永注：天の川銀河のこと）の中の普通の新星が暗い新星なのか明るい新星なのかをはっきりさせなければならなかった。

[注：この分類は後に確認され、「暗い新星」と「明るい新星」はそれぞれ「普通の新星」と「超新星」と呼ばれている。]

◇そして（ランドマークは）この銀河までの距離は 500 万光年程度であると推定した。

◇カーティスは銀河は天の川銀河に匹敵する独立した系であり、「それは 10 万光年から 100 万光年の大きさより大きな宇宙があることを示している」と結論した。

シャープレーはこの結論を否定し、ランドマークは態度を曖昧にしていた。

しかし 3 人とも、新星によって与えられた新しい尺度により渦巻銀河は太陽系からかなり大きな距離にあることを示していることには合意した。

## 【20】銀河の星への分解

◇新星の発見は、銀河の中にある星のもっと一般的な問題に関する考察に必然的に結びついた。またこれは、銀河の距離の問題の最終的な解決へと導いた。

◇1889 年に「知識」の編集者ランヤード（Ranyard）はロバート（I.Robert）の M31 の写真を複写し、最初に巨大な銀河の渦巻構造を示し、その外縁部にたくさんの星があることに注目した。この現象は今では当たり前に見える。

現在では、すべての銀河は島宇宙で、もし十分に望遠鏡の分解能が上がれば分解できると仮定しているからである。

◇ロバートは、自分自身では渦巻腕の粒粒（つぶつぶ）についてあまりはっきりとした言い方をしていない。

彼は「星」「星のような凝集」「星雲に取り囲まれた星」のような言葉を核や粒について使った。

◇これらの凝集が星であるのかという疑問が次第に強くなってきた。  
そしてこの疑問は、1910年にリッチーが新しい60インチ反射望遠鏡で撮影した写真について記述した時に正当化されたようだった。  
これらの写真は比較的大きなスケールの上であり、今まで撮影された写真の中で最も状態が良く、シャープだった。  
したがって、リッチーが「これらすべて、M33、M51、M101などを含む渦巻銀河は星のような凝集をたくさん含んでいる。これを私は星雲状星と呼ぶ」と述べ、2400個の「星雲状星」がM33に、M101には1000個あるとした。  
それはこの凝集が一般に、個々の普通の星を表わしているのではないことを暗に示していた。  
この写真の像の解釈は銀河の中の星の研究をかなり遅らせた。

◇ランドマークは1920年にリッチーのM33の写真調べて「数千の星が巨大な恒星系の一部を作っている」ことを示した。  
しかし、ランドマークはコピーしか見ておらず、オリジナルの乾板からのリッチーの結論を覆すにはさらに研究を進める必要があった。

◇この問題は、数年後に運用を開始した100インチ反射望遠鏡で行なわれた、2つの独立の研究によって解決された。  
1つはかつてないほど高い分解能を使った、星雲状の凝集の写真上の像の研究で、もう1つは銀河の中のセファイド変光星発見につながる研究であった。

◇大きな銀河のリッチーの乾板を再調査してみると、凝集の像はきわめて小さいが、同じ位暗い星の写真よりぼんやりしていることがわかってきた。  
しかし中心領域の凝集は、比較的明るい分解できないバックグラウンドの上に写っていた。  
また、背景が少ない外側の領域は望遠鏡のいろいろな収差で歪んでいた。  
だが像の恒星状でない概観は凝集自身の性質かもしれないし、これらの特別な条件における写真の特殊効果の成果かもしれなかった。

[福永注：ブリタニカからの引用：収差 (aberration)：大きな物体や着色した物体を口径の大きいレンズや曲面鏡を使って結像させるときに生じる像のぼけ、ゆがみ、曲り、色ずれなどのことをいう。収差にはレンズや曲面鏡の形に起因する球面収差と光の屈折率が波長によって違うことに起因する色収差とがある。収差をなくするためには材質の違うレンズを組合わせた組合せレンズを用いる。また表面反射を使った曲面鏡では色収差がない。]

◇後の可能性は2つの方法で研究された。  
まず中心領域を中心として、短い露出で写真を撮った。  
より長い露出で銀河の外縁部を中心においた写真と、近くの選ばれた領域の写真をとった。  
どちらの場合も100インチ反射望遠鏡で、最良の状況で撮影された。

◇これらの乾板は、今まで記録された中で最も小さな星像を達成していた。  
このようにして写真のならば効果が避けられたので、大部分の凝集の写真の像は基本的には恒星によく似た概観をしている事実が完全に確立された。  
例えば、M33では星群や星団、星雲の斑点と考えられる像は確かにたくさんあるが、一方でこの銀河から遠く離れた場所の、同じように暗い星の像と区別できない像の方が一般的だった。

◇これらの結果でさらなる研究への足場がなくなってしまった。  
この研究は凝集が星であるとは証明できなかった。  
それらは単に、その写真像が星の像と区別がつかないことを証明しただけであった。

◇凝集の直径は半秒角以下のどのような値でも取り得た。  
しかし大きな距離における半秒角の角直径は、大きな実直径に対応する。  
例えば、100 万光年では半秒角の角はだいたい 2.5 光年の大きさに対応する。  
この直径の球の中にたくさんの星を含むこともできるし、星ではない物質を大量に含むこともできる。

◇凝集が個々の星であることを確立するためには、凝集の 1 つをセファイド変光星に同定して、明るさの変動の範囲が正常であることを示す必要があった。  
もし、星群や星団となっている凝集の中の星がある範囲で変光したら、凝集全体の明るさの変化はその 1 つの星の変化よりずっと少ないであろう。  
セファイド変光星のような凝集の光度変化が普通のセファイド変光星と同じならば、それが 1 つの星であり、重星ではなく星団でもないことが確認できる。

◇他の型の星はあやふやながら同定されていた。

◇より明るい凝集は、たいていは、初期型（白か青）であることがわかっており、高い光度を持っていると思われた。

◇M31 の暗い新星は、銀河（福永注：天の川銀河のこと）の新星と同程度の明るさであることが認識されており、M33 でも同様の天体が見つかった。

◇残りの凝集の頻度分布は、恒星系の明るい星の見かけの明るさの頻度分布と似ていた。

◇したがって、絶対光度がセファイド変光星、新星やその他の星で見かけの明るさのスケールの上で決められた時に、類似性は完全となり、凝集は個々の星と認識された。

◇セファイド変光星で距離が決められた銀河の中の（福永注：M33 銀河の中の）最も明るい星は、その絶対光度は天の川銀河内の最も明るい星と同程度であるという事実が、この結果に整合性をさらに与えている。

## 【21】セファイド変光星

◇系外銀河中の変光星は、1922 年にダンカンが、M33 でおおわれる領域に 3 つ報告したのが、認識された最初である。

彼のデータは変化の性質を特定するには十分ではなかった。  
彼は変光星と銀河の関係を示唆するのを控えていた。

◇その次の年（1923 年）に 12 個の変光星が、マゼラン銀河に似た不規則銀河である NGC6822 に発見された。

これらの変光星のいくつかは、セファイド変光星の性質を持っていたが、それが完全に確立するには次の年まで待たねばならなかった。

◇最初の系外セファイド変光星は、1923 年の終りに M31 で認識された。

その年の 8 月に系統的な観測プログラムが、大きな渦巻銀河で頻繁に発生している新星の、統計的データを得る目的で始められていた。

このプログラムの、100 インチ反射望遠鏡を使った最初の条件の良い乾板は、2 つの通常の新星と、暗い、最初はもう 1 つの新星だと思われていた 18 等の天体とを発見した。

新星探索のためにウィルソン山天文台の観測者によって取りためられていた、たくさんの乾板と照合したところ、この暗い天体は実は変光星で、変化の性質がはっきりとわかった。

◇それは周期約1ヵ月の典型的なセファイド変光星で、その最大における絶対光度は、マゼラン銀河の同様の星の観測により、 $M=-4$ 、または太陽の約7000倍明るいことがわかっている。観測が示している ( $m_{\max}=18$ , 2等) ほどみかけの明るさが暗くなるために、距離は90万光年の桁である必要がある。

◇この最初の確かな同定が、アンドロメダ銀河の広範囲に及ぶ研究を引き起こした。それは、すべての使用可能な道具を使って行なわれたが、100インチ反射望遠鏡の長時間露出が主役となった。

1924年の終わりには、最初の結果が報告された。

36個の変光星が発見され、そのうち12個がセファイド変光星だと認められた。

◇1929年には詳しいデータが出版され、46個のセファイド変光星と86個の新星が確認された。1番、2番、7番、8番の4つのセファイド変光星の光度曲線（光度は見かけの写真等級）を比べると、最も明るい7番が最も長い周期を持ち、最も暗い8番が最も短い周期を持っていることが分かる。

◇この間、研究は自然にその近くの渦巻銀河、M33に進展した。

ダンカンによって発見された3つの変光星のうち、明るい2つは不規則変光星で、最も暗いものがセファイド変光星だと同定された。

1924年の終わりまでに22個のセファイド変光星が発見された。

1926年には35個のセファイド変光星と、2個の新星が議論に使えるようになった。

◇不規則銀河NGC6822には11個のセファイド変光星が見つかった。

また、型がよくわからない変光星が、他の明るい銀河で観測された。

◇セファイド変光星は曖昧さのない距離尺度であることが明らかになった。

光度曲線は典型的で、周期はよく知られた光度との関係を示している。

その関係は、マゼラン銀河の中のセファイド変光星で最初に確立されたものである。

もちろん、スペクトル型は決められていないが、積分されたスペクトルに対応するその色は、通常のセファイド変光星と同じである。

今や、銀河の距離は天の川銀河の遠い領域を調べるのと同じ方法、つまり星の絶対等級を使う方法で正確に決められるようになった。

◇最も大きな不確定性は、セファイド変光星の周期—光度曲線の原点の位置である。

これは見かけの等級から絶対等級を決め、さらに距離を決める時に必要な定数である。

この定数の値は一般に正しい桁にはあると思われていたが、質の高い新しいデータが集積されると、いくらか修正されるかもしれない。

[訳者注：著者のこの予感的中する。距離の絶対値を与える光度—周期関係の原点については、ハッブル自身が心配していた通り、その後大きな修正が加えられる。1952年にウィルソン山天文台のバーデは、シャープレーが光度—周期関係の原点を決めるのに使っていた球状星団の変光星は、普通のものとは違うことを示したのである。実は、球状星団の変光星は、おとめ座W型変光星で、普通のセファイド変光星（ケフェウス座 $\delta$ 型変光星）より、同じ変光周期に対して4倍暗い光度しか持っていない。この結果、銀河までの距離は約2倍大きくなった。このように銀河の中に変光星を発見することは、その銀河までの距離を正確に決めるときに一義的に重要だった。]

◇一方、渦巻銀河の距離は、マゼラン銀河の距離を単位に、より正確に表わすことができる。

距離の正確な値の決定については、将来の研究が必要である。

## 【22】 銀河は天の川銀河と同じ大きさを持つか

◇セファイド変光星は銀河の中で最も明るい星であるわけでは決していない。  
セファイド変光星は新星、ある型の不規則変光星、そして青い巨星より暗く、相対的な光度はすべて、天の川銀河で観測されているのと同じ桁だった。

◇輝線スペクトルを持った青い星を含む（天の川銀河の中の星雲と同様）拡散星雲の斑点が、ところどころに発見された。

◇そして後になって、球状星団と類似の天体が大量に同定された。  
星の構成要素はマゼラン銀河や天の川銀河が、遠い距離から観測された時に期待されるモノとほぼ一致していた。

◇銀河が星の集団であるという証拠は視線速度の証拠とともに圧倒的で、島宇宙理論は道理にかなない、疑いの余地なく確立したようだった。

◇この理論は2つの形をとっていた。  
その1つ、「島宇宙」は単に銀河が独立に系外空間に分布していることを示唆していた。  
もう1つの「匹敵する銀河」という概念では、さらに銀河の大きさが多かれ少なかれ、天の川銀河そのものと匹敵することを示していた。

◇当時、このどちらの形の理論とも完全に矛盾する、大きな角度回転の直接の強力な証拠があった。

[注：回転は、数年の間隔をおいて撮影された写真を比較して得られた。周りの星の相対位置と星雲の凝集の相対位置が比べられ、系統的な差が発見された。これらの変位は、乾板を撮影した時間間隔の間に起こった銀河の運動、つまり銀河の回転が渦巻に沿った凝集の運動によるものだと解釈された。]

◇1916年にファン・マーネンはM101の1年間の回転が $0''.02$ の桁であることを報告した。  
1921年と1923年の間に彼はさらに6個の銀河について同じ桁の回転データを公表し、さらに前の結果を確認する傾向にある測定結果を報告した。

◇これらの大きな角度回転は、距離が比較的小さく、最大数千光年であることを示唆し、したがって星の証拠と直接矛盾した。  
たとえば、M33においては回転速度はスペクトルからわかっており、その角度回転から考えるとその距離は2100光年の桁となるが、一方セファイド変光星から求めた距離は72万光年だった。

◇1923年にランドマークはM33の一对の乾板を再測定し、同じ方向の回転を見出した。  
しかし、その値は非常に小さくて、決定誤差の範囲内にあると考えられた。

◇回転についてのデータは完全に孤立していたが、この観測の中では辻褄が合っていた。  
しかし島宇宙理論とは完全に矛盾していた。

◇星の証拠〔セファイド変光星の発見のこと〕と視線速度の証拠は角度回転の証拠と相容れないので、2つの証拠のどちらかが否定される必要があった。  
前者に有利なデータが強かったので回転は無視され、銀河研究の領域はその成立時の矛盾にもかかわらず発展した。

◇この矛盾は1935年にいくつかの銀河について、もっとずっと長い時間間隔を数人の研究者が

調べて否定的な結果を得た時にやっと解決した。

この結果により、前に発見された速い回転はよく原因がわからない系統的誤差によるもので、現実の見かけの銀河自身の運動を示すものではないことが明らかになった。

◇「島宇宙」よりむしろ、「匹敵する銀河」に反対するもう1つの主張は、30万光年という天の川銀河の非常に大きな直径である。

この値はシャープレーが彼の球状星団の研究により求めたものである。

もし、銀河の直径がそれに匹敵するものであれば、見かけの直径から示唆される距離は大きすぎて、新星は観測不可能であるはずである。

この矛盾はこの時、ゆゆしき問題に見えた。

◇銀河の直径か、新星の光度かのどちらかが銀河系の値とは違う桁を持つことになるからだ。

しかし、新星の方がよりよく知られている距離尺度であり、それが示唆した距離の正しさはセファイド変光星によって銀河の大きさとは関係なく確認された。

◇最終的に M31 との比較の議論は、天の川銀河は例外的に大きな渦巻銀河であるということになって落ち着いた。

この天の川銀河が特に大きいらしいという主張は、遠い場所から見た時の表面輝度による明るい物質の分布からのものではなく、数十個の球状星団の分布からのものだった。

さらに、星間吸収の効果は考慮されていなかった。

天の川の中や近くにある、たくさんの星団は単に距離が遠いせいではなく、低銀緯の空間に満ちている塵とガスの雲により隠されているせいで暗くなっている。

後になって、この効果が調べられると、星団で決められた天の川銀河の大きさは、最初の30万光年という評価の半分か、さらには3分の1まで小さくなった。

◇一方、M31の直径は明るい物質の分布から決められたものだった。

後でM31の中に球状星団が発見されると、これらは明るい物質よりずっと大きな領域に広がっており、それらで決められるM31の大きさは天の川銀河と匹敵することがわかった。

ただし、天の川銀河はおそらく、少し集中度が低い銀河のようである。

◇さらに、最初の評価は小さなスケールの写真の像を眼で見て決めたものだった。

しかし、この写真を光度計で測ると、眼で見た限界よりずっと遠くからも光がやってきていることがわかった。

今や、M31の測定された直径は最初の評価の2倍となり、星団から示唆される直径とほぼ一致している [訳者注：現在ではアンドロメダ銀河の方が天の川銀河より2倍くらい大きいと考えられている。というのは、前述のバーデの研究によりアンドロメダ銀河までの距離が、本書で考えられているより2倍大きくなったからである]。

◇このようにアンドロメダ銀河と天の川銀河の大きさの矛盾はほとんど消え去った。

よりよい評価では大陸は小さくなり、島は大きくなって同じ桁に収まった。

天の川銀河は比較的大きな銀河の1つと考えることができるかもしれない。

球状星団は大きな空間全体に分布しているが、星団がまばらに存在する、さらに外側の領域では星の密度は多分非常に低い。

M31から見ると、天の川銀河からこの渦巻銀河を見た時と同じくらいの空の面積を占める可能性はあり得ないことではない。

## 【23】他の銀河までの距離尺度

◇島宇宙理論、さらには匹敵する銀河の仮定は今や完全に確立し、何の矛盾もない。

セファイド変光星が発見された時、島宇宙理論の地位はまだかなり不確定だった。星の徹底的な解析が、2つの大きな渦巻銀河である M31 と M33 と、不規則銀河 NGC6822 について行なわれた。それらは明らかに独立した恒星の集団で、100 万光年以下の距離にある。マゼラン銀河はもっと近い距離にある天の川銀河の外の銀河だと認められている。この数少ない銀河の標本がさらなる探求への出発点となる。

◇これらの銀河の研究の一般的な性質を述べておこう。銀河の数が少ないので、それは適正な標本になっているとは考え難い。しかし、星の成分によって与えられる可能性は捨てたものではなかった。セファイド変光星は銀河で最も明るい星ではない。それらは通常の新星、ある不規則変光星、そして O 型や B 型などの青い巨星より暗い。それぞれの型の星も距離決定に使える。ただし、その精度はセファイド変光星によるものよりかなり落ちる。

◇星はそれだけで基本尺度になるのですべて重要である。銀河の距離を決める他の方法は、最後には星によって較正されなければならない。

◇距離が遠くなるにつれて、セファイド変光星がまず見えなくなると思われる。次に不規則変光星、そして新星、そして青色巨星が見えなくなる。遂にはすべての星の中の最も明るい星だけが残る。最後には、時々起こる超新星を除いて星がまったく見えない、何百万という銀河が残るだろう。この予測の正しさは、観測によってかなり正確に確認されている。さらに、証拠はかなり貧弱であるが、晩期型の渦巻銀河の最も明るい星がほぼ同じ絶対等級にあることが強く示唆されている。

◇星の光度には上限があるようで、その上限は太陽光度の約5万倍である。この限界はほとんどの大きな恒星の集団ではほぼ同じ明るさであるようだ。したがって、銀河の中にとにかく星が検出されれば距離のおおざっぱな推定は可能である。

◇統計的な目的にはこれらの方法はかなり信頼性があり、十分たくさんのある型の銀河の距離を決め、適正な標本を作ることができる。この方法の最も重大な問題は、一般に星は渦巻が開いた晩期型の渦巻銀河と、不規則銀河からしか検出できないことである。

◇幸いなことに、おとめ座銀河団に属するいくつかの渦巻銀河の中に星が検出されている。他の型の銀河もこの銀河団の数百個のメンバーの中にあり、したがってそれらの距離は星で決められた渦巻銀河の距離と同じはずである。したがって、多数の標本についての解析が可能で、それにより銀河の平均的な性質が明らかになった。

◇これは銀河が記録される限り、距離を決める統計的な尺度として使える。最終的には、パーセントの精度で距離とともに増加する赤方偏移が発見され、もう1つの尺度となった。

◇銀河の領域の探求はこれらの距離尺度の助けを借りて行なわれた。初期の研究は、その結果の内的な無矛盾性で正当化された。基礎はしっかりと確立されたが、さらに大きな上部構造の存在が推定された。これらは実行可能なすべての方法で検証されているが、その検証の大部分はその内部的な無矛盾性についてである。

上部構造の最終的な確立は、臨界的で明瞭な実験というよりは、矛盾の無いデータのたゆまぬ蓄積によって行なわれた。

## 5. 速度-距離関係

### 【24】銀河の初期のスペクトル

◇銀河のスペクトルは最初にウィリアム・ハッギンズ卿によって肉眼で研究された。白色星雲と呼ばれていた天の川銀河外の銀河のスペクトルは、明らかに連続スペクトルだが暗すぎて詳細ははっきりとはわからなかった。最も明るい銀河である M31 の長期にわたる研究の結果、吸収と放射の線やバンドが存在するであろうと推測されていた。1888 年に撮られた非常に微かな写真は、この推測を裏付けているようだった。

◇シャイナー (Scheiner) が M31 に関して判読可能なスペクトル写真を撮ってこの疑問を解決した。1899 年までは、スペクトルについては何も報告されていなかった。彼は、渦巻銀河は多分恒星の集団であると結論し、衰えかけていた島宇宙についての論争への興味を復活させた。ファス (Fath) とウルフ (Wolf) も他の銀河の研究により同様の結論を得たので、明るい銀河は皆、太陽型のスペクトルを持っていることが一般に認識された。

### 【25】最初の視線速度

◇銀河の視線速度は 1912 年、ローエル天文台の V. M. スライファー (V.M.Slipher) によって最初に測定された。スペクトルの一般的な性質はわかっていたが、吸収線の位置を正確に決めるという困難な問題がやっと解決されたのである。スライファーが用いた装置は M31 のスペクトルをはっきりと記録することができた。そのスケール (スペクトル上の 1 mm あたりの波長差) は短かったが、吸収線の位置が通常的位置に完全には一致していないことを示すには十分だった。吸収線はスペクトルの紫側へのずれを示していた。これは、アンドロメダ銀河が地球に近づいていることを示していた。正確な測定により、近づく速度は毎秒約 190 マイル (300km) であることがわかった。1912 年の8月中に、念のため4回のスペクトル写真が撮られたが、どれも一致した結果を示したので、その結果は完全な信頼性のもとに公表された。

### 【26】スライファーの視線速度のリスト

◇M31 の速度の決定は、新しい分野への最初のステップが最も困難で最も意味があるという、一般原理の例として長いこととりあげられてきた。一度障害が取り除かれると、さらなる発展は比較的簡単である。しかし、銀河の速度データの蓄積には時間がかかった。また、明るい天体の観測がなされた後はその対象が暗い銀河に移ったので、次第に大変な作業になってきた。

スライファースはこの仕事をほとんど1人で成し遂げた。  
1914年に彼は13個の銀河の速度を公表し、1925年までにその数は41個に達した。  
いくつかの速度は他の天文台によって追試され、スライファースのデータの信頼性は疑う余地のないものになった。  
ただし、スライファースのリストに他の観測者が追加した銀河の数は4個にとどまった。  
1925年までに45個の銀河の速度が議論に供された。

◇最初速度は負で、観測者に近づいていることを示していたが、観測者に向かって遠ざかっていることを示す、正の速度を持つ銀河の数が次第に増加し、ついにはリストの大部分を占めるに至った。  
さらに、明るい銀河が観測された後は、新しく得られた速度の値は驚くほど大きかった。

◇全リストを見ると、速度は-190マイル/秒から+1125マイル/秒の範囲にあり、平均値は+375マイル/秒である。  
この速度は他の種類の天体のそれとはまったく違う桁だった。  
その速度がこれだけ大きいと、銀河はたぶん天野川銀河の重力場を振り切るはずである。  
つまり、銀河は天の川銀河とは独立の天体であることが明らかになった。  
そして、この結論は島宇宙理論を支持していた。

## 【27】データの解釈

### 【銀河に対する太陽の運動】

◇正確には、このデータをうまく解釈するために、まじめに考えられた他の理論は存在しなかった。  
太陽とともに運動する天の川銀河はそれ自身、銀河の領域を高速で運動していると考えられていた。  
他の銀河も同程度の速度で無作為な方向に運動していると思われた。  
したがって、観測された速度は、(a) 個々の銀河の「固有運動」と、(b) 太陽の運動を、足し合わせたものだった。

[注：太陽の運動は天の川銀河内の太陽の運動と、天の川銀河と他の銀河に対する運動を足したものである。]

もし、十分たくさん銀河が観測されたら、その無作為な固有運動は打ち消されて、太陽の運動が残るはずである。

◇この原理はおなじみのもので、銀河系内で星々に対する太陽の運動を決めるのに非常に役にたっていた。

この原理はトルーマン (Truman) によって1916年に初めて銀河に適用された。

この時はまだ、10個ほどの銀河の速度しかわかっていなかった。

他の研究者もこの原理に従って方程式を解いてみた。

スライファースもその1人で、彼は1917年に25個の銀河の速度について測定した時に同様のことを行なった。

数値的な結果は大体同じで、太陽の運動は大部分天の川銀河の運動で解釈でき、その大きさは420マイル/秒、その方向はやぎ座の方向だった。

◇太陽の運動が取り除かれれば、銀河の固有運動の速度は観測された速度より小さくなり、さらに無作為に分布する。

つまり、近づいている銀河の数は遠ざかっている銀河と同じくらいになると期待された。

実際は残った速度はかなり大きく、しかも正の速度を持つ銀河が大部分を占めていた。

この非対称な分布は、太陽の運動以外の系統的な効果の存在を示していた。

◇これが、1918年にワーツ（Wirtz）が恣意的と思えるK項、つまり太陽の運動を求める前に、すべての観測速度から引かれる定数の速度を導入した理由であった。

◇K項のアイデアは新しくなかった。

例えば、それはB型星に対する太陽の運動を決める時に使われていた。

その場合、その大きさは毎秒約4キロメートルで、星の大気圧か、重力場か、他の青色巨星に特有の条件を表わしていると考えられていた。

銀河の場合その項が毎秒400キロメートルの桁と法外に大きいので、残差の分布に大きな影響を与えていた。

その導入は論理的な帰結ではあるが、このような冒険をするにはかなりの勇気を必要とした。

◇ワーツによる問題の定式化では、K項とともに太陽の運動もデータから決められるべき未知数として含まれていた。

彼はその解を求めた時、たった15個の速度しか知らなかった。

しかし、3年後（1921年）には29個の速度を用いて同じ計算を行なった。

新しい結果も初期の結果と同じくらいの大きさの値を与えた。

K項の大きさは約500マイル/秒だった。

太陽運動は再び440マイル/秒だったが、その向きは天の北極の方向に向いていた。

しかし、より重要なことは残差、つまり個々の銀河の固有運動の広がり、

多かれ少なかれ無作為だったことである。

そして、系統的な効果はほとんどなくなった。

しかし、問題はまだ残っていた。

つまり、残差は完全には満足できるものではなかったが、K項を銀河の特徴的な性質として受け入れるとかなりの進歩が見られた。

この後の議論では当然のこととしてK項を含めて行なわれた。

## 【28】距離の関数としてのK項

◇ワーツが最初にK項を導入した時、彼は単に正の符号が多いこと、そして速度の大きな値のためにそれが必要だと主張していた。

彼は、もしスペクトル線のずれが本当に速度差によるものだったら、K項はすべての銀河が天の川銀河に対して、系統的に遠ざかっていることを意味していることをよく知っていた。

彼はこの解釈についてははっきりとは言っていないが、問題を未解決のまま取り扱い、「事態を収拾」するための恣意的な道具であるかのように使った。

◇しかし、当時の最新の理論はすでに、K項の意味を示していた。

1916年にアインシュタイン（Einstein）は、宇宙の内容と幾何学の関係を表現する宇宙方程式を一般相対性理論から導き、定式化していた。

宇宙は静的であり、時間が経っても系統的には変化しないとの仮定のもとに、彼は宇宙方程式の解を見つけ、ある特別な1つの宇宙がどんなものかを記述した。

ド・ジッター（de Sitter）は1916年から1917年にかけて同じ方程式を用い、もう1つの解を見つけた。

後で、この仮定のもとでは他の解が存在しないことが示された。

◇2つの解のどちらが、実際に私たちが住んでいる宇宙に対応しているのかを知るために、注意深く調べられた。

2つの解の最も大きな違いは、ド・ジッターの解が、遠い光源からの光のスペクトルは正のずれ（赤方偏移）を持つことを予言していたことだった。

そのずれは平均的には観測者からの距離に比例して増加するはずだった。

ド・ジッターはその時たった3つの速度しか知らず、理論と観測を大がかりに比較することができなかった。

しかし、彼が述べているように、2つの暗い方の銀河（NGC1068 と NGC4594）の大きな正の速度と、最も明るい銀河である M31 の負の速度を比べてみると、彼の解の予言と一致していることは明らかだった。

◇ド・ジッターの宇宙は、今では実際の宇宙を反映しているとは思われていないが、その頃は K 項が変化している可能性へ注意を向けるのに重要な役割を果たした。

距離とともに赤方偏移が増加する割合は、理論は予想していなかった。

その割合は大きいかもしれないし、小さいかもしれない。

また、はっきりわかるほど大きいかもしれないし、検知できないほど小さいかもしれない。

そして、その疑問には観測だけが答えることができた。

しかし、そのためには銀河までの距離が必要だったが、その距離がわからなかった。

この事実と、なじみがない一般相対性理論の言葉で語られる、革命的な考えに対する自然な抵抗感が、研究者をして、直ちにこの分野の研究に向かわせるのをためらわせたのだろう。

◇エディントン（Eddington）と他の研究者が、この新しい考えを「普及」させた後になって初めて、この問題が真剣に検討されるようになった。

◇もし、速度が距離とともに増加するのであれば、大きな定数の K 項は観測された特別なグループの銀河の、平均距離に対応した速度を示しているのかもしれない。

この可能性には誰も特に言及しなかったが、一般的に認められていた。

◇この問題は次のように定式化された。

「K 項はすべての銀河で一定なのか、それとも距離とともに変化するのか？」と。

◇銀河の絶対距離を決めることは、きわめて困難だった。

相対的な距離の尺度は、見かけの直径と見かけの明るさしかなかった。

しかし、どちらも信頼できなかった。

というのは、大きさと明るさの範囲はよくわかっておらず、それはかなり大きいと信じられていたからである。

例えば、M31 の三重銀河では2つの伴銀河は直径で 60 対 1、光度で 100 対 1 の差がある。

しかもこの範囲が銀河一般に使える保障はなかった。

しかし、一般に小さい暗い銀河は、明るい大きい銀河より、疑いなく平均距離が大きいはずである。

この尺度は速度でカバーされる距離の範囲が、この尺度によって導入されるばらつきより大きければ、使うことができるかもしれない。

◇この分野のリーダーであったワーツは、1924 年に 42 個の銀河の速度について、見かけの大きさを使った距離の関数として K 項を表現することを初めて試みた。

その結果、小さな見かけの直径を持つ銀河ほど速度が大きいという相関が認められた。

◇しかし、その結果は単にそれを示唆しているというべきで、決定的というにはほど遠かった。

それは真の直径についての未知のばらつきによる、不確定性の影響を受けていただけでなく、速度と集中度の間の見かけの相関の効果も示唆していた。

型で分類してみると、強く中心に集中した球状の銀河は最も大きな平均速度を、大きく暗い不規則銀河や、渦が開いている渦巻銀河は最も小さな平均速度を持っていた。

これら両極端の間では速度は集中度とともに増加した。

◇この相関は一般に知られていて、強い重力場によって作り出されるアインシュタイン偏移で K 項を説明しようとする、見当はずれの試みに動機を与えていた。

このアインシュタイン偏移は、一般相対性理論の重要な検証になった太陽スペクトルにおける赤方偏移と、同様なものである。

◇最終的にはこの相関は単なる選択効果によるものであることがわかった。  
集中した天体はその輝度が高いため、銀河のスペクトルの写真を撮るとい骨の折れる仕事を行ないやすかったのである。  
これらの天体は比較的少ないが、暗い銀河の研究をする時に選ばれやすい傾向が自然に生まれたのである。  
それらは観測された銀河の中で、平均としては最も暗く、最も遠い銀河である。  
このため最も大きな平均速度を示していたのである。  
このような説明は後でなされた。  
この時は直径が小さいことは集中度、または距離、もしくはその両方が大きいことを意味しているかもしれないと信じられていた。  
したがって、直径と速度の関係ははっきりしなかった。

◇1924年にランドマークはワーツと同じ銀河を使って、直径と光度を組み合わせることで距離の尺度として用い、いくらか楽観的に「2つの量（速度と距離）の間にはそれほどはっきりしたものではないが、何か関係があるかもしれない」と結論している。

[福永注：光度と直径の間には、 $\text{光度} = \text{定数} \times (\text{直径})^2$  という関係がある。  
光度と距離の間には、見かけの光度は距離の二乗に反比例するという関係がある。]

◇1925年にストロームベルクは光度だけを尺度として用いて、データの特に明確な解析を行なった。  
そして「視線速度が太陽からの距離に関係があると信ずるべき理由はどこにもない。」と結論した。  
観測家の立場から言えば、真実がどうなっているかは別として、データは関係を示してはいないと言いかうがなかった。  
重要な課題は、もっとデータを集めることであり、もっと正確な距離尺度を作ることだった。

◇ただし、ストロームベルクは、K項は系統的には距離とともに変化してないように見えるが、銀河ごとには変化している、つまり、M31とマゼラン銀河については小さく、NGC584については大きく（観測された中で最も大きな速度+1125マイル/秒を持っている）と、かなりはっきりと表現している。

## 【29】速度-距離関係

◇この状態で自体は1929年まで発展しなかった。  
スライファーは他の問題にテーマを変え、たった2つか3つ、新しい速度が決められたにとどまった。  
しかし、この間に距離の新しい尺度が発達した。  
これは見かけの大きさや明るさから決めた距離よりずっと信頼度が高かった。  
前の章で述べた新しい尺度は、銀河の中の星から求めるもので、銀河そのものから決めるものではない。  
銀河は今や、天の川銀河の外の空間に散らばる、独立した恒星の集合体であることがわかった。  
その中に天の川銀河でよく知られたいろいろな型の星が同定された。  
これらの見かけの暗さから、それらが属している銀河の信頼できる距離が求められた。

◇少し不正確な距離は、銀河の中の最も明るい星の見かけの暗さから決めることができた。  
これらの尺度は最も近い大きな銀河団である、おとめ座銀河団まで使うことができ、その距離は

600 万から 700 万光年の桁である。  
新しい尺度のばらつきは、速度でカバーした距離の範囲より十分小さかった。  
この新しい発展が、距離の関数としての K 項の研究を不可避免的に再び促した。

◇1929 年には 46 個の銀河の速度がわかっていたが、新しい尺度で距離が決められたのは 18 個の孤立した銀河と、4 つのおとめ座銀河団の銀河のみであった。  
しかし、距離の不確定性はそれらが分布している範囲に比べて小さかったので、基本的には現在の形のデータから速度-距離関係が浮かび上がってきた。

◇銀河たちに対する太陽の運動は約 175 マイル/秒で、その方向はこと座のベガの方向だった。  
この結果は太陽の銀河回転、つまり銀河中心の周りの、太陽の公転運動によるものとあまり違わない。  
この一致は、天の川銀河の他の銀河たちに対する運動は小さいことを示している。

◇K 項は距離の一次関数でよく表された。  
平均としての速度は、観測された 650 万光年の範囲ではおおざっぱに言って、100 万光年あたり毎秒 100 マイルの割合で増加していた。

◇太陽の運動とともに距離効果が観測速度から取り除かれると、その残差は銀河の固有運動を表わしており、その大きさは 100 マイル/秒であった。  
さらに、接近する銀河の数は、後退する銀河の数とほぼ同じになった。  
観測速度は桁の単位で小さくなり、残差の分布は満足できるものとなった。

◇速度-距離関係が一度確立してしまえば、それを速度がわかっているすべての銀河についての距離尺度として使うことができる。  
この新しい尺度は、スライファールのリストにあって、星が検出されていない銀河に最初に適用された。  
観測した速度を K 項で割った商は、固有運動によって導入された不確定性しか持っていない距離を示していた。  
距離と見かけの暗さを使えば、本来の光度を求めることができた。  
このようにして求められた光度は、星が観測された銀河のそれと、ほぼ同じであった。  
つまり、平均値の点でも不確定性の範囲内で一致していた。  
速度が測られた銀河は、同質の 1 つのグループの適正な標本であることが判明した。  
これらの結果の一致は、速度-光度関係の正しさのもう 1 つの証拠である。

### 【30】 ハマソンの視線速度のリスト

[なんども出てきた視線速度について：福永注：参考文献から抜粋し一部を改変：視線方向は、観測者の視線に平行な方向で定義する。一方、接線方向は、観測者の視線に垂直な方向で定義する。もし物体が完全に視線方向や完全に接線方向ではない方向に動いていれば、全速度(total velocity)は 2 つの成分に分けられる。それは視線速度(視線に平行な方向の速度)成分と接線速度(視線に垂直な方向の速度)成分である。便宜上、視線速度は物体が観測者から離れていくときを正とし、近づいてくる場合を負とする。]

◇データは、多くの権威者によって再検討され、ときどき小さな修正を受けたが、この線形関係によって、その時点でわかっていた観測速度をうまく説明することは、一般に認められた。  
しかしデータが少なく、観測できる宇宙のほんの一部しかカバーしていなかった。  
さらなる進歩はより暗い、遠い銀河を観測する能力によっていた。  
この苛酷な仕事はウィルソン山天文台のミルトン・ハマソンによって遂行された。

◇スライファ―はそのパイオニア的な仕事で、24 インチ反射望遠鏡による実際上の限界の暗さの銀河の観測を行なった。

ハマソンはウィルソン山の大反射望遠鏡を使って未踏の領域深くに足を踏み入れた。

彼は自分の観測プログラムを 1928 年に始め、1935 年までに 150 個の銀河の速度を新たに決めた。

測定した距離はおとめ座銀河団の距離の 35 倍におよんだ。

◇銀河のスペクトルの研究における新しい段階は、技術と装置の着実な進歩によって特徴づけられていた。

小さな暗い銀河の準恒星状の像に関しては大きな反射望遠鏡、特に 100 インチ反射望遠鏡は小さな望遠鏡に対して決定的に有利だった。

この分光器はこの特別な能力を利用するべく設計され、使用経験をもとに頻繁に改造された。

◇最も重要な装置であるプリズムの後ろのカメ―は、レイトンレンズで作られていた。

このレンズはポッシュ&ロム光学会社の W. B. レイトン (Ryton) 博士によって設計され、逆顕微鏡対物レンズの原理で作られた。

このレンズは  $F/0.6$ 、つまり焦点距離が口径の半分より少し大きいだけという明るさで、極端に暗い銀河のスペクトルを記録することができた。

◇レイトンレンズの成功により、油浸顕微鏡対物プリズムを使った明るいカメ―を開発するための、さらなる実験が開始された。

この原理によって焦点距離口径比  $0.35$ 、すなわち焦点距離が口径の  $\frac{1}{3}$  のサイズが達成された。

ただしこのレンズは、まだ望遠鏡につけてテストされてはいない [注：このレンズは R. J. ブレイシー氏によって設計された。巨大望遠鏡に搭載するための装置を、自前の物理実験室で独自に開発することの重要性は、ウィルソン山天文台の基礎を築いた E. ハールの持論であった。彼は、ウィルソン山天文台とカリフォルニア工科大学の天体物理観測所の実験室を、合併することでこれを実践した]。

### 【31】銀河団

◇ハマソンは自分の研究を、速度がすでにわかっているいくつかの明るい銀河のスペクトルから始めた。

彼は自分の装置と技術の信頼性を確認してから未知の領域へ飛び込んでいった。

最初の課題は、速度-距離関係をより大きな距離で確認することだった。

このために観測は銀河団の最も明るい銀河に集中して行なわれた。

◇まず、ペガサス座銀河団の速度が図られ、+2400 マイル/秒であることがわかった。

これはそれまで知られていた最も大きい速度の 2 倍だった。

その後、より暗い銀河団が観測され、吸収線は次第にスペクトルの中を移動していった。

かみのけ座銀河団で 4700 マイル/秒、おおぐま座第 1 銀河団で 9400 マイル/秒、ふたご座銀河団で 15000 マイル/秒、さらにおうし座とおおぐま座第 2 銀河団でそれぞれ 24500 と 26000 マイル/秒の速度が観測された。

この最後の速度は光速の  $\frac{1}{7}$  にも達している。

◇これらの最後の銀河団は、望遠鏡の長い焦点 (カセグレン焦点) では見えない。

分光器のスリットはまず近くの星に固定され、その後、直接写真撮影で決められた量だけ移動され、見えない銀河に向けられた。

このように、観測は存在する装置の能力の限界まで進められた。  
これ以上の大きな進歩は、より大きな望遠鏡が作られるまで望めない。

◇全領域で速度は距離とともに増加し、線形関係は距離の誤差の範囲で成立している。  
速度が測定された中で、最も暗い2つの銀河団の距離は、それぞれ2億3000万光年と2億4000万光年（7000万パーセクと7300万パーセク）の桁である。  
したがって、線形な速度-距離関係は空間の膨大な体積にわたって確立され、観測可能な領域そのものの一般的な性質として考えられるだろう。

### 【32】 孤立した銀河

◇銀河団の予備的な研究の後で、研究の重点は孤立した銀河に移った。  
ここでもまた、ハマソンがデータの量を急速に拡大させた。  
星を検出できる銀河の数は18個から32個へ増加し、速度がわかった孤立した銀河の数は100を超えた。  
銀河群もこのプログラムに入れられており、今や5個のはっきりした銀河群の中の、15の銀河の速度が測られた。

◇孤立した銀河は13、0等までは完全に把握されており、それより暗い銀河もかなり記載されている。  
観測された最も暗い銀河は17、5等で、その速度は+12000マイル/秒である。  
すべての天体は銀河団で決められた速度-距離関係に従っている。  
孤立した銀河で決められた関係も完全に線形である。

### 【33】 速度-距離関係の意義

◇距離尺度としてだけでも、この関係は銀河研究の助けとなっている。  
重大な誤差は固有運動によるものである。  
これらの平均値は、100マイル/秒から150マイル/秒の間で、距離によらないと思われる。  
K項が距離とともに増加しても、固有運動は定数で、K項よりずっと小さくなってしまふ。  
決定精度が距離の増加とともに増加することは、測光観測を含む方法と好対照を示している。

◇速度-距離関係は研究の強力な道具であるばかりではない。  
それは、私たちの宇宙のいくつかしか知られていない一般的特徴の1つでもある。  
最近まで宇宙の研究は比較的短い距離、小さな体積に限られてきた。  
それは宇宙全体から見ると、ほんの小さな部分である。  
今や、銀河の領域では物質と放射の大規模な構造が研究されている。  
期待は高まっている。  
ほとんど何でも起こり得るのではないかとの予感がある。  
実際、霧が後退するにつれて速度-距離関係が現われた。

◇これは第一義的に重要である。  
というのは、もしこれが完全に説明されたら、この関係は宇宙の構造の問題を解明する、かけがえのない鍵となるはずだからである。

◇観測は、銀河のスペクトルの構造が正常な位置から赤方に偏移しており、その赤方偏移は銀河の暗さとともに増加することを示している。  
見かけの暗さは間違いなく距離のせいである。

したがって、観測結果は、赤方偏移は距離とともに増加すると言い換えることができる。

◇赤方偏移そのものの解釈については、このような完全な自信があるわけではない。

赤方偏移は比  $d\lambda/\lambda$  で表わされる。

ここで  $d\lambda$  は、正常な波長が  $\lambda$  であるスペクトル線の偏移である。

この偏移  $d\lambda$  はスペクトルの場所によって系統的に違うが、 $d\lambda/\lambda$  のような比は一定になる。

したがって、 $d\lambda/\lambda$  が銀河の偏移を表わし、その割合が銀河の距離に比例して増加する。

このように赤方偏移の項は、比  $d\lambda/\lambda$  で表わされる。

[注：銀河の見かけの視線速度を求めるためには第一近似では比  $d\lambda/\lambda$  に光速（18万6000マイル/秒）を掛ければよい。]

◇さらに、偏移  $d\lambda$  はいつも正（赤方）で、偏移した線の波長  $\lambda + d\lambda$  は正常の波長  $\lambda$  より長い。

波長は  $(\lambda + d\lambda)/\lambda$  または  $1 + d\lambda/\lambda$  倍大きくなる。

◇さて、光量子のエネルギーとその波長を掛けた積は一定であるという物理の基本法則がある。

つまり、エネルギー×波長＝一定 である。

ということは、積は一定だから波長が増加すると、光量子のエネルギーが減少することになる。

赤方偏移を説明しようとするれば、このエネルギー損失を説明しなければならない。

◇この損失は、銀河の中で、もしくは光が観測者まで旅をする非常に長い道のりの途中で起こらなければならない。

この問題の研究を通して、次のような結論が得られた。

◇赤方偏移を起こさせるいくつかの方法がある。

それらの中でただ1つだけが、観測で分かるような他の効果を作らずに、大きな偏移を作ることができる。

それはドップラー効果である。

これは、赤方偏移は銀河が実際に後退していることに帰する。

赤方偏移は速度によるものであるとかなりの信頼性を持って言える。

さもなくば、今まで未知の物理法則を考え出さねばならない。

◇速度による解釈は、一般に理論研究科に採用されており、速度-距離関係は、膨張宇宙の観測的な基礎だと見なされている。

このような理論は広く知られている。

それは、宇宙は静止していないとの仮定から出てくる方程式の解を表わしている。

それらは宇宙は静止していると仮定して得られた、それより前の解に取って代わった。

静止解は今では特殊な場合であると見なされている。

◇しかし、銀河の赤方偏移は非常に大きなスケールにおけるものであり、私たちが今まで、ほとんど経験していないものである。

必要な研究は困難と不確定性につきまといわれており、現在使えるデータからの結論はかなり疑わしい。

◇赤方偏移の解釈は、少なくとも部分的には実験的な研究の範疇にある事実をここに強調しておきたい。

望遠鏡の能力をまだ使い切っていないので、赤方偏移が実際に運動を反映しているのかが観測からわかるまで、結論を先に延ばしてもいいと思う。

◇さしあたっては便利なように、赤方偏移を速度のスケールで表わせるかもしれない。

それらは赤方偏移と同じように振る舞う。  
だから最終的な解釈とは別に、赤方偏移を表わす単なる親しみやすいスケールとして使われる。  
「見かけの速度」という言葉は、注意深く考えられた文に使われる。  
「見かけの」というこの形容詞はいつも、一般に使われる時には省略されがちである。

\*\*\*\*\*

## 参考資料・その5 ハッブルの時代

### 1. 星雲の領域——天文学が宇宙論に踏みこむ

■20世紀が進むにつれ、天の川と宇宙ははたして同義語だろうかという疑問が浮かび上がってきた。宇宙のすべての星が天の川に属しているという可能性も大いにあった。もしそうだとしたら、無限の空虚に囲まれた天の川が物質宇宙そのものということになる。

■また、大きさや性質において天の川と似た別の恒星系が、「島宇宙」として存在している可能性もあった。

この島宇宙説の真偽は、当時の天文学者のあいだで激しい議論の的だった。

巨大なウィルソン山100インチフッカー望遠鏡が建設されたとき、天文学界は「大論争」の両サイドへ分裂していた。

この疑問の中核をなすのが、渦巻星雲として知られる一連の天体だった。

■18世紀と19世紀の天文学的研究によって天空の住人の徹底的な調査がおこなわれ、単なる恒星や惑星以外の天体が発見された。

星雲と呼ばれる、雲のようにぼんやりした天体が姿を現したのだ。

星雲のなかには、丸くて滑らかなものもあった。

また不規則でとげとげしたものもあった。

しかしもっとも関心を集めたのは、1845年にはじめて発見されたかざぐるまのような形をした謎めいた渦巻星雲だった。

側面から見た渦巻星雲は、はっきりした円盤状の姿をしていることが多かった。

■渦巻星雲の円盤状の形に、一部の天文学者は強い興味を持った。

円盤形の恒星の集合体は、宇宙論的仮説の分野においてすでに思わせぶりの登場を見せていた。

さかのぼること1785年に哲学者のイマヌエル・カントは、宇宙の歴史の有力なモデルとして、天の川は回転する巨大なガスの雲が自らの重力で収縮して形成されたと推測した。

そして、そのような収縮による自然の結果として、天の川は円盤の形をしているという仮説を立てた。

20世紀初頭になると観測される天体の数が増え、カントの説を思い返したヒーバー・カーティスなど多くの天文学者が、渦巻星雲はわたしたちの天の川のように独立した恒星の集合体であると推測するようになった。

それらの島宇宙、すなわち銀河が天の川と同じ大きさだとしたら、天空でこれほど小さく見えるのだから遠い距離にあるに違いない。

ハーロウ・シャプレーなど島宇宙仮説に反対する人たちは、それにはあまりに遠い距離が必要で想像の域を超えていると論じ、渦巻星雲に対するこの解釈を否定した。

彼らの描像では、宇宙はそんなに大きいはずはなかった。

渦巻星雲は、天の川のなかのもっとずっと近くにある、面白い形をしたガスの雲でしかないはずだ

と、彼らは主張した。

■科学はいまだに、わたしたち自身の銀河の素性も特定していなかったし、ほかの銀河の存在も証明していなかった。

銀河空間、そして宇宙そのものの真の大きさは、エドウィン・ハッブルの登場まで明らかにはされなかった。

■若きハッブルは、1919年にパサデナ（カリフォルニア工科大学とウィルソン山天文台のオフィスがある）へやってきた。

シャプレーは、渦巻星雲は天の川のなかにあると確信していたが、ハッブルは島宇宙説に賛同していた。

そこでこの問題に独自に挑戦しようと決心したが、渦巻星雲の謎を解くには、それらの距離を測定するための信頼性の高い方法が必要だった。

■天文学者にとって距離は厄介の種だ。

恒星まで巻尺を伸ばすわけにはいかない。

そこでその代わりに、距離へ変換できる別の測定値を見つけなければならない。

特別な条件では、明るさの測定がそれにぴったりだ。

どんな光源でも、その見かけの明るさは距離とともに小さくなる。

したがって、光源の固有光度が分かれば——その電球が100ワットだと分かっている場合のように——見かけの明るさが小さくなるというこの効果を使って距離を求めることができる。

■天体が見かけ上どれだけ明るいかと、その天体が本来どれだけ明るいかを比較すれば、その天体までの距離を直接計算できる。

天文学者にとって問題は、恒星など天体の光源の側面には「100W」といった文字が印刷されていないことだ。

しかし幸運なことに、いくつかの種類天体は、もっとも重要な固有光度を導くことのできる特徴を持っている。

それらの天体は「標準光源」と呼ばれ、金（きん）のような価値がある。

標準光源が見つければ、明るさを測定すると同じく距離を単純に決定できる。

■1920年代にはすでに、ケフェウス型変光星と呼ばれる特別な種類の脈動性が、標準光源として特定されていた。

ケフェウス型変光星は、日単位や週単位の周期で明暗を繰り返す。

1908年に天文学者のヘンリエッタ・リーヴィットが、ケフェウス型変光星の変光周期と平均固有光度とのあいだに直接の関係があることを発見した。

要するに、恒星に印刷されている「100W」という文字を読み取る方法を見つけたことになる。

リーヴィットの研究のおかげで、ケフェウス型変光星を見つけてその変光周期を測定すれば、即座にその恒星（およびその周囲の天体）までの距離を計算できるようになった。

■巨大なフーカー望遠鏡を使えば、大きな渦巻星雲のなかにある恒星を一つ一つ見ることができた。1923年10月5日にハッブルは、距離の測定に使える目印を探すために、一晩かけてアンドロメダ座の大渦巻星雲を徹底的に探索した。

翌日、以前の観測結果と比較していると、写真乾板上に探していたものを見つけた。

アンドロメダ星雲のなかにケフェウス型変光星を発見し、ハッブルは驚喜した。

そしてその新発見の標準光源を使い、数行の単純な計算によって、100年に及ぶ論争に決着を付けた。

■ハッブルはそのケフェウス型変光星を用い、アンドロメダ星雲は地球からほぼ100万光年の距離にあると計算した。

その値は、天の川の端までの距離のいかなる概算値よりもはるかに大きく、アンドロメダ座の渦巻星雲は天の川のなかには存在しえないことを意味していた。  
それは紛れもなく渦巻銀河だった。

■ハーロウ・シャプレーはすでにハーヴァード大学に移っていたが、渦巻星雲は天の川の一部であるという信念は捨てていなかった。  
ハッブルの発見の知らせを受けたシャプレー（若いハッブルを忌み嫌っていた）は、ある学生に「この手紙がわたしの宇宙を破壊した」と語った。

■ハッブルの結果によって、渦巻銀河は確かに銀河であり、さらに重要なこととして、宇宙は誰もが想像していたよりもはるかに大きいことが証明された。  
ハッブルの発見以降、宇宙空間の測定は、銀河やその宇宙的分布に対しておこなわれるようになる。宇宙論は哲学的思索の時代を離れ、天体物理学の時代に入ろうとしていた。

## 2. 宇宙を組み立てる——ゲームの始まり

■真の科学的宇宙論には、宇宙全体の理論、空間と時間の完全で包括的な数学的記述が必要だ。そのような理論は、宇宙で起こるすべての事柄を記述できるモデル、数学的表現となる。そのモデルはまた、観測において何が予想されるかを示し、また天文学的観測の生データを理論的予測と比較できるものでなければならない。

■宇宙論が擬似哲学的思索の領域から、最終的により確固とした科学の領域へ進むとしたら、検証可能な宇宙の記述が必要となる。  
そして、物理学や天体物理学の一分野にならなければならない。  
宇宙は、原子や石やウシといった、物理学のほかのあらゆる研究対象と同じように扱わなければならないだろう。  
しかし宇宙は、すべての原子、すべての石、すべてのウシ、そしてすべての科学者を含んでいる。巨大な箱のようにすべてのものを含んでいるだけでなく、箱そのものだ。  
科学者たちは、存在全体を内側からどのように記述したらいいのだろうか？

■宇宙論はいくつもの面で、アインシュタインの登場を待っていた。  
アインシュタインとその一般相対論は、宇宙論の理論的記述を可能にする方法を見つけた。

■宇宙のモデルを構築しようというそれまでの試みはすべて、時空の性質に関するアインシュタインの洞察に欠けていたため、容易には前進しなかった。  
成功するモデルへ向けた第一歩が特殊相対論であり、ニュートンによる絶対空間と絶対時間の神の意識が一扫され、統一された四次元時空へと置き換えられた。  
その作業が完了したのは、一般相対論が、その時空の柔軟な骨組みと質量＝エネルギーの大規模分布とを結びつけたときだった。  
それにより、重力は時空の柔軟な骨組みにほかならず、質量＝エネルギーが時空の重力的歪みを引き起こす主体であることが認識された。

■アインシュタインが自らの場の方程式を使って時空と質量＝エネルギーを結びつけ、宇宙論モデルを構築しはじめるまでに、長い時間はかからなかった。  
しかしそれには、アインシュタインのすべての研究成果と、それに続くほかの人たちの研究を、ある重要な仮定に従わせる必要があった。

■宇宙全体の数学的記述を導くには、宇宙は第一義的に完全である、すなわち、きわめて滑らかできわめて対称的であると仮定しなければならなかった。

専門用語で言うと「一様」で「等方的」となるが、その意味するところは単純で、宇宙的スケールにおいてどの視点からどの場所で見ても同じに見えるという意味だ。  
宇宙は大スケールにおいて完全に対称的であると仮定しない限り、アインシュタインの方程式から宇宙論的モデルを導くことはできなかった。

■完全に滑らかなピンポン球は、どの角度から見ても同じに見える。  
物理学者は、理想的なピンポン球のような完全な球を、最大限に対称的であると表現する。  
同じように、完全な球の表面に立って歩き回りながら調べるとすると、どの場所から見ているかによってその場所の記述が変わることはない。  
つまりどの場所も同じに見える。  
現実の宇宙も最大限に対称的であると仮定することにより、アインシュタインの方程式における小さな時空領域の記述を、時空全体の記述、宇宙全体の数学的記述にすることができた。

■この仮定を置くことで、アインシュタインは宇宙の歴史と宇宙の構造を探究できるようになった。  
宇宙論に関する古代の疑問は、まだ残っていた。  
宇宙には始まりがあったのか、それともつねに存在しつづけてきたのか？  
空間は無限か、それとも何らかの境界があるのか？  
アインシュタインは新たに組み立てた相対論的宇宙論によって、それらの大問題の多くに対して数学的に最終的な答えを出すのに必要な概念的道具を手にした。

■最初に取り組んだのは、宇宙的時間と空間の限界だった。  
ニュートンは空間的に無限の宇宙を受け入れていたが、聖書の先入観から時間の永遠性は受け入れられなかった。  
アインシュタインはニュートンと違い、永遠の宇宙を欲した。  
当時のほとんどの科学者と同じく、宇宙はつねに存在してきたし、今後もつねに存在し続けると信じており、自らの方程式の解として、有限で閉じていて永遠に続く宇宙を探した。  
「有限」とは、宇宙の広がりには限りがあり、宇宙には何立方センチメートルかの空間しか存在しないという意味だ。  
この文脈のなかで「閉じた」とは、空間に端はなく、宇宙船が万物の果てに到達してもレンガの壁に衝突することはないという意味だ。

■それがどのようなものかを理解するために、わたしたちの地球の表面を思い浮かべてほしい。  
地球の表面積は有限だ（最近、痛いほど身にしみるようになってきた）。  
そして境界はない。  
西へずっと進んでいくと、大きく一周して東からもとの場所に戻ってくる。  
この身近な例から、地球のような球の二次元表面は、有限でしかも境界のない湾曲した空間であることが分かる。  
アインシュタインは一般相対論と湾曲した時空から、より高次元ではあるが、まさにこれらの性質を持つ宇宙を作ることができた。  
アインシュタインの最初の宇宙モデルにおける三次元空間は、超球、つまり二次元の球面を三次元に拡張したものだった。

■もうしばらく二次元球面のたとえを続けよう。  
そこからは、きわめて重要な次元性の問題に関して、いくつか洞察が得られる。  
球形の風船を想像してほしい。  
地球の表面と同じく、風船の膜は二次元空間を定義する（この場合の空間を専門用語で「多様体」という）。  
ここで、二次元宇宙全体がその風船の表面によって定義されている様子を、思い浮かべることができる。  
その宇宙には二次元生物が棲んでいて、自分たちの世界よりも大きく広がる高次元の存在に気づい

ていないかもしれない。

宇宙論的に考えると、それらの生物にとって風船の「内側」や「外側」は存在しない。わたしたち三次元生物は、より高次元に棲んでいるので、その風船の膜が湾曲していることが分かる。

その膜が内側と外側を分け隔てていることも分かる。

しかしこの特権的な区分は、二次元より大きい空間でしか存在しない。

二次元生物にとっては、そのような余分な空間は存在しないし、存在する必要もない。

■一般相対論における四次元時空全体がまさに現実であることを、思い出してほしい。

それが存在のすべてだ。

アインシュタインの最初の宇宙論的モデルでは、時空のうち三次元空間の部分は、風船の表面のように湾曲していた。

その三次元の「内側」や「外側」は存在しない。

宇宙船があれば好きな方向へ飛んでいくことができるが、とても長い時間が経つと反対方向から出発点に戻ってくる。

このようにして、空間の境界——宇宙の端の「レンガ塀」——に関する長年のパラドックスは解決された。

■アインシュタインは、宇宙の端、すなわち境界に関する一般的な概念について考え、友人に宛てて「もし宇宙を空間次元に関して有限な（閉じた）連続体として見なすことができたとしたら、そのような境界条件についてはまったく考える必要はないはずだ」と書いている。

アインシュタインは湾曲した空間を使い、一般相対論の方程式の解として、有限だが境界のない宇宙像を構築することができた。

しかし、時間はまた別の問題を提起した。

■アインシュタインは自らの方程式の解として、静的宇宙を記述するものを探していた。

しかし解——方程式から予測されるモデル宇宙——を詳しく調べてみると、それは不安定であることが分かった。

空気を抜くとしぼんで、空気を入れると膨らむ風船のように、その閉じた超球宇宙は、少しこづいただけで収縮あるいは膨張しはじめるのだ。

■この重力的不安定性は、ニュートンが200年前に、滑らかで無限な恒星分布のモデルにおいて発見したものと少し似ていた。

アインシュタインは、宇宙が収縮や膨張をする可能性などばかげていると確信した。

そしてこの偉大な科学者は、自分の宇宙をいかなる種類の変化からも守るために、でっちあげをおこなった。

すなわち、方程式に、宇宙定数と呼ばれる余分な項を付け加えたのだ。

宇宙定数は空間全体を一種の反重力で満たし、宇宙を固定した状態に保つ。

それは宇宙に対する余計な干渉であり、のちにアインシュタインは後悔することになる。

■アインシュタインはわずか数年のうちに、宇宙論という砂場に遊び仲間を見つけた。

数理物理学の方程式は、レゴブロックのセットに似ている。

あなたがレゴブロックでトラクターを作ったからといって、ほかの誰かが同じブロックから飛行機を作れないということはない。

■アインシュタインがモデル宇宙を発見した直後、オランダの物理学教授ウィレム・ド・ジッターが、一般相対論の方程式の宇宙解としてまったく異なるものを見つけた。

ド・ジッターの宇宙も、静的で安定で閉じているようだった。

ド・ジッターの結果を見たアインシュタインは、それもまた自分の方程式の有効な解であると判断した。

しかし、ド・ジッターのモデルにはいくつか大きな欠陥があるという印象を受けた。  
最も重要だったのは、ド・ジッターが、宇宙には物質はないと仮定していることだった。  
アインシュタインにその点を指摘されたド・ジッターは、物質密度がきわめて低い宇宙の近似として解釈できると答えた。

■ド・ジッターの宇宙には、歴史上はるかに重要となるもう一つの奇妙な性質があった。  
その解では、近くの観測者よりも遠くの観測者のほうが時間がゆっくり進む。  
この宇宙的時間の伸びの結果として、遠くの光源から発せられた光は、時空を伝わるとともに引き伸ばされる。  
そして波長が伸び、スペクトル上で波長の短い青の側から波長の長い赤の側へシフトする。  
それは悩ましげな振る舞いだった。  
最終的に、この赤方偏移の本当の原因は、ド・ジッターの宇宙解を動いている宇宙として認めることによって浮かび上がってくる。

■天文学者がその点を認識するまでにはしばらく時間がかかったが、ひとたび認められると、ド・ジッターの空間は膨張する空間を表していることがはっきりした。  
宇宙の膨張という概念は、まもなく誰もが心に抱くものとなる。

[福永注：ド・ジッターの宇宙解も宇宙項を取り入れている。]

### 3. 光と精神における膨張宇宙

■「やったことのない人には、どんなに寒いか分かるはずがない」と、ラバ追いから天文学者になったミルトン・ヒューメイソンは後年、夜の長時間の天文観測について語っている。  
ヒューメイソンは、フーカー望遠鏡がまだ建設中のときに、荷馬車の御者としてウィルソン山へやってきた。  
やがて天文台の電気技師の仕事に就き、望遠鏡の誘導の手腕が認められて天文台の正規職員となった。

■ミルトン・ヒューメイソンとエドウィン・ハッブルは、100インチ望遠鏡のてっぺんにある小部屋のなかで、数え切れないほどの時間を過ごした。  
その巨大な装置を一個一個の銀河へ向け、その光を正確に読み取って運動の程度を求めるには、幾晩もの練習が必要だった。  
1930年頃には銀河の運動が宇宙論の中心的問題となり、手がかじかみながらのこの努力は大きな価値を持つこととなる。

■ハッブルが銀河は独立した恒星の集合体であることを発見する以前から、渦巻星雲の運動は論争を呼ぶ話題だった。  
天体が地球に向かって動いているか遠ざかっているかを予測するには、その天体が発する光の変化に注目すればいい。  
天文学者にとって光の波長の変化はスピードガンのようなもので、それによって宇宙における運動を記録して宇宙の構造を描き出すことができる。  
秘密は、宇宙の元素の指紋にある。

■管に入った水素ガスなど、どんな元素を加熱しても、幅がきわめて狭く正確に定まった色の帯の光を発する（色とりどりのネオンライトの原理）。  
それらの光の帯、すなわち輝線は、各元素に固有の色（波長）の指紋となる。  
天文学者は遠くの天体を観測する際に、分光器を使ってその光を成分の色に分解する。  
そのスペクトルから、それぞれに波長においてどれだけのエネルギーがやってきたかを正確に知る

ことができる。

20世紀初頭、天文学者はさまざまな銀河のスペクトルを集めはじめ、それが宇宙の進化への新たな扉を開くことになる。

■通り過ぎる救急車のサイレンの音程が変わるのを聞いたことがある人なら、運動と振動数が関連していることは分かるはずだ。

止まっている救急車のサイレンは、決まった振動数（および決まった波長）の音波を発する。

救急車があなたの方へ近づいてくると、音波は押しつぶされる。

それによって波長が短くなり、振動数が上がる（そのため聞こえる音程が高くなる）。

救急車が通り過ぎてあなたから離れていくと、サイレンの音波は引き伸ばされる。

そして波長が長くなって振動数が下がる（そのため聞こえる音程は低くなる）。

これが有名なドップラー効果であり、地上の救急車が発する音波と同じように、銀河が発する光の波においても成り立つ。

■20世紀初頭に天文学者たちは、ドップラーシフトを示す渦巻星雲のスペクトルを探しはじめた。その目的は、空間内における星雲（まだ銀河とは認識されていなかった）の運動を知ることだった。ドップラーシフトが短波長——スペクトルの青の側——へ起こっていれば、その銀河はわたしたちの方に向かって動いていることになる。

ドップラーシフトが短波長——スペクトルの青の側——へ起こっていれば、その銀河はわたしたちの方に向かって動いていることになる。

ドップラーシフトが長波長——スペクトルの赤の側——へ起こっていれば、その銀河はわたしたちから遠ざかって動いていることになる。

■1912年、アリゾナ州のローウェル天文台に勤める天文学者ヴェスト・スライファーが、何個かの遠い銀河からの光を苦労して集め、比較的質のよいスペクトルを記録した。

それらの銀河の大半は赤方偏移を示していた。

わたしたちの方へ近づいているように見えたのは、天の川の隣にあるアンドロメダ銀河など数えるほどだった。

■赤方偏移を示す銀河が数多くあるというこのスライファーのデータは興味深いものだったが、隠されたパターンを解き明かす手掛かりにはならなかった。

渦巻星雲が銀河として認識されると、新たな疑問が浮かび上がった。

すべての銀河が赤方偏移を示すのだろうか？

すべて同じ速度なのだろうか？

そうでないとしたら、どの銀河がもっとも速く動いているのか？

銀河の赤方偏移は、天空上における位置、あるいは地球からの距離で決まるのだろうか？

■銀河の赤方偏移の謎を解き明かすために、エドウィン・ハッブルは1928年、ミルトン・ヒューメイソンを助手として再び100インチフッカー望遠鏡に向かった。

長く寒い夜に凄まじい忍耐力と確実な操作手腕を発揮するヒューメイソンは、理想的な相棒だった。二人は、天空上のいくつもの銀河のスペクトルを正確に記録することで、銀河の速度と距離との関係を見だし、スライファーの最初の発見に意味を持たせる何らかのパターンを見つけられることを期待した。

銀河の速度はスペクトルのドップラーシフトから分かるが、地球からの距離を決定するには、それぞれの銀河のなかにケフェウス型変光星を見つけなければならない。

根気のいる研究だったが、徐々にパターンが浮かび上がってきた。

■ハッブルとヒューメイソンは1929年に発表した画期的な論文のなかで、ほぼすべての銀河が赤方偏移を示して凄まじい速度で遠ざかっている——偉大なイギリス人天体物理学者アーサー・エディントンいわく、わたしたちを疫病のように避けている——ことを明らかにした。

しかしさらに重要なのは、後退速度と距離との関係だった。  
ハッブルとヒューメイソンは、距離が大きくなるにつれて銀河の後退速度が大きくなることを発見した。  
美しく単純な直線関係で、遠くの銀河は近くの銀河よりも速くわたしたちから遠ざかっていた。

■ハッブルは自らの結果の解釈を差し控え、理論家に解釈の特権を委ねた。  
しかしハッブルを含めほとんどの人は、そのデータの意味するところを理解していた。  
アインシュタインは間違っていた。  
宇宙は静的ではなかった。  
動いていたのだ。

■アインシュタインの方程式は、それを作った人物よりも先見の明があった。  
数学が、いまでは世界中の科学者にとって明白である、宇宙全体は膨張しているという結論へと自らを導いてくれるというのに、アインシュタインは宇宙定数を付け加えることでそれを邪魔したのだ。  
のちにアインシュタインは宇宙定数について、「わたしの最大のへまだった」と後悔する。

■今日、アインシュタインのへまは異なる姿を装って復活しており、現代宇宙論の議論をビッグバンから離れた方向へ向けている。  
しかし1930年には、宇宙定数は単なる間違いでしかないと受け取られた。

■アインシュタインは宇宙の動きについて間違っていたかもしれないが、それはド・ジッターも同じだった。  
ハッブルは赤方偏移を発見したが、それはド・ジッターの膨張宇宙から予測されるものとは異なっていた。  
ハッブルのデータによってはっきりと示された膨張速度と距離との単純な直線関係は、ド・ジッターモデルが予測するものと一致しなかった。

■ハッブルによる膨張宇宙の驚くべき発見に対応する理論的結論を、相対論的宇宙論が提供してくれるとしたら、それはアインシュタインやド・ジッター以外の人物によるものでなければならない。  
驚くことに、膨張宇宙と距離との直線関係は、1930年以前にすでに、一度でなく二度、科学者によって予測されていた。  
さらに驚くことに、そのどちらの解も忘れ去られていた。

■相対論的な正しい膨張宇宙をはじめて発見したのは、若いロシア人理論家のアレクサンドル・フリードマンだ。  
数理論理学者であるフリードマンは、一般相対論の宇宙モデルが持つ数学的性質に深く興味を持った。  
そして、1922年にドイツの有名な学術雑誌『ツァイトシュリフト・フュア・フィジーク』に発表した論文の中で、一般相対論の方程式の新たな宇宙解として、(ド・ジッターと違って)物質および(アインシュタインと違って)膨張の両方を含むものを見つけた。

■一般相対論の場の方程式を研究したフリードマンは、ハッブルが発見した形の膨張を予測する三種類の異なる宇宙の歴史を表現した、適用範囲の広い解を発見した。  
その解のうち二つは、無限で境界のない宇宙を表す。  
それらの宇宙では、ランダムに選んだどの二点間の距離も、宇宙的時間が進むとともに大きくなっていく。  
三番目の解は、膨張によって始まるが、やがて踵(きびす)を返して収縮し始める。  
この宇宙では空間は有限で境界があり、ランダムに選んだ二点は最初は互いに遠ざかっているが、やがて接近してくる。

宇宙が実際にたどる道筋は、宇宙の膨張と、すべてのものを引き寄せる重力とのバランスによって決まり、そのバランスはたった一つの数で記述できる。

■もし宇宙の質量＝エネルギーの平均量（質量＝エネルギー密度）がある臨界値より大きければ、いずれ重力が膨張に打ち勝ち、宇宙の膨張は減速していった向きを変え、収縮に転じる。しかし、もし宇宙の質量＝エネルギー密度がその臨界値より小さいと、宇宙は永遠に膨張し、薄まっていったらぼ空っぽになるだろう。質量＝エネルギー密度が臨界密度と正確に同じであれば、重力によって宇宙の膨張は減速するが、その減速率は無限に遠い未来にちょうど膨張が止まる程度となる。

■この密度パラメータは、宇宙の実際の密度とフリードマンの臨界値との比である、オメガ（ $\Omega$ ）と呼ばれる値で表現できる。フリードマンのモデルにおいて宇宙の運命と幾何を決めるのが、この $\Omega$ だ。 $\Omega$ が1より大きければ、宇宙が閉じていて有限であり、アインシュタインの三次元超球を固定せずに動かした場合に相当する。 $\Omega$ が1に等しいか、あるいは1より小さければ、空間は無限で境界がない。 $\Omega$ の真の値を求めることが、その後何十年かの観測宇宙論を支配することとなる。

■フリードマンの論文を読み通したアインシュタインは、最初はその結果を斥け、「疑わしい」ように思えると警告した。しかしフリードマンと何度かやりとりをして、その若きロシア人が自分の正しさを証明すると、アインシュタインも異議を撤回した。しかししばしばあるように、フリードマンの研究結果は宇宙論の専門家の小集団には伝わらず、数年で忘れ去られてしまった。

■それから8年後の1930年、ハッブルによる宇宙の膨張の発見が、世界中の理論天体物理学者の精神に染み渡った。しかしフリードマンの研究は完全に失われていたため、アインシュタインの相対論を最初に理解した天体物理学者の一人であるアーサー・エディントンでさえ、ある学会において、なぜ観測された膨張に一致する宇宙解がないのかと、はっきりと疑問を呈したくらいだった。皮肉なことに、エディントンのこの間違いのものは、学術雑誌だけでなく、ある意味、彼の目と鼻の先にも埋もれていた。

■ベルギーの天文学者ジョルジュ・ルメートルは、エディントンの元学生だった。ルメートルは理論宇宙論の最前線で研究する科学者であるだけでなく、カトリックの聖職者でもあった。はじめはエディントンのもとで一般相対論を勉強し、その後MITで博士号を取得したルメートルは、新たな宇宙解の探索を始めた。そして1927年に、フリードマンが数年前に見つけていたのと同じ膨張宇宙モデルを導いた。ルメートルはその結果をベルギーのあまり知られていない出版社が発行する学術雑誌に発表し、それはほとんど無視されたが、どうにかしてある学会の席でアインシュタインに見せることができた。しかしその偉大な科学者は再び、自らの方程式に真理を見いだす機会を逸した。アインシュタインはルメートルに、「君の計算は正しいが、物理はひどい」と語ったのだった。

■ハッブルの観測結果が知れ渡ると、ルメートルはすぐにエディントンに連絡を取った。その物静かな司祭はエディントンに、自らの解のことと、それが、観測された形の宇宙膨張をほぼ完璧に予測していたことを伝えた。

■エディントンの手助けにより、ルメートルの結果はすぐに科学界から関心を集めた。こうして、ハッブルのデータが驚くべき形で解釈された。

銀河が空間の中を互いに離れていっているのではなく、空間、というより時空そのものが膨張していたのだ。

空間全体が一様に引き伸ばされていて、銀河はまるでゴムシートに糊付けされた硬貨のようにそれに乗って運ばれているのだとすると、距離に伴う銀河の後退速度の直線パターンが予想できる。

疑いようもなく、宇宙そのものが膨張していた。

■膨張宇宙の発見は大ニュースとなった。

ヨーロッパから日本やアメリカに至るまで、ハッブルの発見は新聞の大見出しや、当時画期的な新しいメディアだったラジオのニュースに大々的に採り上げられた。

ハッブルが時空の膨張を発見したときにちょうど、ラジオが、空間を縮めてまったく新たな形の時間の経験を作ることにより、人間の宇宙を作りかえようとしていたというのは、少なからず皮肉なことだ。

\*\*\*\*\*

## 参考資料・その6 ハッブルの法則

### 1. 宇宙のエントロピー問題

■1924年、エドウィン・ハッブルは《アンドロメダ大星雲は私たちの住む銀河系とは独立した別の銀河である》ことを発見した。

これを契機に、宇宙にはたくさんの銀河が存在することがわかった。

今では、ざっと1000億個もの銀河がこの宇宙にあると考えられている。

■宇宙も一つの物理的な系である。

そこで、熱力学第二法則を宇宙に適用するとどうなるだろう？

エントロピーのことを考えると、《宇宙は無秩序な姿に進化していく》ことが予測される。

なぜならば、熱力学第二法則のため、不可避免的に宇宙のエントロピーは増え続けていくからだ。

体積が変化しなければ、エントロピーの捨て場所はすぐにいっぱいになってしまう。

無秩序化が進めば、宇宙は一様になっていく。

つまり、宇宙は至る所で密度が一様になるように進化するはずだ。

■ところが、観測事実は、まったく逆になっている。

宇宙には銀河という秩序だったシステムがたくさん存在しているからだ。

そして、どう見ても、銀河が雲散霧消していく気配は微塵もない。

宇宙は熱力学の第二法則の適用外なのだろうか？

これがエントロピー問題と呼ばれるものだ。

■この問題は19世紀の時代にあっては、非常に深刻な問題だった。

なぜなら、当時、宇宙は過去から未来へ悠久の時を刻んでいるものだと思われていたからである。

無限の時間が経過した現在に、秩序を持った構造である天体があるのはなぜだろう？

これが不思議なことだった。

もちろん、19世紀にはまだ銀河が宇宙にたくさんあることは知られていなかった。

だが、夜空を見ればおびただしい数の星々が見える。

宇宙が悠久だとすれば、この星々の存在すら熱力学第二法則に反するものだったのだ。

## 2. 膨張宇宙論

■そして20世紀に入った。

アンドロメダ銀河が銀河系とは独立した銀河であることを発見したハッブルは、その勢いで銀河系の周辺にある銀河を調べ続けた。

■彼が着目したのは、銀河までの距離と銀河系（天の川銀河）に対する相対速度（視線速度）の関係だ。

その結果、不思議な関係が見つかった。

《遠い銀河ほど、大きい視線速度で遠ざかっている》

これがハッブルの法則と呼ばれる関係である。

この法則は宇宙が膨張しているとすれば、自然に説明がつく。

### ハッブルの法則

銀河の視線速度  $v$  (km/s) は銀河までの距離  $D$  (Mpc) に比例する。

$$v = H_0 D$$

$H_0$  はハッブル定数で、現在の宇宙の膨張率を与える。

例：70km/s/Mpc とすると

$v = 7000$ km/s の銀河の距離は

$D = 100$ Mpc になる。

■ハッブルは確信した。

《私たちの住む宇宙は膨張している！》

1929年。

この革命的な発見で、人類の宇宙観はがらりと変わった。

それまで、宇宙は静的なものであり、膨張したり収縮したりしているという考えはなかった。

そもそも、人類が誕生してから長い間、天の川が宇宙そのものだと考えられてきたのだから当然のことともいえる。

銀河系を飛び出し、銀河の世界を垣間見て初めて宇宙の性質がわかったのだ。

ハッブルの発見は、まさに晴天の霹靂のような出来事だった。

## 3. 宇宙のエントロピー問題、再び

■宇宙は膨張している。

このことを頭に入れて、「宇宙のエントロピー問題」を考え直してみよう。

宇宙が膨張していると、宇宙の体積は増え続ける。

そのため、エントロピーの捨て場所がどんどんできる。

そのため局所的にエントロピーの低い場所として銀河のような構造を作り上げることが可能になる。

これは宇宙における構造形成に重力が本質的な役割を果たしているからだ。

■私たちの住む宇宙は膨張することで、熱力学第二法則を破らずに銀河を作り続けてきたことになる。

宇宙が膨張しなければ、銀河系もできていない。

その中の星である太陽、その惑星の地球、その地球に住む私たち。

これらは宇宙膨張の産物ともいえる。

## 4. ハッブルの法則で計算する

■ハッブル定数の値を知っていれば、遠方の銀河の距離が与えられたとき、その銀河の後退速度をハッブルの法則から計算できます。

あるいは、後退速度が与えられていれば、銀河までの距離が計算できます。

実際の応用では、天文学者はドップラー効果を使って遠方の銀河の後退速度を測定するので、ハッブルの法則は距離を測定するための非常に強力なツールになります。

■ハッブルの法則は、私たちから約3Mpc以内にある比較的近い銀河に対しては、有効でないことに注意しなくてはならない。

なぜならば、私たちに近いグループの銀河は、私たちの銀河系やアンドロメダ銀河系（地球から240万光年）の重力に束縛されているからです。

このような強い重力による影響は宇宙膨張に勝るので、たとえ私たちの間の空間が広がっているとしても、近い銀河系は私たちから宇宙の膨張率（観測されている $H_0$ の値）で離れてはいきません。

[注：ハッブルの法則が成り立つのは「典型的な銀河」に対してです。典型的な銀河とは、なんら特異な速度をもっていない銀河のことで、宇宙の膨張によって生じる物質の一般的な流れとともに運動する銀河を意味します。要するにハッブルの法則は、中くらいの遠方にある銀河の後退速度と距離の間で成り立つ比例関係です。]

## 5. ハッブルの法則とビッグバン説

■宇宙の創成時に起こったことのエネルギー論は非常に興味深いので、簡単に触れておこう。

現在では、いわゆるビッグバン説が時間の始まりで起こったことの最もよい説明を与えることは、天文学者や宇宙論者によって広く受け入れられている。

■このビッグバン理論のきっかけをつくったのは、銀河の圧倒的多数が私たちから遠ざかっていることと、遠い銀河ほど速く遠ざかっていることを発見した、ハッブルの観測であった。

遠い銀河までの距離が桁外れに大きいために、ハッブルの法則のハッブル定数の値を正確に求めることは難しいが、最近数十年間の多くの異なる天体観測から $H_0$ の値を計算すると、(km/s)/Mpc単位で、60後半から70半ばまでの範囲になります。

■遠方の銀河はすべて宇宙膨張によって遠ざかっているので、これらの銀河はすべて昔はもっと近かったらと考えるのが論理的です。

過去に戻るほど、銀河はもっと近づきます。

膨張を逆の向きに外挿していけば、過去のある時点ですべての銀河は（あるいは、それらを今構成している物質すべてが）同じ場所に集まるでしょう。

つまり、宇宙のすべての物質はくっついて隙間（すきま）はゼロになり、宇宙の体積はゼロになります。

この体積ゼロの状態から、宇宙が膨張を始めた瞬間をビッグバンといいます。

[注：宇宙の膨張が、きわめて大きい密度と圧力の中で、過去の有限な時点で始まったとする、このビッグバン理論は、ガモフによって提唱された。]

■では、ビッグバンはどれくらい昔におこったのでしょうか？

宇宙の年齢は、ハッブルの法則から計算できます。

あるいは、少なくとも年齢を推定できます。

宇宙の年齢とは、宇宙が膨張し始めてから経過したトータル時間のことです。

いま、ある銀河があなたからどれくらいの速さで遠ざかっているか、そして、その銀河があなたと一緒にあったときから、どれくらいの距離になったかがわかっているとします。

そうすると、その銀河があなたと一緒にあったときから、どれくらい時間が経ったかを計算できます。

それには、 $\text{時間} = \text{距離} / \text{速さ}$  を使います。

この式が宇宙膨張による距離  $d$  と銀河の後退速度に應用できるとして、「速さ」にハッブルの法則

( $v = H_0 d$ ) の  $v$  を代入すれば、

$$\text{時間} = \text{距離} / \text{速さ} = d / (H_0 d) = 1 / H_0$$

となります。

この結果は、膨張率が一定であったということを仮定すれば、宇宙の年齢の推定値になります。

この年齢をハッブル時間 ( $T_0$  で表わす) といいます。

そして、ハッブル定数と

$$T_0 = 1 / H_0$$

のように関係します。

単位を注意深く見れば、 $H_0$  値の代入によって、宇宙の年齢の数値が与えられることがわかります。

重要なことは、この年齢が個々の銀河の  $v$  や  $d$  には依存しないということです。

なぜならば、宇宙の年齢は1つの銀河だけに固有のものではないからです。

ここで、 $H_0 = 70 \text{ (km/s) / Mpc}$  であるとして、 $T_0 = 1 / H_0$  に基づき、宇宙の年齢を計算しますと、

$$T_0 = 14 \times 10^9 \text{ 年} \quad \text{となり、}$$

140 億年という答えが出ます。

この結果は、宇宙年齢の 137 億年という広く受け入れられている値に近いので、この  $T_0$  は妥当な推定値を与えています。

計算からは、ビッグバンは今から 140 億年前に起こったこととなります。

\*\*\*\*\*