

ハッブル定数の決定

岡村 定 矩

〈東京大学理学部天文学教室 〒113 東京都文京区弥生 2-11-16〉

ハッブル定数は宇宙の大きさと年令を定める宇宙論の基本的な定数である。その値を巡っては長い間論争が続いているが、新しい観測によりようやく方向性が見えはじめた。ハッブル定数決定の原理、歴史的経緯、観測手法、現在得られている値、および今後の課題と展望を概観する。

1. はじめに

1929年にハッブルは、近傍銀河のほとんどが距離にほぼ比例した速度で銀河系から遠ざかっていることを発見した。これがハッブルの法則であり、銀河の後退速度を v_{obs} (km s^{-1})、距離を r (Mpc) とすると、

$$v_{\text{obs}} = H_0 r \quad (1)$$

と書かれる。ここに表われる比例定数 H_0 ($\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$) がハッブル定数である。ハッブルの法則は、宇宙が膨張していることを示す観測的証拠であり、ハッブル定数は宇宙の現在の膨張率を表す。

ハッブル定数 H_0 は宇宙論において二つの重要な意味を持っている。第一に、 H_0 によって宇宙の大きさが決まる。現在の観測技術を以ってしても、100 Mpcより遠方の銀河の距離を直接測ることは容易でない。ほとんどの場合、後退速度からハッブルの法則を用いて $r = v_{\text{obs}}/H_0$ として計算で求められている。したがって H_0 の値が2倍変われば銀河の距離も2倍変わり、結局宇宙の大きさも2倍変わることになる。極めて遠い銀河の観測では一般相対論に基づくフリードマンモデルで解析する必要があるが、本稿で述べる範囲では本質的でないので深くは触れない。第二に H_0 によって宇宙の時間尺度すなわち膨張を始めてから現在

までの経過時間(宇宙年令 T_0)が決まる。膨張率が時間的に一定であったとすると $T_0 = H_0^{-1}$ となる。実際には物質が膨張を減速させるので、その度合に応じて T_0 は H_0^{-1} より多少短くなるが、 H_0 が宇宙年令のオーダーを決める。

2. ハッブル定数決定の原理

ハッブル定数を決めるには、まず銀河の後退速度を測り、次にその銀河の距離をハッブルの法則を用いずに決定する必要がある。その上で両者の比をとれば H_0 が求まる。原理的には単純なこの課題に天文学者は60年以上も取り組んでいるが、いまだに満足できる精度で H_0 の値は得られていない。不定性は後退速度と距離の双方にある。

銀河は一様かつ等方的に膨張する宇宙の枠組に整然と乗っている訳ではない。宇宙膨張からずれた銀河の動きを特異運動と言う。特異運動は二つの成分から成る。一つは個々の銀河がランダムに運動する無秩序運動であり、もう一つはある領域の銀河が集団で動く揃った運動である。後者は宇宙の大規模構造による重力の強弱のムラによる。分光観測から得られる銀河の視線速度 v_{obs} は、宇宙膨張による成分 v_{H} と、無秩序運動 v_{R} と揃った運動 v_{B} の視線方向成分の和である(図1)。すなわち、(1)式は実は

$$v_{\text{obs}} = v_{\text{H}} + v_{\text{R}} + v_{\text{B}} = H_0 r + v_{\text{R}} + v_{\text{B}} \quad (2)$$

となる。個々の銀河の v_{R} や v_{B} がどの程度かを予め

Sadanori Okamura: Determination of the Hubble Constant

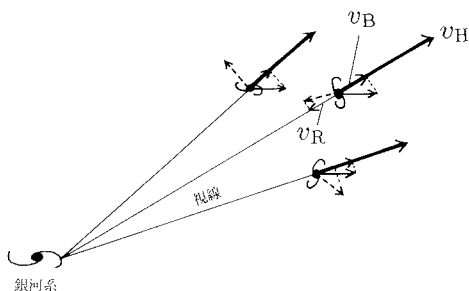


図1 銀河の視線速度の三つの成分。宇宙膨張による後退速度(太矢印)と、無秩序運動(破線矢印)と揃った運動(細矢印)の視線方向成分から成る。

知ることはできない。近傍銀河のほとんどが赤方偏移を示すので v_R は 200 km s^{-1} 程度かそれ以下と推定されている。銀河系は宇宙背景放射に対して約 600 km s^{-1} の速度で運動しているので、 $v_R + v_B$ がこの程度の値を持つことは少なくともあり得る。 v_B については大きさとともに、どの程度広い領域にわたって揃った運動が見られるかが重要な点である。これについては後に述べる。このように、 v_{obs} から v_H を求める際に不定性はあるものの、 v_H は距離に比例して増大するので、相対論効果が無視できる範囲で充分遠方にある多数の銀河について $H = v_{\text{obs}}/r$ を求め、その平均値をとれば H_0 の良い推定値が得られると期待される。

これまでの H_0 の決定の最大の困難は、後退速度の不定性よりもむしろ距離の不定性にあった。天体の距離決定は天文学の最も重要な課題の一つであり、これまでの H_0 決定の問題は、本質的には銀河の距離決定の問題であったと言える。以下では H_0 の決定について、技術的な細部に立ち入ることなく、歴史的経緯と現状をまとめ、問題点と将来の展望を概説する。

3. 歴史的経緯

3.1 黎明期 (1930年代-1952)

ハッブルは30年代に100個あまりの銀河の観測から H_0 の最初の推定値 $526 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (以下 H_0 の単位は省略) を導いた。彼はまずセファイド

で距離の決められた局部銀河群中の銀河の中にあり最も明るい星の絶対等級を求め、それをもとに各タイプの銀河、および銀河団中で5番目に明るい銀河の絶対等級を推定するという手法をとった。この H_0 の値に対応する宇宙年齢は18.4億年となる。放射線年代測定法による地球の古い岩石の年齢は当時18億年と推定されていた。このことは、理論と観測の見事な一致の例としてよく講義でとり上げられたと言われている。

40年代になって、ハッブルの距離尺度のもととなっているセファイドの周期光度関係にいくつかの矛盾が出てきた。44年にはバーデにより星の種族の概念が提唱された。さらに戦後間もなく、地球の岩石の年代推定が36億年(最終的には43億年)へと改訂された。宇宙年齢とハッブル定数の間に矛盾が生じた。余談ながらこのことが定常宇宙論の大きな動機であった。結局それまでセファイドと呼ばれていたものに二種類あることが見出された。周期が約1日より短いものは種族IIに属し、それより長周期のものは種族Iで、両者の間で周期光度関係のゼロ点が1.5等異なっていた。今日では前者はこと座RR星型変光星と呼ばれ、後者がセファイドと呼ばれている。1952年のIAU総会でバーデは、この発見により宇宙の大きさは2倍になったと発表した。

3.2 平和の時代 (1952-1974)

ハッブルの後継者としてウィルソン山天文台のスタッフとなったサンデイジは、ハッブルが銀河中の最も明るい星と思っていたものが、実はH II領域やそれに伴う星団であったことを見出した。さらに銀河中の最も明るい星の絶対等級は、ハッブルの推定した-6.35等よりもずっと明るく、-10等近くのものまであることがわかった。この二つの影響を考慮すると、おとめ座銀河団の距離は2-3倍遠くなる。結局セファイドの周期光度関係の補正と合せて、宇宙の大きさは戦前の評価より5倍程度大きくなった。61年には系外銀河を対象とする最初のIAUシンポジウム(No. 15)が開か

れた。ここでサンディジは、4つの独立な手法で得られた5個の値の平均として、 $H_0=98\pm 15$ を発表した。この値 $H_0\sim 100$ は約100億年という宇宙年令を与え、地球の岩石の年令との矛盾はなくなった。そしてこの値が70年代前半まで学界のコンセンサスであった。

しかし一方、恒星の構造と進化の理論の発展に伴い、銀河系のまわりの球状星団の年令は100億年を超えることが示され、再び深刻な矛盾が予感されはじめていた。このような状況の下、サンディジとタマンは50年代半ばに、パロマーの5m望遠鏡を使って H_0 決定のための新しい観測プログラムを開始した。19年の歳月を要したこの観測のまとめは74-76年に発表された7編の論文に報告された。最終結果は $H_0=50\pm 5$ であった。球状星団の年令との矛盾は回避された。しかし後に「長尺度」と呼ばれるこのサンディジとタマンの距離尺度には多くの疑問が投げかけられ、 H_0 の決定は15年以上にも及ぶ混沌と不毛な論争の時代を迎えることになった。

長い間 $H_0\sim 100$ がコンセンサスであり続けた背景には観測の困難さがある。 H_0 の改定に関わるような新しい観測データを与え得るのはパロマー5m望遠鏡だけであった。他の望遠鏡による銀河の観測データは増え続けたが質的に新しいものはほとんどなかった。その5m望遠鏡でさえ、サンディジらが新しい観測を始めた54年頃には、 $H\alpha$ 線で銀河の写真を1枚撮影するのに2時間を要していた。イメージチューブはまだなかった。

3.3 混沌の時代 (1975-1991)

(1) 不毛な論争

サンディジとタマンの長尺度を最も徹底的に批判したのはドゥボークレアである。彼は78-79年にかけてやはり7編の論文を発表し、 $H_0=100\pm 10$ と結論した。ドゥボークレアの距離尺度は「短尺度」と呼ばれ、以後二つの尺度を巡って論争が続いた。

両尺度の立脚点の違いを明らかにするために、

ここで多少技術的な問題点を整理しておこう。70年代までの銀河の距離決定は伝統的な標準光源に頼っていた。標準光源とは、真の明るさや大きさが何らかの方法で推定できる天体である。その見かけの明るさや大きさを観測し、真の値と比較すれば距離が求まる。明るさは距離の2乗に、大きさは距離の1乗に逆比例することを利用する。セファイドは銀河系内と系外銀河をつなぐ最も信頼性の高い標準光源である。しかしセファイドは約4Mpcまでしか観測できず、それより遠方ではセファイドより明るい別の標準光源を探さなければならない。最も遠方では銀河中の個々の天体はどんなものも見えなくなる。この距離においては銀河全体を一つの標準光源と見なすしかない。

実はセファイドを用いて近傍銀河の距離を決めるには、銀河系内にある、セファイドを含む星団の距離を決定しなければならない。そのためには、年周視差や収束点法によって距離の決められたヒアデスやプレアデスなどの基準となる星団が用いられる。年周視差の基礎になるのは一天文単位である。このように天体の距離決定は、太陽系内から宇宙へといくつもの手法とプロセスをつないで行われるため、「距離梯子」と呼ばれる。

本題に戻ろう。標準光源を使って距離を求めるには星間吸収の補正が必要である。二つの尺度の違いの第一は星間吸収量の見積りにあった。第二の違いは用いた標準光源の多様性である。最も近傍の領域において、長尺度は唯一セファイドを用いたのに対し、短尺度はセファイドを初めとする5種類を用いた。次の距離ステップでは、長尺度がH II領域の大きさにほぼ全面的に頼ったのに対し、短尺度は5種の標準光源を用いた。最も遠方においては長尺度1種に対し短尺度3種であった。三番目の違いは H_0 を求める際に仮定した特異速度場である。長尺度においては、速度距離関係は直線的である、すなわち揃った特異速度はないとした。一方短尺度では、局部超銀河団の存在を前提とし、銀河系がおとめ座銀河団に引かれて

落ち込んでいるという「おとめ座落下モデル」を用いた。これらの違いが $H_0 \sim 50$ と 100 という差を生んだのである。

標準光源による方法では、光源の性質が宇宙のどこでも同じであると仮定する（だから標準光源なのだ）。しかしこれはあくまで仮定である。仮定が正しくないことによる不測の誤差を避けるには、できるだけ多種多様な標準光源を使って危険を分散させるのが良いと多くの天文学者は考えている（しかし何でも使えそうなものを標準光源としてしまうのも行き過ぎだが）。サンデイジとタマンの戦略は結果的に見ると「すべての卵を一つの籠に入れた」ことになってしまった。

長尺度と短尺度の論争が結局の所ほとんど不毛であったのは、お互いが相手の土俵に上らず、独自のデータや独自の解析に基づいて得た H_0 の値を盾に自らの主張を繰り返すばかりであったことによる。データが増えるにつれ、ランダムな誤差は減少し、 H_0 の表面上の決定精度は上がったが、諸々の仮定に伴う系統誤差（外部誤差）について

は適切な解析がなされなかったため、 H_0 の推定値は形式上の誤差範囲を大きく越えてばらついた（図2）。セファイドの届く近傍銀河の距離についても両者の不一致は30%近くに達していた。これが10%のレベルになったのは87年以降である。

(2) 距離指標関係とバイアス

70年代後半になって、銀河の内部運動速度と絶対等級の間に良い相関があることが発見された。この相関が普遍的なものなら、セファイドで距離の決まった近傍銀河について相関を確立しておけば、遠方銀河の内部運動速度と見かけの明るさを観測すれば距離が求まる。銀河は巨大なものと矮小なもので100倍以上も規模が違う。以前は特定のタイプ（渦巻腕の良く発達したものなど）に限れば絶対等級がほぼ一定という単純な仮定の下に銀河を標準光源に用いていた。しかしこの相関は、内部運動速度（距離によらない）の観測から銀河の絶対等級を定量的に推定する道を開くもので、距離指標関係と呼ばれるようになった。楕円銀河に適用できるものがフェイバー・ジャクソン関係

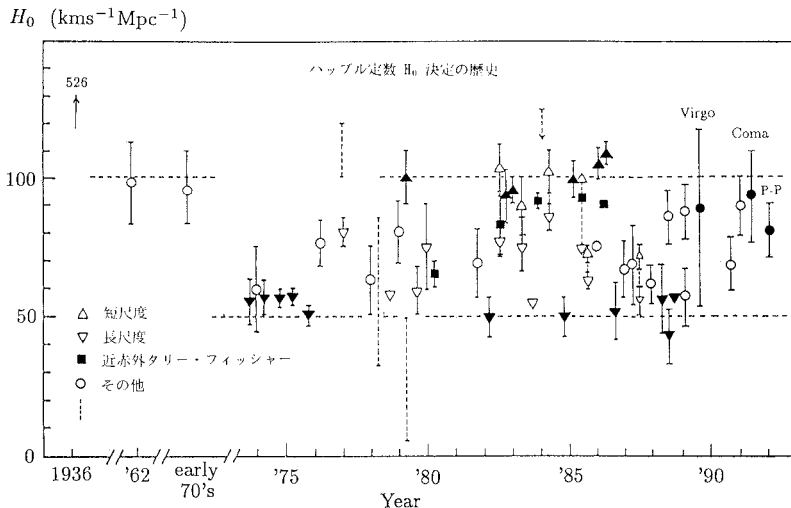


図2 ハッブル定数決定の歴史。立場や手法により記号を変えてある。長尺度と短尺度については、その主唱者によるものは塗りつぶしてある。縦破線は観測・理論などに大きな不定性を含む方法によるもの。大部分の推定値につけられた誤差棒は内部誤差のみを表わす。Virgo とあるのはおとめ座銀河団から得た推定値で外部誤差を含む。Coma と P-P はそれぞれかみのけ座銀河団とうおーペルセウス座超銀河団に対して我国のグループが得た値で、外部誤差も考慮してある。

(76年), 渦巻銀河に適用できるものがタリー・フィッシャー関係(77年)である。この発見により, 近傍銀河から遠方銀河までが一つの梯子で結ばれることになった。

新しい手法の登場により, サンディジ, タマン, ドゥボークレア, バンデンバーグらごく少数の人々のほとんど独壇場であったこの分野に, 新しい人々が参入しはじめた。しかし距離指標関係のゼロ点を定める近傍銀河の距離や, 星間吸収の補正法などに関する両尺度の不一致はそのままだったので, H_0 の決定に質的な進展は見られなかった。近赤外域におけるタリー・フィッシャー関係により独自の距離尺度を礎いたアロンソンは $H_0 \sim 90$ と与えたが, 近傍銀河の距離による不定性が最大の問題と結論している。

距離指標関係の発見は同時に, バイアスという新しい不定要因に人々を気づかせることとなった。ある銀河団を観測するとしよう。その中には明るい銀河も暗い銀河もある。観測限界は見かけの等級で決まっているために, 遠い銀河団になればなるほど暗い銀河が観測されなくなり, サンプルは一握りの明るい銀河に偏ってゆく。距離指標関係式のまわりに銀河がばらついていると, このサンプルの偏りによって距離推定に系統誤差(バイアス)が生じる(図3)。バイアスの大きさは関係式のまわりのばらつき(内部分散)の大きさによる。そして内部分散の大きさは観測でしかきめられないのである。タリー・フィッシャー関係の場合, 内部分散が0.3等以下とする説と0.7等もあるとする説がある。明らかにまだ充分な観測がなされていない。これだけ内部分散の推定が違っていると, 同じデータから2倍近くも異なる距離が結論されるのである。

(3) 大規模な特異運動

80年代後半以降, 銀河は予想以上に広い領域にわたって揃った特異運動をしているのではないかという指摘が相次いでいる。距離指標関係を適用して遠方の多数の銀河の距離を求めることが可能

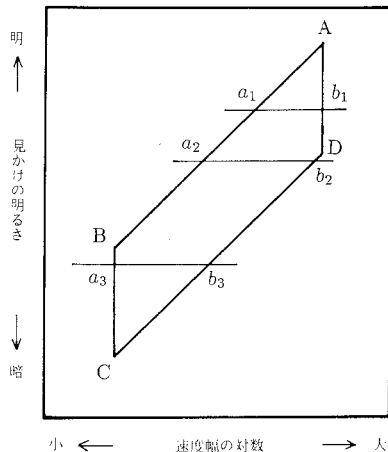


図3 タリー・フィッシャー関係におけるバイアスの概念図。銀河団の銀河がABCDの領域に一樣に分布しているとする。近くの銀河団で暗い銀河まで観測できる場合はたとえば AA_3b_3DA 中の銀河が観測でき, もとの分布とサンプルの分布は大差ない。しかし次第に遠くなるにつれ, 観測可能な領域が Aa_2b_2D のようになり, ついには Aa_1b_1 となって, 観測されるサンプルは, もとの分布から大きくずれ, 距離推定が正しく行えなくなる。

になった結果である。局部超銀河団全体が $u_H \sim 4350 \text{ km s}^{-1}$ の距離にある「グレートアトラクター」に引かれているという, ドレスラーを初めとする「7人の侍」の指摘が端緒であった。

もしこのような大きなスケールにわたって宇宙膨張からの系統的なずれがあるとすると, 狭い領域から得られる H_0 の値は色々にばらついて, 宇宙全体の膨張率を表していない可能性がある。しかし一方, 特異速度は銀河の距離決定の誤差をそのまま反映することにも注意しなければならない。距離指標関係がもし普遍的でない(ゼロ点や内部分散が宇宙の場所毎に多少異なる)とすれば, 普遍性を仮定した現在の解析法からは廣の特異速度が現れる。またバイアスの評価を誤っても同様である。銀河の大規模な特異運動の観測は, 宇宙膨張の非一様性がどの程度の規模に及んでいるのか, そしてまた距離指標関係は普遍なのかという二つの大きな観測課題を示ることになった。 H_0

の決定にとって、この二つの課題の解明は本質的である。

3.4 希望の時代 (1992—)

90年代に入って H_0 の決定は新しい時代に入ったという感じがする。理由は三つある。第一は「面輝度ゆらぎ」と「惑星状星雲の光度関数」という全く新しい高精度の銀河の距離決定法が開拓され、これに基づいて各種距離決定法の誤差を定量的に推定できるようになったことである。第二は、新しい手法とともに新しい研究者グループが育って世代交代が進み、過去の経緯にとらわれず、客観的な誤差評価に基づいてかみ合った議論ができる土壌がこの分野に育ってきたことである。我国のグループも木曾シュミットによる観測データを用いてその一翼をにないはじめて¹⁾²⁾。第三は、1秒を切るシーイングのサイトに建設中のすばるを初めとする8m級望遠鏡、莫大な数の銀河の均質なデータの収集を目指すデジタルスカイサーベイ計画など近未来の計画によって、 H_0 の決定が今日の限界の数倍遠くまで行える見通しがあることである。

4. ハッブル定数決定の現状

4.1 主な手法とその精度

今日 H_0 の決定に用いられている主な手法には次のものがある。古典的な標準光源の範疇に入るものとして、セファイド、新星、Ia型超新星、球状星団がある。セファイドは最も信頼度の高いものであることは既に述べた。CCDの登場により、ハッブル宇宙望遠鏡に加えて、地上からもおとめ座銀河団まで探査の手が延ばされ始めている。近赤外のアレイ検出器の活躍も期待されている。新星ではその最大光度と減光率の間の相関を利用する。10日で約1等級という減光率の測定のため、観測のスケジューリングの制限が厳しい。セファイドと同じくこのことが観測上の困難である。Ia型超新星は最大光度がほぼ一定と考えられているが、その絶対値については、理論や観測の推定が

1等程度の範囲でばらついている。突発現象で頻度が少なく、今日使えるデータの多くは古い写真観測によるものである。近代的な観測が進むにつれ、Ia型の中にも特異な光度変化やスペクトルを示すものが出てきている。Ia型超新星がどの位良い標準光源であるかは、観測と理論の今後の発展が明らかにすることになろう。銀河に付随する球状星団の最も明るいものは古くから標準光源として用いられてきた。今日では1銀河あたり何百個という数の球状星団を観測し、その光度関数が最大となる等級を一定と仮定する。楕円銀河には適しているが、バルジの小さい渦巻銀河では球状星団が少なく適用が難しい。

距離指標関係の代表的なものは、タリー・フィッシャー関係と $D_n - \sigma$ 関係である。前者は渦巻銀河の絶対等級と中性水素の21cm輝線の速度幅の相関である。等級に対する内部吸収の補正および速度幅の補正のために銀河の傾斜角を知る必要がある。吸収補正に関しては様々な処方が提案されているが、どの処方を使っても結果は大きく変わらない¹⁾。速度幅補正に影響する傾斜角の不定性が多くの場合内部誤差の最大の要因である。楕円銀河に適用される $D_n - \sigma$ 関係はフェイバー・ジャクソン関係の改訂版である。 D_n はある輝度レベル（通常20.75等/平方秒）における銀河の直径である。 σ は銀河中心での星の速度分散であり、スペクトル中の吸収線の幅から測定する。この両者の間の相関を利用して距離を測る。ただし、絶対較正に適する巨大楕円銀河が近傍にないため、 $D_n - \sigma$ の関係のゼロ点は他の手法で距離を決めた楕円銀河に頼ることになる。

80年代末に二つの新しい高精度の距離決定法が開拓された。「面輝度ゆらぎ」の方法は、楕円銀河やバルジのように吸収の無視できるものに適用される。平均の面輝度は距離によって変わらないが、遠くなるほど単位面積（立体角）中に含まれる星の数が増えるので、平均のまわりのゆらぎは小さくなる。銀河系のまわりの球状星団の写真

と遠方の楕円銀河の写真を見比べると、球状星団の方が星の粒々が目立ってゆらぎが大きいことがわかる。このことを巧みに利用するコロンブスの卵のような距離決定法が面輝度ゆらぎの方法である。88年にトンリーとシュナイダー達によって実用化された。もう一つは「惑星状星雲の光度関数」を用いる方法である。惑星状星雲は電離酸素の強い輝線を放つため、この輝線のみを通すフィルターをかけて観測した画像の解析から容易に検出できる。一つの銀河内で検出された多数の惑星状星雲の光度関数を作ると、ある明るさの所で急激に数が減少（カットオフ）する。この光度関数の形は銀河毎にほぼ同じであり、カットオフの光度がほぼ一定であることが89年にジャコビイらのグループによって示された。

これらの各方法による距離決定の推定誤差を表1に示す³⁾。銀河1個を観測した時の距離引数の誤差が等級単位で表されている。距離引数の誤差 Δm 等級は距離の相対誤差にすると $50 \Delta m \%$ にほぼ相当する。内部誤差はその方法自身がつもつ不定性、外部誤差は主にその方法のゼロ点の不定性によるものである。多くの手法の外部誤差に共通する0.13等は、セファイドによるM31の距離（大マゼラン雲の距離に基づく）の不定性である。これは銀河系内のセファイドによる周期光度関係のゼロ点の較正の不定性をそのまま反映するものである。

最近急速に注目を浴びてきたのがII型超新星の「膨張光球法」である⁴⁾。これは有名なバーデ・ウ

ェッセリンク法と類似の方法で、光球の膨張速度とスペクトル（温度）および見かけの明るさが爆発後時間と共にどのように変化するかを観測して距離を求める。解析に用いる大気モデルによる不定性はあるものの、この方法は距離梯子を全く用いずに直接距離が測れる点が強みである。

十分な観測はまだないが今後の発展が期待できる方法もある。「スニアエフ・ゼルドビッチ効果」は、銀河団中にある高温プラズマが逆コンプトン散乱によって宇宙背景放射のスペクトルを歪めることを利用する。歪みの大きさはプラズマの電子密度、温度、広がりによって決まる。一方、これらの量は放射されるX線の強度も決める。観測される見かけのX線強度は距離の2乗に逆比例するためスペクトルの歪みとX線強度を測ることにより、プラズマ分布を球対称と仮定して距離が求まる。「重力レンズ像の遅延時間」からも H_0 が推定できる。遠方のクェーサーが変光すると、重力レンズによって二つ以上に見えている像も変光するが、像毎に異なった時刻に観測される。光の伝播経路が異なるからで、この時間差から H_0 が求まる。しかしこの方法では、レンズ天体の質量分布や光の伝播経路上の物質分布の不定性が H_0 の不定性となって現れる。これらの二つの方法は、超新星による方法と共に、最も遠方まで到達できる可能性を秘めている。

4.2 50 Mpc 以内でのハッブル定数

92年8月に宇宙の距離尺度の決定法についてのレビュー論文がジャコビイらによって発表された³⁾。主な手法の誤差を定量的に評価し、広範な比較検討を行った初めての論文として画期的なものである。このような比較が可能になったのは、前述の二つの新しい高精度の手法が開拓されたおかげである。図4に比較の例を示す。面輝度ゆらぎによる距離を基準として他のものと比較した。面輝度ゆらぎは主に楕円銀河の距離を測っていることに注意されたい。セファイドは適用距離範囲が狭いので含まれていない。また、 $D_n - \sigma$ 関係と I_a

表1 各種距離決定法の推定誤差

方 法	内部誤差	外部誤差	全誤差
セファイド	0.10	0.13	0.16
球状星団	0.30	0.27	0.40
新星	0.33	0.22	0.40
Ia型超新星	0.20	0.50	0.53
T-F関係	0.25	0.13	0.28
惑星状星雲	0.10	0.13	0.16
面輝度ゆらぎ	0.10	0.13	0.16
$D_n - \sigma$ 関係	0.45	0.21	0.50

型超新星についてはゼロ点が不確かなので、距離ではなく後退速度が用いられている。いくつかの例外はあるが、各手法による距離は概ね、その手法の推定誤差の範囲内で互いに一致している。タリー・フィッシャー関係による距離は興味深い。楕円銀河と渦巻銀河がよく混じり合っているように見える銀河団では面輝度ゆらぎによる距離と誤差範囲内で一致する。しかしすべての銀河団につ

いて比較すると誤差範囲を越えて食い違いが現れる。このことは、タリー・フィッシャー関係の誤差推定は正しく行われていることを示唆する。銀河団中で楕円銀河は中心近くでほぼ力学平衡状態にあるが、渦巻銀河はそれとは系統的に異なった分布と運動をしていると解釈するのが妥当であろう。

我々は今や 50 Mpc 以内のかなりの数の銀河・

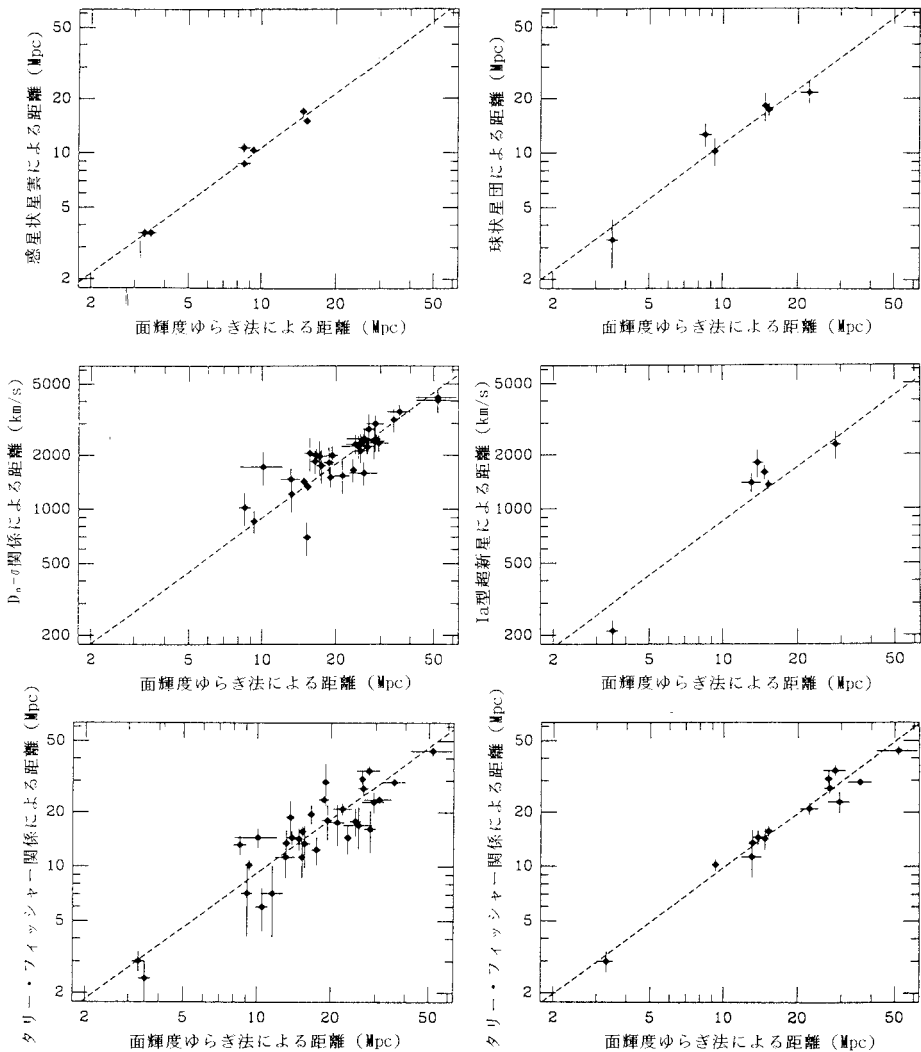


図4 面輝度ゆらぎ法による距離（横軸）とその他の手法で得られた距離の比較（文献3による）。下左のタリー・フィッシャー関係はすべての銀河団のデータを示したもの。これに対し、下右のタリー・フィッシャー関係は、渦巻銀河と楕円銀河が良く混じり合っているように見える銀河団のみをとったもの。

銀河団について複数の独立した方法（面輝度ゆらぎ、惑星状星雲、球状星団、タリー・フィッシャー関係）により、ほぼ15%の精度で一致する距離の推定値を得ている。これを用いて H_0 の推定ができる。図5に50 Mpc以内における速度距離関係を示す³⁾。上図は揃った特異速度はないと仮定した場合である。もし $H_0 \sim 50$ とするならば、この図は10 Mpcより遠方では何らかのバイアスのために距離が次第に近く見積もられる (H_0 が小さくなる) と解釈しなければならない。複数の距離推定法が良く一致した値を与えているのでこれは不自然な解釈である。下図は「おとめ座落下モデル」（銀河系の落下速度 300 km s^{-1} ）を仮定した場合である。速度距離関係のばらつきがずっと小さくなることから、このモデルの方が妥当と思われる。そうすると図からわかるように、 $H_0 \sim 85$ となる。

4.3 ハッブル定数の推定値

既に述べたが、 H_0 を決めるには特異速度の影響をできるだけ小さくするために遠方の銀河団を用いるのが良い。おとめ座銀河団は宇宙の距離尺度決定の第一歩ではあるが、「おとめ座落下」の特異速度のため後退速度の推定が困難である。最近では、おとめ座銀河団の約6倍の距離にあるかみのけ座銀河団を用いて H_0 の推定が行われている。まず、おとめ座銀河団とかみのけ座銀河団の相対距離を諸種の観測から定める（相対距離の決定は絶対距離の決定より容易である）。次に、本稿で述べたさまざまな方法で求めたおとめ座銀河団の距離に基づいてかみのけ座銀河団の距離を導く。かみのけ座銀河団の後退速度は $v_H \sim 7200 \text{ km s}^{-1}$ と比較的良く決まっているので両者の比から H_0 が求まる。ジャコビイ達³⁾がこの方法で得た値は、 $H_0 = 80 \pm 11$ である。この値はM 31の距離を770 Kpcとし $E(B-V) = 0.08$ とした場合である。バンデンバーグは同じ手法で $H_0 = 83 \pm 6$ を得たが⁵⁾、M 31については725 Kpc、 $E(B-V) = 0.07$ を仮定している。ここではジャコビイ達の推定にM 31の距離の不定性を加味した値

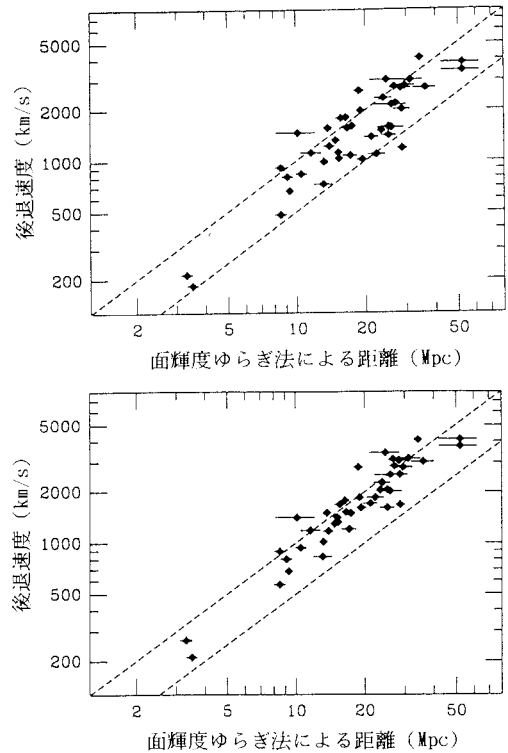


図5 50Mpcまでの銀河・銀河団に対する速度距離関係（文献3）。距離（横軸）は面輝度ゆらぎに基づく。下の破線が $H_0 = 50$ 、上の破線が $H_0 = 100$ に対応する。上図は特異速度場がないと仮定した場合で、下図は銀河系がおとめ座銀河団へ 300 km s^{-1} の速度で落ち込んでいるとした場合。

$$H_0 = 83 \pm 14 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

を採用しよう。これが現在の観測を総合して得られた H_0 の値と言ってよいだろう。

4.4 アスペン・コンファレンス

本稿を書き終えた直後に、アスペンで開催された「宇宙の距離尺度」をテーマとした研究会に参加する機会を得た。そこで得た新しい情報を三点にまとめて追記しておく。

第一点は、Ia型超新星による距離推定が他の手法による値と系統的に異なるという古くからの問題がより鮮明になったことである。主要なすべての手法による「相対距離」の評価は推定誤差内で一致している。問題は「絶対距離」すなわち各手

法の「ゼロ点」の較正にある。すでに見たように面輝度ゆらぎ、惑星状星雲、タリー・フィッシャー関係の三つはゼロ点についても15%以下の精度で一致しており、その距離推定からは $H_0 \sim 85$ が得られる。この距離に基づいてIa型超新星の最大光度を求めると $B \sim -18.7 \pm 0.2$ 等となる。これは多くの理論モデルの予想より1-1.4等暗いのである。このことは、理論モデルの予想をゼロ点に採用すると $H_0 < 60$ となることを意味する。この矛盾に関して今回新たな観測的問題が浮き彫りにされた。ハッブル宇宙望遠によりIC 4182という銀河中のセファイドが観測され、その距離が求められた。この銀河には、1937年にIa型超新星が出現し、その光度がバーデとツビッキーによって観測されているのである。新たに決ったセファイドによる距離をもとにこの超新星の最大光度を求めると $V = -19.8 \pm 0.2$ 等となり、これをゼロ点に採用すると、バンドの違いを考慮しても $H_0 < 60$ となるのである。この矛盾を解決できる可能性は三つしかない。第一はこの超新星は平均的なものより約1等明るい異常なものであった。第二はセファイドによるIC 4182の距離推定に大きな誤差がある、第三に一致した距離推定を与える上記三つの手法がすべて間違っている。現在第二の可能性を調べるべく、IC 4182の距離を色々な方法で決定する試みが行われている。

第二点はII型超新星による膨張光球法が急速な進展を見せていることである。データ数も増え、かつ大気モデルの改良によって従来の距離推定のいくつかが改訂された。この改訂の結果、タリー・フィッシャー関係による距離推定のある銀河については、両手法の与える距離はすべて5%以内で一致した。すなわちII型超新星の結果は従来の $H_0 \sim 60^{(4)}$ ではなく、 $H_0 \sim 85$ と矛盾しないものとなった。

第三点は、面輝度ゆらぎとタリー・フィッシャー関係のように多数の測定データのあるものでは、「おとめ座落下」の影響が速度距離関係の図に

明瞭に見られることである。銀河系の位置での落下速度の最良推定値は 300 km s^{-1} である。またいわゆるグレートアトラクター領域における速度場の乱れも見えている。特異速度の決定精度にはまだ問題があるものの、 H_0 の決定には特異速度が大きく関係しそうな予感がした。

5. 今後の課題と展望

今日までの観測の集大成として得られた値である $H_0 = 83 \pm 14$ は、宇宙年齢 $T_0 = H_0^{-1} = 122 \pm 20$ 億年を与える。この年齢は膨張率が時間とともに変わらないとした場合である。今日の一つの基準として良く用いられる平坦な宇宙モデル(密度パラメータ $\Omega_0 = 1$)をとると、 $T_0 = 81 \pm 13$ 億年となる。すでに述べたが、銀河系のまわりの球状星団の年齢は100億年より古く、110-180億年の間にあると推定されている。 $\Omega_0 = 1$ のフリードマンモデルはこの観測と大幅に(誤差の3倍以上)矛盾する。仮りに $\Omega_0 = 0$ に対応する122億年の宇宙年齢をとったとしても、本質的な解決にはならない。これは一体何を意味するのか、この問題の解決がこれからの観測的宇宙論の最大の課題である。

考えられる可能性を挙げてみよう。

(1) 上記の H_0 はかみのけ座銀河団から決められた。その距離は約90 Mpcである。この距離は観測可能な宇宙半径の30分の1程度でしかない。宇宙の大規模構造に伴う特異速度場がこの程度にまでわたるスケールを持っていれば、我々はたまたま宇宙膨張から大きく離れた領域を観測しているのかもしれない。

(2) 遠方銀河の距離決定は距離指標関係に大きく頼っている。距離指標関係は銀河の力学構造と明るさや大きさとの相関である。銀河の力学構造は光っている物質のみでなくダークマターによって大きく支配されると考えられている。たとえば、ダークマターと光っている物質の量の比が、高密度の領域と低密度の領域で異なるようなことが起っていれば、距離指標関係式の普遍性が成り立た

なくなる。

(3) 一般相対論の式に宇宙項が存在する。つまり重力とは異なる未知の力が宇宙膨張に関与している。この場合 H_0 と宇宙年令の関係はフリードマンモデルとは異なり、 $H_0 \sim 85$ でも球状星団の年令との矛盾は回避できる。

(4) 星の進化の理論に未知の要因がまだあって、球状星団の年令推定が大幅に間違っている。

この他にもまだ予想もしなかった可能性があるのかも知れない。

我が国がハワイに建設中の「すばる」望遠鏡は、0.3秒角というかつてない高い解像力を目指している。地球大気による光波面の乱れを実時間で補正する補償光学により更に高い分解能も期待されている。高い分解能は遠方の銀河の暗い標準光源を観測するのに必須である。すばるの8mという大口径と0.5秒を切る高分解能は、多くの距離決定法の適用限界を今日の数倍遠くに延ばすことを可能にするであろう。さらに、銀河形成領域を深く探査することにより、銀河の形成や初期進化の研究からダークマターの役割も次第に見えてくるかも知れない。

一方、アメリカと我国の研究者の共同研究として進められているデジタルスカイサーベイ計画では、全天の4分の1の広い領域にわたって、1億個の銀河の測光と、100万個の銀河および10万個のクエーサーのスペクトルを観測する。宇宙の地図は今日の約5倍遠方まで拡大され、大規模構造の姿が浮き彫りにされるはずである。広範囲にわたる大量の均質なデータは、距離指標関係の普遍性を調べる鍵となる。また多数の重力レンズも見つかると期待されている。重力レンズは宇宙項の存否の検定に重要な役割を果たす。

すばるは1998年の完成を目指している。デジタルスカイサーベイ計画は94年末から試験観測を開始し、2000年に完了する予定である。ハッブル定数が本当に決まるのはそう遠い未来のことではないような気がする。

参 考 文 献

- 1) Fukugita, M., Okamura, S., Tarusawa, K., Rood, H. J., and Williams, B. 1991, *Astrophys. J.*, **376**, 8.
- 2) Ichikawa, T., and Fukugita, M. 1992, *Astrophys. J.*, **394**, 61.
- 3) Jacoby, G. H. et al. 1992, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **104**, 599.
- 4) Schmidt, B. P., Kirshner, R. P., and Eastman, R. G. 1992, *Astrophys. J.*, **395**, 366.
- 5) van den Bergh, S. 1992, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **104**, 861.



M 65, M 66, NGC 3628
「遙かなる宇宙へ」より (日本天文学会©)