

# 宇宙での距離の決定

杉 山 直

〈国立天文台理論天文学研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: naoshi@th.nao.ac.jp

最近、新聞記事などで、「我々から 100 億光年離れた天体」とか、「宇宙誕生後 20 億年の姿」などという表現を目にする機会が多い。言うまでもなくこれらは、すばる望遠鏡をはじめとする地上の巨大望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などの成果である。しかし、ここで言われるような莫大な距離は、なかなか感覚的にピンとこないし、また記事を読み込んでみても、いったいどのようにして距離を測ったのか、うかがい知ることはできない。ここで挙げた二つの例の場合でも、その表現方法が異なっていることに気づかされるが、その違いがいったい何によるものか、はっきりしない。そこで以下では、天文月報編集部の求めに応じて、宇宙での距離の決定方法、その意味などについて概説する。とくに、距離梯子や膨張宇宙での距離の定義について詳しく述べる。

## 1. 宇宙での距離の測り方

宇宙で距離を測りたい、と思ったときに、まさか物差しを持っていくわけにはいかない。そこで距離の測り方に工夫が必要となる。距離の測定の原理には大きく分けて次の 3 種類が考えられよう。

- (1) 三角測量
- (2) 明るさのわかっている天体の見かけの明るさを測定する
- (3) 大きさのわかっている天体の見かけの大きさを測定する

三角測量の方法 (1) は、直接天体までの距離を幾何学的法則に基づいて決定するだけに、あいまいさがない。この方法によれば非常に正確に距離を決定することができる。実際に、日常生活で目にする測量は、この方法を用いている。互いの間の距離のわかっている独立した 2 点から、距離を測定したいポイントの方向を各々測ってやれば、そこまでの距離を決定できるのである。紀元前 2 世紀にはヒッパルコスが月までの距離をこの方法で求めている。

三角測量の方法がそれほど優れているのなら、この方法だけを使えばよろしかろう、と思われる。しかし、この方法を宇宙での距離の決定に使おうとすると、致命的な欠点があることにすぐに気づかされる。三角形の頂点にあたる天体までの距離を測るためにには、その天体の見える方向が異なる 2 地点で観測しなければならないからである。天体が非常に遠方にある場合、つまり三角形の底辺が他の 2 辺に比べて著しく短い場合には、天体の見える方向は、どちらの点から見てもほとんど変わらないことになってしまう。実際の観測では、分解できる角度に限界がある。角度分解能である。この方法で距離を測るためにには、三角形の頂点の角度が観測の角度分解能よりも大きくなければならない。さもなければ、2 地点からの見え方が違わなくなってしまうからである。

以上のことから、三角測量で測ることのできる距離をできるだけ遠方まで伸ばすためには、(a) 三角形の底辺を長くする、つまり 2 地点をできるだけ長く取る、(b) できるだけ角度分解能のよい観測を行う、という 2 点が重要になる。今のところ、三角形の底辺として、最も長く取ることが可

能なのは、地球と太陽の間の距離、1億5千万キロの2倍である。半年を隔てて観測することで、地球の太陽に対する運動によって、3億キロ隔たった2点から観測できるのである。これが年周視差法と呼ばれる方法である。1年を通して星の位置を測定すると、橢円を一周描くことになる。この橢円の直径が、三角形の頂点の角度に対応するのである。年周視差は距離の定義にも使われている。太陽と地球の間の距離を底辺とし、頂角が1秒角となる（つまり半年隔てて測定すれば2秒角）ところにある天体までの距離を1パーセク（pc: PARallax-SECond）と呼ぶのである。簡単な算数により、1 pc は  $3.1 \times 10^{18}$  cm、3.3 光年であることがわかる。

できるだけ角度分解能をよくするためには、大気の影響のない宇宙空間での観測が望ましいことになる。その目的で打ち上げられたのが **Hipparcos** 衛星である<sup>1)</sup>。Hipparcos 衛星では、誤差1ミリ秒角程度の精度で太陽と地球の距離を底辺とする頂角が決定された。このことから、100 pc までの範囲で 10% 以内の誤差で精度良く距離を決めることが可能となった。しかし、一方で、銀河系の見えている部分の差し渡しは 10 万光年 (30 kpc; kpc=1000 pc) 程度である。残念ながら年周視差法を用いた場合には、現時点では、まだまだ銀河系を出ることはおろかその中心までも届くことができないのである。

そこで、電波の干渉計を用い、天体の位置を非常に高い角度分解能で正確に決定することで、これまでにない遠方の天体の年周視差を測ることを可能とする **VERA** 計画が、国立天文台を中心として走り出した<sup>2)</sup>。特定の電波を出している限られた数の天体しか測定できないが、Hipparcos 衛星を数十倍もしのぐ精度が期待されている。今後の衛星計画として、ヨーロッパでは **GAIA** 計画、日本では **JASMINE** 計画などが提案されている。今後 10 年ほどで、銀河系内の距離の決定精度は飛躍的に高まるであろう。しかし、銀河系外の天

体までの距離をこの方法で直接測定することは将来においても困難である。

明るさがわかっている天体の見かけの明るさを測定して距離を決定する方法(2)は、遠方になればなるほど、天体の明るさが見かけ上暗くなることを利用する。見かけの明るさ（光度）は距離の2乗に反比例するのである。この方法を利用するためには、対象となる天体の本当の明るさがわかっていないなければならない。それが三角測量に比べた場合の、大きな弱点である。明るさのわかっているような都合のよい天体が、どれだけ宇宙に存在しているのかが勝負になる。悪い例を挙げれば、銀河などは個性が強すぎて使えない。

明るさがわかる天体の中で、最も有名かつ距離決定に有用とされているのがケフェウス（セファイド）型変光星である。ケフェウス型変光星は、変光の周期と明るさの間に強い相関がある。周期が長いものほど、明るいのである。このことは 1910 年代にリーヴィットによって、小マゼラン星雲 (SMC) にあるケフェウス型変光星の観測を通じて明らかにされた。ケフェウス型変光星は、周期を測定すれば、本当の明るさがわかるのである。

大きさがわかっている天体の見かけの大きさを測定する方法(3)は、遠方になればなるほど、見かけの大きさが距離に比例して小さくなることを利用する。この方法を実際の距離の決定に用いているものに、スニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果を利用した手法がある。銀河団などの高温のガスが存在する環境では、その中を宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) が通過するときに、高温の電子と衝突する。そのためには、CMB の光子のエネルギー分布が変えられてしまう（ゆがむ）。これがスニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果である<sup>3)</sup>。CMB のエネルギー分布を観測し、X 線観測による電子の温度の情報を付け加えることで、CMB がどれだけのサイズのガスを通過してきたのかがわかる。これは奥行きの情報ではあるが、形状が丸いというよ

うな仮定を置くことで、銀河団ガスの差し渡しの本当の大きさがわかることになる。こうやって得られた大きさを銀河団の見かけの大きさと比較することで距離がわかる、という仕組みである。

最後に、最近注目されている距離決定の方法について述べたい。それは重力レンズ効果を用いて距離を決める手法であり、大きさがわかっている天体の見かけの大きさを測定する方法に分類される。宇宙には、銀河団など非常に質量が集中している構造がある。この背後にクエーサーなどがあれば、光の経路がゆがめられる重力レンズ効果により、その像が複数個現れる。像の数やその位置関係から、重力レンズ効果を引き起こした銀河団などの重力源の情報は得られるのであるが、それだけでは銀河団までの距離はわからない。もう一つ別な情報が必要となる。ここでクエーサーからの光が時間変動したとする。すると観測者にとっては、各々の像で時間変動が異なった時刻に現れることになる。像ごとに光の経路が異なるからである。この時間変動が得られれば、光の経路を決定することができる。距離がわかるのである。場合によっては1年以上も隔たって起きる像ごとの時間変動を測定するのは困難を極めるが、ここ数年でこの方法もようやく実用化してきた<sup>4)</sup>。すでに10個ほどの重力レンズによって、時間の変動が測られ、距離が決定されている。

スニヤエフ・ゼルドヴィッチ効果や重力レンズ効果を用いれば、次に述べる距離梯子によらず直接的に遠方までの距離を決定できる。今後とも注目される重要な方法である。

## 2. 距離梯子

前節で、最も信頼できる距離の測定方法は三角測量であるが、この方法では銀河系を超えた距離を測定することはできないことを説明した。実際に宇宙で莫大な距離を測定するときには、三角測量と明るさのわかっている天体の方法、または大きさのわかっている天体の方法を組み合わせて使

うのである。さらに、明るさのわかっている天体の方法でも、我々の近くに多く存在しているが、暗いために遠方までの距離決めには使えない種類の天体と、明るいが近くにはないので、遠方での距離決めにしか使えない天体をうまく組み合わせることで、遠方までの距離を決めることが可能になる。

なぜこのように異なった距離決定の方法を組み合わせる必要があるのだろうか。それは、明るさや大きさがわかっている、といっても相対的にすぎないからである。例えば、先ほどのケフェウス型変光星の周期と明るさの間の関係にしても、SMCまでの距離が別な方法で明らかにされない限り、相対的でしかない。遠方に15日の周期の変光星を見つけたとする。その見かけの明るさが、同じ15日の周期を持つSMCの変光星の1/4であったとしよう。するとその変光星の存在している場所はSMCまでの距離の2倍であることはわかる。しかし、それが何光年かは、SMCまでの距離を知らずにはわからないのである。

さまざまな方法を組み合わせ、数十億光年以上というはるか彼方までの距離を測定する手法のことを、距離梯子と呼ぶ。非常に遠方までの距離を決定するための巧妙な方法ではあるが、梯子のどこかに距離決定のミスや誤差があると、その先の距離決定にそのミスや誤差がそのまま反映されてしまう点には注意されたい。

次に、どのように距離梯子を伸ばしていくのか具体的に見ていく。本1冊が書けるほど多くの手法があるのだが<sup>5)</sup>、ここでは、現在最も標準的に使われているごく一部の方法のみを紹介する。まず、現在のところ、100光年程度まで(Hipparcos衛星では100pc)は、年周視差を用いた方法で非常に信頼度の高い距離の測定が可能である。

100光年までには、星団がいくつか含まれる。星団には多くの主系列星が含まれている。一方、理論的にも観測的にも、主系列星は色と本当の明るさの間に強い相関があることはよく知られて

る。ある星団において、年周視差によって距離が決められれば、主系列星の（見かけではなく）本当の明るさと色の関係が決まるのである。いったんこの関係が得られれば、どこの星団でも、含まれる主系列星の色と見かけの明るさを測定することで、そこまでの距離が決定できる。年周視差の方法と主系列星の方法が、梯子によってつながれるのである。この主系列星の手法で、大小マゼラン星雲までの距離が決定できる。大マゼラン星雲(LMC)までの距離はおよそ16万光年(50 kpc)であった。この距離には、まだ10%程度の不定性があると考えられている。

LMCやSMCには、ケフェウス型変光星が数多く含まれている。そこで次の梯子をつなぐことが可能になる。主系列星に比べて、ケフェウス型変光星は明るく、はるかに遠方まで使うことが可能である。また、明るさの決定の精度も高い(周期と明るさの相関が非常によい)。そこで、ハッブル宇宙望遠鏡のキープロジェクトとして、ケフェウス型変光星をできる限り遠方まで見つけて、そこまでの距離を決めるという提案が採択された。このプロジェクトにより、今では5千万光年(15 Mpc;  $Mpc = 10^6 pc$ )ほどの距離にあるおとめ座銀河団に含まれる銀河までの距離がケフェウス型変光星によって決定できるようになった。

おとめ座銀河団ぐらい遠方まで梯子が伸びれば、そこには数多くの銀河が存在している。そこで次なる梯子のステップとして、渦巻銀河の回転速度と本当の明るさの相関を用いた手法を使うことが可能になる。タリー・フィッシャー関係と呼ばれるもので<sup>6)</sup>、回転の速い銀河ほど明るい、という経験則である。この経験則は、数値シミュレーションによる理論計算からも成り立つことがほぼ示されている。タリー・フィッシャー関係を用いた距離の測定は、どれだけ遠方の銀河までその回転運動を測定できるのかによって限界が決められる。現在では、100 Mpc以上遠方まで伸ばすことが可能になっている。橿円銀河にもその星の

速度分散と、銀河の大きさ、明るさとの間に似たような経験則(Fundamental Plane)があり<sup>7)</sup>、こちらもやはり100 Mpcぐらいの距離まで決定可能である。

これらの方法を超えて、梯子を非常に遠方に伸ばすことができる的是、超新星Ia型の光度曲線(明るさの時間変化)を用いる手法である。Ia型超新星は非常に明るく、最も明るいときはその輝きは銀河全体と匹敵する。かつては、すべてのIa型超新星は、同じ明るさで輝くと信じられていたがそれは少し単純すぎる仮定であった。実際には、すぐに暗くなっていくものは本当の明るさは暗く、ゆっくりと暗くなっていくものが本当に明るい、という相関が見つけられたのである<sup>8)</sup>。過去、我々の近傍に出現した超新星の光度曲線を調べ、その属する銀河までの距離を他の方法で決定することによって、超新星までの距離が光度曲線の測定によって決定できるようになったのだ。10年ほど前のこの発見により、Ia型超新星を用いた距離決定の信頼度がグンと高まった。超新星を使えば、宇宙の非常に遠方、100億光年を超える距離まで到達できる。距離梯子が宇宙全体に伸ば

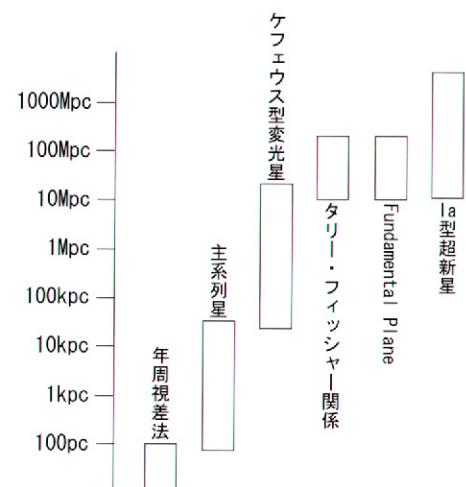


図1 さまざまな距離決定の手法とその適用範囲。このように多くの手法をつないで、遠方までの距離を決定する方法を距離梯子と呼ぶ。

されたのである。

図1にここで紹介した距離の測定方法とその適用範囲が描いてある。2種類以上の方法が重なっているところで梯子をつないでいるのである。

### 3. 赤方偏移と距離

非常に遠方までの距離決定が可能になってくると、宇宙が膨張していることが気になりだしていく。なにしろ、光が天体から放たれて我々に到達する間に、宇宙は、そして天体までの距離は、一刻と大きくなっていくのである。「距離」はもはや不变なものではないのである。膨張している宇宙での距離の定義については次節に述べることとし、ここでは、膨張宇宙に特有な現象である赤方偏移と距離の関係について解説する。

1929年には早くもハッブルによって、我々の宇宙が膨張していることが明らかにされた。このような膨張宇宙では、すべての点が互いに距離に比例する速度で離れていくことがわかる。ポールの表面を宇宙空間に見立てて、ポールが大きくなっていく場合を考えればすぐに理解できるであろう。ここで速度と距離を結ぶ比例係数  $H$  をハッブル定数と呼ぶ。すなわち、2点の間の距離を  $d$ 、互いの遠ざかる速度を  $v$  とすれば、 $v = Hd$  という関係になる。ハッブルの法則と呼ばれるものである。

一方で、遠ざかる天体は、ドップラー効果により、そこから放出される光は赤方偏移を受ける。放出されたときの光の波長を  $\lambda$ 、受け取るときの波長を  $\lambda'$  とすれば、赤方偏移パラメーター  $z$  は  $z = \lambda'/\lambda - 1$  と定義され、互いの遠ざかる速度（後退速度） $v$  との関係は、 $v = cz$  となる（高校で習った音の場合のドップラー効果の公式を思い出してください）。ここで  $c$  は光速である。

ただし、これらの式は、すべて我々の近く、 $z$  が1よりも十分小さい場合にのみ成り立つ関係である。 $z$  が1に近づいていくと、補正が必要になってくる。例えば、ハッブル定数  $H$  ももはや、「定

数」ではなくなる。宇宙の膨張は時間とともに減速、ないし加速しているために、速度を表す  $H$  も過去では現在とは異なった値であったと考えられるのである。また、もしこれらの法則が  $z=1$  でも成り立っているとしたら、 $z=1$  を示す天体の我々から遠ざかる速度は光速と等しくなってしまう。因果律から考えて、それよりも大きな赤方偏移の天体は決して我々には見ることができないはずである。しかし実際には  $z$  が1よりも大きい天体は数多く見つかっている。この関係は、明らかに  $z$  が1に近づくと破綻するのだ。実際には速度が光速に近づくと、特殊相対性理論に基づいたドップラー効果の式を用いる必要も生じるのである。

ハッブルの法則や赤方偏移と後退速度の関係に補正をもたらす宇宙膨張の加速や減速は、宇宙にどのような物質が存在しているのかによって決定される。通常の物質であれば、互いの間に働く力の主成分である重力が引力のみを及ぼすことから、宇宙の膨張は常に減速していくことになる。一方、宇宙項と呼ばれる斥力として働く成分が宇宙の主成分であれば、膨張は加速していくことになる。

このように減速、ないしは加速しながら膨張している宇宙で、遠方までの天体の距離を測定し、また同時にその天体の遠ざかる速度を赤方偏移によって測定することを考える。するとそこで得られる情報は、天体の赤方偏移  $z$  の1に対する大小で異なることがわかる。まず  $z$  が1に比べ小さければハッブル定数  $H$  が決定できる。一方、 $z$  が1に近づく、または超えるような超遠方の天体では、むしろ宇宙項や宇宙に平均的に存在している物質の量を決定できることになるのである。

実際に、最近  $z$  が1近い、場合によっては1を超えるようなIa型超新星を大規模に探査した結果、宇宙項の存在が明らかになってきた<sup>9)</sup>。これは近年の宇宙論観測の大きな成果であるが、ここでは深く立ち入らないことにする。

さて、ここで  $z$  が1に比べ小さい場合を考えよ

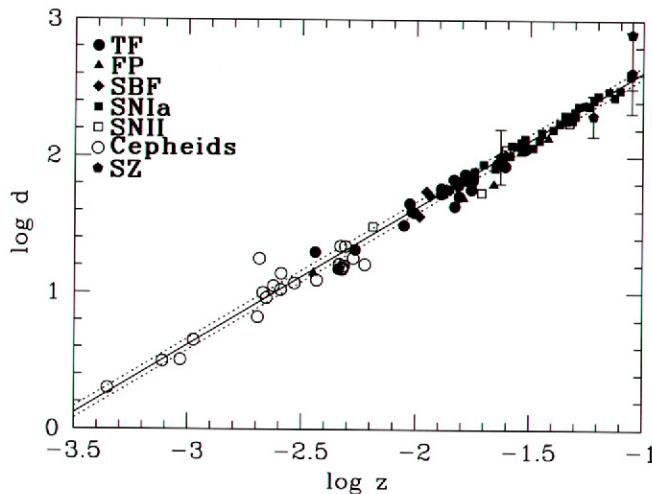


図2 ハッブル定数の観測的決定<sup>11)</sup>. 横軸は赤方偏移の対数で、後退速度に書き直せる ( $z=v/c$ ). 縦軸は距離の対数. このグラフの傾きがハッブル定数を与える. 実線が  $72 \text{ km/s/Mpc}$  で、10% の誤差の領域が点線で示されている. ハッブル宇宙望遠鏡のキープロジェクトによって、ケフェウス型変光星を用いて、これまでにない遠方の距離が決定できた (Cepheids). それにより、タリー・フィッシャー関係 (TF) や Fundamental Plane (FP), 超新星 Ia 型 (SNla) などの決定精度が格段に向上した.

う. このとき遠方の天体までの距離と赤方偏移を測定した結果として、いったんハッブル定数の値が明らかになれば、今度は遠ざかる速度（赤方偏移）を測ることだけで、距離が決定できる. 先ほどの式を書き直せば、 $d=v/H=cz/H$  となることから明らかであろう. 面倒な距離梯子はもはや必要なくなるのである.

そのため、ハッブル以降、 $H$  を決定する、つまり距離を測定することが宇宙論観測の大きな課題となってきた. ハッブル自身が得た値は、後になって大きな誤りがあったことが明らかにされた. ハッブルが測定したのは、宇宙の膨張以外の効果である銀河同士が直接及ぼし合う重力が問題になるような、我々のごく近傍の銀河までの距離であったこと（実際アンドロメダ銀河は、赤方偏移どころか、青方偏移をしている、つまり我々に近づいている）、ケフェウス型変光星の周期と明るさの関係を決める際に、ダストによる減光を勘定に入れていないかったこと、などによって誤った結果を得てしまったのである<sup>10)</sup>.

距離の決定の困難さのため、ハッブル以後も、

ハッブル定数の決定は遅々として進まなかった. 1980年代までは、サンデージとドボクロールが率いる二つのグループ間で、2倍の食い違いをめぐる論争が延々と繰り広げられていた. しかし、1990年代になって、ハッブル宇宙望遠鏡の登場により状況は大きく変わってきた. 先にも述べたが、キープロジェクトとして、遠方の銀河まで、直接ケフェウス型変光星を用いて距離を決め、距離梯子のつなぎ目をこれまでよりもはるかに精密にする計画が進められたからである. その最終結果は、2000年（論文は2001年出版）に報告された<sup>11)</sup>. ケフェウス型変光星からつなげられた、渦巻銀河や楕円銀河、超新星を用いた方法によって、100 Mpc 以上までの距離が正確に決定されたのである. その結果が図2である. 得られたハッブル定数の値は、 $72 \text{ km/s/Mpc}$  で、誤差は  $\pm 8 \text{ km/s/Mpc}$  である. この値の意味するところは、100 Mpc の距離の銀河は、我々から  $7200 \text{ km/s}$  の速度で遠ざかっていること、また、 $z=1$  は、（本当は補正が必要ではあるが） $4200 \text{ Mpc}$  ( $d=cz/H$  を用いた) に対応するということである. この  $H$  の

値から、膨張が減速、加速していることによる補正が必要になる距離は、 $z$  が 1 に近づく、例えばおよそ 1000 Mpc ( $z=0.24$  に相当) を超えるあたりからであることもわかる。

#### 4. 距離の意味の違い

膨張する宇宙では、距離の定義があいまいになる。先にも述べたが、光が空間を走ってくる間に、その距離が時々刻々と伸びていくからである。特にその違いは、赤方偏移が 1 に近づくにつれ、大きくなってくる。そこで「距離」というものを観測に基づいてきちんと定義することが必要となる。

これまで、遠方で使える距離の決定の方法として、大きく分けて、本当の明るさがわかっている天体の見かけの明るさを測定する方法と、本当の

大きさがわかっている天体の見かけの大きさを測定する方法があると述べてきた。このそれぞれについて、距離を定義することができる。前者が光度距離、後者は角径距離と呼ばれる。

光度距離とは、「距離」を天体の放つ光の明るさの減光具合によって定義する方法である。例えば恒星表面から放たれた光が、 $1/4$  に減光するのは、恒星の中心から測って、半径の 2 倍の距離にある場所で実現する。恒星を覆う球殻を考えると、その表面全体では、放射されるエネルギーが保存するというのがその理由である。この減光が  $1/100$  ならば、恒星の半径の 10 倍、 $1/10000$  ならば、100 倍の距離である。

角径距離は、距離を測る対象となる天体の大きさを、我々観測者が見込む角度で割ることで定義される。

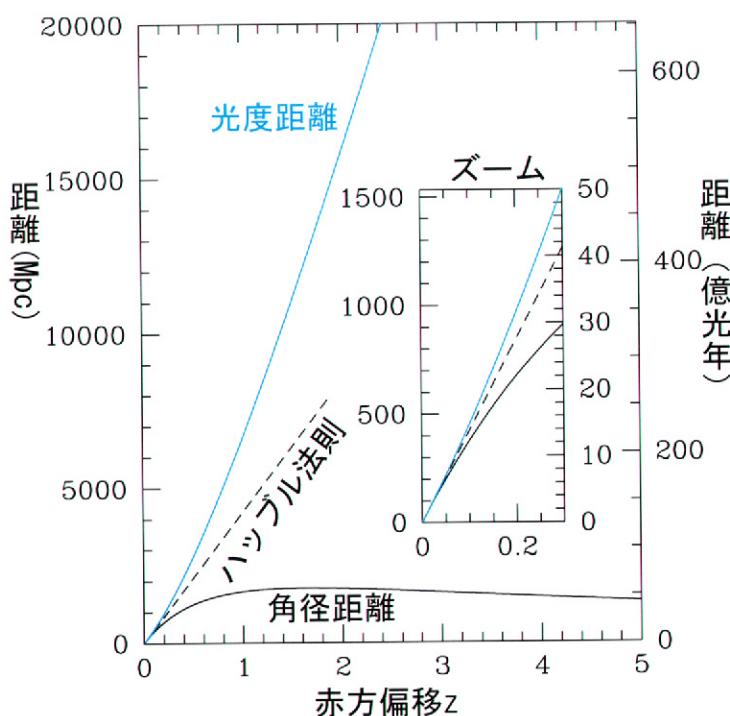


図 3 光度距離、角径距離を赤方偏移の関数として描いた。点線はハッブルの法則。図の中に、赤方偏移が小さい部分だけ拡大して描いてある。赤方偏移  $z=0.1$  を超えると、光度距離と角径距離、ハッブルの法則が異なり始めることがわかる。ここでは宇宙論パラメーター（ハッブル定数、物質密度、宇宙項）は WMAP の結果<sup>12)</sup>を用いている。

この二つの距離の定義は、普通の膨張しない空間であれば等しい。しかし、宇宙膨張が二つの距離を異なったものにする。天体から光がやってくる間に、空間が膨張するために「距離」は伸びていく。一方で、膨張の効果は、像の大きさをむしろ拡大する方向に働く。途中の空間が凸レンズの役目を果たすと考えても良い。そこで、角径距離は、赤方偏移が大きくなってしまっても、あまり伸びないことになる。角径距離は光度距離に比べて、短くなるのである。一般相対性理論に基づいた計算を行うと、光度距離は角径距離を  $(1+z)$  の 2 乗倍したものであることがわかる。 $z$  が小さい間は両者は同じであるが、宇宙の膨張がきいてくる遠方、すなわち  $z$  が 1 に比べ無視できない場合に、その違いが際立ってくるのである。ここでも、 $z$  が 1 に近づくと、距離というものの意味が曖昧になってくる。光度距離や角径距離そのものは観測量として、しっかりと定義できるが、それらと、我々が日常生活で使っている「距離」の概念が大分食い違ってくるのである。例えば、驚くべきことに、角径距離は  $z$  が 1 を超えてある程度よりも大きくなると、 $z$  の増加とともに短くなっていく。本当は遠方にあるのに、角径距離では、むしろ近くにあることになってしまうのである（図3参照）。もはや「距離」としての用をなさないことは明らかであろう。また図3からは、光度距離と角径距離は、 $z=0.1$  程度でも、すでに異なっていることが明らかである。

## 5. 宇宙年齢との関係

距離の意味があいまいになる、赤方偏移が 1 を超えたような遠方までの距離は、いったいどのように表すのが適当なのだろうか。

ここで、我々が観測できる最も遠方、とはいってどこか考えてみよう。それは赤方偏移でいえば、無限大に対応する。

遠方の天体を観測するということは、昔の時期に放出した光を見ることになる。例えば、250 万

光年程の距離にあるアンドロメダ銀河は、250 万年前の姿を、5000 万光年の彼方にあるおとめ座銀河団は、5000 万年前の姿を、それぞれ我々に見せてくれている。しかし、我々はどこまでもさかのぼれるわけではない。今から、140 億年ほど前に宇宙がビッグバンによって始まったことがわかっているからである。もし、宇宙の年齢が 140 億年ならば、140 億光年以上遠方には、光を出す天体が存在しないはずである。なにしろ宇宙が誕生以前なのであるから。これが我々の宇宙の観測できる限界、いわば「果て」である。地平線と呼ばれる。

ここで簡単に 140 億光年と述べたが、その数字にはいくつかの問題点がある。まず、宇宙の年齢がどれだけ精密に決定されているのかという疑問が挙げられる。以前から、最も古い星の年齢を調べることで、宇宙は 130 億歳以上であることはわかっていた。しかし、ごく最近、WMAP 衛星による宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎの観測から、宇宙の年齢が、誤差数%で、137 億歳であることが明らかにされた<sup>12)</sup>。これが正しければ、宇宙年齢決定の問題はほぼ解決されたといえる。

次に問題となるのは、例えば宇宙が 137 億歳だとしたら、果てまでの「距離」は 137 億光年なのか、ということである。当たり前に思えるが、前節で述べたように、宇宙が膨張しているために、ここでは距離とは何かが、はなはだ曖昧になる。この果てとは、赤方偏移無限大に相当するのだから、光度距離と角径距離の違いは、無限大である！

地平線の大きさを膨張宇宙を表す一般相対性理論の式に基づき、厳密に定義し、決定することは可能である。それは、宇宙の物質の量や、宇宙項の大きさによって異なるものになる。膨張速度が影響を受けるのであるから、当然といえよう。WMAP の観測によって決定された物質の量や宇宙項の値によって地平線の大きさを計算すると、14.3 Gpc (1 Gpc = 1000 Mpc)、466 億光年になる。

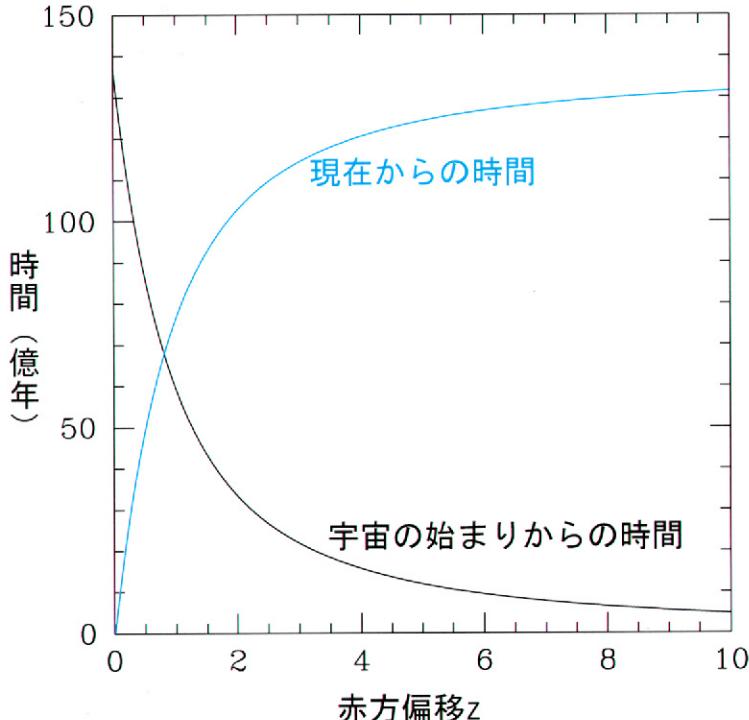


図 4 宇宙年齢と赤方偏移の関係。現在の宇宙年齢を 137 億歳として、宇宙が始まってからの時間と赤方偏移の関係が黒線、現在からどれだけの時間隔たっているかが青線。後者が、我々からの「距離」を与える。

137 億光年とは、大分違ってくる。しかし、この地平線の大きさといえども、直接の観測量ではなく、ある定義に基づいたものであるとしかいいようがない。

そこで巷では、これらのもろもろには目をつぶって、宇宙の年齢を用いて、観測できる最も遠方までの距離を 140 億光年とか、150 億光年、最近では 137 億光年などという数字が通常使われている。距離の意味が曖昧であり、結局定義の違いでしかないからである。

ここでは仮に、137 億光年としよう。WMAP によって決定された宇宙年齢から得た数字である。さて、これは赤方偏移無限大の天体までの距離である、と先に述べた。では、距離の意味が曖昧になってくる赤方偏移 1 付近からそれ以上遠方（大きな赤方偏移）の天体までの「距離」は、この宇宙年齢に基づいた距離の表示方法を用いてどのように表すことが適当なのであろうか。

これは年齢で距離を定義する方法である。そこで赤方偏移とその天体の年齢（ビッグバンの始まりからの時刻）の関係を調べてみよう。WMAP の決定したパラメーターを用いると、 $z=1$  は 59 億年、3 は 22 億年、5 は 12 億年、10 は 4.8 億年にそれぞれ対応する（図 4）。するとそこまでの距離は各々、78 億光年、115 億光年、125 億光年、132 億光年となる。 $z$  が大きくなると、急速に 137 億光年に近づくことがわかるであろう。差がほとんどなくなってしまうのである。また 137 億光年という数字自体に少なくとも数%の誤差があったことを考えると、このような距離の表記の方法は、誤解を招くだけでなく、正確でもない。そこで、 $z$  が大きい非常に遠方の天体までの距離は、「宇宙が誕生してから、何億年後の天体」という表現方法を用いた方がより正確でわかりやすいことになる。

しかし、この何億年後、という数字は、ハッブ

ル定数や宇宙項の値などによって大きくかわる(ここでは最新の WMAP の値を用いた)。新聞に「なんなら望遠鏡が宇宙誕生後 20 億年の銀河の衝突の痕跡を発見」などという記事がでたときには、赤方偏移の値を適当に変換している。そのときに、どのようなハッブル定数、宇宙項、物質の量などが使われて、その変換が行われているのかは、記事からはうかがい知ることはできない。研究者は、記事の発信元である研究機関のホームページにアクセスを急ぐことになるのである。

## 参考文献

- 1) <http://astro.estec.esa.nl/Hipparcos/hipparcos.html>
- 2) <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/index-J.htm>
- 3) Zeldovich Ya. B., Sunyaev R. A., 1969, Ap & SS 4, 301
- 4) Schild R. E., Cholfin B., 1986, ApJ 300, 209; Colley, W. N., et al., 2002, ApJ 565, 105
- 5) Rowan-Robinson M., 1985, The cosmological distance ladder (W. H. Freeman, New York)
- 6) Tully B., Ficsher J. R., 1977, A & A 54, 661
- 7) Djorgovski S., Davis M., 1987, ApJ 313, 59; Dressler A., et al., 1987, ApJ 313, 42; Faber S. M., et al., 1987, in Nearly Normal Galaxies, ed. S. M. Faber (Springer, New York), p. 175
- 8) Phillips M. M., 1993, ApJ Lett. 413, L105; Hamuy H., et al., 1995, AJ 109, 1; Riess A. G., Press W. H., Kirshner R. P., 1995, ApJ Lett. 438, L17; Perlmutter S. et al., 1997, ApJ 483, 565
- 9) Riess A. G., et al., 1998, AJ 116, 1009; Perlmutter S., et al., 1999, ApJ 517, 565
- 10) このあたりの詳しい事情は、Weinberg S., 1972, Gravitation and Cosmology (John Wiley & Sons, New York)。Weinbergによれば、ハッブルの誤った値が 1950 年代になるまで気づかれてなかったのは、星間吸収が実際よりも低く評価されていたこと、またケフェウス型変光星(種族 I)の誤った周期と明るさの関係が、たまたま(全く偶然に)、種族 II の W Virginis Stars については、正しい関係であったことなどが理由とのことである。後者を少し詳しく述べると、球状星団の距離の較正を行う際に、シャプレーが二重に間違えた、つまり、誤ったケフェウス型変光星の

周期と明るさの関係を、ケフェウス型変光星と思って、W Virginis Stars について適用したために、偶然に正しい距離を得た、という事情で、誤りが発覚するのが非常に遅れたのだという。

- 11) Freedman W. L., et al., 2001, ApJ 5553, 47
- 12) 例えば、小松英一郎, 2003, 天文月報 96, 482; Bennett C. L., et al., 2003, ApJ Suppl. 148, 1. 前者では宇宙年齢を WMAP だけから求めたものとして 134 億年としているが、ここでは後者、および WMAP の記者発表に基づいて 137 億年とした。この値を得るために宇宙論パラメーターは物質密度、宇宙項、無次元ハッブル定数が各々  $\Omega_m = 0.27$ ,  $\Omega_\lambda = 0.73$ ,  $h = 0.71$  である。

## Determination of the Distance in the Universe

Naoshi SUGIYAMA

*Division of Theoretical Astrophysics, National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

**Abstract:** In these days, we often see articles in the news paper something like “the distance to the object is 10 billion light year”, or “the image reveals the universe of 2 billion years old”. These are articles to explain observational results by large telescopes such as Subaru, Keck, or Hubble space telescope. From these articles, however, it is difficult for us to get insight about such huge distances and to know how these distances are measured. We notice the difference of phrasing of these two examples while it is not clear why they are different. I was requested by Tenmon-Geppou editorial board to review how to measure distances in the universe and explain meaning of each distance, that is described in this paper. In particular, I discuss the cosmic distant ladder and the definition of distances in the expanding universe.