

Ia 型超新星による宇宙論パラメータ決定と宇宙年齢

戸谷友則

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

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

宇宙論において、我々の宇宙の膨張速度や幾何学的構造を決める最も基本的な3つのパラメータ、すなわち、ハッブル定数、密度パラメータ、及び宇宙定数が決まれば、宇宙の年齢は予言することができる。近年様々なアプローチでこれらのパラメータを決定する努力が行われ、進展を見せているが、その中からIa型超新星による方法の現状と問題点について解説し、それから得られる宇宙年齢への示唆を議論する。

1. はじめに

我々の住む宇宙の幾何学的構造や、ビッグバン以来の膨張の歴史を探ることは、現代天文学、観測的宇宙論における最も基本的かつ究極の目標である。様々なアプローチが提案され、実行されているが、その中でも最もシンプルで分かりやすいのがIa型超新星を使った宇宙モデルの検証であろう。Ia型超新星は、白色矮星内部で核融合反応が爆発的に進むことで発生するとされていて、重要な特徴として、明るさが非常に一定なことが知られている。Ia型超新星自体のメカニズムや発生源も非常に興味深い問題であるが、それについては他の文献を参照されたい¹⁾。明るさが厳密に一定の天体を、理想的に「標準光源」と呼ぶが、Ia型超新星は諸天体の中で最も標準光源に近いといえる。真の明るさが分かっているわけだから、宇宙の遠方(昔)に発生した超新星の見かけの明るさを調べることで、宇宙の幾何学的構造や歴史がわかるというわけである。

ここ数年、赤方変移 z にして0.5-1程度の超新星が、この宇宙論目的の系統的探査計画により多数発見されるようになり、その結果、宇宙は従来

信じられていた減速膨張から加速膨張に転じようとしているらしいこと、そしてその加速膨張を引き起こす源、「宇宙定数」がゼロでない有限の値を持っていないと説明ができないことが主張され、大きな注目を浴びている。通常、宇宙は物質の重力により減速しながら膨張するが、「宇宙定数」(物理的には真空のエネルギーとされる)があれば斥力が働いて加速膨張する。定常宇宙を信じていたアインシュタインが宇宙を制止させるために導入し、後にハッブルの宇宙膨張発見を受けて撤回した、という経緯はあまりにも有名である。また、宇宙の超初期に起こったとされるインフレーションも、同じメカニズムでおこると考えられている。つまり、我々の宇宙は再びインフレーションの時代に突入しつつあるのかもしれない。ただ、私個人の見解としては、現在の超新星のデータはそうした強い結論を出せるほどの精度に達していないと考えている。

さて、今回、天文月報で宇宙年齢に関する記事を集めることとすることで、Ia型超新星による宇宙モデル決定についての解説記事を依頼された。Ia型超新星観測の目的は、宇宙の幾何学的構造を決定することで、宇宙年齢を測定することは直接の目

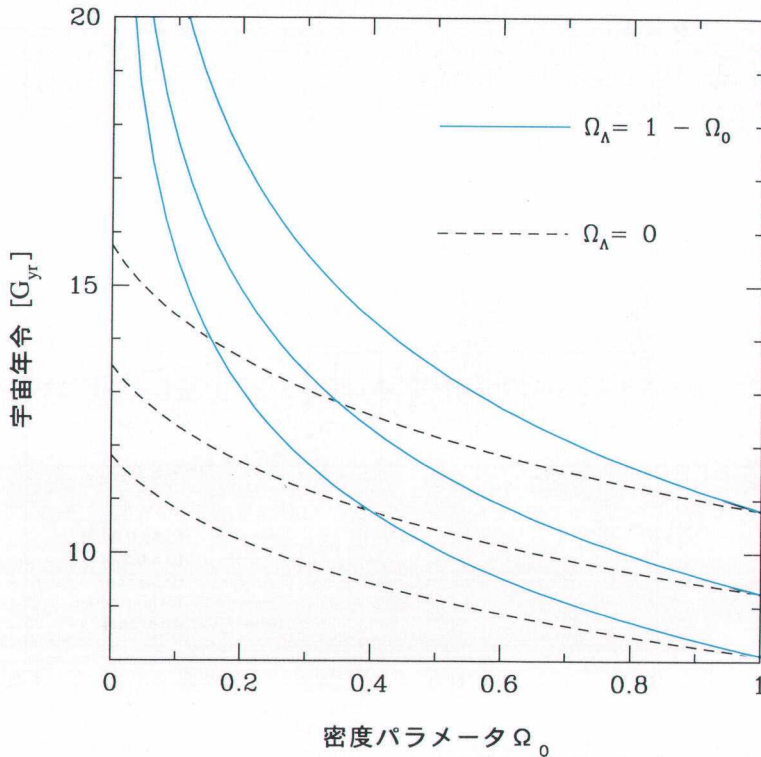


図1：宇宙年齢と宇宙論パラメータの関係。密度パラメータ Ω_0 の関数として宇宙年齢を Gyr = 10 億年単位で書いてある。実線と鎖線は、宇宙定数 Ω_Λ を、 $\Omega_0 + \Omega_\Lambda = 1$ (宇宙の曲率ゼロ) となるように取った場合と、宇宙定数ゼロの開いた宇宙の場合に相当する。それぞれ3本の線は、上から順に、ハッブル定数 $H_0 = 60, 70, 80$ km/s/Mpc の場合である。

標ではない。しかし、宇宙論パラメータが決定されれば宇宙の年齢はビッグバン宇宙論により容易に計算することができ、そこから予言される宇宙年齢と、球状星団の年齢や宇宙初期に形成された原子核の崩壊率から推定される宇宙年齢の下限値との整合性はビッグバン宇宙論の検証として極めて重要である。

以下、宇宙論パラメータとその宇宙年齢との関係、Ia型超新星による宇宙モデル決定の現状と、私の考える問題点について、簡単に解説する。

2. 宇宙論パラメータと宇宙年齢

一様等方な宇宙を考えると、一般相対性理論より、その膨張、収縮のダイナミクスは以下の3つのパラメータにより一意的に決まる。ハッブル定数

H_0 は現在の宇宙の膨張速度である。「速度」といっても、この場合、単位距離だけ離れた2点間の速度として膨張速度は測られるので、物理的次元は時間の逆数である。天文月報5月号の伊藤氏の記事²⁾にあるように、ハッブル定数の値は、近年、 $H_0 \sim 70$ km/s/Mpc という値に収束しつつある。この逆数は $H_0^{-1} \sim 140$ 億年、これはハッブル時間と呼ばれ、宇宙の年齢はこの時間スケールで決まるとして基本的に間違いはない。ただ、宇宙の膨張速度は一定ではなく、中に含まれる物質密度などの影響で変化するために、正確な年齢はこれから多少ずれる。それを記述するのが、Freedman 方程式

$$\frac{H^2}{H_0^2} + K(1+z)^2 = \Omega_0(1+z)^3 + \Omega_\Lambda, \quad (1)$$

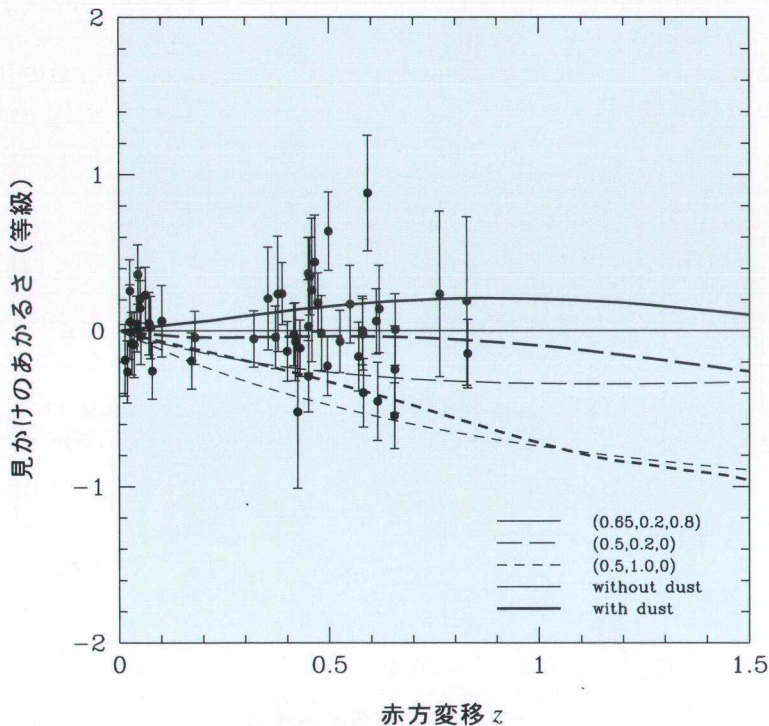


図2：赤方変移と見かけの明るさの関係図（ハッブル図）。横軸に超新星の赤方変移，縦軸に超新星の見かけの明るさの等級を書いている。ただし，縦軸は，ダストの影響無しで，「宇宙定数入りの平坦な宇宙」($\Omega_0, \Omega_\Lambda = (0.2, 0.8)$)の場合に期待される等級をゼロとして，そこからの差をプロットしている。データは，Supernova Cosmology Project³⁾からのもの。細い線はダストの影響がない場合の期待される明るさで，実線，長鎖線，短鎖線の順に，「宇宙定数入りの平坦な宇宙」($\Omega_0, \Omega_\Lambda = (0.2, 0.8)$)，「開いた低密度宇宙」(0.2, 0.0)，「物質で閉じた宇宙」(1, 0)である。太い線も同様だが，超新星の母銀河のダストの影響を考慮した場合⁵⁾である。

である。ここで H はある時点でのハッブル定数， $\Omega_0 = 8\pi G\rho / (3H_0^2) = \rho/\rho_c$ は密度パラメータと呼ばれ，現在の宇宙の物質密度の，臨界密度 $\rho_c = 3H_0^2 / (8\pi G)$ に対する比である。この項への，我々の知っている通常物質つまりバリオンからの寄与はたかだか数%とされ，大半は未知の暗黒物質に占められていると考えられている。 Ω_Λ は宇宙定数による項で，前述のように物理的には真空のエネルギーと解釈される。曲率 $K = \Omega_0 + \Omega_\Lambda - 1$ が正，ゼロ，負だとそれぞれ，閉じた宇宙，平坦な宇宙，開いた宇宙ということになる。赤方変移 z は， $(1+z)^{-1}$ がその時点の宇宙の大きさ（現在を1とする）を与え，ハッブル定数との関係は $H = -$

$\dot{z}/(1+z)$ である。

3つのパラメータ， $H_0, \Omega_0, \Omega_\Lambda$ が与えられれば，この方程式から宇宙の膨張則が決まり，宇宙年齢も決まる。図1に，宇宙年齢がこうしたパラメータにどのように依存するかを示した。前述したように，基本的には H_0 の逆数で決まっている。宇宙の曲率が，宇宙定数無しの開いた宇宙，もしくは， $\Omega_0 + \Omega_\Lambda = 1$ で平坦な宇宙の場合について，密度パラメータ Ω_0 の関数で宇宙年齢を描いている。宇宙に物質が多いほど，宇宙膨張の減速度が大きい。従って，現在の膨張速度，つまりハッブル定数を固定すれば，密度パラメータが大きくなると過去はそれだけ宇宙膨張が速かったことになり，結果

として宇宙年齢は小さくなる。一方、宇宙定数は物理的には斥力の効果があり、宇宙定数が大きいほど加速度を与えるので密度パラメータとは逆に Ω_Λ が大きいほど宇宙年齢は大きくなる。

3. Ia 型超新星による宇宙論パラメータ決定

現在、Ia 型超新星による宇宙論パラメータ決定は、supernova cosmology project³⁾ と high-z supernova search⁴⁾ という二つのグループによってリードされている。どちらも、 $z \sim 0.5-1$ 程度の Ia 型超新星を数十個発見して解析している。原理は、種々ある宇宙論パラメータ決定法の中でも最も単純明快といっていいただろう。「標準光源」であることを認めれば、赤方変移と見かけの明るさの関係は宇宙論パラメータ、 H_0 、 Ω_0 、 Ω_Λ のみで決まる。特に、 $z \ll 1$ の近傍では、ハッブル定数のみで決まる。歴史的には、近傍の超新星からハッブル定数を決定するという試みが永く行われていた。しかし、この場合は、標準光源の絶対的明るさを正確に決めねばならず、その点に不定性が残る。現在では、ハッブル定数に関しては、セファイド型変光星を用いた決定に比べ精度が落ちると考えられており、あまり精力的には行われていない。

しかし、セファイドに比べ明るい超新星は、より高赤方変移まで観測可能なのが魅力である。しかも、絶対的明るさを知らずとも、「明るさが一定である」ということを認めれば、ハッブル定数は決まらずとも、密度パラメータと宇宙定数についてはデータから制限が得られる。近傍、あるいはユークリッド的な宇宙なら、距離は赤方変移に単純に比例するが、実際のビッグバン宇宙では宇宙膨張や幾何学的構造の影響で比例関係からずれていく。そのずれが、 Ω_0 と Ω_Λ によって決まっているのである。上記二つのプロジェクトの目的はまさにこの点にある。

図2は、超新星の赤方変移と、超新星の静止系での B バンドの見かけの明るさの関係を示している⁵⁾。

ただし、見かけの明るさは、 $(\Omega_0, \Omega_\Lambda) = (0.2, 0.8)$ の宇宙モデルの場合をゼロ等として、そこからのズレを示している。ハッブル定数の変化は、全体を上下するだけなので、ここでは自由パラメータとしている。データは Supernova cosmology project のものである。赤方変移 $z \sim 0.5-1$ の静止系で B バンドの明るさを測りたいので、実際の観測は R または I バンドで行われ、適当な K 補正が行われている。また、標準光源に近いとはいえ、実際には、0.5-1 等ぐらいのばらつきがある。このばらつきは、宇宙論パラメータ決定に深刻な影響を与える。しかし、超新星の光度曲線は絶対等級と相関があることがわかっており、それをもちいて補正を行うと、ばらつきを 0.1-0.2 等に押さえることができる。ここで示したデータはそうした補正が行われている。

まずは細線に注目して頂きたい。かなりばらつきはあるが、前述の、宇宙定数いりの平坦宇宙モデル、 $(\Omega_0, \Omega_\Lambda) = (0.2, 0.8)$ 、つまりゼロ等の線が全体的に合っているようだ。一方、長鎖線、短鎖線はそれぞれ (0.2, 0.0) (低密度の開いた宇宙)、(1, 0.0) (物質のみで閉じた宇宙) であり、データからはずれている。この結果をもとに、両グループとも、超新星のデータは宇宙定数の存在を強く示唆していると結論したのである。

この宇宙モデルを採用すれば、ハッブル定数を 70 km/s/Mpc として、宇宙年齢はおおよそ 150 億年ということになる。これは、最も古い球状星団の年齢より大きく、宇宙論的には矛盾しない。一方、物質で閉じた宇宙なら 9 億年で、球状星団との矛盾は避けられない。宇宙年齢の問題から言えば、この結果は好ましいものとも言える。

4. Ia 型超新星による宇宙モデル決定の問題点—ダストによる吸収

さて、宇宙定数の存在が事実だとすれば大変な歴史的発見なのだが、前述した通り、私はまだ問題があると考えている。幾つかの系統誤差が考えられるが、もっとも深刻なのはダストによる吸収で

ある。ダスト、つまり宇宙塵が途中にあると、光が吸収されて暗くなってしまうことは良く知られている。この点について、詳しく述べることにする。

まず、ダストの影響は上記の結果に影響を与えないとする両グループの主張を聴いてみよう。「我々の天の川銀河起源の吸収については、すでに知られているダスト吸収マップから補正されており、問題はない。一方、超新星の母銀河中のダスト吸収については、もしそれが影響を与えているのなら、吸収とともに赤くなるはずだ。しかし、近傍の超新星と高赤方変移の超新星のサンプルの間に、系統的な色の違いはみられない。だから、ダストの影響は考えにくい。」

ダスト吸収があれば、赤くなるのは事実だし、近傍の超新星と高赤方変移の超新星のサンプルの間に、系統的な色の違いはみられないのも事実である。しかし、だからといって上記の結果にダストの影響がない、と結論するには大きな飛躍があると私は考えている。色の違いがみられない、といっても、測定誤差があり、その誤差の範囲内で色の違いがない、というのが正しい言い方であろう。そして、問題は、その誤差の程度が、宇宙論パラメータの結果に影響を与えないほど小さければいいのだが、残念ながらとてもそうはいえない状況なのである。Supernova Cosmology Project の論文³⁾の図6をみて頂きたい。彼らの評価したダストによる赤化 $E(B-V)$ のヒストグラムが近傍と高赤方変移の両サンプルについて示されている。確かに、平均的な $E(B-V)$ に違いは認められない。しかし、 $E(B-V)$ のばらつきはゆうに0.2等を越えている。では、宇宙論パラメータに影響を与えるほど、ダストの吸収があった場合、どれくらいの $E(B-V)$ の違いが期待されるだろうか。「宇宙定数入りの宇宙」モデルと他のモデルにおける明るさの違いは、図2にあるように、「物質で閉じた宇宙」とで約0.5等、「低密度で開いた宇宙」となら0.2等である。Bバンドでこれくらいのダスト吸収がある場合、銀河系ダストなら、 $E(B-V)$ で0.1等もしくは

0.05等程度が期待される。ダストの影響がないことを証明するなら、この程度の色の変化も起きていないことを示さなければならない。さて、このような小さな変化が、論文³⁾の図6でチェックできていると言えるだろうか？是非、ご自分で確かめて頂きたい。

つまり、カラーの観測的不定性が大きく、宇宙論パラメータに影響をあたえるぐらいのダストの影響はチェックできていないというのが私の見解である。では、理論的に、高赤方変移の超新星のほうがより吸収を受けて暗くなっている（この場合、宇宙定数の効果に見えてしまう）ことが考えられるだろうか？実は、そうなのである。我々は簡単な銀河進化モデルを用いて、ダスト吸収量の進化を見積もり、高赤方変移の超新星の母銀河における吸収が、現在に比べてどう進化していくかを調べた⁵⁾。高赤方変移ほど、金属量は減り、ダストの総量も減ると思われるが、一方星間ガスも多いため、ガス中のダストは、実は現在より多くなることが示唆された。典型的なパラメータをもちいると、実際にダスト吸収が現在より0.2等ほど大きいことが予想されるのだ。これは、「宇宙定数入り」と「開いた宇宙」の明るさの違いに匹敵する。この効果を考慮した理論曲線が、太線で図2に描かれている。この場合は、「開いた宇宙」がデータに最も合う宇宙モデルになってしまう。

昨年2月、ロサンゼルスで暗黒物質と宇宙定数に関する国際会議があり、私は招待して頂き、以上の内容で批判を行った⁶⁾。当然のことながら、両グループと論争する羽目になった。英語力の面で難点もあったが、私が納得できる反論は彼らからは聞くことはできなかった。

では、どうすれば、宇宙モデルの影響なのか、ダストなのか、区別できるだろうか。二つほど挙げておこう。一つは、 $B-V$ の色ではなく、例えば、 $B-K$ などの近赤外線を観測も合わせれば、ダストによる赤化がより明確に検出できる。もう一つは、より高赤方変移の超新星を観測し、宇宙モデルと

ダスト進化のモデル予言の違いをみることだ。どちらの方面もデータが出始めている。特に最近、 $z = 1.7$ の超新星が見つかり、それは宇宙定数の存在を更に強めるものだと喧伝されている⁷⁾。その方向自体は結構だとは思っているのだが、しかし、そのようなデータはまだごく少数である。たかだか1つや2つの超新星でどんどん結論を出すという彼らのセンスは、私にはやや理解しがたい。図2をみてもわかるとうり、ひとつひとつの超新星のばらつきは、明らかに宇宙モデルの違いよりはるかに大きいのである。一つや二つでは何も言えないことは明白である。実際、最初に発見された7個の超新星からは、現在と全く逆の、「物質のみで閉じた宇宙」が良く合う、と堂々と結論されていた⁸⁾。その歴史が、少数の超新星で一喜一憂することの愚かさを教えてくれている。

5. まとめ

私自身の仕事と関連して、やや批判めいた記事になってしまった。しかし、Ia型超新星による宇宙論パラメータ決定は、単純さの魅力もあるが、現時点ではまだ問題もあることがご理解頂けたのではないかと考えている。

さて、宇宙年齢の話に戻ろう。前述したように、球状星団の年齢との整合性から言えば、「宇宙定数入りの宇宙」は、むしろ好ましい。また、超新星以外にも、様々な宇宙論的観測を考えると、この宇宙モデルが現在の所、多くの観測を説明できるベストなモデルということは動かしがたくなってきている。例えば、宇宙論パラメータを決めるうえで重要とされている、宇宙マイクロ波背景放射のゆらぎの解析からは、宇宙の曲率はゼロ、つまり、「低密度の開いた宇宙」ではなく、「宇宙定数入りの平坦な宇宙」か、「物質のみで閉じた宇宙」が要求されている⁹⁾。「物質のみで閉じた宇宙」は、理論的には最も美しく、自然なモデルでありながら、球状星団の年齢と矛盾するし、銀河や銀河団の数密

度なども含め、観測からは全く支持されていない。

一方、宇宙定数があるとすれば、理論的にはこれもまた悩ましい問題である。理論的にこの大問題に迫る試みが各方面で始まっているが、いまだその手がかりすら見えないというのが現状のようだ。これについては、他の解説に譲ることにする¹⁰⁾。

参考文献

1. 例えば, K Nomoto, et al., 1999, astro-ph/9907386
2. 伊藤直紀 2001, 天文月報, 94, 214
3. Perlmutter S. et al., 1999, ApJ, 517, 565
4. Riess A. et al., 1998, AJ, 116, 1009
5. Totani T., Kobayashi C., 1999, ApJ, 526, L65
6. Totani T., 2001, in proceedings of "Sources and Detection of Dark Matter and Dark Energy in the Universe", ed. Cline, D.B. (Springer) (astro-ph/0005393).
7. Riess A. et al., 2001, astro-ph/0104455, ApJ in press
8. Perlmutter S. et al., 1997, ApJ, 483, 565
9. de Bernardis P. et al., 2000, Nature, 404, 955
10. 例えば, Carroll, S.M. 2000, astro-ph/0004075

Cosmological Parameter Measurement by Type Ia Supernovae and the Age of the Universe

Tomonori TOTANI

Division of Theoretical Astrophysics, National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo 181-8588 Japan

Abstract: We can predict the age of the universe by the three fundamental cosmological parameters which determine the geometry and expansion rate of the universe: the Hubble constant, the density parameter, and the cosmological constant. A number of approaches have been taken in recent years to determine these parameters with remarkable progress. Here I review one of these approaches: type Ia supernovae, emphasizing its systematic problems and implications for the age of the universe.