

1. 序論

遠い銀河からの赤方偏移の、宇宙膨張としての一般相対性理論的な説明は、広く受け入れられている。しかし、この説明はいくつかの誤解を招いている。

宇宙膨張がビッグバンモデルの基礎とされてから、この誤解は根本的なものとなった。天体物理学者が著した有名なサイエンスブック、天体物理学の入門書や天文学の専門的な文献にも宇宙膨張に焦点をあてており、その中にも誤解が含まれている。

おそらく宇宙膨張に関しての最も多い誤解は、「後退速度は光速を超えられない」ということだろう。宇宙膨張の概念は宇宙論を理解する上でとても基本的であり、その誤解は多いためこれらの問題を明らかにすることが重要である。

2. 1 誤解：後退速度は光速を超えられない

まず1つ目の誤解とは、宇宙膨張速度は光速より速くならないということだ。

ハッブルの法則は、遠方 ($D > c/H$) での天上の後退を予測し、また、それは後退速度が光速に近づいてきた時に特殊相対性理論による修正を必要とした。しかし、広く受け入れられたのは、特殊相対性理論ではなく一般相対性理論のほうで、一般相対性理論は宇宙観測について説明するのに無くてはならないものとなった。観測されたものが一般相対性理論を使って計算されたとき、すぐに観測的矛盾が生じる。銀河は我々から後退しており、天上は局部的には動かず（このときの特有の速度 $V_{pec} = 0$ ）、運動は特殊相対性理論によって説明される。それらは決して光子に追いつくことはない ($V_{pec} = c$)。それどころか、銀河と光子は共に我々から光速よりも速い速度で後退している。

特殊相対性理論では、速度は赤方偏移から直接的に生じる。それは、1929年ハッブルによって銀河の赤方偏移の変化から導かれたもので、彼は速度に没頭して観測を続け、宇宙膨張を予測した。宇宙膨張の一般相対性理論による説明は、速度の証拠としての宇宙論的赤方偏移を説明している。しかし、速度は宇宙空間じゅうの運動ではなく、宇宙空間の膨張速度である。したがって、特殊相対性理論のドップラーの法則で計算することができない。そのため、H u b b l e と H u m a s o n の速度計算は高い赤方偏移での特殊相対性理論の修正では不十分だった。

一般相対性理論と特殊相対性理論の速度と宇宙論的赤方偏移の関係は、

$$\text{一般相対性理論} \quad V_{rec}(t, z) = c/R * R(t) * \int dz / H(z) \dots (1)$$

$$\text{特殊相対性理論} \quad V_{pec}(z) = c * \{(1+z)^2 - 1\} / \{(1+z)^2 + 1\} \dots (2)$$

これらの速度は、赤方偏移を正確に測定したものを z としている。

特殊相対性理論が間違っって宇宙論的赤方偏移を説明しているにも関わらず、宇宙論的赤方偏移を速度に転換して長年使われてきた。図 1 は、特殊相対性理論の速度と赤方偏移の関連だけでなく、一般相対性理論の速度と赤方偏移の関連の概略を表す。後退速度はすべての宇宙モデルで光速を超えており、赤方偏移もおよそ 1.5 を超えたあたりからばらつきが出ている。高い赤方偏移では特殊相対性理論の「修正」はより間違っている (図 2)。

いくつかあるもので、最たる誤解は、相対性理論の適用で、光速よりも速く後退できるものは何もないという誤解から生じる。

遠方の銀河の速度が観測できる基準にあるにも関わらず、観測者は適切な距離を正確に測定することを必要とする。それは現実的ではない。その代わりに、一般に観測に使われる赤方偏移のように直接観測できるものが使われ、宇宙論的赤方偏移の特殊相対性理論による解釈を除外している。

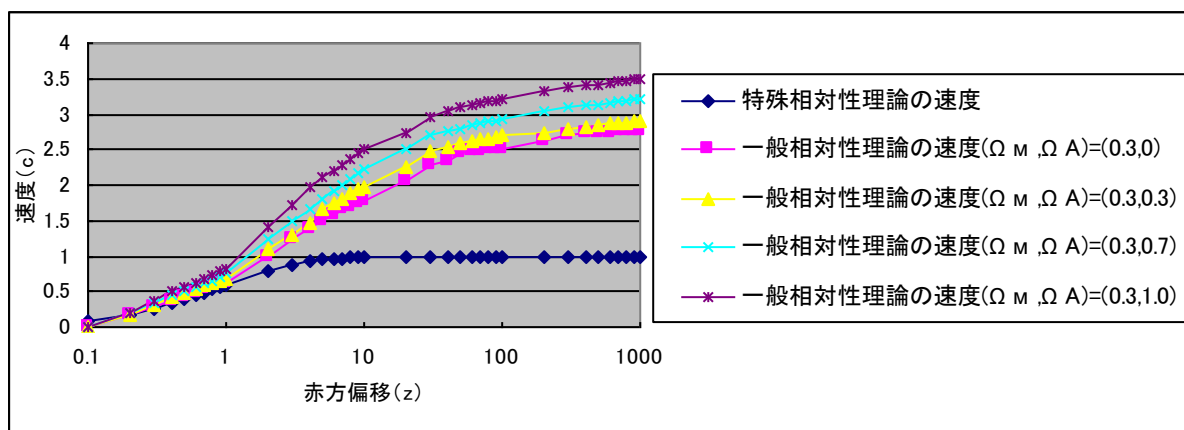


図 1. 赤方偏移の関数としての速度は様々な前提の下にある。特殊相対性理論は (2) 式を使って計算しているが、一般相対性理論は (1) 式を使っており、4 本の曲線はフリードマンモデルの範囲を示している。これらは宇宙モデルの $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.7)$ の観測的裏づけも含んでいる。おおむね $z \geq 1.5$ の銀河の後退速度はすべての宇宙モデルで光速を超えている。

2. 2 誤解：銀河の後退速度は光速を超えているが、それを見ることはできない。

後退速度が光速を超えることができると認めたとしよう。その主張は、観測できない、光速よりも速い後退速度のものから構築される。我々が見たことがある、我々の方に伝わる光子の速度は一定ではなく、むしろ $V_{rec} - c$ である。したがって、ハッブル球体を超えた光はトータル速度を持ち、我々から離れて行く。では、我々はどうすればこの光を見ることができるだろうか？光子もハッブル球体の領域にあり、我々から後退はするにも関わらず、ハッブル球体もまた後退するのだ。減速する宇宙では、 H はだんだん減少する (ハッブル球体の後退の原因となる)。加速する宇宙でも H は減少に向かう。ハッブル球体が光子よりも速く後退する ($D_H > V_{rec} - c$) 間、

光子は地球周辺の領域に入り、我々に近付くことになる。このように、ハッブル球体に近い光子はゆっくり後退しており、より速く後退するハッブル球体に追い越される。

このように、これらのトータル速度は我々から離れている。ただし、ハッブル球体がこれらの光子を通り過ぎて膨張した場合、我々に接近する。したがって、それらが光子を放ち、我々がそれを見たとき、それらは後退している。

観測から裏付けられた $(\Omega_M, \Omega_A) = (0.3, 0.7)$ を (1) 式に入れ、数値を出せば、赤方偏移が $z = 1.46$ 以上のすべての銀河で光速より速く後退している。現在、 $z > 1.46$ の何百という銀河が観測されている。したがって、我々は今まで通りに、光速以上の速さで後退する物体を観測することができる。

3. Ia型超新星の光度と赤方偏移の関係

特殊相対性理論的説明を排除できる、一般相対性理論的説明の観測的証拠は、光度と赤方偏移の関係の曲線だ。Ia型超新星は、現在観測に使われているスタンダードなもので、光度と赤方偏移の関係と一致する。超新星の光度と赤方偏移データの解析をしたところ、それは強く宇宙論的赤方偏移の特殊相対性理論的説明を排除している (図2)。

図2は、Ia型超新星に付随して起こる、それぞれの一般相対性理論モデルの理論上の曲線を表している。

特殊相対性理論を使って宇宙論的赤方偏移を説明することに反対する、最も強い論拠は、このような特徴ある観測結果を、特殊相対性理論を使って説明することは難しいということだ。

$V = HD$ とし、 $D(z)$ を計算すると、

(2) 式から、

$$D(z) = c/H \cdot (1+z)^2 - 1 / (1+z)^2 + 1 \dots (3)$$

となる。

特殊相対性理論の筋書きでは、すべての赤方偏移が起こったとき、 V は放射の時で計算されるべきだ。しかし、特殊相対性理論は宇宙膨張の計算に組み入れる手法を持っておらず、ハッブル定数のように、最も良いのは後退速度をおよそ同じ時に放射されたものとして考えることである。

特殊相対性理論は、この一般相対性理論的 Λ -CDM モデル $(\Omega_M, \Omega_A) = (0.3, 0.7)$ での 2.3σ という観測結果を達成することができない。また、 $V = cz$ としての結果も含んでいる。この観測結果の曲線と一般相対性理論の曲線は特殊相対性理論のものよりもより近い。それにも関わらず、 Λ -CDM と一致する結果の曲線は 1.2σ のままである。

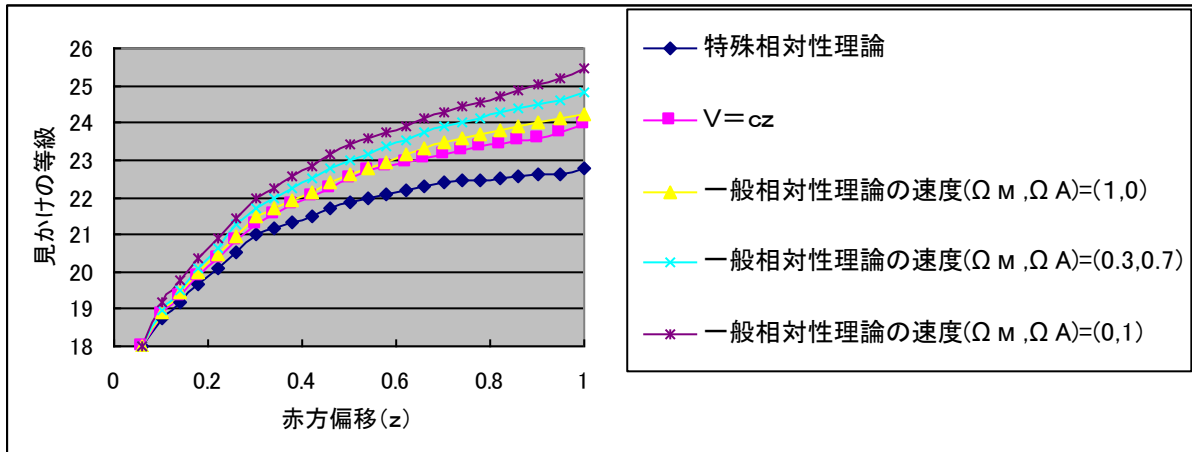


図2. 様々なモデルの光度と赤方偏移の関係。特殊相対性理論の予測は、曲線 $V = cz$ との関係があるとみなしている。特殊相対性理論のドップラー効果による宇宙論的赤方偏移の説明は、 Λ -CDMと一致するモデルと比べると 2.3σ 以上で排除される。曲線 $V = cz$ のモデルは、特殊相対性理論よりも、より接近しているが、 1.2σ では依然として排除される。

4. 結論

ここまで宇宙膨張の誤解を明らかにしてきた。天上の後退はすべての宇宙膨張モデルの特徴である。また、それは一様性・等方性をもつため、ハッブルの法則に従う。そしてそれは特殊相対性理論に矛盾しない。

多くの観測的証拠は一般相対論的ビッグバンモデルを立証している。超新星からの、光度-赤方偏移のデータから、およそ 2.3σ での宇宙論的赤方偏移の特殊相対性理論的説明が不可能であることがわかった。同時にこの観測は宇宙論的赤方偏移の一般相対性理論的説明の強い証拠となった。

宇宙膨張の一般相対性理論的説明は観測からも支持を得ており、またそれは $V_{rec} > C$ といった制限を必要としない。

5. 参考文献

「相対論的宇宙論」, 佐藤 文隆・松田 卓也, 講談社, 1974

「宇宙の終焉」, 杉本 大一郎, 講談社, 1978

「宇宙その始まりから終わりへ」, 杉山 直, 朝日新聞社, 2003

「膨張宇宙とビッグバンの物理」, 杉山 直, 岩波書店, 2001

Expanding Confusion: common misconceptions of cosmological horizons and the superluminal expansion of the universe, Tamara M. Davis Charles H. Lineweaver, PASA, **21** p97-109, 2004