



宇宙項最前線

坂井伸之

〈京都大学基礎物理学研究所 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail:sakai@yukawa.kyoto-u.ac.jp

宇宙項は、アインシュタインが定常宇宙を実現するために導入し、ハッブルの宇宙膨張の発見によって1度は破棄されたものである。しかし、ここ数年の様々な観測結果は、宇宙項がゼロでなく正の値であること示唆している。そして、その不自然に小さい値を説明せよという難題が、理論家に突きつけられている。観測結果からどのように宇宙項の存在を示唆されるのか、なぜ理論的困難があるといわれるのか、観測および理論の現状を概観する。

1. 宇宙項は存在するか？

— 観測の現状

この10年間、宇宙項の存在する可能性は、銀河の個数密度と明るさの関係、宇宙年齢とハッブルパラメータの関係など、様々な観測結果から指摘されてきた。しかし、それらの観測は大きな系統的・統計的誤差を含み、多くの研究者を納得させるに至らなかった。しかし、昨年には、遠方の超新星が高精度で観測され宇宙の加速膨張が示された、という衝撃的な観測結果が報告された。ここでは、その結果を含め宇宙項にかかわる様々な観測結果を概観する。

なお、宇宙項とは、場の理論で現れる真空のエネルギーと等価であるが、それを実験室で測る手段はない。真空のエネルギーの値が意味をもつ相互作用は重力だけであり、重力相互作用が主役となる物理現象は天体現象または宇宙自身の力学的発展だけである。現在のところ、宇宙が物質と宇宙項の2成分系であるという仮定の下に、宇宙の幾何学や膨張則を通じて制限がつけられている。

単位系と記号について： $c = \hbar = 1$ の自然単位系を用いる。ハッブルパラメータを $H_0 = 100 h \text{ km / sec / Mpc}$ 、減速パラメータを q_0 とする。現在における物質密度を ρ_m 、宇宙項を $\Lambda = 8 \pi G \rho_\Lambda$ 、臨界密度

を $\rho_\Lambda \equiv 3H_0^2 / 8\pi G = 2 \times 10^{-29} h^2 \text{ g / cm}^3$ とし、無次元パラメータを $\Omega_m \equiv \rho_m / \rho_\Lambda$ 、 $\Omega_\Lambda \equiv \rho_\Lambda / \rho_\Lambda$ 、 $\Omega_{tot} \equiv \Omega_m + \Omega_\Lambda$ と定義する。

1.1 遠方の天体による宇宙の幾何学テスト

天文学でしばしば用いられる光度距離とは、絶対光度 L と見かけの光度 l から $d_L \equiv \sqrt{L/4\pi l}$ と定義されるものであるが、赤方偏移 z で展開すると、

$$d_L = \frac{1}{H_0} \left\{ z + \frac{1}{2}(1 - q_0)z^2 + \dots \right\}$$

と表される。ここで、 z の1次だけをとった式がハッブルの法則を表し、その関係から H_0 が決定される。2次以上の項は宇宙の幾何学的性質を反映し、 z の大きい天体について精度よい観測データが得られれば、それらの係数を決めることができる。

1998年に最も注目を集めた成果であるIa型超新星の観測とは、そのような幾何学テストのひとつである。Ia型超新星は、きわめて明るいことに加えてその光学的性質がよく研究されており、標準光源として最も適している。超新星爆発の起こる頻度は典型的な銀河内で約300年に1回と非常に小さく、その観測は容易ではないが、アメリカとオーストラリアの2つのグループは独立に、ハッブル宇宙望遠鏡やケック望遠鏡など多くの望遠鏡を駆使

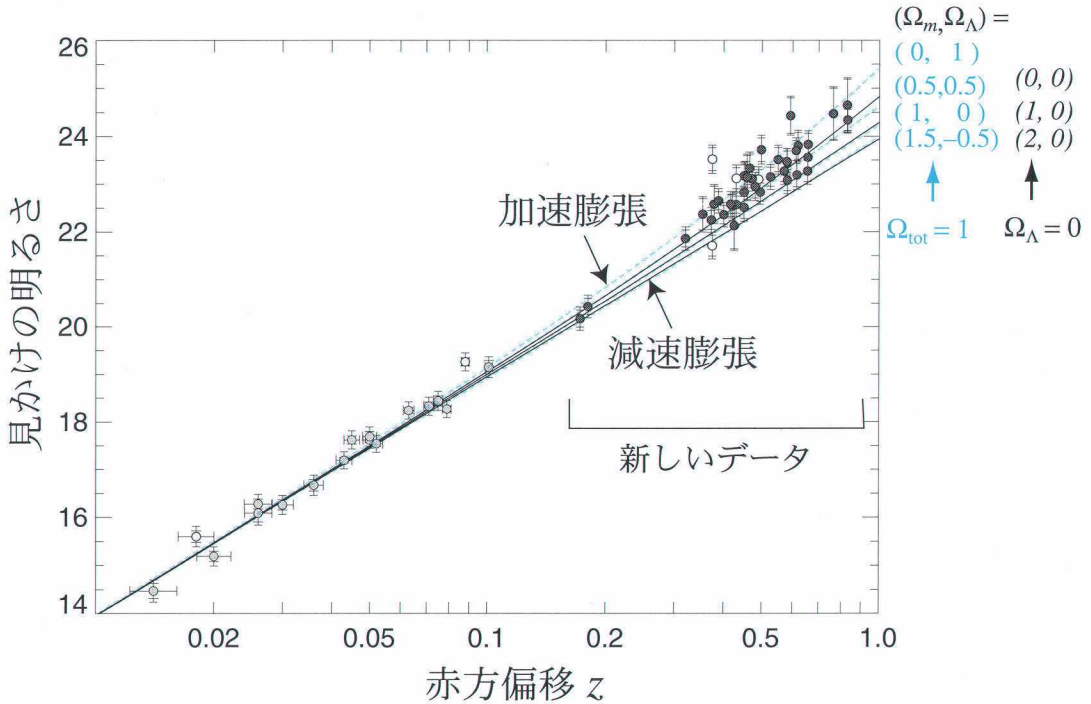


図1：Ia型超新星の見かけの等級と赤方偏移の関係¹⁾。 $z > 0.18$ の42個のデータがパールマターらの観測で新しく得られたものであり、宇宙項の存在を示唆する。わずかな値の違いから宇宙モデルを決定するため、高精度の観測が要求される。

して数年間観測を行った。そして、前者のグループは、 $z = 0.18 \sim 0.83$ の42個の超新星のデータから宇宙膨張が加速的 ($q_0 < 0$) であると発表した¹⁾。宇宙パラメータについては $0.8\Omega_m - 0.6\Omega_\Lambda = -0.2 \pm 0.1$ という制限が与えられ、正の宇宙項の存在が示されたのである (図1)。特に、平坦な宇宙 ($\Omega_{\text{tot}} = 1$) を仮定すると $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ になる。後者のグループも、 $z = 0.16 \sim 0.62$ の超新星16個および近傍の超新星34個のデータに基づき、ほぼ同じ結果を得ている²⁾。

宇宙項が存在するという結論は、要するに、遠方の超新星が $\Omega_\Lambda = 0$ のときに比べてより暗く見えるという観測事実の帰結である。これに対し、宇宙項がなくても観測結果を説明できるという反論もある。例えば、遠方 (過去) の超新星と近く (現在) の超新星、宇宙環境の違いにより性質が異

なるという可能性も否定はできない。また、銀河間ダストが予想以上に多ければ、遠方の超新星がより一層暗くなる³⁾。このような批判に答えるためにも、より遠い超新星を含めた観測データを大幅に増やす必要があるだろう。

このほかの幾何学テストとしてよく用いられるのが、重力レンズ効果を利用する方法である。遠方にあるクェーサーは、我々との間にある銀河の重力レンズ効果により多重像として観測されることがあるが、この現象の起こる確率が宇宙項に強く依存し、宇宙項が大きいほど頻度が高くなる。これまでに宇宙項の存在に否定的な議論もあったが、最近の千葉らの解析からは、超新星の観測と整合的な結果が得られている⁴⁾。



1.2 宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎ

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 揺らぎから、宇宙モデルに関する情報が得られることが示されている³⁾。通常、温度揺らぎを様々な角度スケール θ に分解し、各成分の 2 乗平均としてパワースペクトルを定義する。インフレーション期につくられた様々なスケールの揺らぎは、放射優勢期および物質優勢期では、小さいスケールの揺らぎから順に音地平線 (= (音速) \times (宇宙年齢)) に入り、放射圧により振動を始める。その結果、温度揺らぎパワースペクトルの最大振幅は晴れ上がりの時刻の音地平線スケールになり、 $\theta \approx \sqrt{\Omega_{\text{tot}}}$ [deg.] の角度成分が振幅最大となる。ここで、振幅最大の角度スケールが Ω_{tot} に依存するのは、一定の揺らぎの長さを見込む角度が宇宙の幾何学的性質によって変わるためである。したがって、これも幾何学テストのひとつである。

COBE 衛星の分解能は 7 度程度であり、パワースペクトルのピークの位置を測定することはできないが、地上観測や気球を使った様々な観測によって、小角度スケールの揺らぎが測定されている。これまでの観測結果はまだ大きな誤差を含んでいるものの、ピークの位置が $\theta \approx 1$ [deg.] にあることを示し、平坦な宇宙を含む $\Omega_{\text{tot}} > 0.3$ の宇宙を示唆している。 Ω_{tot} が 1 またはそれに近いことが確かになれば、以下に述べる物質密度への制限 ($\Omega_m \approx 0.3$) と併せ、宇宙項の存在を示すことになる。

1.3 ハッブルパラメータと宇宙年齢

ハッブルパラメータ H_0 と宇宙年齢 t_0 の積は、 Ω_m と Ω_Λ の関数で与えられる。つまり、一般に $H_0 t_0 = f(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$ と書け、例えば $f(1,0) = 2/3, f(0,0) = 1$ となる。したがって、 H_0 と t_0 の観測値から Ω_m と Ω_Λ を関係づけることができるのである。

ハッブルパラメータについては、セファイド型変光星や超新星の観測からハッブルの法則によって決定するのが標準的な方法である。一方、宇宙年

齢の下限は主に球状星団の年齢によって与えられる。数年前 (1994 年頃)、 $H_0 \approx 80 \text{ km/sec/Mpc}$, $t_0 > 15 \text{ Gyr}$ という値が報告され、 $H_0 t_0 > 1$ となるので正の宇宙項がなければならぬ、といわれたことがあった。(100 km/sec/Mpc \approx (10 Gyr)⁻¹ という換算を覚えておくと、この議論に便利である。)

しかし、ヒッパルコス衛星による観測で大マゼラン雲までの距離が修正されたことにより⁶⁾、 $H_0 = 60 \sim 80 \text{ km/sec/Mpc}$ ⁷⁾、 $t_0 = 11 \sim 15 \text{ Gyr}$ ⁸⁾ という範囲に修正され、制限は $H_0 t_0 > 2/3$ とやや緩和されている。つまり、低密度 ($\Omega_m < 1$) 宇宙であれば、 H_0 と t_0 だけから宇宙項は必ずしも必要とされなくなっている。

1.4 物質の質量密度

H_0 と t_0 の関係のほかにも、以下の観測結果から、物質が低密度 ($\Omega_m = 0.2 \sim 0.3$) であることが示唆されている⁹⁾。

- ・ビリアル定理による銀河団質量の推定。
- ・銀河団のバリオン-物質比 Ω_b / Ω_m と、ビッグバン元素合成から決まる Ω_b 。
- ・銀河団の数密度の進化 (z 依存性)。
- ・局所銀河群の運動 (特異速度)。
- ・大規模構造のパワースペクトル。宇宙項 ($\Omega_\Lambda \approx 0.7$) の存在も示唆されている。

物質密度が $\Omega_m \approx 0.3$ と小さいことは、宇宙項の有無とは独立に決まる観測結果である。しかし、インフレーション理論が平坦な宇宙 ($\Omega_{\text{tot}} = 1$) を予言すること、CMB の揺らぎもそれを支持する結果を出し始めていることを併せると、正の宇宙項が存在する間接的証拠となる。

2. 真空のエネルギーと宇宙項

アインシュタインの宇宙項 $\Lambda g_{\mu\nu}$ にはもともと物理的意味はなく、余分な項として導入されたものであったが、後に、場の量子論における真空のエネルギーと等価であることが指摘され、物理量として議論されるようになった。

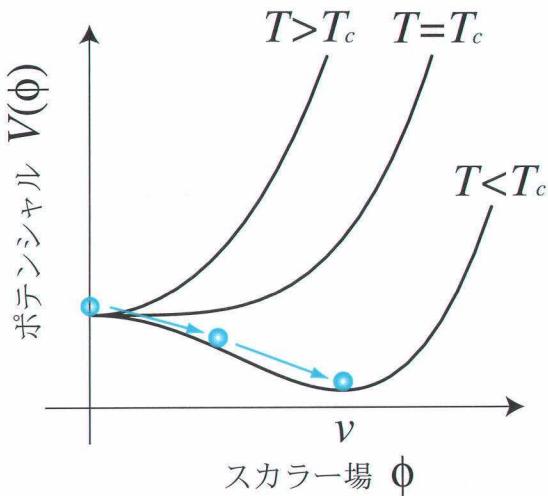


図2：相転移による自発的対称性の破れ。ポテンシャルエネルギー $V(\phi)$ は宇宙項として働く。

2.1 零点振動エネルギーと宇宙項

場の量子論における真空の零点振動エネルギーと宇宙項の関係を最初に論じたのは、ゼルドビッチである¹⁰⁾。場の理論の教科書の初めに書かれているように、質量 m のスカラー粒子を量子化すると、波数 k のモードはエネルギー $(1/2)\sqrt{k^2 + m^2}$ をもつ調和振動子として記述される。彼は、この零点エネルギーが宇宙項 $T_{\mu\nu} = -\rho_\Lambda g_{\mu\nu}$ として寄与することを示したのである。

しかしながら、すべてのモードの和として求められるスカラー場のエネルギー ρ_Λ は、短波長側 ($k \rightarrow \infty$) の寄与により発散してしまう。しかも、量子重力の効果が重要になるプランク長以下の波長のモードを除いても、プランク密度 $\rho_{\text{Pl}} \sim (10^{19}\text{GeV})^4$ 程度になる。これは、現在の臨界密度 $\rho_{\text{cr}} \equiv 3H_0^2/8\pi G = (4.7\text{meV})^4 h^2$ より122桁も大きい値である。

2.2 真空の相転移と宇宙項

ワインバーグ-サラム (WS) 理論によると、弱い力と電磁力はもともとひとつの相互作用であり、真空の相転移によって2つに分岐したと考えられ

る。WS理論では、ヒッグス場のポテンシャルが臨界温度 T_c 付近で特徴を変えると仮定され、宇宙膨張によって宇宙の温度が $T < T_c$ になると、基底状態が $\phi = 0$ から $|\phi| = v$ に移動する (図2)。これによって真空の対称性が自発的に破れ、力が分岐するのである。これをWS相転移と呼び、温度 $T_{\text{WS}} \sim 100\text{ GeV}$ で起こると考えられる。さらにこの考え方を拡張して、自然界の4つの相互作用がもともと1つだったとすれば、強い相互作用が分岐されるGUTスケール ($T_{\text{GUT}} \sim 10^{15}\text{ GeV}$) および重力が分岐されるプランクスケール ($T_{\text{Pl}} \sim 10^{19}\text{ GeV}$) においても、相転移があったことになる。どのスケールのポテンシャルエネルギーも $T_{\mu\nu} = -V(\phi)g_{\mu\nu}$ と表され、まさに宇宙項として働くのである。したがって、種々の相転移の結果として現在の基底状態がちょうど $V=0$ になっていない限り、ポテンシャルエネルギーは宇宙項として寄与する。

相転移後のポテンシャル極小値は、相転移の起こるエネルギースケールでオーダーが決まると考えられる。すると、重力を含む4力が統一されていたプランクスケールでは $\rho_{\text{Pl}} \sim (10^{19}\text{ GeV})^4$ 、WS相転移のスケールでも $\rho_{\text{WS}} \sim (10^2\text{ GeV})^4$ となる。したがって、現在の宇宙項をプランクエネルギースケールと比較すると $\rho_\Lambda / \rho_{\text{Pl}} \sim 10^{-122}$ 、WSエネルギースケールとの比較でも $\rho_{\text{WS}} / \rho_{\text{Pl}} \sim 10^{-54}$ となり、きわめて小さい値が要求されるのである。

このように、真空の零点振動エネルギーにしるポテンシャルエネルギーにしる、宇宙項の「存在」は自然な帰結であり、問題はその「小ささ」である。そのため、1980年代には宇宙項を厳密にゼロにする様々なメカニズムが提案された (例えばコールマンのワームホール機構¹¹⁾)。しかし、ゼロではなくきわめて小さい値が残るとすれば、理論的には一層深刻な問題となる。



2.3 インフレーションと宇宙の平坦性

宇宙項が素粒子論的なスケールに比べて 100 桁以上小さいことは大問題だが、本来独立な量である物質密度 ρ_m や臨界密度 $\rho_{cr} \equiv 3H_0 / 8\pi G$ と同じオーダーであることは、さらに不思議なことである。歴史的に見ると、宇宙項とは別に物質密度 ρ_m が臨界密度が同程度になること ($\rho_m \sim \rho_{cr}$) は大きな謎であり、平坦性問題と呼ばれていた。

この問題を解決したのがインフレーション理論である。それは過去の宇宙で真空のエネルギーが支配的になった時期に、混沌とした非一様宇宙が急激な加速膨張によって一様化され、量子揺らぎによって構造形成の種が作られるという理論である。この急激な宇宙膨張によって空間曲率はゼロになり宇宙項がなければ $\rho_m = \rho_{cr}$ が実現される。一方、宇宙項がゼロでない場合は $\rho_m + \rho_\Lambda = \rho_{cr}$ となり、 $\rho_m \approx \rho_{cr}$ または $\rho_\Lambda \approx \rho_{cr}$ とはいえるが、なぜ $\rho_m \sim \rho_\Lambda$ かという問題が残る。

宇宙項問題は、インフレーション理論と大きなかわりがある。まず、インフレーションは、巨大な宇宙項が宇宙膨張を支配した時代があったことを意味する。ひとつの素粒子モデルから両方が説明されるかどうかは別にしても、物理的に何らかの関係がありそうである。

また、平坦な宇宙 ($\Omega_{tot} = 1$) の予言は、別の意味で宇宙項の議論に影響を与える。それは、低物質密度 ($\Omega_m \approx 0.3$) の観測事実と併せると、宇宙項が存在するかインフレーション理論が破綻するかという帰結になるからである。しかし、インフレーションモデルの研究により状況は変化した¹²⁾。オープンインフレーションモデルとは、真空の相転移で泡が形成された後、泡の中で第 2 のインフレーションが起こるというものであるが、第 2 のインフレーションの期間を適切に選ぶと、負曲率 ($\Omega_m \sim 0.1$) の宇宙が実現されるのである。このモデルはパラメータの微調整を新たに要請するという批判もあるが、CMB 揺らぎの観測から曲率 Ω_{tot} が求

められようとしており、やがて観測的に決着がつくだろう。

ところで、これまではアインシュタインの導入した宇宙項の形を前提に話を進めてきた。しかしながら、スケール因子 $a(t)$ の発展方程式 (アインシュタイン方程式)

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{\pi G}{3} a(\rho + 3P)$$

が示すように、加速膨張を実現させるためには状態方程式が $P < -\rho/3$ を満たす流体があればよく、正体が不明である以上宇宙項 ($P = -\rho$ の流体) にこだわる理由はない。謎のエネルギーを宇宙項 (宇宙定数) に限定せず、様々な可能性を考えておくことが重要であろう¹³⁾。ただし、以下では定数でない場合も含めて「宇宙項」と呼ぶことにする。

3. 宇宙項の値は偶然か必然か？

ここで、宇宙項について何が問題になっているかを整理しよう。

1. エネルギー密度にすると $\rho_\Lambda \sim \rho_{cr} \sim (4 \text{ meV})^4$ となるが、これは現在の素粒子理論で現れるスケールに比べてずっと小さい。
2. バリオンや物質全体の質量密度が $\rho_b, \rho_m \propto a^{-3}$ と減衰するのに対し、宇宙項に相当するエネルギー密度 ρ_Λ は一定である。それが、現在の時刻でたまたま

$$\rho_b \sim \rho_m \sim \rho_\Lambda \sim \rho_{cr}$$

となっているのは、きわめて不思議なことである。

むしろ、 $\rho_\Lambda \sim (4 \text{ meV})^4$ のオーダーを導く素粒子モデルが明らかになり、上記 2 の一致も偶然だったという可能性も否定はできないが、ここでは偶然性によらずに宇宙項の値を説明しようとする試みを紹介する。

3.1 減衰する宇宙項モデル

なぜ宇宙項がきわめて小さいかという問いに對するひとつの考え方は、宇宙項はかつて大きかつ

たが時間的に減衰して現在に至っているというものである。このことを最初に議論したのはドルゴフで、次のようなモデルを提案した¹⁴⁾。曲率 R と非最小結合するスカラー場（運動方程式は $\square\phi + \xi R\phi^2 = 0$ ）を仮定すると、宇宙項は実質的に $\Lambda_{\text{eff}} = \Lambda / (1 - 8\pi G\xi\phi^2)$ のように寄与し、 $\xi < 0$ であれば必ず減衰する。しかしながら、このモデルでは重力定数も著しく変化し、観測と矛盾してしまうことも指摘された。

その後、藤井らは、やや複雑な非最小結合項をもつスカラー場を仮定し、インフレーションを起こした後に減衰する宇宙項になるモデルを提案した¹⁵⁾。時空計量に共形変換を施してアインシュタイン系で見ると有効ポテンシャルは図3のようになり、 $\phi \approx 0$ でインフレーションが起こった後ゆっくりと減衰する宇宙項が実現されるのである。また、ピープルスとラトラは初めから図3のようなポテンシャルを仮定し、やはりインフレーションと減衰する宇宙項の両方を説明するモデルを議論している¹⁶⁾。

ところで、インフレーションモデルには、インフレーションからビッグバン宇宙に移行する再加熱過程がなければならない。標準的なモデルではポテンシャルが図2のような極小値をもち、そのまわりで場が振動する過程によって、真空のエネルギーが物質に転嫁すると考えられている。一方、図3のポテンシャルには極小値がなく、通常のシナリオでは再加熱は起こらない。この問題に対し、スカラー場の振動がなくても瞬時に再加熱が起こるモデルが議論されている¹⁷⁾。

最近、「第5元素 (quintessence)」という用語がよく用いられるようになったが、これは以前から論じられている減衰する宇宙項モデルにはかならない。基本的には、様々な観測結果と整合的なモデルを構築しようとする、現象論的な試みである。

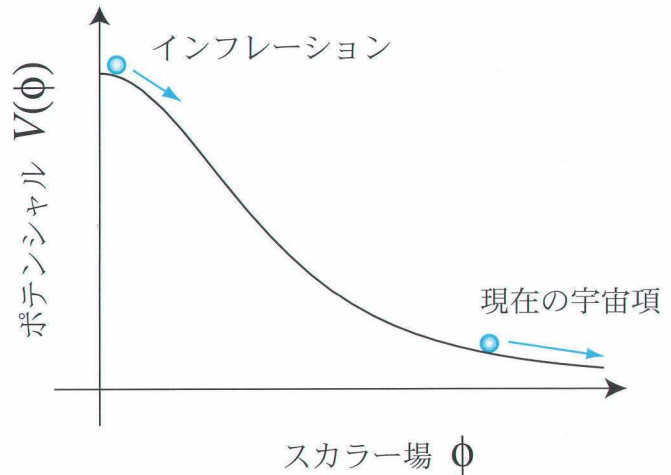


図3：減衰する宇宙項モデル。藤井・西岡のポテンシャル $V = \Lambda(1 + \xi\phi^2)^{-2}$ ¹⁵⁾を描いた。

興味深い結果のひとつは、 $V(\phi) = M^{4+\alpha}/\phi^\alpha$ や $V(\phi) = M^4[\exp(m_{\text{pl}}/\phi) - 1]$ などのモデルでは、 ϕ の漸近的な振る舞いが初期条件に依らずに収束的になることである（図4）¹⁸⁾。彼等はこれを「追跡解 (tracking solution)」と呼び、現在の値が実現するために初期条件の微調整が不要であるから、現在の値は「偶然」ではないと主張する。しかし、これは偶然性の問題を解決したことにはならない。初期条件の微調整が不要としても、パラメータ M をあらかじめちょうどよく設定しなければならず、微調整すべきパラメータを置き換えただけである。

3.2 人間原理

ワインバーグやピレンキンのとる「人間原理」的な立場は、次のようなものである。量子的宇宙創生論によると、基本物理定数や宇宙パラメータの異なる宇宙が無数に存在する。その中で、適切な条件を満たす限られた宇宙だけに知的生命体が生まれる。したがって、我々の宇宙の基本物理定数は、知的生命体が生まれる条件からある程度決まるはずだ、という主張である。

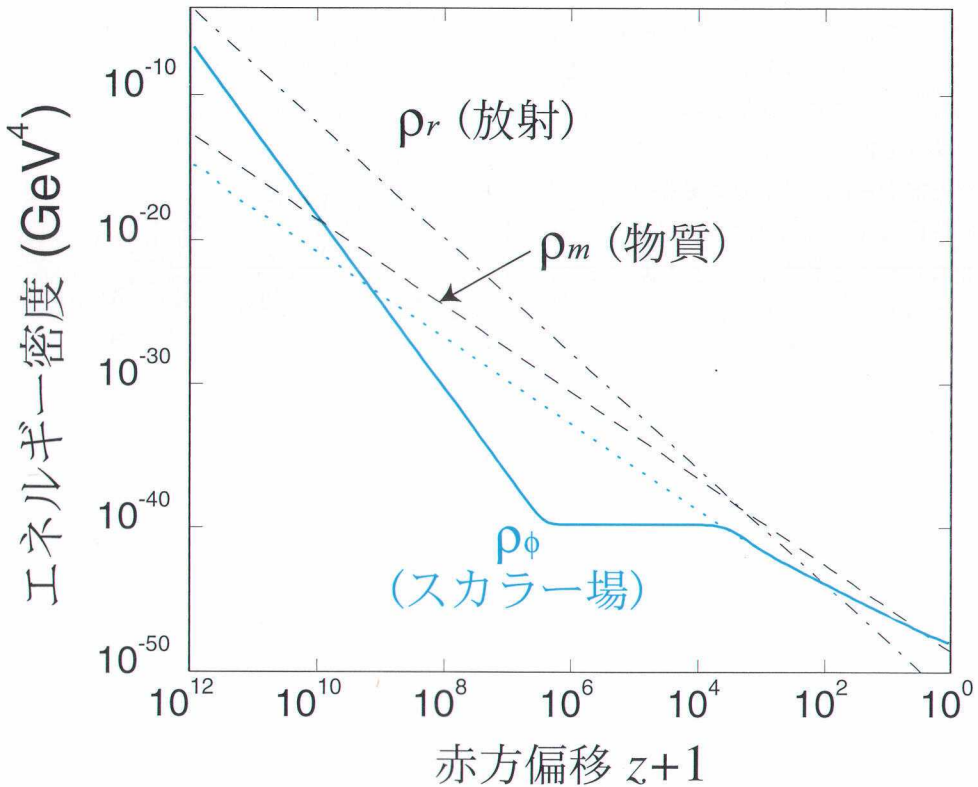


図4：「追跡解」の振る舞い¹⁸⁾。幅広い初期条件において、スカラー場のエネルギー密度 ρ_ϕ は点線の解に近づく。

ワインバーグはこの考え方にに基づき、密度揺らぎが重力的に成長して天体形成が起こるまでになる条件から、 $\rho_\Lambda < 100 \rho_m$ でなければならないことを示した¹⁹⁾。これは、あまりにも宇宙項が大きすぎると、宇宙膨張が速すぎて揺らぎが成長できないということである。ワインバーグらはさらに、 ρ_Λ の値に対する存在する知的生命体の数 (具体的には銀河数) の確率分布を計算した²⁰⁾。そして、 $\rho_\Lambda \sim \rho_m$ のところにピークをもつという結果を得た。ビレンキンらも、同様な考え方に基づく解析を独立に行い、ほぼ一致した結論を得ている²¹⁾。

この議論において、大きすぎる宇宙項が排除されることは理解できる。一方、ゼロまたは小さすぎる宇宙項は物理的に排除されるわけではなく、宇宙項がある程度あった方が形成される銀河の数が

多くなる、ということにすぎない。推論としての面白さはあるが、たくさんの宇宙に対する確率分布は観測的に検証しようがなく、説得力のある議論とはいえないだろう。

4. おわりに

様々な観測結果は、正の宇宙項の存在を指し示している。現段階で宇宙項は存在すると結論づけるのは早いかもしれないが、今後数年間の観測からはっきりするだろう。まず、超新星のデータは確実に増加し、より遠くのものも観測され、信頼性が向上すると期待される。さらに、CMB 揺らぎについては、1度以下の角度分解能をもつ観測衛星による全天観測計画が欧米で進行中であり、 Ω_{tot} の値が精度よく決まるだろう。物質については多く

の観測事実から低密度 ($\Omega_m \approx 0.3$) であることは確からしいので、CMB の高精度観測による $\Omega_{tot} = \Omega_m + \Omega_\Lambda$ の決定はきわめて重要である。

理論的には様々な議論があるものの、観測の示唆する宇宙項の起源について全くわからないという状況にある。宇宙を満たすダークマターには、未知の素粒子理論を探求する鍵があると考えられているが²²⁾、宇宙項問題にはさらに深い物理的意味が隠されているように思える。この問題を糸口に、宇宙論および素粒子論に新たな局面が展開する可能性がある。

最後に、草稿を読み意見を下さった京都大学理学部の中尾憲一氏に感謝する。

参考文献

- 1) Perlmutter S. et al., 1999, ApJ 517, 565
- 2) Riess A.G. et al., 1998, AJ 116, 1009
- 3) Aguirre A., preprint astro-ph/9904319
- 4) Chiba M., Yoshii Y., 1999, ApJ 510, 42
- 5) 杉山直, 1999, パリテイ, 07, 49
- 6) 関口和寛, 1997, 天文月報, 188
- 7) Freedman W. et al, preprint astro-ph/9801080
- 8) Chaboyer B., preprint astro-ph/9808200
- 9) Bahcall N.A., preprint astro-ph/9901076
- 10) Zel'dovich Ya. B., 1968, Soviet Phys. Uspekhi 11, 381
- 11) Coleman S., 1988, Nucl. Phys. B 310, 643
- 12) Tanaka T., 1998, in Particle Cosmology, (eds. Sato K. et al., Universal Academy Press), 33
- 13) Chiba T., Sugiyama N., Nakamura T., 1998, MNRAS 301, 72
- 14) Dolgov A.D., 1983, in The Very Early Universe, (eds. Gibbons G.W. et al., Cambridge University Press), 449
- 15) Fujii Y., Nishioka T., 1990, Phys. Rev. D 42, 361
- 16) Peebles P.J.E., Ratra B., 1988, ApJ 325, L17
- 17) Felder G., Kofman L., Linde A., 1999, Phys. Rev. D 59, in press (123523)
- 18) Steinhardt P.J., Wang L., Zlatev I., 1999, Phys. Rev. D 59, in press (123504)
- 19) Weinberg S., 1987, Phys. Rev. Lett., 59, 2607
- 20) Martel H., Shapiro P.R., Weinberg S., 1998, ApJ 492, 29
- 21) Garriga J., Livio M., Vilenkin A., preprint astro-ph/9906210
- 22) 坂井伸之, ビッグバン宇宙論は超えられるか (物理学最前線第2シリーズ, 共立出版), 印刷中

Recent Arguments on a Cosmological Constant

Nobuyuki SAKAI

Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502

Abstract: A cosmological constant was introduced by Einstein to realize a static universe, and later discarded by Hubble's discovery of the cosmic expansion. However, recent observations have indicated that the cosmological constant is not zero but positive. It is a great puzzle for theoreticians why the cosmological constant is unnaturally small. I review observational and theoretical arguments on the cosmological constant, discussing how observations suggest its existence and which theoretical problems occur.