

暗黒エネルギーの起源は何か

辻川 信二

〈群馬工業高等専門学校 〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580〉

e-mail: shinji@nat.gunma-ct.ac.jp



超新星をはじめとするさまざまな最新の観測データから、宇宙は現在近くになって加速膨張期に入ったと考えられている。この加速膨張を引き起こす源である暗黒エネルギーは現在の宇宙のエネルギーの約70%を支配しているが、その起源は謎に包まれている。本稿ではまず、暗黒エネルギーの性質が通常物質と異なるといかに異なるかを述べ、それによる宇宙の進化を明らかにする。さらに、暗黒エネルギーの起源を探る最近の理論的な試み、特にスカラー場によるモデルや重力理論の変更によるモデルなどについて解説する。最後に、観測から暗黒エネルギーの状態方程式の変化を知る方法について述べ、観測と理論の両方の側面から暗黒エネルギーの本質に迫る重要性に触れる。

1. はじめに

ここ10年ほどの急速な観測技術の向上により、宇宙論に関するさまざまなパラメーターの値が精度良く求まり、宇宙論は詳細科学の領域に足を踏み入れたといっても過言ではない。その一方で、現在の宇宙の約70%が暗黒エネルギーという正体不明のエネルギーで満たされているということが、さまざまな観測結果によって明らかにされてきた。宇宙全体のエネルギーの約25%は、暗黒物質という、これもまたその起源が不明な物質であり、原子などの通常物質（バリオン）の割合はわずか4%程度に過ぎない。つまり、最新の観測は、われわれの見ている世界が実際には宇宙のごく一部を占めているに過ぎず、残りは得体のしれない二つの暗黒成分であることを示唆しているのである。

暗黒エネルギーとは、簡単にいうと負の圧力をもち、重力に打ち勝って宇宙を加速膨張させるようなエネルギーであり、バリオンのような通常物質ではこのような性質をもたない。それに対して暗黒物質とは、圧力がほぼ0で無衝突のダスト

のように振舞う物質で、その性質は暗黒エネルギーと異なる（ここでのダストは、いわゆる星間物質の宇宙塵とは別の意味に用いている）。暗黒物質については、銀河団の運動から、銀河だけでは説明できない大量の力学的質量として、1933年にすでにその存在が指摘されていた。それに対して暗黒エネルギーは、1998年にいくつかの超新星の観測グループによりその存在が指摘された^{1),2)}。その後も、Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) 衛星による宇宙背景放射の温度揺らぎ^{3),4)}、宇宙の大規模構造などのさまざまな観測データ⁵⁾により、暗黒エネルギーの存在は裏づけられている（図1を参照）。

銀河団のような構造を作るためには、宇宙が過去にダスト的な物質に支配された物質優勢期の存在が不可欠である。最新の観測から、銀河は暗黒物質の作る大規模構造の中に分布していることがわかり、これにより物質優勢期の銀河形成は、主に暗黒物質が主役となっていることが明らかとなった。この暗黒物質主導の物質優勢期の後、暗黒エネルギーが暗黒物質の量を上回り、宇宙が加速膨張期に転じ、現在に至ったのである。なぜ、

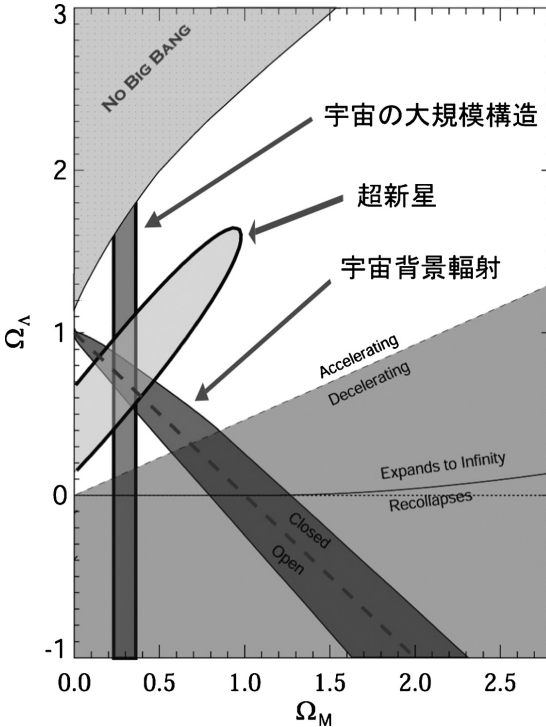


図1 超新星、宇宙背景輻射、宇宙の大規模構造の観測からの、現在の宇宙のエネルギー成分に対する制限。縦軸 (Ω_Λ) が暗黒エネルギーの割合、横軸 (Ω_M) が圧力のない物質の割合を表す。 $\Omega_\Lambda \approx 0.7$, $\Omega_M \approx 0.25$ が、観測データと最も整合性がある値である。

現在近くになってこのような奇妙なエネルギーが支配的になったかということは、その起源も含めて大きな謎であり、世界中の研究者がその性質を探るべく精力的に研究を行っている。

暗黒エネルギーの起源を明らかにすることは、今後の宇宙進化を予測するうえでも非常に重要である。もし暗黒エネルギーが存在し続けると、宇宙が加速膨張を続けることによりやがて銀河などが離ればなれになっていき、最終的には宇宙は構造のほとんどない寂しい終末を迎える。その一方で、暗黒エネルギーが支配的であるのが現在だけで、未来に崩壊するようなことが起これば、現在の宇宙の加速膨張は一時的なものとなる。

本稿では、暗黒エネルギーの起源を探るさまざまな試みを、主に理論的な立場から解説していく。その理論的な側面をより詳しく知りたい方は、レビュー論文⁶⁾を参照されたい。観測的な立場からその性質を探る試みについては、日本物理学会誌2007年2月号に優れた解説記事⁷⁾があるので、そちらも参照されたい。

2. 暗黒エネルギーと宇宙進化

アインシュタインの一般相対論によると、物質の種類により時空の構造が決まる。つまり、宇宙に存在する物質により、宇宙の進化が決まることになる。観測的に宇宙は一様等方であり、空間の任意の点を取るとその点の周りで球対称と見なせる。そこで、一様等方宇宙で任意の半径 a の球を考え、その球の内部がエネルギー密度 ρ の物質で占められているとする。このとき宇宙の膨張率 H は、宇宙時間 t の微分ドットを用いて $H = \dot{a}/a$ と表せ、エネルギー密度 ρ と

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{K}{a^2} \quad (1)$$

という関係をもつ。この式をフリードマン方程式と呼ぶ。定数 K は宇宙の曲率を表しており、 $K > 0$, $K = 0$, $K < 0$ がそれぞれ、閉じた宇宙、平坦な宇宙、開いた宇宙を表す。WMAPなどの観測から、現在の宇宙は平坦に近く、これは宇宙初期のインフレーションからの帰結と考えられている。そこで、式(1)において $K = 0$ とおくと、

$$3H^2 = 8\pi G\rho \quad (2)$$

となり、この式は宇宙を占める物質 (ρ) によって、膨張率 (H) つまり宇宙進化が決定されることを意味する。

それでは次に、宇宙を占める物質について見ていこう。物質の性質を特徴づける量として、状態方程式と呼ばれる量 w があり、物質の圧力を p 、エネルギー密度を ρ として、

$$w = p/\rho \tag{3}$$

で定義される。例えば、ダストのように振舞う暗黒物質の場合、圧力はエネルギー密度に対し無視できるので $w=0$ であり、光のような輻射の場合には輻射圧があり、統計力学により $w=1/3$ である。それに対して暗黒エネルギーの状態方程式は、観測的に $w=-1$ 付近であることが知られている。つまり、暗黒エネルギーの圧力 p は負であり、われわれが目にして通常の物質とは性質が本質的に異なる。

状態方程式 w により、エネルギー密度 ρ の変化にどのような違いが出るかを見てみよう。一様等方宇宙において、 ρ, p は連続方程式と呼ばれる式

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0 \tag{4}$$

に従う。この式は、球の体積 $V=4\pi a^3/3$ を用いて

$$d(\rho V) = -pdV \tag{5}$$

とも書ける。ここで、 $d(\rho V)$ は物質がもっている“内部エネルギー”の変化、 pdV は物質が外部にずる仕事を表し、連続方程式は、断熱変化のときの熱力学第 1 法則に対応することがわかる。

物質の状態方程式 $w = p/\rho$ が定数のとき、式 (4) は容易に積分でき、エネルギー密度 ρ の変化は

$$\rho \propto a^{-3(1+w)} \tag{6}$$

で与えられる。これより、輻射優勢期 ($w=1/3$) には $\rho \propto a^{-4}$ 、物質優勢期 ($w=0$) には $\rho \propto a^{-3}$ のように変化する。前者のほうが後者よりも速く ρ が減少するのは、式 (5) において、輻射が外部に仕事をする分だけ、宇宙が“疲れて”しまい、内部エネルギーの減少が大きいからである。

暗黒エネルギーの場合、 w が -1 に近いので、 ρ はゆっくりと変化する。暗黒エネルギーは、負の圧力 p をもつため、宇宙が膨張してもそれが外にする仕事 pdV は負である。このとき式 (5) の右辺

が正で、内部エネルギーに相当する量 ρV が増加する。つまり、宇宙が膨張しても、あたかも外から仕事をされエネルギーが補給されるような状況になっており、エネルギー密度 ρ はほとんど減少しないのである。特に $w=-1$ 、つまり $p=-\rho$ のとき、式 (4) から $\dot{\rho}=0$ となり、 ρ は一定に保たれる。これは後で述べる宇宙項に対応する。

式 (6) をフリードマン方程式 (2) に代入し積分することにより、スケール因子 a の変化は

$$a \propto t^{2/3(1+w)} \tag{7}$$

となる (ただし $w \neq -1$)。これより宇宙進化は、輻射優勢期 ($w=1/3$) には $a \propto t^{1/2}$ 、物質優勢期 ($w=0$) には $a \propto t^{2/3}$ となり、ともに減速膨張 ($\ddot{a} < 0$) する。宇宙が加速膨張をするためには、式 (7) の t のべきが 1 より大きいこと、つまり

$$w < -1/3 \tag{8}$$

が必要である。特に宇宙項 ($w=-1$) の場合、 ρ が一定のため式 (2) より H も一定で、宇宙は

$$a \propto e^{Ht} \tag{9}$$

のように指数関数的に膨張する。

最近の観測から、暗黒エネルギーが $w < -1$ のファントム (幽霊, 次章参照) である可能性も示唆されており、その場合、式 (7) は収縮宇宙を表しているので適切な解ではなく、膨張宇宙を表す解は

$$a \propto (t_s - t)^{2/3(1+w)} \tag{10}$$

である。ただし t_s は定数であり、 t が t_s に近づくに伴い a は発散し、同様に宇宙の膨張率と曲率も発散する。この現象は、ビッグリップ (引き裂き) と呼ばれており、銀河系、太陽系、地球、原子などが順に引き裂かれていき、有限時間 t_s で宇宙は終末を迎える⁸⁾。例えば $w=-3/2$ のとき、現在からビッグリップまでの時間はおおよそ 220 億光年と見積もられる。

3. 宇宙項

前章までの議論で、状態方程式 w により宇宙の進化が異なることがおわかりいただけたと思う。それでは、現在の宇宙を加速膨張させている暗黒エネルギーの起源はいったい何なのであろうか。最も単純な説明は、アインシュタインによって最初に導入された宇宙項である。アインシュタインは、一般相対論を築き上げた当時、宇宙は定常的であると考えており、静的宇宙を作る手段として宇宙項を導入した。実際に、閉じた宇宙 ($K > 0$) において、宇宙項の斥力と重力によるバランスにより静的宇宙は実現されるが、定常宇宙論は、遠方銀河の赤方偏移や 3 度 K 黒体放射の発見により、ビッグバン宇宙論に完全に取って代わられた。ところが 21 世紀に入る直前になって、現在の加速膨張を説明するための斥力として、宇宙項は再び脚光を浴びることとなったのである。

もし暗黒エネルギーの起源が宇宙項 Λ であるとする、現在の加速膨張を説明するために、 Λ の大きさは現在の宇宙の膨張率 $H_0 \sim 10^{-42} \text{ GeV}$ の 2 乗程度の大きさでなければならない。これは、エネルギー密度に換算すると、およそ

$$\rho_\Lambda = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 10^{-47} \text{ GeV}^4 \quad (11)$$

程度である [式 (2) を参照]。

一方、現代の素粒子物理では、物質が存在していない真空の状態でも、エネルギーが存在すると考えられている。量子論における真空とは、全く何も無い状態ではなく、存在しうるあらゆる場の基底状態を表す。不確定性原理のために、この基底状態のエネルギーはゼロにはならず、その真空のゼロ点エネルギーは宇宙項としての役割を担うことができる。量子論が有効であると期待される上限のエネルギースケールである、プランクスケール $m_{\text{pl}} \sim 10^{19} \text{ GeV}$ まで量子場のゼロ点エネルギーの和を計算すると、

$$\rho_{\text{vac}} \sim m_{\text{pl}}^4 \approx 10^{76} \text{ GeV}^4 \quad (12)$$

と見積もれる。これは観測されている値^{1,2)}よりも 10^{123} 倍も大きい。このことは宇宙項問題と呼ばれ、式 (12) のような大きなエネルギーが宇宙初期から存在すると、宇宙の大規模構造なども形成されないことから、暗黒エネルギーの存在が発見される以前から問題となっていた。

つまり宇宙項問題を解決するには、真空のエネルギーを何らかの形で非常に小さくするメカニズムが必要である。ここ数年の間に、統一理論の候補と期待される超弦理論を用いて正の真空のエネルギーを説明しようとする研究が活発に行われてきた。超弦理論は 10 次元もしくは 11 次元の理論であり、われわれが住んでいる 4 次元時空 (空間 3 次元 + 時間 1 次元) と矛盾しないためには、余剰次元を何らかの方法で小さく固定しなければならない。一般に余剰次元を小さく保ちつつ、加速膨張する解を構築するのは困難を極めるが、**Kachru** らは、ある特殊な余剰次元のコンパクト化を用い、さらに非摂動的な効果を考慮することにより、余剰次元が固定され、かつ正のエネルギーをもつ真空を構築することに成功した⁹⁾。これを暗黒エネルギーに用いるには、もちろんモデルパラメーターの調整が必要であり、しかもそのような真空が 10^{100} 個以上現れることが指摘されている。すると、われわれはたまたまエネルギーの小さい真空に生きているだけかもしれない。今後の超弦理論の進展が、暗黒エネルギーとどのように関係していくか非常に興味深い。

4. スカラー場

宇宙項の場合、エネルギー密度が変化しないので、状態方程式は $w = -1$ で一定であるが、エネルギー密度が変化する暗黒エネルギーのモデルも存在する。例えば、スカラー場を用いたモデルである。スカラー場とは、空間の各点においてスカラー量として振舞い、ローレンツ変換と呼ばれる座標変

換に対して不変な量である。量子論における場とは、量子化されたエネルギー準位をとる固有振動子の系のことを表す。スカラー場も、すでに述べた真空のように一見何もない空間のように見えるが、場の固有振動子がエネルギーをもつように、実際にはポテンシャルエネルギーを蓄えている。超弦理論のような素粒子物理において、数多くのスカラー場が現れる。

暗黒エネルギーの観測結果が出た直後、Steinhardtらは、その起源となりうるスカラー場 ϕ のことを、クインテッセンスと名づけた¹⁰⁾。クインテッセンスとは、古代ギリシャで、土、水、空気、火の四つの“基本元素”に加えて存在すると考えられていた“第5の元素”を意味する。スカラー場は、ポテンシャルエネルギー $V(\phi)$ をもち、そのポテンシャルに沿って場がゆっくりと運動すれば、場のエネルギー密度の減少は緩やかで、加速膨張の条件を満たすことができる。スカラー場を用いた加速膨張のダイナミクスは、それ以前にも宇宙初期のインフレーションモデルにおいて盛んに研究されており、輻射や物質とともにスカラー場がある場合の宇宙進化については、Steinhardtらの論文の前にも、藤井、千葉たちをはじめとした先行研究があった^{11), 12)}。

いまスカラー場 ϕ の一様成分を考えると、そのエネルギー密度 ρ は運動エネルギー $\dot{\phi}^2/2$ とポテンシャルエネルギー $V(\phi)$ の和で $\rho = \dot{\phi}^2/2 + V(\phi)$ と与えられ、これはいわゆるハミルトニアン密度 \mathcal{H} に対応する。また、スカラー場のラグランジアン $\mathcal{L} = \dot{\phi}^2/2 - V(\phi)$ からエネルギー運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ を計算し、これを完全流体の場合： $T_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}p + (\rho + p)u_\mu u_\nu$ と比べると、圧力 p が \mathcal{L} に対応することがわかり、 $p = \dot{\phi}^2/2 - V(\phi)$ で与えられる。スカラー場の状態方程式は、

$$w = \frac{p}{\rho} = \frac{\dot{\phi}^2/2 - V(\phi)}{\dot{\phi}^2/2 + V(\phi)} \quad (13)$$

である。このことから直ちにわかるように、 $\dot{\phi}^2/2$ が $V(\phi)$ に対して非常に小さいときに、 w は -1

スカラー場のポテンシャル

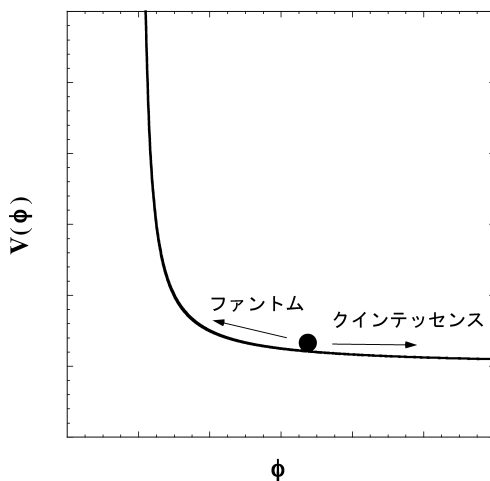


図2 暗黒エネルギーの起源となりうるスカラー場のポテンシャル $V(\phi)$ の例。クインテッセンスの場合、場はポテンシャルに沿って落下していくが、ファントム場の場合、ポテンシャルに沿って上昇していく。

に近づき、加速膨張の条件を満たす。つまり現在付近で、ポテンシャル $V(\phi)$ が緩やかな勾配をもっており、場がゆっくりと変化すればよい。Steinhardtらは、そのようなポテンシャルの例として、べき型タイプの模型 $V(\phi) \propto \phi^{-n}$ （ただし n は正）を考えた（図2を参照）。この模型では、場の値がある値よりも大きくなると宇宙が物質優勢期から加速膨張期に転じる。スカラー場模型は、 $V(\phi)$ と w が変化するいわゆるダイナミクスがある暗黒エネルギー模型であり、過去においてスカラー場のもつエネルギーが現在の値よりも大きいことから、宇宙項に特有な低いエネルギースケールの問題を緩和することができる。

スカラー場を用いた模型として、場の運動エネルギーにより加速膨張を起こさせるK-エッセンスと呼ばれる模型もある^{13), 14)}。これは、系のラグランジアンが、スカラー場 ϕ と運動エネルギー $X = \dot{\phi}^2/2$ の関数で

$$\mathcal{L}=p(\phi, X) \tag{14}$$

のように書けている模型のことをいう (クイン
 テッセンス: $p=X-V(\phi)$ もこれに含まれている
 ことに注意). 簡単な例として, p が X のみの関数
 である模型

$$p=-X+X^2/M^4 \tag{15}$$

を考えよう (M はエネルギーの次元をもつ定数).
 このときエネルギー密度は

$$\rho=2X \frac{\partial p}{\partial X} - p = -X + 3X^2/M^4 \tag{16}$$

で与えられるので, スカラー場の状態方程式は

$$w = \frac{p}{\rho} = \frac{1-X/M^4}{1-3X/M^4} \tag{17}$$

となる. この式から, $1/2 < X/M^4 < 2/3$ のとき $-1 < w < -1/3$ を満たすため, 運動エネルギーの
 効果だけによって加速膨張が可能である. 特に, $X/M^4=1/2$ で $w=-1$ であるので, このときは宇宙
 項と同じ状態方程式となる.

模型 (15) は, ゴースト凝縮¹⁵⁾とも呼ばれる模
 型であり, p が極小値をもつ位置 $X/M^4=1/2$ に
 おいて, 通常のスカラー場のヒッグス機構と同様
 にいわゆる凝縮が起これ, そこで指数関数的な宇
 宙膨張を引き起こす. このときのエネルギー密度
 は $\rho=M^4/4$ であることから, 現在の暗黒エネ
 ルギー密度 (11) を説明するには, $M=10^{-3} \text{ eV}$ 程度
 であればよい. ただしこの場合, 宇宙項とほとん
 ど区別がつかないことから, それを拡張した模型
 $p=-X+ce^{\lambda\phi}X^2$ なども考案されている. なお, こ
 のように X^2 の項を含む模型は, 超弦理論の作用
 において高次の補正項として現れ, 決して不自然
 なものではない.

超弦理論における D-ブレーンの崩壊で現れる
 タキオン場¹⁶⁾も, K-エッセンス模型 (14) の一種
 とみなすことができる. 一様等方宇宙で, タキオ
 ン場 ϕ のポテンシャルを $V(\phi)$ として, その圧力
 p とエネルギー密度 ρ は

$$p=-V(\phi)\sqrt{1-\dot{\phi}^2}, \rho=\frac{V(\phi)}{\sqrt{1-\dot{\phi}^2}} \tag{18}$$

である. これからタキオン場の状態方程式は,

$$w=p/\rho=\dot{\phi}^2-1 \tag{19}$$

となり, $\dot{\phi}^2 < 2/3$ ならば加速膨張の条件を満たし,
 $\dot{\phi}^2 \rightarrow 0$ の極限で $w \rightarrow -1$ である. 通常のタキオン
 模型では, ポテンシャルが ϕ の増加につれて
 $V(\phi) \propto e^{-\lambda\phi}$ のように変化し, 漸近的に場がダス
 トのように振舞う ($w \rightarrow 0$) ので加速膨張を起こす
 のは難しい. しかし, ポテンシャルが $\phi=0$ で正
 の極小値をもつような模型も超弦理論から構築さ
 れており, 暗黒エネルギーの起源がタキオンであ
 る可能性も捨てきれない.

上記では, 状態方程式が $w > -1$ の場合に限っ
 て議論を進めてきたが, $w < -1$ のファントム場
 についても触れておこう. 式 (13) から, 通常のス
 カラー場のとき $w > -1$ であるが, もし運動エネ
 ルギーが負の値 $-\dot{\phi}^2/2$ をもつファントム場を考
 えると, $w < -1$ が実現されうる. このとき, 場は
 ポテンシャルに沿って (あたかも幽霊のように)
 上昇するという奇妙な現象が起こる (図 2 を参照).
 素粒子物理に基づくファントム場は大きな問
 題で, 量子的な不安定性が常につきまとう¹⁷⁾.
 しかし, 上で触れたゴースト凝縮による模
 型やローレンツ不変性の破れの模型など, ある条
 件の下ではそのような不安定性を回避できる模
 型も考案されている. 今後の観測が $w < -1$ の可
 能性を肯定し続けるとすると, そのような研究の重
 要性も増すであろう.

暗黒エネルギーのダイナミクス, 特に状態方
 程式 w の変化は, 上で述べたように模型により異
 なるため, 観測からそのいくつかを棄却できる
 ことが望ましい. しかし現在の観測では, まだそ
 れらの模型を明確に区別できるレベルまでには
 至っていない. ただし, スカラー場を用いた模型
 ではないが, チャプリジンガスと呼ばれる模型¹⁸⁾
 ($p=-\alpha/\rho$ という状態方程式をもつ) は, 観測的

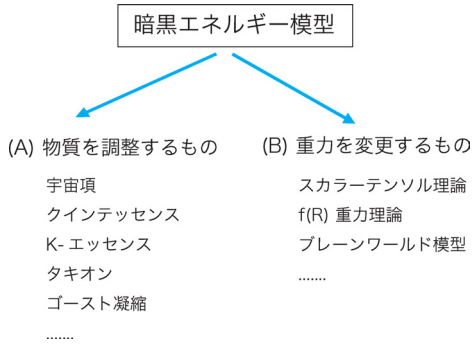


図3 暗黒エネルギーのさまざまな模型. 大きく分けると, (A) 物質を調整するもの, (B) 重力を変更するものの二つに分類できる.

にはほぼ棄却されている.

5. 重力理論の変更

フリードマン方程式 (2) は, “時空=物質” という関係を表しており, 前章のスカラー場模型は, 右辺の物質を調整することにより宇宙の加速膨脹を引き起こすものであった. それに対して, 左辺の時空を通常のアインシュタイン重力理論から変更することで, 暗黒エネルギーの起源を説明しようとする模型もある (図3を参照). 代表的なものは, (i) スカラー場 ϕ が重力と相互作用するいわゆるスカラーテンソル理論, (ii) 系の作用が時空のスカラー曲率 R の関数で書いている $f(R)$ 重力理論などである.

(i) の理論では, スカラー場は曲率 R と $F(\phi)R$ という形で結合している. 実はコンフォーマル変換と呼ばれる手法を用いて, ラグランジアンがアインシュタイン理論の形を取る系に移ることができる. ただしダストのような物質は, この新しい系ではスカラー場と直接的に結合しており, そのエネルギー密度 $\tilde{\rho}_m$ は

$$\frac{d}{dt} \tilde{\rho}_m + 3\tilde{H}\tilde{\rho}_m = Q(\phi)\tilde{\rho}_m \frac{d\phi}{dt} \quad (20)$$

を満たす. ただし $Q(\phi) = -F_\phi/2F$ であり, 記号 \sim は新しい系での量を表す. この式は, 暗黒物質

と暗黒エネルギーが結合の強さ $Q(\phi)$ で相互作用する, いわゆる結合した暗黒エネルギー模型¹⁹⁾で得られるものと同じである. この結合が大きいと, 物質優勢期および加速膨脹期の宇宙進化に影響を与えることから, それにより $Q(\phi)$, すなわち $F(\phi)$ に対する制限がつく. さらに, $F(\phi)R$ のような結合があると, 実効的な重力定数が変化するため, 太陽系での重力実験などからも $F(\phi)$ に対する制限が得られる. この模型の興味深い点は, ファントム的な状態方程式 ($w < -1$) を, スカラー場の運動エネルギー項の符号が正であっても実現可能な点である. このように, $w < -1$ がかつ重力実験と無矛盾な場合のパラメーター領域は, 最近の論文²⁰⁾によって解析されている.

(ii) の $f(R)$ 重力理論の研究も活発になされており, 例えば, 通常の一般相対論での線形項 R に加えて, 曲率 R が小さい領域で支配的になる項 $-\mu/R^n$ ($n > 0$) を考え, それにより現在の加速膨脹を引き起こす模型もある^{21), 22)}. ところがそのような場合, 重力と暗黒物質の相互作用が大きすぎ, 通常物質優勢期が存在しないことが文献 23 で示された. さらに最近の研究で, 超新星, 宇宙背景放射の観測, 局所重力の実験と矛盾しない模型は, 宇宙項による模型 $f(R) = R - \Lambda$ に非常に近いことがわかっている²⁴⁾.

上記以外にも, 超弦理論などで現れる高次の曲率項を用いた模型²⁵⁾, プレーンワールドによる模型²⁶⁾などさまざまな模型が提唱されている. アインシュタイン理論からのずれがあまりに大きいと, 重力実験などと矛盾するため, 重力理論の変更による模型は一般にリスクを伴う. しかしながら, 大スケールでの重力理論の変更の可能性も捨てきれず, 暗黒エネルギーの存在は, アインシュタイン理論の有効性に対する何らかの示唆を与えているのかもしれない.

6. 観測による状態方程式の制限

次に, 観測から暗黒エネルギーの性質に対して

どのように制限をつけるのかについて述べる。まずは超新星による観測であるが、これは光度距離 d_L を用いたデータにより、宇宙の膨張率 H に対する制限をつける。光度距離 d_L とは、星の絶対光度 L_s とエネルギーフラックス \mathcal{F} から、 $d_L^2 = L_s / (4\pi\mathcal{F})$ と定義される量であり、宇宙の膨張率 H と

$$H(z) = \left\{ \frac{d}{dz} \left(\frac{d_L(z)}{1+z} \right) \right\}^{-1} \quad (21)$$

という関係がある⁶⁾。 z は赤方偏移と呼ばれる量で、宇宙のスケール因子 a から、 $1+z = a_0/a$ で定義される (a_0 は現在の値)。過去にさかのぼるほど a は小さいため、 z は大きくなり、例えば $z=1$ では a は現在の値の半分である。1998年の観測では、 z が1に近い遠方の超新星の光度距離の観測により、宇宙が現在近くになって加速膨張期に入ったことが指摘された。

物質優勢期から現在までの宇宙進化を考えるには、式 (2) において、暗黒エネルギー (密度 ρ) だけでなく暗黒物質 (密度 ρ_m) も考慮する必要があり、その場合のフリードマン方程式は

$$3H^2 = 8\pi G(\rho + \rho_m) \quad (22)$$

となる。ここで ρ_m は、現在の値を $\rho_m^{(0)}$ として、 $\rho_m = \rho_m^{(0)}(a/a_0)^{-3} = \rho_m^{(0)}(1+z)^3$ で与えられる。式 (21) から H が z の関数として表されれば、式 (22) から ρ が z の関数としてわかる。さらに、式 (22) を t で微分し、式 (4) を用いて得られる式

$$\dot{H} = -4\pi G(\rho + p + \rho_m) \quad (23)$$

を用いれば、 p が z の関数としてわかる。このようにして、暗黒エネルギーの状態方程式 $w = p/\rho$ の時間変化が z の関数として決まることになる。

もし、 $d_L(z)$ の観測データが非常に詳細で、 $H(z)$ とその微分 $H'(z)$ が z の関数として正確にわかれば、アインシュタイン重力理論である限り、暗黒エネルギーの模型によらず w の振舞いが決定される。しかし、 $H(z)$ を z の関数としてパラ

メーター化することは模型に依存し、現在までの観測データは、どのパラメーター化が好まれるかを判断するためにはまだまだ詳細さに欠ける。さまざまな暗黒エネルギーの模型において $H(z)$ のパラメーター化を行い、それぞれの模型に対する制限を行う研究は活発に行われてきている。ただし、観測的にどの模型が最も好まれるかを判定できるレベルまでには至っていない。

$H(z)$ ではなく、 w を z の関数としてパラメーター化し、状態方程式に対する制限を与える研究も盛んに行われている。例えば最も単純なものは、2変数 w_0 と w_1 を用いて、 $w(z) = w_0 + w_1 z$ のようにパラメーター化されるものである²⁷⁾。ここで w_1 は、スカラー場のときのように $w(z)$ が変化する自由度を与えていると考えればよく、 $z=0$ での微分係数 $w'(z)$ に対応している。それ以外にもさまざまな $w(z)$ のパラメーター化が考案されているが、そもそも二つの変数 w_0 と w_1 だけで状態方程式の変化を正確に表せる保証はどこにもなく、それによる代償は大きいことが文献 28 によって示されている。文献 28 では、より幅の広い $w(z)$ の変化の場合も含むようなパラメーター化が考案されており、2変数のパラメーター化では表せないような、現在付近になって急激に $w(z)$ が変化する場合が最も好まれるという結論が得られている (図 4 を参照)。

その一方で、 $w = -1$ の宇宙項模型は、超新星のデータから棄却されない模型であり続けている。図 4 からわかるように、いまだに $w(z)$ の変化で許される領域の範囲は広く、 $w(z)$ が定数であるのか z によって変化するのかも判定できていない。将来の詳細な観測データから、 $w(z)$ の変化の証拠がつかめれば、暗黒エネルギーの起源は宇宙項ではないことになり、暗黒エネルギーの模型の理論的な構築にも非常に重要な示唆を与える。

超新星以外にも、暗黒エネルギーの性質に制限をつけることができる観測がある。 $z=1,100$ 程度の宇宙背景放射 (CMB) の温度揺らぎの情報がそ

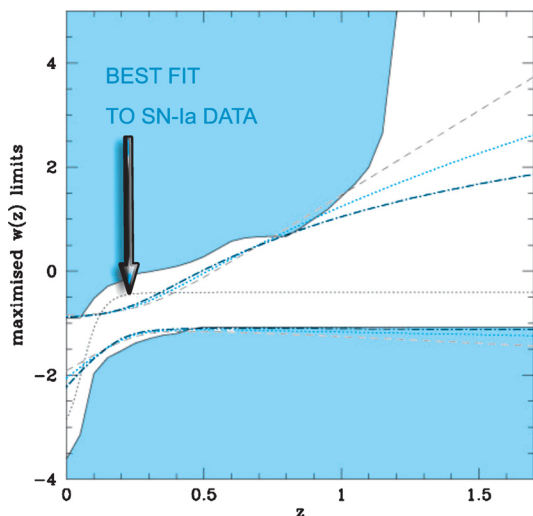


図4 暗黒エネルギーの状態方程式 w の変化の超新星の観測による制限²⁸⁾。上下にある3本ずつの点線は、 $w(z)=w_0+w_1z$ のような2変数を用いたいくつかのパラメータ化による、 $w(z)$ に対する上限と下限を表す。矢印で示した点線は、文献28で考案されたキックパラメータ化の場合の最適なフィットであり、 $z=0.2$ 付近から現在 ($z=0$) まで、急激に $w(z)$ が変化している。

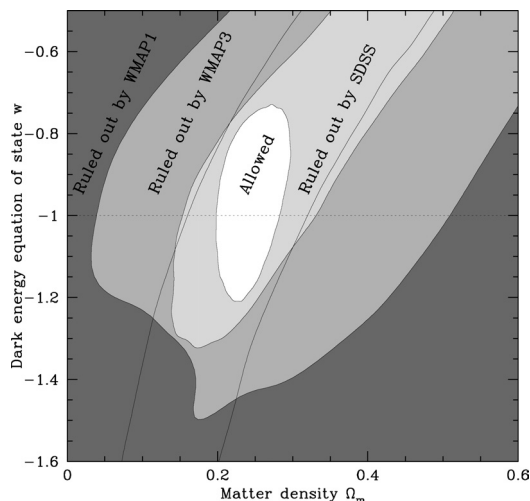


図5 暗黒エネルギーの状態方程式 w が定数の場合の、さまざまな観測データを統合した制限⁵⁾。縦軸が w 、横軸が現在の暗黒物質の割合を示す。CMBのWMAPによる1年目のデータ³⁾と比べて、3年目のデータ⁴⁾はより強い観測的な制限を与えている。これに Sloan Digital Sky Survey (SDSS) による宇宙の大規模構造の観測データ⁵⁾を加えることで、 w に対するさらに強い制限が得られている。

の一つであり、暗黒エネルギーの存在により、温度揺らぎのスペクトルは次のように主な二つの変更を受ける。CMBの温度揺らぎは、音波振動によるスペクトルのピークをもつが、このピーク的位置は暗黒エネルギーの状態方程式 w に依存する。これは、現在から $z=1,100$ までの距離が w によるためである。もう一つは、Integrated Sachs-Wolfe 効果と呼ばれるもので、暗黒エネルギーが存在すると宇宙の密度揺らぎの重力ポテンシャルが変化するため、これによる制限も加わる。WMAPグループによるCMBの観測データだけでなく、2008年1月打ち上げ予定のPlanck衛星によるさらに精度の良い観測データを用いて、暗黒エネルギーの状態方程式に関してより詳細な制限をつけることが可能になるであろう。

そのほかにも、宇宙の銀河分布などの大規模構

造の観測、初期宇宙での光子-バリオン流体中の音波に起因するバリオン振動も、暗黒エネルギーの性質に制限を与えるうえで重要な役割を果たす。最近の観測から、 $z=0.35$ 付近におけるバリオン振動のピークが発見されており²⁹⁾、それにより暗黒エネルギーの解析に重要な低い赤方偏移での情報が得られる。図5は、 w が定数の場合の、いくつかの最近の観測データを統合した状態方程式への制限であり、 w が -1 付近に許容領域があることがわかる。宇宙項 ($w=-1$) だけでなく、 $w < -1$ の領域も、依然として許容範囲に入っている。

上記以外にも、重力レンズによる暗黒エネルギーへの制限、ガンマ線バーストを用いた高赤方偏移宇宙の解析など、いくつかの興味深い観測が現在進行中である。これらのさまざまな観測結果を組み合わせることで、暗黒エネルギーの性質に

対するより精密な制限が将来得られると期待される。

7. おわりに

暗黒エネルギーの起源を明らかにするためには、理論的な側面と観測的な側面の双方の進歩が必要である。理論が進展しさまざまな模型が提唱されても、観測からその妥当性が検証されなければ意味がない。将来の詳細な観測から、宇宙項だけでなく、いくつかの暗黒エネルギー模型が棄却されるようになれば、それは素粒子理論に対する重要な示唆を与えると期待される。

世界的に見ても、理論と観測の両方でこの5年ほどの間に非常に活発に研究が行われており、“暗黒エネルギー”もしくは“宇宙項”という言葉が入っている論文は実に2,700を超えている。これはいかに多くの研究者が暗黒エネルギーに関心をもち、その起源を解明すべく日夜研究に励んでいることを示している。プレプリントに投稿される論文を見ていると、暗黒エネルギーの論文がない日は珍しい。その一方で、日本において暗黒エネルギーの理論的な研究を行っている宇宙物理学者は、国外の研究者と比べると意外に少ないという印象をもっている。この記事を読んで、少しでも多くの方々が暗黒エネルギーに興味をもち、その研究に参加して下さることを望んでいる。

物理学の歴史において人類は、実験または観測事実の原因を明らかにするため理論研究に取り組み、ほとんどの場合において成功を収めてきた。暗黒エネルギーの問題がその例外であるとは思えない。その起源が明らかになったとき、われわれは相対論や素粒子の標準理論を超えた新しい物理学を手にすることができるのかもしれない。

謝 辞

本稿の執筆を依頼してくださった、編集委員の戸谷友則氏に感謝します。また、暗黒エネルギーに関するさまざまな研究をここ数年でともに行ってきた、20人以上の共同研究者、特に Edmund Copeland 氏、Mohammad Sami 氏には謝意を表します。また、図4と図5をそれぞれ提供して下さった、Bruce A. Bassett 氏、Max Tegmark 氏にも感謝します。

参考文献

- 1) Riess A. J., et al., 1998, AJ 116, 1009
- 2) Perlmutter S., et al., 1999, ApJ 517, 565
- 3) Spergel D. N., et al., 2003, ApJS 148, 175
- 4) Spergel D. N., et al., 2006, ApJ, submitted
- 5) Tegmark M., et al., 2006, Phys. Rev. D 74, 123507
- 6) Copeland E., Sami M., Tsujikawa S., 2006, Int. J. Mod. Phys. D 15, 1753
- 7) 須藤 靖, 高田昌広, 相原博昭, 2007, 日本物理学会誌 673 号
- 8) Caldwell R. R., Kamionkowski M., Weinberg N. N., 2003, Phys. Rev. Lett. 91, 071301
- 9) Kachru S., et al., 2003, Phys. Rev. D 68, 046005
- 10) Caldwell R. R., Dave R., Steinhardt P. J., 1998, Phys. Rev. Lett. 80, 1582
- 11) Fujii Y., 1982, Phys. Rev. D 26, 2580
- 12) Chiba T., Sugiyama N., Nakamura T., 1997, MNRAS L5
- 13) Chiba T., Okabe T., Yamaguchi M., 2000, Phys. Rev. D 62, 023511
- 14) Armendáriz-Picón C., Mukhanov V., Steinhardt P. J., 2000, Phys. Rev. Lett. 85, 4438
- 15) Arkani-Hamed N., et al., 2004, JHEP 0405, 074
- 16) Sen A., 2002, JHEP 0204, 048
- 17) Cline J., Jeon S., Moore G., 2004, Phys. Rev. D 70, 043543
- 18) Kamenshchik A., Moschella U., Pasquier V., 2001, Phys. Lett. B 511, 265
- 19) Amendola L., 2000, Phys. Rev. D 62, 043511
- 20) Gannouji R., et al., 2006, JCAP 0609, 016
- 21) Capozziello S., et al., 2003, Int. J. Mod. Phys. D 12, 1969
- 22) Carroll S. M., et al., 2004, Phys. Rev. D 70, 043528
- 23) Amendola L., Polarski D., Tsujikawa S., 2007, Phys.

Rev. Lett. 98, 131302

24) Amendola L., Tsujikawa S., 2007, Phys. Lett. B, submitted

25) Nojiri S., Odintsov S. D., Sasaki M., 2005, Phys. Rev. D 71, 123509

26) Dvali G. R., Gabadadze G., Porrati M., 2000, Phys. Lett. B 485, 208

27) Huterer A., Turner M., 2001, Phys. Rev. D 64, 123527

28) Bassett B. A., Corasaniti P. S., Kunz M., 2004, Astrophys. J. 617, L1

29) Eisenstein D. J., et al., 2005, Astrophys. J. 633, 560

What Is the Origin of Dark Energy ?

Shinji TSUJIKAWA

Gunma National College of Technology, 580 Toriba, Maebashi, Gunma 371-8530, Japan

Abstract: The recent data of Supernova Ia and other observations suggest that the universe has entered the stage of an accelerated expansion after the matter-dominated epoch. The origin of dark energy responsible for this accelerated expansion is a serious mystery. I review recent theoretical attempts to investigate the origin of dark energy such as scalar field models and modified gravity models. I also address the method to determine the evolution of the equation of state of dark energy from observations.