

佐藤勝彦

Thinking of the Universe

宇宙の公案I

撮影/飯島 裕

甦る宇宙項



近年、これまでの宇宙論の主流であった「標準ビッグバン理論」が深刻な矛盾に直面している。深宇宙の高精度観測で得られたデータを下敷きに標準理論を検討すると、たとえば宇宙年齢が「若すぎる」のである。そこで、この矛盾を解消すべく再登場した

のが「宇宙項」である。「人生最大の失敗」とアインシュタインを嘆かせた歴史的遺物「宇宙項」の復活が意味するものは何か？ 東京大学の佐藤勝彦教授が、混迷する宇宙論の今を語る。

「宇宙項の導入は、人生最大の失敗だった。これはアインシュタインがハッブルによる宇宙膨張の発見後、自らの不明を悔やんで語ったという有名なことばである。しかしアインシュタインが導入し、本人も要らないといった『宇宙項』は今や宇宙論では不可欠のものとなっている。それでは、その宇宙項とはいったい何なのか？」

アインシュタインは一般相対論をつくり上げたとき、ただちにこの理論が初めて宇宙全体を取り扱うことのできる理論であることを認識し、自分のつくり上げた方程式——アインシュタインの重力場方程式と今日呼ばれている——を宇宙全体に応用し、解いてみようとした。アインシュタイン方程式は物理学の法則の中でもきわめて美しい方程式である。一見複雑な式に見えるが、じつに単純な原理から導かれる方程式なのである。この方程式を解くこととしてわかったことは、宇宙は収縮したり膨張したりするということである。静かに変化しないように宇宙のモデルをつくっても、その宇宙は自らの重力で収縮を始めてしまうのだ。一般相対論といっても、ニュートンの万有引力の法則を拡張したものであり、物質間に重力がはたらくことには変わりはない。

しかしアインシュタインは、当時の多くの人がと同様に宇宙は永遠不変なもので変わることはない存在だと信じていた。これは「自然は単純で美しい」という彼の信念にも合うものであった。そこでアインシュタインは、自分の美しい方程式を變形し、永遠不変なモデルをつくらうとした。重力つまり万有引力によって収縮しようとする宇宙を押し返すには斥力が必要である。そこでアインシュタインは空っぽの空間どうしが互いに反発するようなたらきをする

アインシュタインの不覚

「宇宙項」(宇宙項に代入される数値を宇宙定数といい記号 Λ (ラムダ)で表す)をつけ加えた。これにより、万有引力と宇宙項による宇宙斥力をちょうど釣りあわせて、1917年に膨張も収縮もしない宇宙モデルをつくったのである。これが今日、アインシュタインの静止宇宙モデルと呼ばれているものである。

しかし先にも紹介したように、アインシュタイン自身はハッブルによって宇宙が実際膨張していることを示され、宇宙項をとり下げた。確かに自分の導いた美しい方程式を信せず、宇宙は永遠不変であるという当時の常識を信じた点で彼は不明であった。実際、彼は自分の方程式を素直に解いたならば、そしてそれを確認することができれば、ハッブルの発見以前に「宇宙膨張の予言」ができたはずである。しかし、逆に彼は、素直に彼の方程式を解いて宇宙膨張を導いたフリードマンの結果を信じなかった。さらに宇宙項も含めた方程式で、やはり宇宙の膨張を予言した、ベルギーの神父ルメートルに対しても、「おまえは物理的センスがない」と叱りつけていたのである。彼の永遠不変な宇宙に対する信念が、いかに強かったかがわかるであろう。

それならば、宇宙項はもはやアインシュタインの失敗を歴史に残す単なるモニュメントで、科学的には忘れ去られてしまうべきものなのだろうか？ 今、宇宙論の分野では、宇宙項が存在するとしたモデルに基づいた研究論文が多数発表されている。宇宙項は復活したのである。

なぜ宇宙項なのか？

それでは、なぜ今、宇宙項は復活しつつあるのか？ 一言でいえば、宇宙論的観測が近年飛躍的に進んだ結果、詳細かつ誤差の小さなデータが得られるようになり、こ





ゆらぎ、ひろがる——自然が表出する、ありふれたパターン
 宇宙は「無」から生じたと説く学者もいる。「無」は、しかし、無のままではなく、
 有と無の間を量子的に「ゆらぐ」物理的な「無」であったという。
 そして「無」から創生した宇宙は、たちまち何十何百の桁に劇的なインフレーションを遂げた。

宇宙を『早生』させる宇宙項
 それでは、現在、ハッブル定数の値の観測はどうなっているのだろうか。図3に近年のハッブル定数の測定値を示す。図からわかるように今もってハッブル定数の値は

$$H_0 = \frac{2}{3H_0} \text{で導かれる。}$$

さて、 $\Omega = 1$ のとき宇宙の年齢は、

$$t_0 = \frac{2}{3H_0}$$

$\Omega = 1$ ・平坦な宇宙

さて、以上の議論を整理すると、宇宙の年齢はハッブル定数 H_0 と密度パラメータ Ω によって決まることになる。図2を見よう。これは宇宙年齢を H_0 と Ω の関数として表したものである。ここでもっとも興味深い宇宙が「平坦」な場合($\Omega = 1$)である。
 近年の宇宙論のパラダイムとなっている、インフレーション過程を含む宇宙創生論は、現在の宇宙はほとんど平坦であることを予言している。インフレーション理論は宇宙がどのような曲率で生まれようとも、急激な宇宙膨張によって宇宙の曲率をほとんどゼロにしてしまうのである。
 また実際の観測からも、 Ω の値が百万や一億などというように極端に大きいこともなく、また逆に百万分の1とか一億分の1というように極端に小さいこともない。理論的に考えれば、インフレーション理論を信じない人でも、何らかの理由で宇宙を平坦にするメカニズムがはたらいたと考えるべきであろう。宇宙が平坦であることは自然であり、もしそれが平坦でなければ、なぜ宇宙がそのような曲率を持っているのかを説明する理論が必要であろう。

H_0 と Ω
 ハッブル定数と密度パラメータ
 宇宙論的立場からは、宇宙の年齢は現在の宇宙の膨張の速さから、宇宙の大きさがちょうどゼロになる時刻を逆算して求めればよい(図1)。現在の宇宙の膨張の速さとは「ハッブル定数」のことである。宇宙がちょうど風船の表面のように膨らんでいるならば、われわれの住んでいる銀河系から遠方にある銀河までの距離を r とし、その銀河のわれわれの銀河に対する後退速度を v とすると、 v は距離 r に比例する。すなわち

$$v = H_0 \cdot r$$

 このときの比例定数 H_0 がハッブル定数である。

宇宙の物質密度がゼロの場合、宇宙膨張は宇宙開闢から今日までまったく減速されない。したがってどの時刻でも膨張の速さは同じなので、開闢までの時間、つまり宇宙の年齢 t_0 は図1に示すように単純にハッブル定数の逆数(H_0)が宇宙年齢となる。しかし、実際の宇宙は物質に満ちており、物質間の重力によって宇宙の膨張は減速を受けるので、物質密度が大きくなるにしたがって、宇宙の年齢はこのハッブル定数の逆数より短くなる。
 このように宇宙の膨張速度に大きな影響を与える宇宙の物質密度は通常、密度パラメータ Ω (オメガ)という量で表す。 Ω は宇宙の平均の物質密度(暗黒物質も含む)を「臨界密度」と呼ばれている量でわり算をしたものである。臨界密度とは、これ以上密度が高いと宇宙が将来収縮に向かうというぎりぎりの密度のことである。
 一方、宇宙論に関するさまざまな解説書にも示されているように、この密度と宇宙膨張の関係を、フリードマンモデルでは、宇宙の曲率、すなわち時空の曲がり方によって異なるとする。

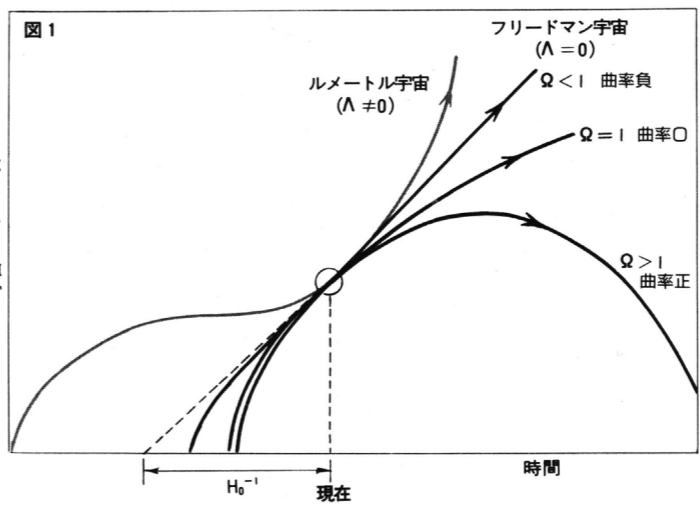


図1 宇宙項のない場合($\Lambda=0$ ・フリードマン宇宙モデル)、曲率によって宇宙の運命は大きく変わる(永遠に膨張したり、収縮したりする)が、いずれにせよ現在のハッブル定数では宇宙年齢が短すぎる。これに対し宇宙項がある場合(ルメートル宇宙モデル)は、その年齢を長くとることができる。

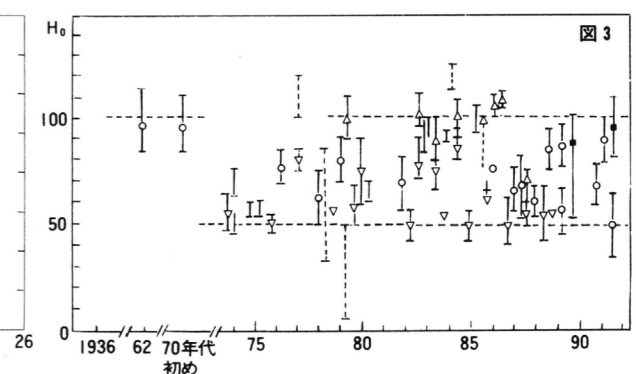
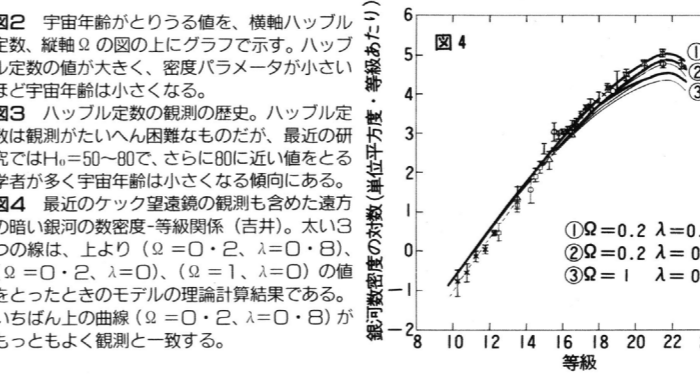
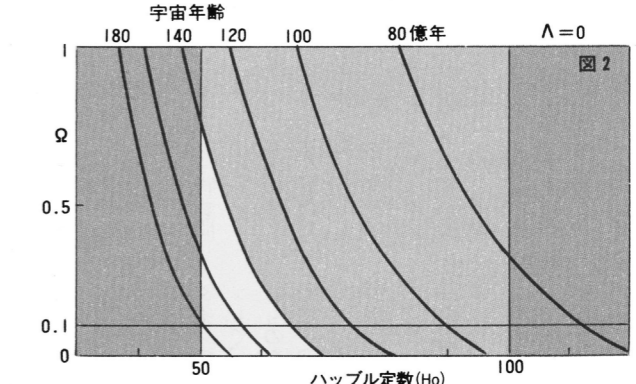


図2 宇宙年齢がとりうる値を、横軸ハッブル定数、縦軸 Ω の図の上にグラフで示す。ハッブル定数の値が大きく、密度パラメータが小さいほど宇宙年齢は小さくなる。
 図3 ハッブル定数の観測の歴史。ハッブル定数は観測がたいへん困難なものだが、最近の研究では $H_0=50\sim 80$ で、さらに80に近い値をとる学者が多く宇宙年齢は小さくなる傾向にある。
 図4 最近のケック望遠鏡の観測も含めた遠方の暗い銀河の数密度-等級関係(吉井)。太い3つの線は、上より($\Omega=0.2, \lambda=0.8$)、($\Omega=0.2, \lambda=0$)、($\Omega=1, \lambda=0$)の値をとったときのモデルの理論計算結果である。いちばん上の曲線($\Omega=0.2, \lambda=0.8$)がもっともよく観測と一致する。

最近、取り組んでいる研究のひとつ——別の宇宙に逃げる方法
100億年後のビッグクランチに備えてワームホールを通じて逃げるんです。
これ、宇宙が膨張しているうちに準備が必要なんですよ。

50から80くらいの範囲にあるとしか言えない。最近の観測はどちらかといえば、大きめの値、すなわち80近くの観測値を出す人たちの勢いが強い。

NASAの打ち上げたハッブル宇宙望遠鏡は、まさにこのハッブル定数をきちんと測定することを主要な目的の一つとして打ち上げられたものである。ところが、研摩ミスによるピンボケにより、最近まで充分その能力を発揮することができなかった。しかし93年12月、補正板、つまりいわばコンタクトレンズをつける修理を行なった結果、その像は鮮明となり、ハッブル定数を測定するための遠方の銀河の変光星の観測も始まった。1年以内にハッブル望遠鏡による観測値も発表されてくることであろう。

ともあれ、以上述べてきたように、宇宙論的なアプローチによってわれわれは $\Omega=1$ 、 $H_0=50\sim 80$ の値を得た。

さて、一方宇宙の年齢は、古い星の集団である球状星団の年齢から下限値を求めることができる。球状星団のヘルツシュプルング・ラッセル図を星の進化の理論的計算と比較すると、多くの球状星団の年齢は150億年を超える。星の理論的不確定性を考えてもなお、宇宙の年齢は130億年を下回ることはなさそうである。ふたたび図2を見よう。宇宙の年齢が140億年以上、ハッブル定数が50以上となると、もはや Ω が1となる解は存在しない。さらに H_0 が80となると、もはや $\Omega=0$ でも宇宙年齢が140億年を超えることはできないのである。

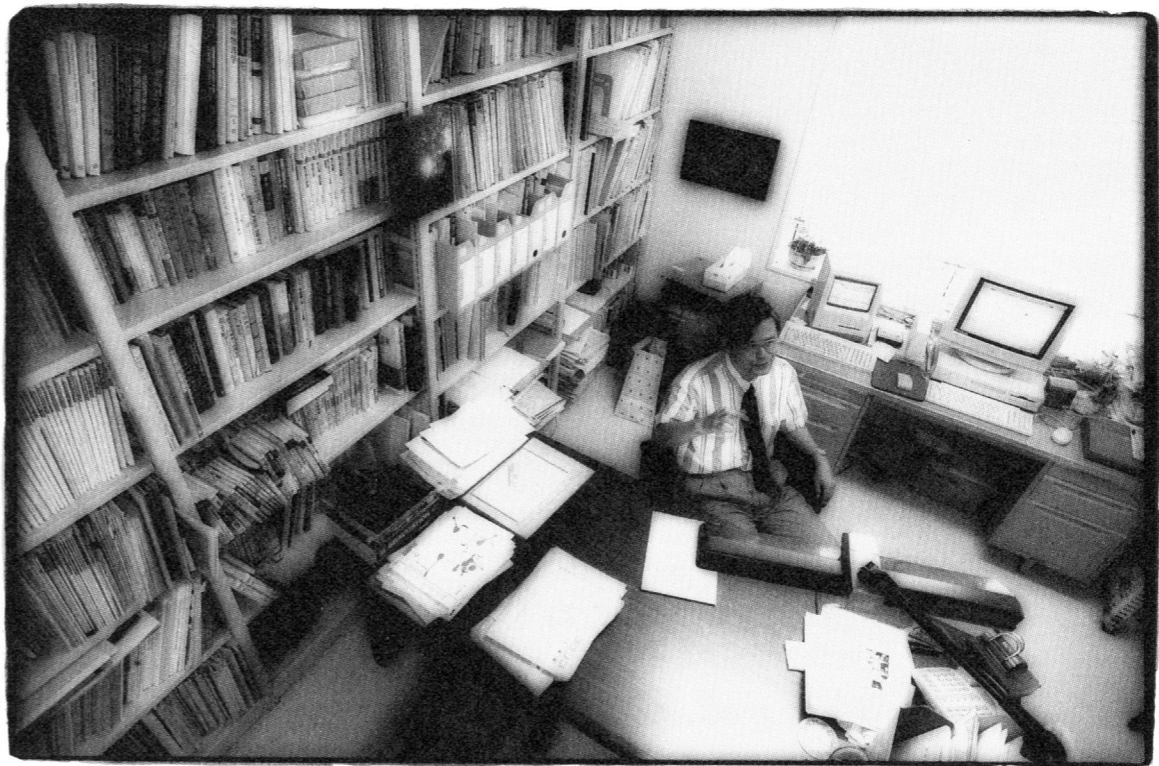
例えば銀河の数は遠方にあるものほど空間の体積が増加するため多くなるが、その増え方のようすで曲率や宇宙定数の情報が得られる。実際には銀河の距離の測定は困難であるので、暗い銀河の数が暗さとともにどのように増加するかで調べる。図4は、最近の吉井（私信）の結果である。このデータをみると宇宙項が存在するモデルが、もともとよい一致を示す。その他にもさまざまな宇宙項の存在を示唆する観測がある。

インフレーションによる宇宙創生論と宇宙項

アインシュタインによって導入された宇宙項は、じつは素粒子論の立場からその意味を考えると、それは空っぽの空間と考えられている真空が持っているエネルギー、すなわち、真空のエネルギー密度、そのものなのである。宇宙の開闢直後、急激に宇宙が膨張するインフレーションモデルは、じつはこの真空のエネルギーどうしが斥力を及ぼした結果起こるものである。

もちろんその値は、現在の宇宙に残っていると考えた場合の値と比べると120桁以上大きな値であるが、真空のエネルギーはインフレーションを引き起こす直接の原因であり、不可欠なものである。さらに量子宇宙論においても真空のエネルギーが大きければ大きいほど、その宇宙は創生される確率が高くなる。したがって宇宙は、真空のエネルギーの存在によって創生されたと言ってもよい。しかし創生の役目が終わった後、そのエネルギーは潜熱として解放され消え去る、つまりインフレーションの終了とともに宇宙定数はゼロになる。これがインフレーション宇宙創生論の標準シナリオであった。

そもそも、このように宇宙項が宇宙初期に存在することによってインフレーション



理論やホーキングなどの量子宇宙論などがつくられているのであり、たとえ現在に宇宙定数が残存しなくても、今日的な宇宙創生論の立場からすれば、宇宙項のアイデアはアインシュタインの偉大な業績の一つ、とも言えるものなのである。

宇宙定数の奇妙な数値の一致

ところが、ルメートル宇宙モデルの復活によって宇宙項が甦った。先に示したように現在の宇宙には宇宙定数が残存し、 $\Omega + \lambda = 1$ の平坦な宇宙モデル（ $\Omega = 0.2$ 、 $\lambda = 0.8$ ）がもともと観測に合うことを示しているのである。

しかし、もし観測が示すように宇宙項が実際に残存しているとする、これはじつに奇妙な数字の一致が見られることになる。 λ が0.8とか1のオーダーであることは、現在の「真空のエネルギー」が「臨界密度」と同じ程度ということである。これは宇宙は今、ふたたび真空のエネルギーが宇宙のおもなエネルギーとなり、急激な宇宙膨張、すなわち「インフレーション」を始めようとしていることを意味する。なぜわれわれはそのような特別な宇宙の歴史の時期に生きているのか。偶然そのようなことが起こる確率は極めて小さい。そこには何らかの必然があるはずである。

さらに現在の宇宙は、曲率が正か負かわからないほど平坦に近いことは既に述べたが、これも考えてみれば「宇宙の密度そのもの」も「臨界密度」と同じオーダーであることを意味している。

真空のエネルギー密度 λ 宇宙の物質密度 ρ 臨界密度

これらの関係をもっとも自然に説明する理論とは何か。それは、じつは、すでに捨て去られたホイールヤナリーカの定常宇宙論

甦るルメートル宇宙モデル

この宇宙年齢の矛盾を解決すべく登場してきたのが、宇宙項のある宇宙モデルである。フリードマンの解を宇宙項のある場合に拡張した宇宙モデルは、それを初めて考えたルメートルの名まえをとって「ルメートル宇宙モデル」と呼ばれている。

図1に示すように、このモデルでは宇宙定数 λ を調節することで、開闢までの時間をほとんど好きなように調節することができる。今や宇宙項なしでは、ビッグバン宇宙モデルは危機に瀕していると言える。

しかもルメートル宇宙モデルでは宇宙項が存在するとしても、なお宇宙を平坦にすることができるというメリットがある。というのは、最近の報告によると、曲率ゼロすなわち $\Omega=1$ にするほど物質は宇宙に満ちていないという観測結果が多い。実際、光を出してその存在がはっきりしている物質の量はせいぜい 0.01 程度である。暗黒物質の量がその 100 倍あればよいが、 10 倍から 30 倍だという観測が有力である。

つまり、フリードマンモデルでは宇宙が平坦であるということは $\Omega=1$ であるが、ルメートルモデルでは宇宙が平坦である条件は、 $\Omega + \lambda = 1$ となり（ここで λ は宇宙定数 λ を $3H_0^2$ でわり算した量）、観測から Ω の値が1より小さくてもそれを補うだけの宇宙定数の値があれば宇宙は平坦となり、インフレーションの予言とも一致するのである。例えば $\Omega = 0.2$ 、 $\lambda = 0.8$ などの平坦な宇宙モデルは、 H_0 が80でも宇宙の年齢は150億年を超えることができる。

以上、宇宙年齢矛盾の問題について見てきたが、その他にもフリードマン宇宙モデルではうまくいかないが、宇宙項が存在するとすれば、救われるという問題も多い。

なのである。定常宇宙論では、宇宙は平坦で、宇宙の膨張によって物質の密度が薄くなった分だけ、新たに真空から物質が生まれてその密度を一定にすると考える。

しかし定常宇宙論は、ビッグバン宇宙モデルの強力な論拠となっている「宇宙の背景放射」の観測事実を説明できないという致命的な欠陥を抱えている。

知をも膨張させる宇宙論

1980年代に始まった観測的宇宙論の爆発的進歩は、今も衰えることなく続いている。すでにすばらしい成果を出しつつあるケック望遠鏡を始めとして、世界で8メートル、10メートルという大型望遠鏡が数年内に10台近く建設され観測を始めることになっている。修理されたハッブル望遠鏡の活躍もめざましい。今世紀中に「Deep Sky Survey」により、20〜30億光年という遠方までの宇宙地図も手にいれることができるだろう。



佐藤勝彦（さとうかつひこ）

1945年香川県生まれ。東京大学理学部教授。インフレーション理論の提唱など、宇宙論研究の最前線で活躍を続ける。「宇宙論という、とてもむずかしいイメージを抱きがちですが、研究の動機のもっとも基本的な部分は、自分はいったい何者なんだろう？」という素朴な疑問に、何とか答えを見つけたいという欲求なんですね」