

# Outrageous fortune

## 人間原理、とんでもなく幸運であること

Nature Vol.439(10-12)/5 January 2005

J. MAGEE

私たちの宇宙の様相について「偶然の産物に近い」と考える宇宙論やひも理論の研究者が増えてきている。これは、たわいのない思考実験なのか、それとも科学自体への挑戦なのか？ Geoff Brumfiel が探った。

「なぜ私たちはここにいるのか？」これまで、哲学者や神学者、あるいは酒に酔った人々が頭を悩ませてきた問題だ。これに対して理論物理学者は、より本質論的な問題提起をする。「そもそも、ここに何かが存在するのはなぜか？」という具合に。

物ごとを大きくとらえる研究分野である宇宙論の研究者たちは、ここ 20 年の間、その方程式における予測不能な数学的変動に苦しんできた。ビッグバン以降の宇宙の成長を制御する数値がわずかでも大きすぎると、宇宙の膨張速度が大きくなりすぎ、陽子と中性子は互いに結合して原子を形成できる距離に近づけなくなる。逆にわずかでも小さすぎると、宇宙は十分に膨張しなくなり、あらゆるも

の温度が過度に高いまま保持され、原子核が 1 つも生成されなくなる。素粒子の観測質量と基本的な力の強さについても、同様の問題がある。

別のいい方をすると、世界一流の宇宙論の研究者たちが示す方程式が正しいとするなら、現在の宇宙の様相が偶然によってもたらされた、つまり、莫大な数の中からある特定のたった 1 つの数に遭遇するような確率で今の状況にある、という可能性は極めて低いことになる。「(その偶然とは)  $10^{120}$  の部分に分けられたダーツボードの中心的にダーツを命中させようとするようなもので、まったくばかげた確率だ」と、スタンフォード大学 (米国カリフォルニア州) でひも理論を研究する Leonard Susskind はいう。

### 途方もなく稀なこと

物理学者はこれまで、私たちの宇宙はまったくの偶然でできたのではない、という態度で臨んできた。これらの定数の値を設定する、未知の根本的な要因があるにちがいないというのが、物理学者の考え方である。「根本となる原理が未解明であり、だからこそ研究を強化する必要があるという考えだ」。ノーベル賞を受賞した理論物理学者で、ケイヴィル理論物理学研究所 (カリフォルニア州サンタバーバラ) の所長 David Gross はそう話す。

ところが、ここ数年で状況が変わった、とロンドン大学クイーンメリー校 (英国) の天文学者 Bernard Carr は語る。ひも理論や宇宙論の研究者たちが

次々に、「偶然だ」という説明のしかたをし始めているのだ。この考え方が正しいとすると、自然界の各種定数には意味がないことになる。「これまで多くの人々が、このような考え方には、ほぼ猛反対の態度をとってきた。それは科学として適切なこととは思われなかったからだ。しかし、最近になってその姿勢に変化が生じている」と Carr はいう。

こうした姿勢の変化は、私たちの宇宙が唯一の宇宙でない可能性を示す研究が出てきたことを発端にして現れ始めた。1980年代前半から一部の宇宙論の研究者は、ビッグバン以前の宇宙の膨張期に、複数の宇宙が形成されたと主張してきた。その後、ひも理論の研究者たちは、 $10^{500}$  個の宇宙が存在する可能性があるという計算結果も発表している。この数値は、私たちに観測可能な宇宙で存在している原子の数をはるかに超えるものだ。そしてこの仮説にしたがうと、私たちの宇宙に似た宇宙がほかにもいくつも存在すると考えることの合理性が高まるのだ。「これは、ものすごい数のダーツを、手当たりしだいにダーツボードに向かって投げつけるようなものだ。もちろん、いくつかのダーツが的に確実に命中するだろう」と Susskind はいう。そして、私たちが、私たちの宇宙に存在しているのは、ほかの宇宙では存在できないからにほかならない。

しかし Gross は、「これは興味深い理論だが、1つだけ致命的な問題がある。この理論の正誤を立証する方法がないことだ」と話す。私たちの宇宙とは、その定義からほとんど明らかなように、私たちが観測可能であるすべてのものを意味している。そのため、私たちが実は複数の宇宙によって構成されたコスミック・ランドスケープ (cosmic landscape) の中で存在しているのか、それとも私たちの宇宙が唯一無二の宇宙なのか、という点を確認できる明白な測定法は私たちの宇宙の中には存在していないことになる。理論の正誤を立証する方法がない以上、これは科学

ではない。少なくとも、従来のいかなる定義によっても科学とはいいがたいと Gross は話す。Carr は「Gross はこの理論について、宗教的特質を一部帯びた科学だととらえていると思う。信仰や美といった事柄が議論の要素になりつつあることから、彼のその考えはある意味で正しい」という。

それでも、宇宙論とひも理論が重なり合う研究分野では、複数の宇宙によって構成されたランドスケープ、という考え方が支配的な見解になりつつある。「将来は、これよりもすぐれた考え方が生まれることを心から期待している。しかし現時点では、このランドスケープ論が最善の考え方だ」と、プリンストン高等研究所 (ニュージャージー州プリンストン) でひも理論を研究する Juan Maldacena は、この研究分野の多数の研究者の見解をまとめるように、そう話した。これは現在の物理学が大きな賭けともいえる状況にあることを示している。ひも理論の研究者は、正しさを検証できない理論を研究するなんてことは無謀な行為だと受け取られる危険性を理解しているが、かといって意味がないかもしれぬ一連の数値に意味を見つけてようとする研究にも納得していない。

### ケプラーの誤り

このジレンマの核心にあるのが、「人間原理」という考え方だ。これは、現在の世界がこのような様相を呈しているのは、それを観測する人間が宇宙の特別な条件下に生存しているからだ、とする考え方である。この概念自体は新しいものではないが、従来は科学というよりも哲学としてとらえられてきた。

しかし一部の科学者は、観点を变えて物ごとを考えるうえで、この人間原理が役に立つという。「このような考え方を考慮に入れることは非常に重要で、さもなければ、宇宙に関してまったく誤った結論に達してしまう。たとえば、私たちの太陽系は典型的なものだと考えられているかもしれないが、宇宙において典型的なものとは、銀河間の空間で星が1

つも見えないような地点をいう」。マサチューセッツ工科大学 (マサチューセッツ州ケンブリッジ) で宇宙論を研究する Max Tegmark はこのように主張する。

観測地点を考慮しなかったことで痛い失敗をした研究者は、過去に少なくない。16世紀のドイツの天文学者ヨハネス・ケプラーは、太陽系の惑星がそれぞれ、太陽から幾何級数的な間隔で配置されている理由を解明しようと何年も研究を重ねた。彼は、惑星の配置に理由を見いだそうとした。それは彼が、私たちの太陽系こそが唯一の太陽系だと考えていたからだった。しかし現代の科学者は、私たちの太陽系は、同じ銀河系に存在すると推定されている数十億個の太陽系のうちの1つにすぎないことを理解している。こうなると、惑星の配置に見られる間隔は、ほとんど偶然の産物であると考え方が合理的である。

ケプラーが惑星の軌道について苦慮していたのとほぼ同様に、現代の宇宙論研究者は、宇宙の膨張速度を記述する宇宙定数の値に頭を悩ませている。観測される宇宙定数の値は、既存の理論が示唆する数値よりもかなり小さい。だが、それは観測結果によって正確に説明されるものであるため、理論系研究者たちは、実際の宇宙定数について、より深遠な理由を見いだそうと努力している。また、すべての現象を説明できるような偉大な統一理論を探し求めている研究者も数多い。

その一方で、実は現代の物理学者は、ケプラーのように意味がないものについて意味を見いだそうとしているのではないかと考え始めた研究者もいる。「最近になって、自然の法則は宇宙誕生時の初期条件によって決まってきたのではないかという思いを強くしている」と Susskind はいう。彼は、この主張を展開した一冊の本を書き終えたところだ (L. Susskind *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design*. Little Brown, 2005)。Susskind は、我々が存在している以外にも数多くの宇宙が存在し、

自然界で定められている数値はそれぞれの宇宙で異なるものと考えている。人類が水のある惑星でしか進化できなかったように、そもそも人類は、原子が形成されるような条件下の宇宙にしか生まれてこなかったというのだ。

最近まで、Susskindのような考えをする者は少数派だった。ただし、複数の宇宙が存在する可能性は、すでに宇宙論的学説の1つであるインフレーション理論によって示唆されていた。インフレーション理論は初期宇宙に関する代表的な学説で、初期宇宙における急速な膨張によって、現在のような平坦で均質な宇宙ができあがったとする考え方である。1980年代前半に提唱されたインフレーション理論の1つでは、ビッグバン以前にインフレーションが起こっていたとされる。この理論によれば、膨張する宇宙は泡沫状でエネルギーに満ちあふれたものだったという。テキサス大学オースチン校（米国）の研究者 Steven Weinberg は、「たまたま宇宙の一部が膨張し、ビッグバンとなる。そしてそれぞれのビッグバンで、基礎定数の値が異なっているのだ」と話す。

### ひも理論

1987年に Weinberg は、結果的に人間原理に基づいた宇宙のあり方を裏づけるような予測をした。予備的観測結果では、宇宙定数がゼロと示されていたケースにおいて、Weinberg は、宇宙定数が人間原理によって説明できるものならば、宇宙定数は銀河や恒星、惑星の形成を妨げない小さな値をとるはずだが、基本的にはランダムなために必ずしもゼロにはならないと考えた。「この予測が正しかったことは、その後の超新星やマイクロ波背景放射の観測によって確認された」と Weinberg は語る。だが当時は、彼自身もこの考え方に転向することに乗り気ではなかったという。

複数の宇宙が存在することを示す状況証拠は、ひも理論によって示されている。ひも理論とは、極めて小さなひもが時空構造の中で振動することで、巨

視的宇宙における数多くの粒子や力を作り出しているという考え方である。ひも理論は、実験的裏づけがないにもかかわらず幅広い関心を集めているが、それはひも理論がすべての事柄を説明できる一大理論の構築への道すじを示しているように思われるからだろう。これまで相いれなかった、相対性理論と量子力学を統一的に説明できる理論へと発展させる可能性を秘めているのだ。

しかし、理論系研究者たちがひも理論を展開していく過程において、方程式に複数の解が得られ、しかもそれぞれの解が物理的性質の異なる宇宙を表すことが判明した。「では、なぜそのうちの1つの解が我々の宇宙として選ばれたのか。それを解明することが常に目標となっていた」と、ケイヴィル理論物理学研究所でひも理論を研究する Joe Polchinski はいう。しかし20年にもわたって最大限の努力がなされたにもかかわらず、理論系研究者たちは、方程式から得られる100万通りの解、つまり、100万個存在するかもしれない潜在的宇宙を前に立ち往生したままなのである。

このように複数の解が存在するランドスケープが研究者の間で知られるようになり、やっかいであると同時に興味深い存在となった。一方で、この学説から私たちの宇宙に似た単一の解が得られることは決してなかったものの、一部の研究者は、それぞれが宇宙定数がランダムにみえる理由のだと主張し始めた。もし、この数多くの解が実際に数百万個の宇宙の存在を表しているのであれば、そのうちの1つがたまたま人類にぴたりだったとする考え方も、さほど突飛なものではなくなる。

### わからないほうが幸せ

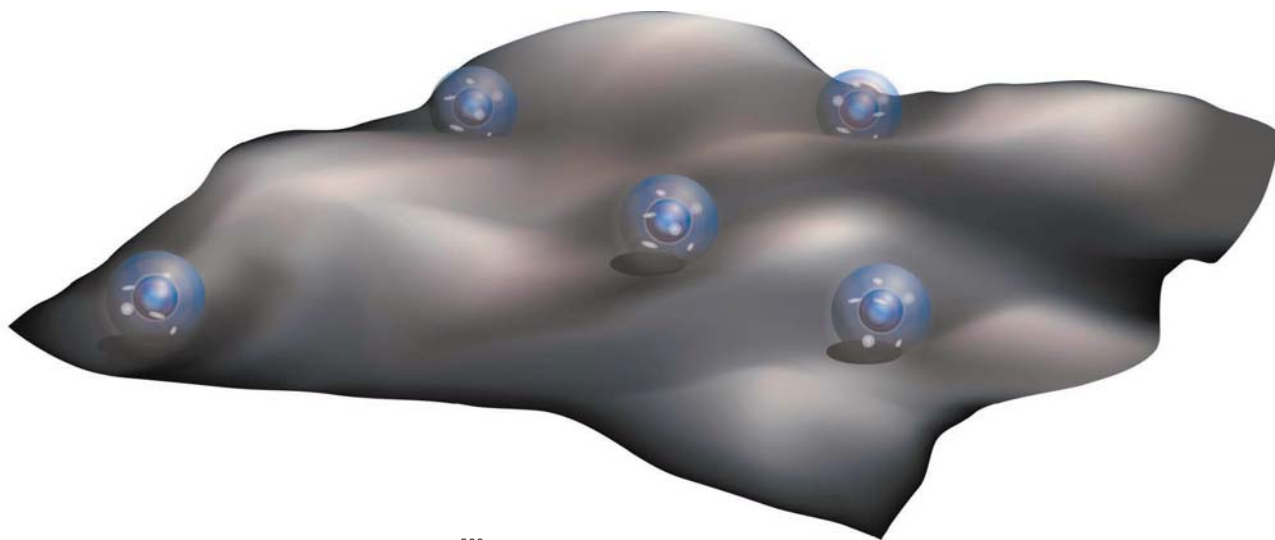
思わぬ問題となったのは、我々の宇宙が存在するためには、その背景にある宇宙の数が100万個でも不十分だったことだ。完璧に調整された宇宙定数を説明するためには、最低でも  $10^{60}$  個の宇宙が必要だと Polchinski はいう。そして2000年に、彼とローレンス・バー

クレイ国立研究所（カリフォルニア州バークレー）の Raphael Bousso は、100万以上の相当数の種類の解が存在しうることを示す計算結果を発表した。「この計算は位相的にかなり複雑なため、 $10^{500}$  個の宇宙が導き出される可能性がある」と Polchinski はいう。これほど多くの解があれば、一見、人類の生存に合わせて作られたかのようにみえる宇宙に、私たちが生まれてきたのも偶然の結果だと考えやすくなる、と Weinberg は話す。

確かに考えやすくなるだろうが、それが正しいと証明するのはむずかしい。他の宇宙は、私たちの宇宙から原理的に切り離されているため、私たちの宇宙が唯一の宇宙なのか、それとも数多く存在する宇宙のうちの1つなのかを判断するのは不可能なのである。ほとんどの科学者は科学の本質という観点から、この状況を憂慮している。生物に合わせて微調整された宇宙という考え方は、あるインテリジェントな力によって進化が決定されたと主張するインテリジェントデザイン論の支持者をすでに引きつけている。科学定数の値が偶然によって生じたものかどうかを判断する方法がないのであれば、それは神の行いの証拠であると考えればよいではないか、というのがインテリジェントデザイン論に賛同する者の主張である。

複数の宇宙によって構成されるランドスケープという概念の背後にある人間原理の考え方には、別の観点からも気がかりな点があると Gross はいう。通常の科学理論は、理論上の予測と適合した観測結果が発表されるたびに力を増すものである。ところが、人間原理にとっては本来、偶然が主たる要素となっている。通常の科学理論にとっては礎石となるパターンや相関といったものは、人間原理をむしろ弱体化させてしまう。「この原理は、何もわかっていない領域においてこそ、最も力を発揮する」と Gross はいう。

いくつかの問題点を残しつつも、人間原理の考え方を裏づける測定作業の



可能性のランドスケープ：ひも理論の構造から、最大  $10^{500}$  個の宇宙が予測されている。

準備は着々と進んでいる。2007年にはヨーロッパのCERN素粒子物理学センター（スイス、ジュネーブ）で大型加速器の運転が始まり、これまでに観測されたことのない粒子エネルギーが調べられることになっている。この加速器を使うことで、いわゆる超対称性粒子を検出できるかもしれない。超対称性粒子については、これまでに一部の研究者によって、強い力と弱い力、それに電磁力の3つを統一する手段としてその存在が予測されていた。これら3つの力に重力を加えた物理学上のすべての力を、1つの理論によって統一的に説明するための重要なステップになると期待されている。

これと同時に、私たちのすむ宇宙が、数多く存在する宇宙の1つなのかどうかを判断するためのヒントが超対称性粒子から得られるかもしれない、とハーバード大学（マサチューセッツ州ケンブリッジ）のひも理論研究者 Nima Arkani-Hamed はいう。大型加速器によってある特定タイプの超対称性粒子が検出されれば、宇宙で、弱い力と重力の比の微調整という別の微調整が行われていることが明らかになるというのだ。人間原理でも同じことが論じられている。もし、数値がわずかに  $10^{30}$  分の1でもずれていけば、人類は今、ここでこんな議論はしてい

ないとされるほど微妙な調整なのだ。

第2の完璧に調整された数値が検出されれば、ますます議論が激しくなるだけのようにも思えるが、Arkani-Hamed は逆の効果があると主張する。宇宙定数は、宇宙論研究の内部においてすら論争があったのに対し、この第2の微調整は物理学の標準モデルになると考えられており、ほとんどの物理学者も、これまで構築・検証されてきた物理理論のどれよりも完全なものになると考えているのだ。その発見は、特定の基礎定数に任意性があるとする学説を補強するものになるだろう、と Arkani-Hamed は話す。そして、「この測定値によって、ランドスケープ論の正しさ、もしくは誤りが直接証明されるわけではないが、この考え方を大きく推進する役目を果たすと思う」という。

#### 無条件に信じてはいけない

それでもなお、数多くの科学者は人間原理の考え方に不信感を持っており、今でも別の説明のしかたを探し求めているのも事実である。ハーバード大学の Lisa Randall もその1人だ。Randall は、複数の宇宙が存在するという見解は、ひも理論で使用される方程式が精緻化されていないために生じた妄想だと考えている。「このような過激な考え方を信じ込む前に、別の考え方を探す

ことのほうが重要だ」と彼女は主張する。また、Gross も他の宇宙を検出する方法がない現状では、1つの考え方を無条件に信じるべきではないと考えていて、「現時点で到達すべき結論としては、やや極端だと思う」と語る。

Susskind もまた、人間原理を検証する方法がないことを「非常に危惧」している。しかし、人間原理を否定するわけではない。「何が科学で、何が科学でないのかを定める判定基準に合わないからという理由で、正しいかもしれない答えを捨てるのは非常に愚かなことだと思う」と彼はいう。

複数の宇宙が存在するという考え方が科学に登場した背景には、微調整された宇宙の数値を説明しようとしてきた理論系研究者たちの20年間の苦闘がある、と Gross は考えている。「ひも理論の研究者たちは、私もそうだが、これだけの年月をかけて研究を行ったのに理論の予測能力が高まっていない現状に大きなフラストレーションを感じている」と Gross はいう。しかし、だからといってそれは「奇怪な科学」を利用する際の免罪符にはならない、「それは危険なことだ」と Gross は警告している。

Geoff Brumfiel は *Nature* のワシントン特派員（物理科学担当）。