A constant problem

行き詰まる ダークエネルギー研究

Nature Vol.448(245-248)/19 July 2007

10年前の発見時には大歓迎されたダークエネルギーの研究が、ここにくいて研究者を失望させているのはなぜなのだろうか？ Geoff Brumfielが取材した。

1998年、2つの天文学者のチームが、宇宙は自分自身を引き伸ばしていると報告した。これは衝撃的な報告だった。宇宙が膨張していることは1920年代から知られていたが、この膨張は減速しており、遠い将来にはほぼ完全に止まるだろうと考えられていたからである。しかし、1990年代後半に行われた遠方の超新星の観測は、膨張はまったく減速しておらず、むしろ加速していることを示唆していた。ジョンズホプキンス大学（メリーランド州ボルティモア）の天文学者Charles Bennettは、「この発見は信じられないほど直観に反していた。私はそれを信じなかった」と振り返る。

しかし、数年のうちにBennettやこの分野の研究者のほぼ全員が、それまでの考えを改めざるを得なくなった。観測結果は確実なものになっていったし、宇宙の膨張が加速していることは理論の行き詰まりを救うとみられたからである。Bennettのチームを含むさまざまな研究グループがビッグバンの名残の電磁波を観測していたが、その結果は、宇宙の重力が宇宙を平坦にしていることを示していた（平坦な宇宙とは、宇宙の膨張速度とそれに含まれる質量が均衡しており、膨張速度を減じながら永遠に膨張を続けるが、ある一定の大きさ以上にはならず、またけっして収縮には転じないというもの）。しかし、ほかの観測結果は、それほど大きな重力効果を及ぼすには、宇宙にある物質の量が少なすぎることを示していた。この不足分は、

まだ見つかっていないダークマターを考慮に入れても埋めることはできなかった。

幸いにも、相対性理論では物質だけでなくエネルギーも重力効果をもつことになる。そして、宇宙の膨張を加速するのに必要なエネルギー量は、その重力により平坦性問題を解決するのに必要なエネルギー量にかなり近いことがわかった。このエネルギーはすぐに「ダークエネルギー」として知られるようになった。シカゴ大学（イリノイ州）の宇宙論研究者Michael Turnerは、「ダークエネルギーは、宇宙の起源と未来に関するすばらしい洞察を与えてくれるようにみえた。その正体さえ明らかになれば、すべてがうまくいくように思われたのだ」と話す。

それから約10年が過ぎた今、研究者たちは、1つの理論的な難問をより大きな難問に置き換えてしまっただけのようにみえる。その後の観測は、ダークエネルギーの正体についてほとんど何も明らかにしておらず、ダークエネルギーを説明する理論は前進するための手がかりを欠いている。天文学者たちは新しい観測装置を投入して、やっとのことで歩を進めているが、こうした観測により問題を解決できる保証はほとんどない。もちろん、今後の観測にどれだけ力を入れるべきかについても、研究者の意見は一致していない。ハーバード大学の宇宙物理学者Avi Loebは、「問題は、今後の観測からどれだけの情報を得られるのかという点にある」と話す。

見えない謎

大きな問題は、ダークエネルギー自体は目に見えないということだ。ダークマターと同じように、ダークエネルギーはその効果を通じてのみその存在を知ることができる。ダークエネルギーの場合は、宇宙の膨張に及ぼす効果がそれに当たる。ダークエネルギーと膨張の加速との関係は、「ダークエネルギーの状態方程式」に現れるある定数によって決まる。これは、ダークエネルギーが及ぼす圧力を単位体積当たりのダークエネルギー量で割ったものである。

膨張が加速しているなら、状態方程式の定数はマイナスでなければならない。そして、状態方程式の定数が -1 であれば、ダークエネルギーが宇宙の不変の性質、つまり宇宙定数(宇宙項)であることになる。宇宙定数はアインシュタインの一般相対性理論に現れる定数である。皮肉にも、彼は宇宙を同じ大きさにとどめるために宇宙定数を導入した。アインシュタインは、宇宙が実際には膨張しているという事実を受け入れたとき、宇宙定数を自分の「生涯、最大の過ち」とよんで方程式から取り除いた。しかし、状態方程式の定数が -1 であるなら、ダークエネルギーは宇宙定数としての条件を満たす。そして、最新の観測結果によると、状態方程式の定数が -1 である可能性はかなり高い。

スタンフォード大学(カリフォルニア州)の宇宙論研究者Leonard Susskindは、「ダークエネルギーの状態方程式の定数が本当に -1 であるなら、その正体についてはよく知られた説明が1つある」という。物理学者たちは数十年前から「真空のエネルギー」というものの存在を仮定してきた。これは、真空の中で生まれたり消えたりする量子的粒子からなる原始の泡である。この真空のエネルギーなら、観測されているような加速膨張の駆動力となるかもしれない。また、真空のエネルギーによる加速は休みなく続くだろう。真空のエネルギーは空間にもともと備わった性質であるため、「宇宙が膨張すると宇宙の真空のエネルギーも増え、圧力とエネルギー密度との比は変化せず、 -1 に固定されることになる」とSusskindは説明する。

この説明には1つだけ理論的矛盾があ

夜空の一部を連続して撮影した画像から、超新星爆発(右写真の赤い点)を見つけることができる。

る。天文学者が観測したダークエネルギーの効果は比較的弱いため、物理学者が計算した真空のエネルギーは、この効果を説明するのに必要な量の 10^{100} 倍以上の大きさになってしまうのである。ダークエネルギーがこんなに大きかったら、私たちの宇宙は一瞬にしてバラバラになってしまうだろう。「どのように計算しても、真空のエネルギーは莫大な量になってしまう。自然に小さな値をとらせる方法はない」とTurnerはいう。そのため物理学者の多くは、隠れた自然の対称性による未知の効果が真空のエネルギーを打ち消しているのだろうと考えた。このような「そのうち消えてくれるといいのだが」という考え方は、物理学では珍しいものではなく、場合によってはこれが唯一の前進方法になることもある。とはいえ、真空のエネルギーについてこのような考え方をするのは「まったく愚かなことだった」とSusskindは認めている。

「そして、私自身もそうした愚かな考え方をしていたことを白状しなければならない」と、彼はほとんど申し訳なさそうに話す。今のSusskindは、このような考え方はしておらず、この難問に対してある種の解答を提案している。「多くの素粒子物理学者に人気のある『ひも理論』では、私たちが観測できる宇宙は、より大きな『多元的宇宙』が含む 10^{500} 個の宇宙の1つにすぎないと考えることができ、そう考えることが望ましくさえある」と彼は語る。真空のエネルギーは宇宙ごとに異なる値を持ち、多くの宇宙、ひょっとするとほとんどの宇宙では、実際に莫大な値になっている

のだろう。しかし、私たちの宇宙では小さい値に違いない。なぜなら、私たちのような観測者が進化できるのは、真空のエネルギーが小さい宇宙だけであるからだ。

この種の「人間原理」の議論は多くの科学者をうんざりさせている。批判的な人々は、この種の推論は検証することがほとんど不可能であり、宇宙に関するより深い洞察を与えてくれるものではないと指摘する。プリンストン大学(ニュージャージー州)の理論研究者Paul Steinhardtは、「人間原理と無作為性は何も説明していない。大部分の理論研究者がこうした議論を受け入れていることに私は失望している」と話す。

問題は、これよりも有望そうにみえるほかの説明がないことだ。一部の人々は、問題はアインシュタインの重力理論にあると主張して、ダークエネルギーと合うようにこれを修正しようとしている。「ダークエネルギーが重力の一種であるとしたら、それはとても幸運なことだ。物理学の根本的な謎に挑むことができるのだから」とニューヨーク大学のGeorgi Dvaliは話す。しかし、彼らの修正にはほとんど意味がないと考える人もいる。宇宙全体はともかく、「そうした重力理論が、太陽系で矛盾が生じないようにするのは容易なことではないからだ」とTurnerはいう。

ダークエネルギーは宇宙の時間の経過とともに変化する性質なのではないかと考える人もいる。ある人は、ダークエネルギーは宇宙規模の長距離で働く5番目の力(残りの4つは、電磁気力と2つの核力と重力)なのではないかと考えている。またある人

は、ビッグバン直後に起きたとされているインフレーションの余波ではないかと考えている。インフレーション期は、極端な膨張が起きていた期間であった。その後の宇宙の歴史を通じて、この現象が何らかの尾を引いている可能性はないのだろうか？

提案されているさまざまな仮説は、概念的には異なっているが、数学的には同等である。これらはいずれも、ダークエネルギーが時間とともに変化することと、状態方程式の定数が-1に固定されないことを要請する。「ダークエネルギーが変化すると考えれば、今日のダークエネルギーの小ささを説明しやすくなるだろう」とSteinhardtはいう。さらに、ダークエネルギーの変化は、この宇宙のほかの特徴にも影響を及ぼすかもしれない。例えば、基本定数と考えられている定数の一部に検出可能な影響を及ぼすなら、それはこの仮説にとってプラスになるだろう。しかし、批判的な人々は、よほどの事情がないかぎり、こうした考え方が受け入れられることはないとみている。

希望の光

全体としては、この問題の理論的側面はうまくいっていない。カリフォルニア工

科大学（同州パサデナ）の理論物理学者Sean Carrollは、「私たちはあらゆることを試してみたが、うまくいったものはない」という。「今必要なのは、もう少しの手がかりだ」。

状態方程式の定数を精密に測定するため、天文学者たちは新世代のダークエネルギー探査機を計画している。彼らはすでに1a型超新星の詳細な観測を進めている。ローレンスバークレー国立研究所（カリフォルニア州）の天文学者Saul Perlmutterは、超新星を使って宇宙の膨張の加速を測定する方法の原理を次のように説明する。1a型超新星爆発は、連星系の大きな星から小さな星へと物質が流れ込んだ結果、小さな星の質量がしきい値を超え、大規模な熱核反応により爆発することで起こる。どの星も同じ質量しきい値で爆発するため、1a型超新星はみな同じ量のエネルギーを出すことになり、その絶対的な明るさ（等距離から見た明るさ）はどれも同じになるはずだ。ならば、1a型超新星を地球から見たときの相対的な明るさを比較することにより、超新星までの距離を正確に測定できることになる。この方法で超新星までの距離を測定し、光の赤方偏移

を使ってその速度を測定することにより、宇宙の膨張がどの程度加速されているかを知ることができる。Perlmutterらは今、超新星の仕組みを詳細に解明し、計算結果の精度を上げるために、観測数を増やそうと努力している（p.13写真参照）。

超新星は最もよく解明されている天体の1つだが、宇宙の膨張の加速を測定する唯一の方法ではなく、遠方の銀河団からのX線を調べるという方法もある。スタンフォード大学のX線天文学者Steve Allenによると、超新星の場合のように、銀河団の温度と明るさには標準的な関係があるため、地球から任意の距離にある銀河団が遠ざかる速度を測定することができるという。

ダークエネルギーの効果は、より複雑な方法によっても測定できる。銀河団や銀河群の重力場は、重力の井戸に落ち込む光の波長を青色方向に変化させ、井戸から出てくる光の波長を赤色方向に変化させる。ピッツバーグ大学（ペンシルベニア州）の天文学者Ryan Scrantonは、ビッグバンの名残である宇宙マイクロ波背景放射にこうした効果が現れるときにダークエネルギーが影響を及ぼしているはずだと考えている。

ダークエネルギーを追い詰める

さまざまな観測法を組み合わせることで、宇宙の物質密度とダークエネルギーの状態方程式の定数がとり得る値を絞り込むことができる。

宇宙マイクロ波背景放射の観測結果は宇宙が平坦であることを示しており、左下から右上に伸びる紺色のバナナ型の外側にある状態方程式の定数と物質密度の値を除外する。超新星の観測からは宇宙の膨張の加速の程度がわかるが、これにより右下から左上に伸びる薄い水色と濃い水

色のバナナ型の外側の値が除外される。銀河団の測定は加速を知るもう1つの方法であり、薄い紫色と濃い紫色の領域の外側の値が除外される。すべての観測結果を統計的に組み合わせると、緑色の小さい丸型の領域が得られる。

どの観測法についても、内側の線は68パーセントの確からしさで除外される領域との境界を、外側の線は95パーセントの確からしさで除外される領域との境界を示している。

進むべき道は？

状態方程式の定数を決めていくためには、単一の観測法に頼るよりも、各種の観測法を組み合わせるほうがよい(コラム「ダークエネルギーを追い詰める」を参照)。新しい研究方法の中では、宇宙の大規模構造がダークエネルギーによってどのように形作られたり歪められたりしてきたかを調べる方法が最も有望視されている。銀河は宇宙に均等に分布しているわけではなく、寄り集まって3次元のクモの巣構造を作っている。このクモの巣はダークエネルギーの影響を受けやすい。さらに、独自の超新星観測チームを率いてPerlmutterらの観測チームと競争しているジョンズホプキンス大学の天文学者Adam Riessによると、大規模構造の観測で予想される誤差の種類は、超新星の観測に伴う誤差の種類とまったく異なっているため、この新しい観測法は古い観測法とうまく補い合うことになるという。現在、宇宙の大規模構造の地図作りを進めるために、いくつかの野心的な調査が計画されている。

しかし、こうした方法のどれをとっても、歯がゆいほど何も教えてくれない状態方程式の定数を限定していくことしかできない。ダークエネルギーが宇宙定数であることを証明するには、状態方程式の定数が本当に-1であることを示す必要がある。-1に近いことを示すだけでは不十分なのだ。ドイツのガルヒンクにあるマックスプランク宇宙物理学研究所のSimon White所長は、「天文学者たちは、ほかの仮説の可能性を除外することもできないまま、いつまでもダークエネルギーを測定し続けることになるかもしれない。それが定数であるなら、無限の正確さが必要となるからだ」と話す。

ケースウエスタンリザーブ大学（オハイオ州クリーブランド）の理論物理学者Lawrence Kraussはさらにこう指摘する。状態方程式の定数が本当に-1であり、ダークエネルギーが定数であるなら、膨張の加速に及ぼす効果を通じてしかそれを測定できないことになる。「状態方程式の定数が-1であるなら、ダークエネルギーの正体は解明できないだろう。これではまったく理論の指針にならないからだ」とKraussは話す。

英国のダラム大学の理論物理学者Carlos Frenkは、しっかりした理論的根拠なしに1つの数字を調べるのは正しいやり方ではないと主張する。「それは、すべての木の高さを測定して、生物学の本質を知ろうとするようなものだ」と彼はいう。「測定のための測定は無意味である」。Frenkはそのような測定に多額の研究資金を投じることに異議を唱えており、Loebもこれに同意している。「この目的にも資金は出さなければならないが、ほどほどの額にするべきだ」とLoebは話す。

一部の理論物理学者の懸念とは裏腹に、実際に観測を行っている天文学者たちは、状態方程式の定数の測定を続けることが最も賢明な道だと考えている。なんといっても、現在できるのはこの観測だけであるからだ。Bennettは、「測定は限界まで行うべきだ」と主張する。「驚くべき事実が明らかになるかもしれないし、そうしたことはしばしば起こる」。Perlmutterも、研究を御破算にするためではなく、收拾するために、いくつか結果を出す余地があると考えている。「『私たちは十分やった』とあきらめるにしても、いくつか退屈な結果を得てからにしたいというようなものだ」と彼は話す。

BennettとPerlmutterはさらなる観測に意欲を燃やしており、Bennettは人工衛星を使って銀河の構造を観測する計画を、Perlmutterは遠方の超新星を観測する計画を提案して、米航空宇宙局（NASA）と米国エネルギー省（DOE）がダークエネルギー観測衛星のために検討している予算を獲得しようと争っている。これによりダークエネルギーをめぐる議論をいくらか正確にする程度の知見しか得られなかったとしても、宇宙について多くのことが明らかになるはずである。例えば、宇宙から超新星を観測する衛星があれば、全天の赤外線天体につき正確な観測結果が得られるだろう。スタンフォード大学カブリ粒子宇宙物理学・宇宙論研究所（カリフォルニア州）のRoger Blandford所長は、「こうした装置は特定の目的にしか使えないものではない」という。「あらゆる分野に革命を起こし得るのだ」。

ダークエネルギーの解明につながる待望の新しい手がかりがほかの研究分野から

得られる可能性は常にある。2008年になって、スイスのジュネーブ近郊にある欧州原子核共同研究機関（CERN）のラージハドロンコライダー（ハドロン衝突型加速器）がデータを取り始めたら、時空の本質に関する発見があるかもしれない。これはダークエネルギー問題にもかかわってくる。「ひょっとすると、宇宙よりも加速器のほうが、多くのことを教えてくれるかもしれない」とKraussは話す。同様に、基本定数の測定や短距離での重力の測定が、ダークエネルギー問題と予想外の関係をもっている可能性がある。さらに、ある種のダークマター粒子の検出もダークエネルギー問題の解決に役立つかもしれない。

10年前にダークエネルギーの証拠が発見されたときに期待された革命は、いまだに実現していない。研究者たちは宇宙の膨張が加速していることへの確信を深めたものの、その物理的な意味については1998年当時と同じぐらいわかっていない。「今は2つの可能性がある。ダークエネルギーが真空のエネルギーである可能性と、ほかの何かである可能性だ」とCarrollは話す。観測を行っている天文学者たちはもう少し楽観的だ。「この研究は始まったばかりの段階にあるのだと私は思う」とPerlmutterはいう。とはいえ、状態方程式の定数が-1から外れる結果が得られなかった場合、何かが明らかになる可能性は低いだろうということはPerlmutterも認めている。「獲物の気配がなかったら、狩りをするのはむずかしい」。

今、この分野の多くの研究者が不安を感じている。彼らはかつて、あと少しですばらしい手がかりが得られると思っていたが、探求の過程で、いつしか腹立たしい謎に変わってしまった。Susskindは、「宇宙の4分の3を占めている可能性のあるものについて明確な説明ができないという状況で、自分たちの宇宙像には大きな欠落があると考えずにいることはむずかしい。私たちの宇宙像は、今後1000年にわたって間違っただけであるのかもしれない。大きく間違っただけで……」と話した。 ■

Geoff Brumfiel は *Nature* のワシントン DC 物理科学担当記者。