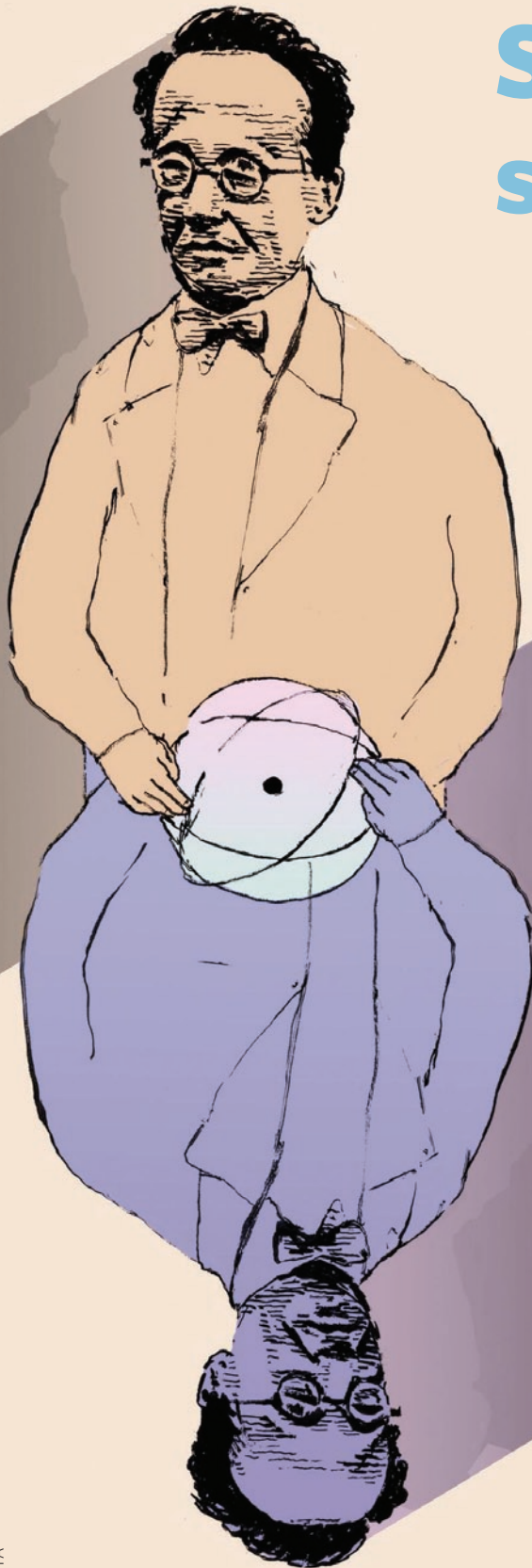


See me here, see me there



50歳を迎えた 多世界解釈

Nature Vol.448 (15-17) / 5 July 2007

50年前、量子力学の標準的な解釈に不満を抱いた1人の物理学専攻の大学院生が、まったく新しい解釈を考え出した。彼の解釈をめぐる起きたその後の論争をMark Buchananが報告する。

J KAPUSTA

KAPUSTA

1957年、プリンストン大学の1人の若き物理学者が自身の最初の論文を発表した。その論文はほとんど注目されず、彼は学界から消えていった。その後、軍需産業界でエンジニアやアナリストとして働いた彼は、1982年に51歳で死去した。彼の名はヒュー・エヴェレット。一部の物理学者たちは、エヴェレットが科学になした不滅の貢献は、その少ない論文数からは考えられないほど大きいと主張する。彼の最初の論文は、量子物理学の難問の1つに新しい理解をもたらしたといわれている。

量子論は多くのめざましい成功を収めてきたが、その論理の一貫性に関しては、物理学者たちは常に落ち着かない気持ちでいた。シュレーディンガーの波動方程式などの形で表される量子論によれば、電子などの量子論的粒子は「重ね合わせ」という奇妙な状態になり、さまざまなあり方（例えば2つの場所に同時にあるなど）をする可能性がある。原子のふるまいはこの方程式で説明することができるが、椅子などの通常の物体も量子論的粒子からできている。それならなぜ、私たちは同時に2つの場所にある椅子を見ることがないのだろうか？

この難問への1つの答えは、ニールス・ボーアとヴェルナー・ハイゼンベルクが1920年代後半に示した有名なコペンハーゲン解釈だ。コペンハーゲン解釈によると、私たちがこうした奇妙な状態を見ることのないのは、重ね合わせの状態を観測しようとした途端にこの状態が収縮してしまう（重ね合わせのない特定の状態へとつぶれてしまう）からであるという。エヴェレットは、これとは大きく異なる大胆な答えを提案した。重ね合わせは私たちの世界に実際に影響を及ぼしているが、私たちはそれに気づかないというのである。彼によると、量子論の数学的表現は、物体がここにある状態とあそこにある状態の重ね合わせに遭遇した私たち自身もその重ね合わせに引き込まれて、物体をここに見る私たちと、あそ

こに見る私たちに分裂することを示唆しているという。後にある物理学者がまとめたように、エヴェレットは、量子物理学は並行して共存する「多数の世界」へと絶え間なく分裂する宇宙を示していると説明したのである。

この考えはあまりに突飛であるとして退けられ、それ以来、多くの代案が提案されてきた。実験で検証することは期待できない。批判的な人々は、実験だけでは多世界解釈と一部の代案を区別することができないという。コロンビア大学（ニューヨーク市）の物理学者で哲学者のDavid Albertは、「量子論の正しさが実験によって証明され続けることになれば、私たちはとてもむずかしい立場に追い込まれるだろう。どの理論を採用するかを、証拠以外のものによって決めなければならなくなるからだ」と話す。しかし、多世界解釈の支持者たちは、実際には実験は多世界解釈を支持しているのだと主張する。コペンハーゲン解釈が必要とする不可解な「収縮」の証拠を、いつまでも見つけられないままなのだから。

今年、カナダと英国で2つの会議が開催されて、数十人の選り抜きの物理学者、哲学者、数学者が、発表から50年を迎えたエヴェレットの解釈の現状を検討することになっている。英国の会議の共同開催者であるオックスフォード大学の科学哲学者Simon Saundersは、「この解釈に対する主要な賛成意見と反対意見を集め、裁定を下すことが会議の目的だ。解釈そのものの是非を判断することができなかったとしても、どのような長所と短所があるのかを詳細に判断することならできるはずだ」と話す。

手に負えないもの

20世紀の初めに量子論が原子物理学や核物理学の説明に不可欠なものになって以来、量子論の解釈（および、私たちはなぜ重ね合わせを経験しないのかという謎）は物理学者たちを悩ませ続けてきた。ボーアや量子論の初期にその解釈を試み

た物理学者たちは、世界を古典的な部分と量子論的な部分に分け、量子論は後者のみに適用されると考えることで、単純にこの難問を回避していた。彼らの考えによると、電子などの量子論的粒子は波動力学に従うが、観測装置などの古典的な物体と相互作用した途端、すべての重ね合わせ状態が収縮し、1つの結果のみが残ることになる。ボーアは、量子論的相互作用は本質的に制御不可能なものであり、実際の測定結果が予測できないのはそのためであると指摘した。

ハンガリー生まれの数学者ジョン・フォン・ノイマンは1930年代に、こうした考えを「収縮公理」として定式化した。これは後に量子力学の標準的規則の1つになった。この公理を使うと、「測定」が行われたときにさまざまな結果が得られる確率を信じられないほど正確に計算することができる。けれども量子論は、収縮がいつ、なぜ起こるのかをまだ詳細に説明していない。量子論は大きな成功を収めているにもかかわらず、不完全であるように見えた。ロスアラモス国立研究所（米国ニューメキシコ州）の物理学者Wojciech Zurekは、「教科書を見ればわかるように、量子論の公理には一貫性がない」と話す。

分裂した世界に橋をかける

アルバート・アインシュタインら多くの物理学者にとって、古典的世界と量子論的世界を分けるというボーアのやり方は、物理学の世界観に恣意的な分割を導入することにほかならず、とうてい受け入れられるものではなかった。古典的な測定装置も量子論的粒子からできているのだから、量子論は測定装置にも適用できるはずだ。以来、こうした全体性を回復することが量子論の理論研究者の目標となっている。

理論研究者たちは1950年代から首尾一貫した量子論を作ろうと試みてきた。その1人である米国の物理学者ディビッド・ボームは、いわゆる「隠れた変数」

解釈を提案した。この理論では、量子論的粒子は常に固有の位置と速度をもつとされ、収縮を必要としない。しかし、その数学的構造は独特であり、隠れた変数を実験的に測定することも明らかに不可能であるため、これに魅力を感じる物理学者は少なかった。

一方で、この20年間にさまざまな研究者が、事実上ボーアの解釈を支持しつつ、それを特殊にした解釈を提案してきた。こうした理論家たちは、シュレーディンガー方程式を修正して重ね合わせの状態が自然に収縮するようにし、(ここが重要な点なのだが)古典的な物体ではこの収縮が非常に速く起こるようにすることで、古典的な物体の重ね合わせの状態を見ることがない理由をより正確に説明できると主張する。彼らは、数学的に一貫した方法で収縮に対応するものをシュレーディンガー方程式にもち込むことで、収縮公理を不要にする。

エヴェレットの解釈は、これとも違っている。彼は単純に、収縮などというものではなく、宇宙のすべては常にシュレーディンガー方程式の波動力学に従っていると主張した。私たちは収縮のような現象を目にするように思われるかもしれないが、それは私たちも量子世界の一部であって、枝分かれしていく重ね合わせに引き込まれるからにすぎないという。量

子論をあるがままに受け止めよ、そうすれば独自の実在の解釈が与えられる、とエヴェレットは主張した。それが、宇宙が多数の並行世界に分かれていくという彼の解釈なのである。

オックスフォード大学の理論研究者 David Deutsch は、「この解釈では、私たちの宇宙はより大きな多元的宇宙のちっぽけな一面にすぎないことになる。多元的宇宙自体は高度な構造もっていて、多数の宇宙を含んでいる。私たちの宇宙に存在するすべてのもの、あなたや私、あらゆる原子、あらゆる銀河に相当するものが、こうしたほかの宇宙にも存在しているのだ」と説明する。

この3つの解釈はそれぞれ支持者をもっているが、エヴェレットの解釈を支持する物理学者が増えているようである。特に、量子情報と宇宙論を専門とする物理学者に支持者が多い。「こうした研究分野では、量子論を論理的限界まで適用していくことは理にかなっているという考え方が支配的だ。そうしてもよいということを知ってくれたのがエヴェレットなのだ」と Zurek は話す。

神出鬼没の粒子

エヴェレットの解釈は人気を獲得しつつある。これには、量子論の理論研究者たちが初期の問題（これらはいく最近まで

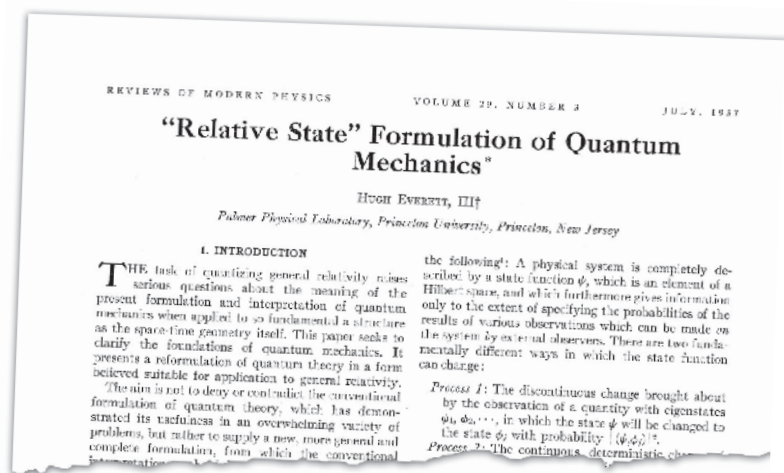
致命的な問題と考えられていた)をいくらか解決できたことも関係しているはずである。1つの問題は、エヴェレットの解釈では世界が多数の枝に分かれるとされているが、理論からは、この分岐の仕方が明確には与えられないことである。例えば、標準的な量子論では、曖昧な状態にある電子は、明確な位置をもつ多数の状態の重ね合わせと見ることもできるし、位置はいまいだが明確な速度を持つ状態の重ね合わせと見ることもできる。どちらの描像がより正確ということはない。同様に、エヴェレットの理論も、共存して重ね合わせを構成している枝を明確に特定する方法を与えるものではないのである。

本当は何が起きているのか？

デコヒーレンス理論という考え方は、1970年代にドイツのハイデルベルク大学の物理学者 Dieter Zeh によって提唱され、その後、Zurek によって発展させられたものである。この理論によると、量子系は環境と相互作用するため、長時間にわたり重ね合わせの状態にとどまることはなく、「干渉性を消失」(デコヒーレンス)する傾向にあるという。つまり、量子系は環境との相互作用により重ね合わせの状態が収縮するように見えるが、これは、量子系が周囲の環境と「もつれ



ヒュー・エヴェレット(右)は1957年の論文でニールス・ボーア(左)の量子物理学の解釈に異を唱えた。



て」しまって、実験で重ね合わせの状態を検出することが事実上不可能になっているにすぎないというのである。これは特に多数の粒子を含む系で顕著である。

多くの物理学者たちが、多世界解釈とデコヒーレンスを組み合わせると魅力的な理論になると提案している。これは、デコヒーレンスが古典的物体のごく普通の状態を、より強固な（したがって、観測可能な）ものとして選び出すからである。この考え方を支持する実験結果も得られており、多世界解釈の曖昧さを大幅に取り除くように見える。

エヴェレットの解釈は、量子物理学の基盤の1つである確率をめぐる問題も抱えている。収縮公理を使えば、波動関数の絶対値から電子の位置や速度の確率を計算することができる。しかし、量子系は収縮することなく発展すると主張する多世界解釈は、確率については何もいわない。カナダのウエスタンオンタリオ大学の物理哲学者Wayne Myrvoldは、「エヴェレットの解釈では、確率をもち込む余地がないように見える」という。

しかし、Deutschとオックスフォード大学の物理哲学者David Wallaceによる最近の研究は、ヒトやその他の生物の脳が環境の変化を記録する仕組みを考慮することで、多世界解釈に確率をもち込むことができるとしている。

DeutschとWallaceは、枝分かれする多世界宇宙に住む人が現実世界で起こることをできるだけ正確に予測しようとしたらどのようにふるまうかを、意思決定理論（最適な意思決定に関する科学）を使って調べた。その結果、彼らが新しい枝に入って新しい出来事に直面したときには、その枝に確率を割り当てざるを得なくなり、その確率は収縮公理で用いられるのとまったく同じものになるだろうという結論に達した。

この結論にだれもが納得しているわけではないが、DeutschとWallaceはエヴェレットの理論から自然に量子論の確率が現れてくることを示してみせた、と評価

する物理学者もいる。Myrvoldも、「私はそれが理にかなっていると確信しているわけではないが、大きな進歩があったと思う。この理論は、私が以前思っていたほど怪しいものではない」と話す。

実験によりわかること

エヴェレットの支持者たちは、ますます高度になっている現代の実験が、例外なく量子論の予言の正しさを証明し続けていることも引き合いに出す。たしかに、原子トラッピングや量子光学の技術を使うことで、より多くの粒子を含む系での量子的な重ね合わせが観察できるようになっており、これはエヴェレットの理論が予測しているとおりである。英国のヨーク大学の数学者Tony Sudberyは、「多世界解釈は徐々に、物理学者の多数が好む解釈になろうとしている。ますます大きな系につき、収縮のきざしなしに量子論がうまくいっていることが確認されていることも、その一因になっている」と話す。

けれどもAlbertは、こうした実験結果が多世界解釈を裏付けていると考えるのは、願望が目くらんでいと指摘する。なぜなら、量子力学の正しさを証明するすべての実験は、多世界解釈だけでなく、ボームの隠れた変数の理論などとも矛盾しないからである。実験で波動関数の収縮が観測されればエヴェレットの解釈を否定することになるだろうが、収縮を観測できなかった場合は、重ね合わせを制御して実験を行うことのむずかしさを反映しているだけの可能性がある。

物理学者たちは、将来はシュレーディンガー方程式を修正した理論の一部を実験的に検証できるようになり、波動関数の収縮という概念の是非をより直接的に確認できるようになるだろうと考えている。「残念ながら、現時点の実験は、これにはほど遠いレベルにあります」とAlbertはいう。現時点で重ね合わせ実験に成功している系は、約1000個の粒子を含むものが最大である。けれども一部の研究者は、巨視的な系（ 10^6 個の粒子

を含むウイルスなど）で重ね合わせの収縮を確認する大胆な実験を計画している。

量子論と向かい合うために

今年の2つの会議ではこうした状況をふまえて、「多世界解釈を証明するにはどのような実験を行えばよいか?」、「理論家は、ほんとうに多世界解釈のすべての穴を埋められたのか?」などの議論が行われることになる。いずれの会議もエヴェレットの支持者たちが計画したもののだが、多くの研究者はまだその概念に大きな疑問をもっているため、一方的な会議にはならないだろう。オックスフォード大学の物理学者Roger Penroseは、「多世界解釈を受け入れるにしても、私たちがこの世界で起きていると知覚する物理過程について説明するためには、意識の理論が必要だ」と主張する。それがない多世界解釈は本末転倒であると彼はいう。

多世界解釈についてはあまり乗り気でないものの、最近の理論研究の進展を評価しているAlbertも、「私自身は、最終的には多世界解釈はうまくいかないだろうとみている。しかし、理論のどこが引っかかり、どこが問題なのかがはっきりと理解されるようにはなっていない」という。

エヴェレットを支持するSaundersらは、多世界解釈への反対は、口に出さずかき出さないかはさておき、その直観に反する結果への本能的な嫌悪に根ざしていることが多いという。「エヴェレットの解釈に基づく量子論は奇想天外すぎて、大多数の物理学者は真剣に受け止めることができないのだ」とSaundersは話す。しかし、多世界解釈に取り組むにしても、ほかの解釈に取り組むにしても、彼らがエヴェレットの学位論文の「量子論をあるがままに真剣に受け止めよ」という核心部分に敬意を払っていることはたしかである。 ■

Mark Buchanan はヨーロッパのサイエンスライター。彼の最新の著書は『ザ・ソーシャル・アトム（社会の原子）』。