

## 第1章　これがショックじゃないなら、君はわかっていないのだ

テレビドラマシリーズ『スタートレック』と、そのスピンオフ作品は、宇宙船エンタープライズ号が銀河間空間を旅する物語だ。その五年にわたる宇宙探検ミッションの目的は、前人未踏の遠方に行くことだった。エンタープライズの乗組員たちは、遠い未来には存在するかもしれない想像上の技術を使って、光の何倍も速いワープスピードで移動し、「亜空間通信」を使って、何パーセク（「パーセクは約三〇兆キロメートル」）も離れた場所から宇宙艦隊司令部と連絡をとり、接近してくる宇宙船や新しい惑星の表面を「スキャン」し、ときには光子魚雷で敵軍の攻撃から身を守る。なかでもいちばん高度で新しいのは、乗組員が自分を粒子レベルに分解し、ビームに乗せて「転送」する技術だ。これを使って、彼らは見たこともない世界の表面に降り立ち、不思議な景色のなかを調査して回ったり、よその星の文明——より高度なことも、そうでないこともある——の指導者と直接話し合ったりする。

しかし、数あるスタートレックのどの放映回でも、あるいは他のどんなSF長編ドラマでも、私たちが知る限り、一九〇〇年から三〇年にかけて地球上で実際に行われた宇宙調査ほど、奇妙なこ

とは起こったためしがない。二〇世紀初頭の「科学の時代」に物理学者たちが探検したフィールドは、エンタープライズ号が行ったところに負けず劣らずすごかった。だがそれは、銀河間空間を数十億光年進むというような、尺度の大きいほうの極限をいく話ではなかった。それは、宇宙のすべてをつくり上げている最も小さな物体の姿が現れてくる、誰も探ったことのなかった未知の宇宙、一センチの何十億分の一の、また何十億分の一という深い世界——すなわち、尺度の小さいほうの極限——を追究する旅だったのだ。

一九世紀から二〇世紀への変わり目、技術の進歩と科学の高度化のおかげで、探検者たる物理学者たちは、まったく新しい驚異的な異文明領域とも言える、原子の世界に初めて足を踏み入れた。そこで彼らが出合ったものは、想像を超えているが実在する、超現実シュレールなものだった。まるで、当時の美術、音楽、文学が——ピカソの目、シェーンベルクの耳、そしてカフカのペンが——、自然の奥底に存在する、摩訶不思議で奇怪で、それまで誰も知らなかった新しい世界を解明しようとする物理学者たちとタッグを組んでいるかのようだった。物理学は、それまでの三〇〇年をかけて、さまざまな法則を見いだし、精緻化を進めて構築されてきたにもかかわらず、物理学の体系をなす諸法則に関する、洗練された「古典的な」科学知識のほとんどすべてが、この新しい世界では完全に間違っていることが明らかになったのだ。『スタートレック』に例えるなら、カーク船長とエンタープライズの乗組員たちがある惑星に降り立ったところ、その惑星はウサギの穴に落ちたアリスが見たのと同じくらい異様な自然法則に支配されていた、というのに近いだろう。それは、まったく新しい、一種「夢の論理」のようなものに支配される世界だった。ここに置いた物体が、すぐさまあつちに現れた。なめらかな硬い石の輪郭がみるみるうちにぼやけて、やがて消え去り、何もなくなってしまう。堅固な壁も、何の苦もなくすると通りぬけられた。物体は、空間と時間のな

かでむやみやたらに跳びまわった。

おびただしい数の物質の粒子が、この奇妙な新しい世界のなかで、群れをなしてあちらへ、こちらへと動いていた。科学者たちは注意深く観察し、これらの粒子は、出発点Aから離れたところにある終点Bへと、きっちり定まった時間でみな同時に到達するわけではないことを発見した。運動は、三〇〇年前にガリレオやニュートンが考えたようなものではまったくなかった。<sup>(1)</sup> すべてのもを構成している自然の**基本粒子**——たとえば、あの小さな電子など——は、AからBへ行くのに、複数の可能な経路をすべて同時に、進むかのように見えたのだ！ どの瞬間を見ても、粒子は、どこにも存在しないと同時に、あらゆる場所に存在していた。奇妙なことに粒子たちは、とり得た、つまり自分がとったかもしれないすべての経路を知っていて、しかも実際にどの経路をとったかは知らぬままに、終点に到着していた。科学者たちは、AからBに行くときに通れる経路を一部ふさぐという細工を試みたが、粒子がBに到達する様子は、細工に影響される場合もあれば——たとえば、粒子がとり得る経路（実際にとるかどうかは別として）の一つだけに、少し細工をして変えてやると、粒子はBにますます頻繁に到達するようになったという実験など——、そんなことにはまったく影響されないこともあった。

内部にそれらしい仕掛けも内臓もたない、針の先のように小さな粒子は、検出器にははつきりした経路を示し、蛍光スクリーンに小さな光の点を残し、ガイガーカウンターを「カチッ……カチッ……カチッ、カチッ……カチッ」と鳴らす。だが、このものすごく小さい物質の点は、波であるようにも見える。粒子たちは、波のような雲のような、ぼやけた広がりのある運動を見せ、そこには、湖や海の表面に見られる波のような、山と谷が現れる。そして逆に、電波や光のように波だと思われていたものが、粒子でもあることがわかった。波が粒子になり、粒子が波になったのだ。ど

ちらでもないが、しかし、同時に両方でもある。まるで、当時の急進的な画家や作曲家、小説家が、自然法則をつくっているかのようだった。

要するに、高度に洗練されたさまざまな装置をおして見るようになった二〇世紀初頭の物理学者の目の前で、世界は劇的な変貌を遂げたのだ。今や宇宙は、ルネサンスに始まった三〇〇年にわたる啓蒙主義の時代をおして科学が教えてきたのとは、まったく異なる仕組みで働いているようだった。物理の世界に対する私たちの理解がこれほど大きく変化したことは、自然観そのものが、今や完全に様変わりしたのだと高らかに告げていた。そしてこの革新的な理解はさらに、まったく新しく底の知れない科学——量子力学——を誕生させていくのである。

新しい実験データや理論物理のアイデアと格闘する物理学者たちは、ガリレオやニュートンの古典時代の伝統的な世界でつくり出された言語や比喩を使わざるをえなかったが、それは新しい経験<sub>を</sub>記述するにはどうにも不便だった。今や世界を記述するには、「曖昧な」「不確定な」「薄気味悪い遠隔作用」などの言葉が必要になったようだった。まるで、幽霊がうろちよろしては実験の結果に影響を及ぼしているかのよう<sub>に</sub>。

波がときとして粒子であり、粒子がときとして波であるなどということがどうして起こるのかを、辻褄を合わせてうまく説明するために、**粒子と波の二重性**という概念が登場した。しかし、科学者たちの混乱は治まらなかつた。量子物理のもたらした影響はあまりに摩訶不思議であり、おそらく正気を保つためであろう、量子力学のバイオニアたちは、自分たちが記述しているのが広大な新世界であることを否定せずにはいられなかつた。代わりに彼らは、「自分たちは、起こり得る実験の結果を予想する新しい方法を編み出しただけであつて、それ以上ではないのだ」と、まるで他人ごとのように主張するほうを選んだのだつた。

## 前もって少し量子力学を見ておこう

量子時代以前、科学者たちは、原因と結果について述べるとき、そして、加えられたさまざまな力に応答して、物体が明確に定義された経路に沿って進む様子を正確に述べるとき、曖昧なところなど少しもなしに明言することができた。だが、遠い昔から一九世紀の終わりまで発展してきた古典的な科学が対象にしてきたのは、膨大な数の原子の集合ばかりだった。たとえば、一粒の砂にしても、一兆の数百万倍ほどの原子が含まれている。

量子時代以前の観察者たちは、例えてみれば、はるか彼方から人間の大群を調べている、文明をもった異星人のようなものだった。そのような地球外文明から地球を見ても、数千人、数万人、もしくはそれ以上の群集しか観察できない。彼らは、パレードで行進している人間たち、拍手喝采している聴衆、職場へ、あるいは四方八方へと急ぐ通行人たち、こんな状態の人間を観察したことになる。しかし、もつと接近して、個々の人間のふるまいが見えるようになったときに何が見いだされるか、実際にそういう状況になる前に、彼らに心構えさせてくれるものは何もなかっただろう。接近して見たとき、人間たちのふるまいには、ユーモア、愛、思いやり、そして獨創性が表れているのがわかるはずだが、そんな微妙な特徴は、遠方から群集としての人間が示すふるまいだけを観察してきた者には、まったく予期せぬものだろう。その異星人が昆虫やオートマトン（入力された情報に対して、内部の状況に応じた処理をした結果を出力する自動機械）だったとしたら、今はじめてクローズアップして観察することができた人間の行動の特徴を記述するために、即座に使える言葉すらもっていないはずだ——実のところ、人類が今日まで蓄積してきた詩や文学（たとえば古代ギリシャ

の悲劇詩人アイスキュロスから現代アメリカの作家トマス・ピンチオンに至るまで)にしても、個々の人間の経験をすべて網羅してはいない。

これと似たような状況で、二〇世紀の幕開け、膨大な数の原子に満たされた物体のふるまいを正確に予測してきた、物理学という厳格たることを身上とする荘嚴な建物は、倒れて粉々に砕けた。新たに精緻化され洗練された実験をとおして、個々の原子の性質のみならず、原子のなかに存在しているもっと小さな粒子の性質までもが表舞台に登場してきて、ソロで、デュエットで、トリオで、あるいは大勢でパフォーマンズをするのが見られるようになった。古典世界から目覚めつつあった第一級の科学者らにとって、新たに観察された個々の原子のふるまいはショックングなものだった。彼ら新世界の探検者、原子時代の近代物理学のアバンギャルドな「詩人、画家、作曲家」たちは、ハインリヒ・ヘルツ、アーネスト・ラザフォード、J・J・トムソン、ニールス・ボーア、マリール・キュリー、ヴェルナー・ハイゼンベルク、エルヴィン・シュレーディンガー、ポール・ディラック、ルイ・ヴィクトル・ド・ブロイ、アルベルト・アインシュタイン、マックス・ボルン、マックス・プランク、ヴォルフガング・パウリらであった。彼らが原子の内部に見いだしたものに感じたショックは、宇宙船エンタープライズ号の乗組員が、広大な宇宙のなかで異星人の文明に出合ったときに感じただろうショックに近いものであったと言えよう。最初のデータに面食らって混乱したものの、やがて科学者たちは、この新世界に秩序と論理を復活させるべく必死の努力を始めた。一九二〇年代の終わりになって、化学と日常のありきたりな出来事すべてを定義する、原子の性質についての基本的な論理がついに構築された。人間は、この奇妙極まりない量子の新世界を理解しはじめたのだ。

『スタートレック』の探検者なら、転送ビームを使って、そこそこ安心な場所になんとか戻ってく

ることができるかもしれない。しかし、一九〇〇年代初頭の物理学者には、帰るべき安心な場所などなかった。彼らは、原子を支配する奇妙奇天烈な新しい量子の法則が、すべてのものにとって一番の基礎をなす根本的なものであることを知っていた——宇宙のどこであろうとも。私たちはみな原子でできているのだから、原子の領域のありさまが意味する異様な真実から逃れることなどできない。異星人の世界を見てしまったと思ったら、それは私たちの世界だったのだ！

新しい量子の世界で行われたさまざまな発見が指し示したショックな意味に、その発見者たる当の科学者たちは狼狽した。政治的な革命にも似て、量子論は、その初期のリーダーの多くを消耗させた。彼らが最も忌み嫌ったのは、他人の政治的陰謀や策略ではなく、世界のありさまに関する、人を落ち着かなくさせるような深い哲学的な問題であった。一九二〇年代が終わるころ、この物理概念の革命が意味するものがどんなに大きな影響を及ぼすかという全貌がわかりはじめると、アルベルト・アインシュタインのような大物まで含めて、量子論の創始者の多くが、自らがその創生に大いに貢献したはずのこの理論を非難し、拒否するようになった。しかし、二一世紀に突入した今、量子力学はさまざまな状況に应用され、そのすべてにおいて実際に役目を果たしているのである——トランジスタ、レーザー、原子力、そのほか数え切れない発明や洞察を私たちにもたらしてくれている。傑出した物理学者たちが、量子論を理解するもつと親しみやすくわかりやすい方法を探そうと奮闘している。人間の直感が心地よく感じる範囲をなるべく逸脱しないやり方を見つけようと試みている。だが私たちは、鎮静剤を求めるのはやめて、そろそろ正面から科学に向き合うまっとうな態度に戻るべきだろう。

量子論が登場する前に主流だった科学は、巨視的な物体の世界を見事に説明し切っていた。壁に立てかけられて安定している梯子、矢や弾丸の飛行、惑星や、風変わりな軌道を進む彗星の自転や

公転、しかるべく機能する便利な蒸気機関、電信、電気モーターと発電機、ラジオ放送。要するに、一九〇〇年までに科学者たちが容易に観察し、測定できたほとんどすべての現象が、古典物理学でうまく説明できたのだ。ところが、原子サイズの物体の摩擦不思議なふるまいを説明しようとする試みは、途方もなく困難で、冷静ではいられないほどだった。新たに生まれた量子論は、完全に直感に反するものだった。

直感とは、それまでの経験に基づいたものだ。この意味においては、以前の古典物理学にしても、それが発見された当時の人々にとっては直感とは相容れないものであった。ガリレオが到達した、摩擦がない状態での物体の運動に関する洞察は、当時の人々にとって、直感的にはどうにも受け入れにくいものだった。摩擦のない世界など、ほとんどの人が経験したことも考えたこともなかったのだから。だが、ガリレオから始まった古典物理学は、私たちが直感と感ずるもの自体を変えた。その後三〇〇年間、一九〇〇年に至るまで共有されることになったこの新しい直感には、これ以上の極端な変化は起こりそうになかった——量子物理学の発見によって、まったく新しいレベルで直感に反する衝撃、私たちの現実世界の捉え方を揺るがしかねない衝撃がもたらされるまでは。

一九〇〇年から三〇〇年にかけて、一見自己矛盾としか思えないさまざまな現象が世界各地の実験室から報告されるようになったが、そうした現象を総合的にとらえ、原子というものを理解するには、旧来の姿勢や、慣習となった思考の枠組みを根本から変えなければならなかった。それまで大きな尺度では出来事を明確に予測してきた物理の方程式が、今や「こうなるかもしれない」という可能性しか提供してくれなくなった。それも、どの可能性についても、**確率**——ある一つの出来事に対して、それが実際に起こる確からしさ——しか計算できなくなってしまったのだ。ニュートンの絶対的に正確で確実な方程式（**古典的決定論**）は、曖昧さ、不確定性、そして、確率を主役とす

るシュレーディンガーの方程式とハイゼンベルクの数学とに比べて代わられたのだった。

さて、この不確定性というものは、自然界において原子のレベルでどんなふうに見えているのだろうか？ いろいろな場面に現れているが、ここでは単純な例を一つ挙げよう。実験室にウランなどの放射性原子の塊があったとすると、半減期と呼ばれる時間が経つと、もともとあった原子の半数が消えてしまう（このことを物理学者は「原子が、他の原子や原子の構成要素へと崩壊する」と言う）。半減期に等しい時間がもう一度経過すると、残った原子はまた半数にまで減る（だから、半減期が二度経過すると、放射性原子は、もともとあった数の四分の一になり、半減期が三度経過すると、もともとの数の八分の一になる、というふうには、数がどんどん減っていく）。量子力学を使い、きちんと計算すれば、原理的にはウラン原子の半減期を求めることは可能だ。同じように、他の元素や核子などの基本的な粒子についても半減期を計算することができ、おかげで素粒子物理学者は職に就いて給料をもらえるというわけだ。しかし量子力学は、どれか一つのウラン原子に注目したとき、それがいつ消えるかを予測することはできないのである。

この結論は、ちよつと嫌な感じがする。ウラン原子が実際にニュートンの古典論的な物理法則に支配されていたなら、ウラン原子のなかで働いている何らかのメカニズムがあつて、それを十分詳しく研究しさえすれば、あるウラン原子がいつ崩壊するかを正確に予測することができるはずだ。だが、量子の法則は、そういう内部メカニズムを把握できていないがために、曖昧な確率の結果しか与えてくれないというわけではない。そうではなくて、ある一つの原子の崩壊について知ることができるのは確率だけだと量子論は断言しているのである。

世界に見られる量子論的状况の例をもう一つ考えてみよう。二つのまったく同じ光子（光をつくり上げていく粒子）を、まったく同じ方法で一枚のガラス窓にぶつけると、どちらの光子も、ガラ

スを通り抜けるか、あるいはガラスから反射するか、どちらかのふるまいをする。新しく登場した量子力学は、それぞれの光子が反射するか通過するのかどちらなのかを、正確に予測することはできない。私たちは、原理的にすら、ある一個の光子の未来を予測することはできないのだ。さまざまな可能性の確率を計算することしかできないのである。量子力学を使って、「どちらの光子も、ガラスから反射する確率は10パーセントで、ガラスを通過する確率は90パーセントだ」と計算することはできる。だが、それだけだ。しかしながら、一見あいまいで不正確としか思えない量子力学が、物事の仕組みを理解するための正しい手段——実のところ、唯一の正しい手段——を提供してくれる。また量子力学は、原子の構造やふるまい、分子の形成、そして放射の発生（私たちが感じる光はすべて原子から放射される）を理解する唯一の方法を提供する。のちに量子力学が成熟してくると、原子核に関して、なぜクォークは陽子や中性子の内部に閉じ込められて永遠に出てこないのか、そして太陽はどうやってものすごい量のエネルギーを生み出しているのかについても、同じく実にうまく説明できることも明らかにするのである。

では、原子の説明には見事に失敗したガリレオやニュートンの古典物理学が、日食がいつ起きるかや、ハレー彗星が次に戻ってくるのは二〇六一年だということや、宇宙船が進む正確な経路を、これほどまでにエレガントに正しく予測できるのはなぜなのだろう？ 翼が外れてしまうことなく飛行機が飛び続けられることや、橋や高層ビルは風が吹いても崩れず、ロボット手術器具は正確で精密だということを保証しているのはニュートン力学だ。量子論が、実のところ世界はこんなふうになり立っているのではないと声を大にして言うのなら、現代社会のインフラがニュートン力学に支えられているなどということが、どうしてあり得るのだろうか？

それは、膨大な数の原子が集まって大きな物体をつくるとき——これすなわち、先に挙げた飛行

機の翼や橋、そしてロボット器具などの例すべてで起こっていることである——、偶然と不確定性に満ちた、直感に反する量子力学的なふるまいは平均化されて消えてしまい、古典的ニュートン物理学に従って、ちゃんと正確に予測できるという状況が現れるのだ。一言で言えば、それは統計的効果だ。平均的なアメリカの家庭一世帯は二・六三七人だという、統計的に正確な文章とちよつと似ている。この文章はいたって正確だが、二・六三七人からなる家庭などどこにもない。

二一世紀の現代社会では、量子物理が原子や素粒子の研究のみならず、材料科学の研究や宇宙研究でも不可欠になっている。アメリカでは、量子論の成果をエレクトロニクスやその他の分野で利用することによって毎年数兆ドルが生み出され、また、量子世界を理解したことによって実現された生産性の向上のおかげでさらに数兆ドルが生み出されている。だが、一部の独自路線を行く者たち——実存主義の哲学者に応援された物理学者——は、今なお量子論を定義する基本概念を研究して、まだ見落とされたままになっている、より深く厳密な理論が量子論の内部に存在するのではないかと期待しつつ、すべてをつじつまが合うように説明しようとしている。しかし、彼らはあくまで少数派でしかない。

どうして量子論は心にしっくりこないのだろうか？

よく知られているように、アルベルト・アインシュタインはこんなふうと言った。「君はサイコロ遊びをする神を信じているが、私は、客観性が存在する世界の完璧な法則と秩序を信じており、想像力をとことんたくましくしてそれを捉えようとしているのだ……。量子論が最初に大成功を収めたからといって、世界の根底にサイコロ遊びがあるなどは、私には絶対に信じられない。君の

若い同僚たちが、私のこの態度を老人ばけのせいだと考えていることは重々承知しているがね<sup>③</sup>。そしてエルヴィン・シュレーディンガーはこう嘆いた。「私の波動方程式がこのように使われることがわかっていたらなら、発表する前に論文を燃やしていただろう……。こんな方程式など大嫌いだし、自分がそれと関わったことが悔やまれる<sup>④</sup>」。いったい何が気にいらなくて、彼らのような優れた物理学者たちは、自分たちが生み出した愛すべき理論からそっぽを向いてしまったのだろうか？ 彼らの不満は、「量子論では、『神は宇宙を相手にサイコロ遊びをしている』ことになってしまっている」という表現でまとめられることが多いが、その背景についてじっくり考えてみよう。

新しい量子論をもたらした飛躍的進歩<sup>⑤</sup>は、一九二五年、若きドイツ人ヴェルナー・ハイゼンベルクが、重い花粉症から解放されたくて、北海に浮かぶ小さなヘルゴラント島で一人ぼっちの休暇を過ごし、見事なアイデアを思いついたときにはじまったのだった。

そのころ科学者たちのあいだで、原子は、中心部にある密度の高い核と、その周りを太陽を周回する惑星のように回る電子とでできているという仮説が次第に支持を集めつつあった。しかし、ハイゼンベルクは原子内部の電子のふるまいについてじっくり考えた結果、電子が原子核の周りでどんな軌道を進んでいるのかという正確な知識は必要ないのだと気づいた。電子は、一つの軌道から別の軌道へと不思議なジャンプをしているようで、その際、極めて正確に決まった色の光が必ず放出されていた。ハイゼンベルクは、この現象を数学的に説明することに成功したが、そうするのに「さっつちり決まった軌道を電子が周回している小さな太陽系」という原子のイメージを使う必要はまったくなかったのである。そしてついに彼は、電子が点Aで放出され点Bで検出されたとき、電子がAからBのあいだをどんな経路に沿って移動したのかを計算すること自体あきらめてしまう。さらには、AとBのあいだで何らかの測定を行えば、理論的にとり得るあらゆる経路に影響を及ぼ

してしまうことにも気づいた。ハイゼンベルクは、原子からの光の放出について、正確な結果を提示できる理論を構築したが、その理論では、電子がどんな経路をとるかとはまったく知らなくても正しい結果が得られたのである。突き詰めていくと、存在するのは、出来事が起こる可能性とその確率だけだと彼は見抜いた。しかもその確率には、常に不確定性が本質的に伴っているのだ。これが当時新たに登場しつつあった、量子物理学の現実<sup>リアリティ</sup>だったのだ。

ハイゼンベルクの革命的な解決策は、原子物理学で出てきた、さまざまな摩訶不思議な実験結果を説明することができ、そのおかげで、彼と同じ方向に先に進みはじめていたニールス・ボーアは、自身の急進的な思考を全面的に展開することができた。ボーアこそ、量子論の父であり、祖父であり、また助産師であった。ボーアはハイゼンベルクの大胆な考え方をさらに一歩前進させた——あまりに大きな一歩だったので、ハイゼンベルクさえもがショックを受けたほどだ。しかし、ついにそのショックから立ち直ったハイゼンベルクは、すでに名を上げた年上の同僚たちとは違い、新しいアイデアを推進するボーアの熱意に同調した。

ボーアの主張はこうだ。電子がどの経路をとるかという知識が、原子のふるまいを決定するのに何の意味ももたないなら、恒星を周回する惑星の軌道のように明確に定義された電子の軌道というものは、概念として意味をなさず、したがって放棄されねばならない。最終的に状況を決定するのは、観察と測定である。測定という行為そのものが、系がとり得るさまざまな可能性のなかから、一つの可能性を系に選ばせる。言い換えれば、たんに不確かな測定のせいで現実<sup>リアリティ</sup>が見えてしまっているのではなくて、むしろ、原子のレベルの微視的な領域では、現実<sup>リアリティ</sup>を従来<sup>リアリティ</sup>のガリレオ的な意味での確実性を示すものと考えること自体が間違っているということなのだ。

量子物理学では、系の物理状態と、それを観察している何らかの存在の意識とのあいだに、一種不

気味な結びつきがあるように見える。しかし実のところ、無数に存在する可能性の一つに量子系を収束させるのは、測定するという行為なのである。これがいかに薄気味悪いことかは、スリットが二つあるスクリーンに電子を一個ずつ通過させて（電子は二つのスリットのどちらか一方を通過する）、スクリーンから少し離れたところで検出し、多数の電子が通過しおえたときのパターンを観察すれば実感できる。このパターンは、電子がどちらのスリットを通ったかを、誰かが（あるいは何かが）知っているかどうか、つまり、電子がどちらのスリットを通過したかが「測定」されたかどうかで違ってくる。測定が行われていたなら、ある結果が得られるが、測定が行われていなければ、それとはまったく違う結果となる。電子は、気味の悪いことに、誰も（何も）観察していなかったなら、同時に両方の経路をとるのに、誰か（または何か）が観察していたなら、片方の経路だけをとり。このようにふるまう電子は、粒子でもなければ波でもない——その両方であると同時に、どちらでもない——何か新しいものだ。それらは量子状態と呼ばれるものなのである。<sup>6</sup>

原子を探る科学の形成期に立ち会った物理学者の多くが、これらの奇妙な現象を受け入れられなかったのはそれほど不思議ではない。量子の現実に対するハイゼンベルクとボーアの解釈（いわゆるコペンハーゲン解釈）を一番わかりやすく説明すると、こういうふうになるだろう——原子の領域にある何かを測定するとき私たちは、その状態そのもののなかに測定装置を入りこませてしまい、ひどく大きな干渉をってしまったているのだ。だが、実際のところ量子物理は、私たちが生まれつきもっている現実の感覚にまったく対応していない。私たちは、量子論と遊び、量子論を検証しながら、それに慣れていくしかない。いろいろな実験を行い、さまざまな状況を表す理論的問題をつくら、それにくらべて徐々に親しむのが唯一の道だろう。そうするなかで、新しい「量子論的直感」を身につけることができるだろう。最初は、まったく直感に反するとしか感じられないにしても。

さて、ハイゼンベルクによるものとはまったく別に、量子力学の大きなブレークスルーがもう一つ、やはり休暇中だった理論物理学者によって一九二五年に成し遂げられた。ただし、ハイゼンベルクとは違い、一人ぼっちの休暇ではなかったようだ。その理論物理学者というのが、ウィーン生まれのエルヴィン・シュレーディンガーだ。彼は友人の数学者にして理論物理学者のヘルマン・ワイルと、科学史上最も有名な協力関係を結んだ。優れた数学者で、相対性理論や電子の相対論的理論の発展に大いに貢献したワイルは数学面でシュレーディンガーを助け、その見返りとしてシュレーディンガーは、ワイルが自分の妻、アニーと枕を交わすことを許した。アニーがこのことをどう思っていたのか、私たちにはわからないが、夫婦関係にこのような実験を行うことは、当時のウィーンの知識人たちのあいだでは珍しくなかった。この取り決めのおかげでシュレーディンガーは、ワイルの数学面での助けのほかに、婚外のさまざまな関係に耽る自由を得たわけで、その一つが量子論における最大級の発見をもたらすことになった（と言ってもいいだろう）。

一九二五年一二月、シュレーディンガーは二週間半の休暇を別荘で過ごすためにスイスアルプスの町アローザへ出かけた。アニーは家に残り、古くからのウィーンの女友達を連れ、他にはフランスの物理学者ルイ・ド・ブロイの論文数編に、真珠を二粒もって行った。左右の耳に一個ずつ真珠を詰め、雑音で気が散らないようにして、ド・ブロイの論文をじっくりと読んだ（そのあいだ女友達が何をしていたのかはわからない）。そしてシュレーディンガーは、**波動力学**を生み出したのだ。

波動力学は、生まれて間もない量子力学を、より単純な数学で理解できる、新しい方法であった——新しい方法ではあったが、当時のほとんどの物理学者にとって極めてなじみ深い波動方程式を使っていたのである。おかげで波動力学は、生まれたばかりの量子物理を、はるかに多くの物理学者に広める一大ブレークスルーとなった。シュレーディンガー**方程式**と呼ばれることも多い、今で

は有名になったシュレーディンガーの波動方程式が量子物理の進歩を加速したのは確かだが、物理学者たちが最終的にたどりついたその解釈があまりに異様だったために、その生みの親は精神的なストレスに苛まれることになった。ちょっと驚いてしまうのだが、シュレーディンガーは後年、自分が発表した研究が思想や哲学を革命的に変えてしまったことを悔やみ、そんな研究など世に出さねばよかつたと嘆くのである。

シュレーディンガーは、電子を（数学的に）波として描いた。それまで硬い小さな球だと思われていた電子は、いくつかの実験では、実際に波のようにふるまう。波の現象は物理学者にとつてなじみ深く、水、光、空気や固体を伝わる音、ラジオ、マイクロ波など、そんな例は数え切れないほどある。当時の物理学者は、これらの現象をどれもよく理解していた。シュレーディンガーは、電子をはじめとする素粒子も、実のところ量子のレベルでは、物質波という新しい波なのだと言張した。これはすこぶる奇妙な主張だったが、同時に、彼の方程式は物理学者にはとても使いやすく、正しい答えがすべてすんなりと出てくるように思われた。シュレーディンガーの波動力学は、物理学のコミュニティーの人々に安らぎを感じさせた。彼らは、登場して間もない量子論という領域を理解しようとする取り組みながら、ハイゼンベルクの理論はあまりに抽象的すぎると感じていたのである。

シュレーディンガー方程式の主役は、波動方程式の解にあたるもの、すなわち、電子の波を記述するもので、ギリシャ文字 $\Psi$ で表される。 $\Psi$ は波動関数と呼ばれ、電子についてわかっていることもしくは、わかり得ることがすべて盛り込まれている。波動方程式を解くと、 $\Psi$ が空間と時間の関数として出てくる。言い換えれば、シュレーディンガーの方程式は、波動関数の値が空間のなかでどのように分布しており、また、時間が経つとどのように変化するかを教えてくれるのである。

シュレーディンガー方程式は水素原子に應用することができ、その結果、水素原子のなかで電子たちがどんなダンスを踊っているのかを厳密に特定することができた。Ψで記述される電子の波は、打楽器のベルやその他の楽器が響くときのパターンと非常によく似た波のパターンで、いわば鳴り響いていたのである。それは、バイオリンやギターの弦をはじいたときと最もよく似ているかもしれない。つまり、解として得られた物質波には明確で観察可能な形と、特定の大きさのエネルギーを対応させることができたのだ。このようにシュレーディンガーの方程式は、原子内の電子の振動のエネルギー準位を正しい値で導き出すことに成功したのだった。実は、水素のエネルギー準位は、シュレーディンガーより前に、ボーアが大雑把な推測によつて極めて正しい値を計算していた（この頃の量子力学を、今では**前期量子論**と呼んでいる）。原子は、特定のエネルギーをもつた光——**光のスペクトル線**——を放出するが、こうした光は、電子が運動の一つの波動状態（たとえばΨ<sub>2</sub>）から、別の波動状態（たとえばΨ<sub>1</sub>）へと「ジャンプする」ときに現れるようだった。

シュレーディンガーの方程式にはこんなすごい威力があるのだと、物理学者たちは知った。Ψの数学的な形式を見れば、そこに波のパターンがあることはすぐにわかった。こうして、量子力学で扱わねばならないすべての系に、波の概念を簡単に適用することができるようになった。それらの系とは、電子を多数含む系、原子全体、分子、内部で電子が動き回っている結晶や金属、原子核内部の陽子や中性子、そして今日では、クォーク（陽子や中性子、そして原子核を構成するさまざまな粒子を形づくっている基本的な構成要素）でできた粒子などである。

シュレーディンガーは、電子は音波や水の波のように純粋な波であつて、粒子としての側面など今後いつさい思い出す必要がない、あるいは、そもそも錯覚でしかなかったのだと考えた。彼の解釈では、Ψは新しい種類の物質波で、それ以外の何物でもなかった。しかしやがて、シュレーディ

ンガー自身によるこの方程式の解釈は間違っていることが明らかに。それでもなお、 $\Psi$ が何らかの波を表しているのだとしたら、それはいったい何の波なのだろう？ また、電子は依然として微小な粒子のようにもふるまい、蛍光スクリーンにぶつかると、針の先で突いたような点を残したが、そんなふるまいが、物質波 $\Psi$ とどんなふうに両立するというのだろうか？

ドイツの物理学者マックス・ボルン（歌手のオリビア・ニュートン・ジョンの祖父）がまもなく、シュレーディンガー方程式のよりよい解釈を思いつき、それが新しい物理学の重要な教義となつて今日にまで至っている。ボルンは、電子に付随する波は**確率波**だと断言したのであつた。<sup>(10)</sup> 実際のボルンの主張はこうだ。 $\Psi$ の数学的な二乗、すなわち $\Psi^2$ は、ある電子を、 $x$ という場所で見いだす確率を表している。 $\Psi^2$ が大きくなる場所や時間では、その電子が見つかる可能性は大きい。一方、 $\Psi^2$ が小さくなる場所や時間では、電子が見つかる可能性は小さい。 $\Psi^2$ の場合には、その可能性はまったくない。これは、ハイゼンベルクのブレークスルーと同様、極めてシヨッキングな考え方だつたが、こちらのシュレーディンガー方程式の捉え方はずっとわかりやすく、誰もが理解できた。そして結局、このボルンの解釈が決定的な見解となつた。

ボルンは、電子がどこにあるのかは正確にはわからない、そして、それを知ることが不可能だと断言したので。ここにあるんじゃない？ そうだな、八五パーセントの確率であるかもしれない。それとも、あそこかな？ そうかもしれないね、一五パーセントの確率でね……。確率を用いた解釈は、実験室で行うどんな実験に対しても、正確に予測できることと、正確には予測できないことを明確に規定した。まったく同じはずの実験を二回やって、まったく違う二つの結果が出てくることもあり得るわけだ。粒子は、古典科学がふつう従っているとされる厳格な因果律に支配されることなく、どこに存在するか、何を行うかの自由を許されているように見える。新しい量子論では、

神は確かに宇宙を相手にサイコロ遊びをなさるのだ。

心情的にはどうにもしっくりこない方向へ進んだこの革命で、自分が大きな役割を担ったことにシュレーディンガーは心を乱してしまったが、これ以上に皮肉なことがあった。ボルンが確率という解釈を思いついたのは、一九一一年に発表された、ある大胆な推測を述べた論文に刺激されたからだったのだが、その論文は、誰であろうアルベルト・アインシュタインが書いたものだったのである。シュレーディンガーとアインシュタインは、その後生涯を通してタッグを組み、量子力学に反対し続けることになる。マックス・プランクもまたそうだった。「コペンハーゲンの連中が提案した確率解釈は、われわれが愛する物理学に対する反逆行爲として、絶対に葬り去らなければならぬ」と彼は述べた。<sup>11</sup>

一九世紀から二〇世紀への変わり目のベルリンを生きた偉大な理論物理学者、マックス・プランクは、新たに生まれてきた量子論の意味に狼狽していた。プランクこそ、この新しい理論の本当の創始者であり、一九世紀のうちに早くも、この新しい科学の概念に対して量子という言葉をつくったのも彼だったことを考えると、この上なく皮肉な展開である。

厳密な因果関係ではなくて、確率が宇宙を支配しているのだと認めることを反逆的だと考える人がいても不思議はない。考えてみてほしい。ごく普通のテニスボールを手にとつて、自分の手元に戻ね返ってくるように、平らなコンクリートの壁に向かって投げ、同じ場所に立ったまま、壁の同じ点に向かつて、同じ強さでラケットでボールを打ち続けてみる。他の条件（風速など）がすべて同じなら、あなたの腕前があるにつれて、ボールはまったく同じように、あなたのとこりに繰り返し跳ね返ってくるはずだ。それは、あなたの腕が疲れ果ててしまうか、ボール（または壁）が磨り減ってしまうまで続くだろう。アンドレ・アガシがウィンブルドンで勝利したのも、カル・リプ