

はじめに

もしそれを自分自身の喜びのためにするのでなければ、全然かれは芸術家ではないのである。

——オスカー・ワイルド『社会主義下の人間の魂』<sup>(1)</sup>

科学者が一般向けの啓蒙書を書く理由は数多くあり、書かない理由もまた数多くある。科学において何より優先されるのは研究だ。科学者はそれによってキャリアを築き、名声を得る。研究以外はすべて貴重な時間の浪費である——少なくとも、他の科学者の評価をしなければならぬ同業者の目には、そう映っている。

しかし、その成果を他人に伝えられないのなら、科学の進歩が何の役に立つのか？ 苦勞して勉強をした者にしかわからない説明をする科学者は、本当に世界を理解しているのか？ 難しいことを学んだはずの人が、たんにその問題の基本原則を受け入れ、独特の計算方法に慣れていただけという例は非常に多い。

実を言えば、自分が本当に理解しているかを確認できるのは、予備知識や偏見のない一般の人々に対して自分の知識を説明するときだけだ。<sup>(2)</sup> だとすれば、科学者が一般読者に向けて本を書くことは、自身の研究にとっても、このうえなく有益と言えるだろう。

付け加えるならば、一般向けの啓蒙書は、科学、文学、芸術——いずれも世界を描写し伝えるもの——の融合をはかるには格好の場所である。もちろん、そうした融合は現実には存在せず、理想的なものでしかない。だが、広く受け入れられることを目的として書かれた本書であれば、その理想を追求する権利があるのではないかと私は思っている。

\*\*

ここで、そうした私の試みを手助けしてくれた人々に感謝を述べておきたい。

芸術の分野では、本書でも作品をいくつか紹介したジャンニ・カラヴァッジオに感謝申し上げる。彼の作品を通じて得た洞察は、私の物理学の理解に少なからぬ影響を与えた。またルディガー・バースにも感謝を捧げる。彼の長年にわたる助力によって、私は物理学に対する考えを深め、そのようにして得た理解を他人に伝えられるようになった。さらに彼は、広める価値のある私の研究成果を見つけてくれた最初の人物でもある。すべての名前は挙げられないが、その他にも多くの人々に堅牢な象牙の塔から抜け出す後押しをしていただいた。

S・フィッシャー・フェアラーク社のヨーク・ボンクス氏からの企画の提案と、その後のアレクサンダー・ルースラー氏のサポートがなければ、本書は生まれなかった。原稿に目を通し、多くの有益な助言をしてくれたジゼル・ペンドー、マリヤム・シャエリ、ハナ・ウイリアムスにも感謝する。また、最高に快適で刺激的な雰囲気をもどるよう提供すればいいのかを熟知しているペンシルベニア州立大学の物理学部に感謝する。物理学部は、私の執筆計画を知らなかったにもかかわらず、当初から一学期間を完全に自由に使えるようにしてくれた。ペン州立大重力・宇宙研究所は、本書の内容に関する多岐の専

門分野にわたる議論と研究を行う機会を私に与えてくれた。同僚たちの高度な専門知識は、私の文章に有形無形に影響を与えている。

最後に、エリザベット・ボジョワルドとシュテファン・ボジョワルドに感謝を捧げる。二人は本書の草稿を丁寧に読み、エジプトの宇宙論をはじめ、いくつかのヒントを与えてくれた。また本書で見られるいくつかの着想は、執筆場所を選んだアイフェル山地のほとりにある保養所の静けさから生まれたものであることも記しておく。

ペンシルベニア州立大学にて

# 1 すべてが始まり

なんじが教えようとする真理が抽象的であればあるほど、なんじは感覚をその真理へと誘惑せねばならぬ。

——フリードリヒ・ニーチェ『善悪の彼岸』<sup>〔1〕</sup>

## 哲学を取り込んでいく科学

科学がこれまで目標としてきたのは、世界を支配する法則の可能な限り完全な理解、つまり我々が見つけ探究する対象のできるだけ明確な記述に他ならない。言い換えれば、真理と考えられるものに対し、主観を排した手段——唯一の有効な手段——を用いて、どこまでも近づいていくことだった。

物理学は前世紀を通じて大きく前進し、一般相対性理論と量子論という主要な理論体系を生み出した。それによって、宇宙そのものといった大きなスケールから、分子や原子、素粒子といった小さなスケールにいたるまでの自然を理解できるようになったのである。多様な現象に対して精緻な記述と深い理解をもたらすこれらの理論は、観測によって驚くほどの精度で検証されてきた。とくにここ一〇年、宇宙の誕生時を研究する初期宇宙論においては、目覚ましい成功が見られる。

日常生活で目にするテクノロジーは別にして、科学が確かに発展していることの紛れもない証拠は、これまで伝統的に哲学の領域とされてきた問題が科学の範疇で扱われ始めてきたことだろう。物理学

者・哲学者であるアブナー・シモニーの造語「実験形而上学」もこうした背景で生まれたものだ。

アリストテレス（前384-322）以降、自然科学における理論は、一般の事象に光を当て、それが起こる理由をさぐることを目的として構築されてきた。一方で哲学は、あらゆる事象の源流にある、最も深い原理または起源を追い求め続けてきた。したがって、科学が物理学の問題と哲学の問題を一つの枠内にまとめられるならば、我々は世界の理解に向けて大きく前進したことになる。

物理学がこうした方向にさらに進んでいけば、現在よりもずっと一般的で広範な関心に応えられるようになるだろう。たとえば、量子論の観点から宇宙を研究する「量子宇宙論」の場合は、宇宙がどのようにして生まれたか、そのときの様子はどのようなものだったか、という疑問に答えを出せるかもしれない。これらの疑問は、おそらく哲学が誕生する以前から人類が夢中になっていたものだ。

### 理論の限界

何世紀にもわたり思想家たちを虜にし、今日もまだ依然として重要性を失っていない問題は他にもある。本書の中心的なトピックである一般相対論と量子論について言えば、たとえば、世界における観測者の役割は何か、結局のところ何が観測可能で何がそうでないのか、といったものが挙げられるだろう（観測者の問題については2章で触れる）。

一般相対論と量子論は、宇宙の誕生を説明するビッグバン・モデルにおいて基礎となる理論である。一般相対論は、重力を空間と時間の歪みとして記述し、量子論は、初期宇宙の物質のふるまいを理解するのに不可欠なものだ。そして、この二つの理論から、すべての物質（原子核や原子、そして銀河にいたるまでのあらゆる複合的な物質）がきわめて高温の初期宇宙で生まれたとする、息を呑むほどにすば

らしい説明がなされる。

しかしこれらの洗練された理論も、じつくりたどつてみると、やがては袋小路に行き当たる。今日でも用いられ続けている一般相対論および量子論は、これまでの華々しい成功にもかかわらず、実のところ、宇宙の完全な記述を与えてはいないのだ。

具体例を見てみよう。宇宙の時間発展のモデルを解明して、その長い歴史を知ることができるのではないかと希望をもつて一般相対論の方程式を解くと、我々は常に**ビッグバン特異点**と呼ばれる、宇宙の温度が無限大になる一点に出くわす。ビッグバン時の宇宙が非常に高温なのは、別段驚くことではない。なぜなら、現在考えられているように宇宙が膨張しているのであれば、過去には今よりもはるかに小さく高密度であるはずで、それは温度が非常に高いことを意味するからだ。

とはいえ、温度が「無限大」となると話は違ってくる。物理理論の結果として導き出された無限大とは、実はその理論が限界を超えて酷使されていることの証拠に他ならないためだ。そのとき、方程式は意味を完全に失っている。

多くの人が、ビッグバン・モデルにおけるこの方程式の破綻は「宇宙の始まり」を示していると説明する。だが、それは誤理解だ。方程式が無限大の値を出す、ある時間軸上の一点とは、宇宙の始まりでも終わりでもなく、その理論の限界を示す一点にすぎない。

### 重力の量子論

この限界を乗り越えるために、一般相対論に量子論を組み合わせようという試みがなされてきたが、そうして得られるはずの理論はいまだ完成されていない。

問題は、二〇世紀の物理学革命が不完全だったことに起因している。量子論は物質を記述するのに用いられるが、重力、さらには空間と時間そのものの記述には用いられない。後者は完全に一般相対論の範疇であり、量子論とはほとんど関わりをもたないのだ。

しかし、量子論と、重力の理論である一般相対論が完全に統合されれば、これまでの理論は大きく拡張される。こうした統合の結果生まれる重力の量子論、すなわち本書の主題である**量子重力理論**は、後述するように、ビッグバンを記述するのにとりわけ重要であり、ビッグバン特異点の無限大で何が起きているのかも説明できると期待されている。ビッグバンは、本当に宇宙の起源、時間の起源なのか？もしそうでないのなら、その前に何かがあったのか？ ビッグバンの前に何かがあったのなら、それはいったい何か？

残念ながら、量子重力理論はきわめて複雑な理論だ。一般相対論と量子論に分けて考えてみても、それぞれが従来の物理学とは一線を画す数学的機構を有しており、さらに悪いことに、必要とされる数学的手法が大きく異なっているのである。そして物理理論の統合は、数学的原理の統合も要求するため、このことが問題をよりいっそう困難にする。こうした理由によって、科学者たちの長年の精力的な研究にもかかわらず、完全に定式化された重力の量子論はまだ存在していない。

しかし近年になって、量子重力理論のいくつかの特質について、解析可能ではないかという数々の有望な兆しが見られるようになった。研究生生活でときおり遭遇するこのような状況は、ジグソーパズルを組み立て始めるときに似ていると言えよう——おぼろげながら全体像は思い浮かべられるかもしれないが、それが間違っていないとは言いきれないのだ。

とはいえ今日の研究者たちは、理論が完成しさえすれば、ビッグバンで何が起きたのかばかりでなく、それ以前の出来事もわかるようになるかと考えている。つまり我々は、誕生したての宇宙を垣間見て、それがどのように生まれたのかを人類の歴史の中で初めて解析できると期待しているのだ。

### 本書の構成

本書は、量子重力理論のここ数年の成果と、近い将来に行われる人工衛星による観測計画を説明し、それらが我々の世界観をどれほど劇的に変えるのかを論じたものである。より具体的に言えば、一般相対論と量子論を統合した量子重力理論の候補の一つとして研究が進められている**ループ量子重力理論**が、ビッグバン特異点が必要としない結果を初めて示したことを説明するつもりだ（他の有力な候補には弦理論がある。これについては5章で触れる）。

ループ量子重力理論の考え方は、宇宙はビッグバン以前にも存在し、それが現在の宇宙とどう異なっていたかを大まかに見積もることができる。また、精度の高い観測を用いて、その宇宙がビッグバン以降の宇宙の膨張に与えた影響を検出できれば、そこからさかのぼって我々の宇宙の先史時代を探索することが可能になるだろう。

本書ではさらに、量子重力理論の研究における私の実体験も報告する。後半の章では、興味深いブラックホールの議論をはじめ、世界の一般的理解についてのさらなる問題、なかでも宇宙進化論、時間とその方向の謎や、万物の理論という聖杯について触れるつもりだ。加えて、科学を通じて世界の理解が深まるにつれて、人類の知がどのような変遷をたどることになったのかを、現代の研究の例を用いて個人的な視点から述べる。

ループ量子重力理論は高度に数学的だが、多くの計算は現在までに直感的に理解されている。この

「直感」は大切だ。というのも、それは未知の領域を探検するのに役立つ、同時にその広範な説明をも可能にするものだからである。私は本章の冒頭に「教えようとする真理が抽象的なほど、感覚を真理へと誘惑しなければならぬ」というニーチェの言葉を置いた。これに従うことができれば、5章で登場するきわめて重要な方程式以外は数学を使わずに、ループ量子重力理論の本質を伝えられるかもしれない。もちろん、本書の根底にある理論を完全に理解したいのなら、数学は避けて通れない。だが直感的な理解ならば、それほどの努力は必要ないだろう。なぜ物事がそうなっているかという理由を常に見抜くことはできないかもしれないが、直感という信頼できる旅行ガイドがあれば、そこにあるつながりをつかむのは可能なのである。

しかしながら、ここで一つ注意をおきたい。量子重力理論に関する多くの研究は、今のところまだ推論の域を出ていないのだ。一般相対論と量子論が発展した二〇世紀前半とは異なり、量子重力理論の定式化を強く後押しする観測結果はまだ我々の手の内にはない。現在の研究を推し進めているのは、不完全な一般相対論を補完しようとする雑多な理論的考察と、理論を方程式によって定式化する際の数学的な整合性なのである。

しかも、一般相対論と量子論で使われる数学的手法の組み合わせがどんなものであれ、宇宙をきちんと記述するために必要な解を求められるという保証はどこにもない。実際、そこで使われる数学の道具は非常に制限されたもので、その正誤はどうであれ、解が存在する理論を定式化すること自体がすばらしい成功と考えられているほどだ。他の妥当な理論が存在するかどうかはさらに先の問題で、確実な答えを知っている者は誰もいない。

このことは今日の量子重力理論が立っている足場のもろさを示しているが、これ以降で紹介するように、多くの独立した観測結果が同じ方向を示していることもあり、楽観的な見解が優勢だ。それぞれどこか、さほど遠くない将来に行われる観測実験が、量子重力理論によって予言される現象を明らかにするかもしれないとも期待されているのだ。本書でも述べるように、そのような現実的な観測実験は、いつの日か、量子重力理論を実験によって検証可能な理論へと導くことだろう。

非難されるべきは自然ではない

現在の我々を取り巻く現状は、新しい領土を獲得したばかりの状況に似ている。数学は、フロンティアのさらに先にある新領域を切り開く開拓者であり、量子重力理論の場合、そのフロンティアとは宇宙と時間にまつわるものだ。

こうして獲得した土地は、物理学などの実証科学では、実験によってのみ確実に我がものにできる。だが量子重力理論においては、その作業はまだなされていない。そのため、この土地では誰もがいたとでもたやすく道に迷い、様々な憶測の沼地に飲み込まれてしまう。

そんな土地を探検するときには、自然に対する謙虚さが求められるが、誰もがそれに従っているわけではない。それぞれどこか、物理学者の言葉は、しばしば自信ありげに、ときには傲慢にさえ聞こえるものだ。だが自然の法則を考えるなら、我々はルドルフ・カルナップの言葉を心に留めておくべきではないか——「それは正しくも間違いにもなりえる。そして正しくない場合には、非難されるべきは自然ではなく科学者なのだ」。

自然の法則を組み立てるのは物理学者だが、それがうまくいかないとかわかったときに責任を負うのもまた物理学者である。物理学者は何ものも支配しておらず、ましてや大いなる自然を統べているわけ

もない。このことは、とりわけ量子重力理論のような、理論による見取図を扱う分野にとっては真実だと言えよう。

現時点では、研究者たちが量子重力理論として押しつけた法則に、自然が敬意を払っているという観測結果は得られていない。こうした状況の中、ビッグバン以前という前人未踏の世界に旅立とうと思うならば、優秀なガイドが欠かせないだろう——そう、いまこそ我々の直感が必要とされているのである。