

## 量子重力と哲学

内井惣七

量子力学が提起するいろいろな問題は、空間・時間の問題と並んで、欧米の科学哲学では最も盛んに論じられている話題である。日本の哲学研究者では、北大で長らく教鞭をとった石垣壽郎氏と、彼が育てた若手研究者がかなり専門的な論考を続けており、優れた成果も出している。こういった話題については、かなり掘り下げたテクニカルな知識が必要となるので、物理学に対する一般的な無知が支配的な日本の科学哲学では、欧米に比べて、研究者層も薄いし研究のレベルも貧弱であることは、否定しようがない。こういった実情を改善するのが急務だとわたしは考えるので、小論では、量子重力という、宇宙論にも関わりの深い話題について、あまりテクニカルにならない範囲でも理解できる哲学的問題をいくつか取り上げて、哲学者の注意を喚起してみたい。

### 1. 量子重力とは

まず、「量子重力」というキーワードについて簡単に説明しておかなければならない。現代物理学を支える二つの基本的な理論、一般相対性と量子力学とが相性が悪いことはよく知られている。一般相対性は、アインシュタインの重力場方程式と適切な初期条件（たとえば、重力場を求めたい星の質量）および境界条件（その星のまわりがどんな条件か、たとえば空っぽの空間に置かれているかどうか、など）が与えられれば、一義的な解を得ることができ、重力場やその中の光や物体の運動が一義的に決まるような理論である。要するに、決定論的な理論である。もちろん、関係のある物理量も一義的に決まる。これに対し、量子力学の基本方程式、シュレーディンガー方程式によれば、量子系の状態変化については、適切な条件の下で一義的に決定することができるが、その状態を「観測量」と呼ばれる、測定にかかる物理量と関係づけようとする、確率が間に入って（その確率は方程式から求めることができるが）、一義的な関係は成り立たなくなる。

くわえて、量子力学では「量子」と呼ばれる離散的な値が基本なので、一般相対性では連続量として扱われた重力や、重力に拘束された連続的な運動などは、

きわめて短い距離や、きわめて大きな重力のもとでは、離散的な値や運動に「量子化」されることが要求される。簡単に言えば、量子力学が適用される微小な領域での重力を扱おうとすれば、重力場方程式も量子化されなければならないはずである。これが量子重力の基本問題にほかならない。この問題が、長年にわたって解決を拒んできたので、一般相対性と量子力学とは「相性が悪い」といわれるのである。

そして、近年の宇宙論では、初期宇宙は極微の状態から始まったことになっているので、宇宙の始まりを論じるためにも、相対論と量子論を統合した量子重力の理論が要求されることになる。高温で極微の宇宙は、当然高エネルギー状態だから、クォークを初めとする物質粒子も生成されることとなって、素粒子論で言われる「力の統一理論」も出番となる。電磁力と原子核内の弱い力がまず統一され（ワインバーグ、サラム、グラシヨウ）、そのシナリオの延長線上で原子核内の強い力も統一できるだろうと見なされる（大統一理論）ことは、よく知られている。しかし、重力はここでも除け者扱いで、「高温状態ではすべての力は一つだったのだが、宇宙が冷えるにしたがって四つの力が分かれた（相転移と呼ばれる）のだ」という一般論以外、シナリオは不明状態だったのである。一つの大きな理由は、他の力に比べて、重力が桁違いに小さいことである。この小さい重力を、統一レベルの大きな力に持って行くシナリオを考え出すためには、大変な想像力が必要である。

## 2. 拡張路線と緊縮路線

では、現在の量子重力研究では、どのような考え方が採られているのだろうか。現在の「主流」となっているのは超ひも理論だろうが、最近話題になっているリサ・ランドールらの唱える五次元時空説（超ひも理論の考え方も取り入れている）や、もっと控えめな行き方として「ループ量子重力」と呼ばれる動向もある。わたしの見るところ、これらの研究動向を概観して、哲学者に興味深いのは、概念的な「拡張路線」と「緊縮路線」のせめぎ合いである。これら現代物理学の最新理論は、アイデアや手法こそ新しいものの、二つの相反する路線のせめぎ合いという点では、ニュートンとライプニッツの昔の対立を再現しているような観がある。昔も今も、現場の科学者たちの間では拡張路線が圧倒的

に優勢（何しろ、豊かな枠組みのリソースがふんだんに使えるので、どんどん論文が書けるのだろう）だが、へそ曲がりな哲学者には緊縮路線の魅力も捨てがたく思われる。

言うまでもなく、拡張路線の代表は超ひも理論であり、緊縮路線の代表はループ量子重力である。ひも理論は、当初「点粒子」から生じる量子化の難点を避けるため、「有限の長さのひも」を基本的な道具立てとして出発したが、何度かのブレイクスルーを経た現在では、三次元や高次元のブレン（膜）が主役に成り代わりつつあるという印象さえ強い。ランドールが指摘するように、超ひも理論は「ひも理論」ではなくなったのだ。そして、来るべき超ひも理論の統合を期待されている（まだ未知の）M理論は、実に十次元の外枠を前提する理論である。この理論がうまく機能するためには、十次元が要求されるのである。これによって、わたしがなぜ「拡張路線」という言葉を使うのか、ある程度理解していただけるだろう。多様な素粒子を統一的に説明するために、小さなひもの振動に還元しようとした当初の動機は「緊縮路線」のように見えたのだが、そのひもの活動を支えるためには、「時空」という枠組みのレベルで相当な拡張路線を採ることを余儀なくされたのだ。

概念的な拡張はそれだけではない。「超ひも」の「超」が意味しているのは「超対称性」であって、ここでもふつうの対称性よりも強い概念が導入されて道具立てが拡張されているのである。対称性は、現代物理学では欠かすことのできないきわめて重要な概念である。簡単に言えば、二つのものの間に違いがなく、同じ法則が成り立つことが対称性である。そして、これは力の統一理論の要とも言うべき概念である。というのは、低い温度では違いのあった別々の力が高い温度で統一されるということは、対称性が回復するということにほかならないからである（逆に、同じだったものが分化することは「対称性が破れる」、あるいは「相転移が起きる」ということになる）。ふつうの対称性とは、専門用語では「ゲージ対称性」と呼ばれ、粒子やその活動を支える場の法則が同じ、あるいは対等であることを意味する。そして、この対称性を要とする一群の理論が「ゲージ理論」と呼ばれ、これまでの素粒子論で大きな役割を果たしてきたもの。ところが、超対称性は、フェルミ粒子とボース粒子という、素粒子の二大カテゴリーを同等（高温状態では）と見なすという拡張に踏み込む。粒子

のスピンの半整数か整数かで区別されるこれら二種の粒子が（高温では）同等だということは、結果として、粒子の種類数をも大幅に拡張する。たとえば、フェルミ粒子のクォーク（対称性が破れてできたもの）には、そのパートナーであるボース粒子のクォークがあるということになる（実験的な裏づけはないけれども）。なぜこのような高い代償を払ってまで超対称性を導入するかといえば、これによって重力をになう粒子グラヴィトンと重力場が、他の粒子や場と同じ手法で扱えるようになるということである。いずれにせよ、これによって、超ひも理論のアプローチがいかに大胆な拡張路線に乗っているのか、明白であろう。

他方、ループ量子重力のアプローチは、時空の構造（一般相対性によれば、重力と不可分）そのものの量子化を目指し、一般相対性と量子論とを統合しようとする。「ループ」という名前の由来は、空間の幾何学を量子化したとき、量子状態がループ、輪のようななめらかな閉曲線で表現されるからである。こうして、このアプローチは、高次元の外枠を前提しないで、物理学の枠組みとなっている時空構造の解明をしようとする。これが、超ひも理論や高次元理論との最も際だった違いである。この点は、しばしば「背景を前提しない background independent」という言葉で表現される。たとえば、一般相対性は背景を前提しない理論の一例であり、空間と時間は重力場の方程式にしたがって動的に生み出される（境界条件によって外枠の類を持ち込まない限り）。これに対し、ニュートンが提唱した力学は、絶対空間と絶対時間という外枠を前提していたし、その後改良された形でも「慣性系」という背景に依存した理論となっていた。この、背景を前提しないという点が、緊縮路線の本質とも言うべき条件なのである。超ひも理論の支持者たちは、ループ量子重力にはとても「統一理論」の資格がないと見なすようだが、この緊縮路線によって一般相対性の量子化を成し遂げている点は、決して無視できない成果である。

### 3. 拡張路線と緊縮路線の対立——古典的事例

二つの路線の対立がどのような意味を持つのかを理解するためには、まず、理解しやすい古典的な事例を見ておくのがよい。量子力学や一般相対論の難しい細部や数学を取り除いて考えてみても、哲学的な意義はいっこうに失われない

し、かえって論点が明晰にさえなりうるからである。すでにふれた、ニュートンとライプニッツの対立は、空間と時間の本性に関わるものだった。したがって、話題としても現代の超ひも理論やループ量子重力の研究対象と十分に重なっている。

ニュートンは、自分の力学を始めるとき、不動で不変の絶対空間と、一様に流れる絶対時間という外枠を仮定したのである。運動する物体の速度や加速度といった概念が、この外枠なしでは定義できないと彼は考えたのだ。しかし、この外枠の仮定は、回転運動から生じる遠心力という、経験的に測定できる現象によって、検証可能な帰結をもたらすので、単なる形而上学ではない「実験哲学」において意味があるし、この仮定なしでは遠心力の現象そのものの説明が困難である、と論じたのだった。これは、当時の知的状況にあってやむを得ない方便、拡張路線だったと弁護できるだけでなく、実際に、その後多くの科学者によって支持されて、めざましい成果を生み出すことに貢献した。

これに対して、ライプニッツは、絶対空間と時間の外枠（背景）を仮定することは、世界の事物そのものに内在しない、余分な区別を持ち込むことになるので、科学理論、とくに究極の理論を目指そうとするなら望ましくないと論じたのである。これは、もちろん、わたしの現代的なパラフレーズだが、ライプニッツが「充足理由律」や「合理的な神」で意図したことの重要な部分を継承していると思う。彼にとって、空間と時間は、神が与えた法則に従って運動する事物の間の関係や秩序として派生するはずのものだから、「外枠」として導入するのは不要であるだけでなく、この外枠（背景）と世界に内在的な事物との間に余分な（外枠、背景に依存する）関係を生じさせることになってしまう。こんなことは、神が創造した世界とその法則を解明しようとする科学にとって好ましくない、とライプニッツは反対したのだった。しかし、外枠を持ち込まないというこの緊縮路線のもとで、ニュートン力学に対抗できるような別の力学を展開することは、ライプニッツにはできなかった。何しろ、適当な座標系を立てて力学問題を考え、微分方程式を解いて力学問題の解を求めるという手法さえ、彼らの時代にはまだなかったのだ（オイラー以後の成果）。ちなみに、適当な座標系を選ぶこと自体は、「外枠なし、背景に依存しない」という方針に違反するわけではないことに注意されたい。法則や解が座標系によらず不変

であること（一般共変性）が保証されておれば、この方針は堅持できるのである（もちろん、それがわかるのはずっと後世の話で、一般相対性が最初の事例）。

したがって、ライプニッツが構想したような物理学を自分では実現できなかったからといって、ライプニッツの緊縮路線と彼の構想自体が誤りだったということにはならないのである。とはいえ、ニュートンの拡張路線が、実に、相対性理論が出現する二十世紀の初頭まで大勢を占め、大きな成果を生み出してきたことも否定しようのない事実である。

#### 4. オイラーの議論

ここで、ニュートン流の拡張路線を支持して展開し、力学の発展に多大な貢献をしたレオンハルト・オイラーの、ライプニッツ批判とニュートン力学擁護の議論を紹介し、批判しておきたい。というのは、この手の議論は、その後の科学者や哲学者の認識論的な論議で（超ひも理論の支持者やリサ・ランドールを含め）繰り返し現れることになるからである。

オイラーは、1748年に出版された論文「空間と時間に関する考察」で、哲学的原理に基づいて物理学を批判するのではなく、成功を収めた物理学理論に合致するような哲学的原理を追究すべきだと論じ、ライプニッツのニュートン批判を論駁しようとした。中心的な論点は、運動の第一法則、慣性の法則の経験的な成功である。ニュートン力学は、諸種の運動や天体の運行に関して多種多様な現象を解明することに成功してきた。したがって、この力学の基本法則、なにかんずく第一法則の妥当性は経験的に確立されていると見なすべきである。ところが、ライプニッツ流の時空の関係説ではこの第一法則さえ再現が難しいのである（詳しい議論については内井 2006, 88-94 参照）。物体の慣性は、ある物体と他の物体との関係に依存せず、その物体と絶対空間との関係によってのみ決まっているというのが決め手である。

くわえて、第一法則の定式化には、運動の「同じ方向」、「同じ速度」という概念が不可欠であり、これも絶対空間と時間とに言及しなければ定義できない概念である、とオイラーは論じる。第一法則の経験的妥当性は確立されていると

見なすべきだから、その法則の記述に必要な概念の妥当性も認められるべきである。関係説の時空論ではこれらの概念を定義する方法さえ示されていない。以上の議論からオイラーが結論として導き出すのは、「第一法則の経験的妥当性を認める限り、絶対空間と時間の実在性も否定できない」という主張である。

その後の物理学の発展を知っているわれわれにとっては、この議論の欠陥を指摘することは易しい。慣性の法則の妥当性を認めても、絶対空間と時間の「実在性」を言うにはまだ道が遠い。せいぜい、「慣性系があることを経験的に認めざるを得ない」という結論（慣性系では、絶対速度は決まらないことに注意）が擁護できるのみである。この批判は、後知恵によって偉大なオイラーをけなそうと意図されたものではない。オイラーほどの知性にとってさえ、ある科学理論の経験的な成功によって、その理論が前提する枠組みや諸概念の妥当性を結論したいという誘惑がいかにか大きいか、という一点を強調したいがためである。重要なのは、その理論の経験的な成功からいったいどれだけのことが結論できるかを言うためには、かなり込み入った分析が必要だということである。理論全体の「正しさ」や、用いられた一つ一つの概念の適切さを言うには、相当に難しい問題が控えている。そのような問題は、ニュートンやオイラーの時代の古典的科学に比べて、量子力学や量子重力の理論ではさらに複雑になり、難しさが増しているのである。

## 5. モデルと経験

さて、科学哲学の出番は、科学理論の認識論や存在論を明らかにするところにある。超ひも理論が前提する十次元世界や、ランドールの「曲がった五次元世界」、あるいはループ量子重力で時空を構成する元になるループなど、いったいどういう資格のものであり、科学理論と経験世界とをつなぐ上でどういう役割を果たすものかと考えるべきなのだろうか。

近年の科学哲学で多くの支持者を集めているのは、科学理論の役割を世界のモデルを提供することだと見なす考え方、いわゆる意味論的アプローチと呼ばれる立場である（たとえば van Fraassen 1980 参照）。物理理論の場合、数学的記述が不可欠であるから、そのモデルとは数学的なモデルだと言い換えてもよい。

テクニカルな詳細に立ち入る必要はないので、骨子だけ解説するなら、たとえばニュートン力学の場合は、三つの運動法則を満たすような数学的構造が力学世界を表すモデルであり、ニュートン力学という科学理論の内容はこれらのモデルによって尽くされるとみる。しかし、そのような構造のすべてが現実の世界について成り立っているとは限らない。物理学はあくまでも経験科学だから、現実世界で見られる現象によってチェックされる部分と、そうでない部分との区別が生じてくる。

この区別において、たとえば前のほうを「観察可能」と呼んで、いわば特権扱いする論者もいるが、それには必ずしもこだわる必要はない。観察可能性をきちんと定義することは容易ではないからである。そこで、以下では、実験や経験によって何らかの仕方で（程度の差を許容する）チェックされる部分を単に「現象」と名づけておきたい。これはいい加減な定義のように見えるかもしれないが、与えられた理論の中でおのずから定義できるとわたしは考える。なぜなら、この意味での現象と対比されるのは、理論において基本的な存在物あるいは法則などとして仮定される理論的措定物であり、こちらは直接経験的にチェックできないことがほとんどであるにもかかわらず、理論の中核部分を形成し、経験的にチェックできる部分の記述にも（理論の中では）不可欠に関わってくるからである。たとえば、ニュートンのオリジナルな力学の場合、速度（距離の変化率）や加速度という、明らかに経験的に測定できる物理量（したがって現象に帰属するもの）にも、絶対空間というある種の実体に対する言及が不可欠だった。遠心力（現象）の規定にも、同じくこれに対する言及が前提されていた。アインシュタインの重力理論（一般相対性）でも、重力の強さや重力場に規定された運動などは測定にかかる（したがって現象である）が、重力場自体は直接測定にかかるとは言えない。重力場方程式から現象が規定されるが、重力場方程式が示す基本法則そのものは現象ではない。量子力学の場合、量子系の「状態 $\psi$ 」は現象ではない基本概念だが、観測量（現象の一側面）を規定し、観測量は経験的にチェックできる。さらに、超ひも理論の場合は、ひもやブレーンは直接観測にかからないが、粒子の生成消滅や粒子のエネルギーなどは観測にかかる現象である。もちろん、そのような現象を規定するには、理論的措定物が不可欠に関わってくる。周到ではないけれども、この程度のことが理解できておれば以下の議論には十分である。

要するに、科学理論について哲学的見解の相違にかかわらず共通に認められているのは、理論がある種の階層構造をなしており、その構造の中で底辺に近いところに位置する多様な現象が緊密に統合されるということである。したがって、そのような構造（すなわちモデル）の中で、理論の上層部（中核部分）と現象との違いは、程度の差はあれ（理論に相対的に）客観的に決まってくる。これが重要な点である。また、すでにふれた「対称性」や「超対称性」は、理論の基本方程式や基本的測定物を規定する条件であり、理論の最上層部に位置する概念であることにも注意しておかなければならない。

そして、もう一つ注意しなければならないのは、理論が変われば、かつて「理論的对象」として測定されていたものが、「現象」に近いものとして規定され直すということもありうる。たとえば、かつて「素粒子」という基本的存在物だったはずのものは、超ひも理論では「ひもの振動」から生まれるある種の現象として規定し直される。あるいは、空間と時間という、かつては基本的な外枠だったはずのものは、一般相対性によれば、重力場方程式によって動的に生み出されるという意味で、現象の性格に近づいているのである。一般に、古典的理論から最新の理論までの系列を眺めて気がつくのは、理論の中核部分と、直接観測にかかる底辺の現象との間の「距離」が広がり、理論的測定物は経験からは遠いところにどんどん後退していく観があることである（この点をわたしに気づかせてくれたのは、ひも理論とライプニッツの『モナドロジー』である）。量子系の「状態」しかり、素粒子の構成要素とされる「クオーク」しかり、そして「ひも」しかり、「十次元時空」や「五次元時空」しかりである。こういう事態があるので、わたしは、「観察可能性」を特権的なものとして規定しようとする立場よりも、理論内部の構造的規定によって「現象」が決まるという見解の方に肩入れしたい。しかし、もちろん、現象が何らかの経験的測定と不可分であるという条件だけは外すわけにはいかない。

以上、説明が少々長くなったが、数学的なモデル構造の中で、理論的測定物から底辺の現象にいたる組織化をおこなうのが、科学理論の役割だと見なすのが、意味論的アプローチという立場である。

## 6. 理論的措定物の妥当性

前節での説明に対して、直ちに予想される反論は、現象とそうでないものとの区別はある意味で程度の差を許容するのだから、「経験によってチェックされる」という条件も同じく程度問題となってしまう、オイラーの議論に対する反論が弱くなってしまわないかというものだろう。しかし、この反論は近視眼的であって、一つの理論しか見ていないから出てくるものである。量子重力のような最先端の研究分野だけでなく、科学のどのような分野でも異なる理論の競い合いや対立というのはほぼ常態である。二つの理論が異なるというのは、前節の立場によれば、(1) それぞれが提唱する理論的措定物が異なり、現象の組織化が異なる構造を持つということにほかならない。また、同じ分野での異なる理論であるということは、(2) 組織化されるべき現象群が二つの間でおおむね共有されているということにほかならない。これら二つの条件によって、科学の認識論では理論的措定物と現象の間の違い、いわば「非対称性」が生まれるのである。超ひも理論とループ量子重力を比べてみれば明らかのように、理論的措定物は二つの理論間で共有されにくいのに対して、多くの現象は共有される。そのような現象は、理論の違いに関わらず（記述のされ方は変わるかもしれないが）われわれにとって否応なく現れてくるので、「観察可能性」を特権的なものにしたいという見解さえ出てくるのである。そして、たとえば、同じ現象が一つの理論によっても他の理論によってもうまく説明できるのなら、他に理由がないかぎり、どちらの理論的措定物の「妥当性」にも差は生じない。オイラーによるニュートン力学擁護の議論のもっともらしさを生み出していたのは、論敵の理論が弱すぎて慣性や遠心力の説明を提供できていなかったからにすぎない。対抗馬として一般相対性を持ってきたなら、オイラーの議論はただちに説得力を失う。

もちろん、理論的な仮定や措定物については、観察できる予測から得られる信憑性とは別に、組織化の善し悪しや簡潔性、他の理論との調和など、妥当性の考慮に関わってくる要因がある。しかし、物理学が経験科学であるかぎり、実験や観察からの支持は、妥当性の判断で最も重要な要因である。

## 7. 量子重力理論、緊縮路線の問題点

これまでの準備によって、ようやく量子重力の拡張路線と緊縮路線について、ある程度の哲学的評価に立ち入ることができる。「ある程度」というのは、いずれの理論も完成したものではないから、評価の方も暫定的であらざるをえないからである。まず、緊縮路線のループ量子重力は、時空の量子化には成功しているが、四つの力を統一するというヴィジョンは現在欠いているので、素粒子論の標準モデルなどを援用するほかはないし、宇宙全体の量子状態を決めると考えられるホイーラー・デウィット方程式（1967年）というかなり古い道具立てを使う点が、多くの専門家には不評なのかもしれない。しかし、すでに述べたように、背景を前提しない理論構成になっている点が魅力的である。くわえて、時空の成り立ちをループという基本要素の関係から解明していくという、「謎解き」の方向にも大きな魅力がある。また、この立場の主要な提唱者であるリー・スモーリンが繰り返し言うように、われわれの宇宙における観察においてほかに物理理論が最終的なよりどころとすべきものはないのだという、科学哲学では正統的な論点も強調する。これは、科学理論のモデル構成で、経験とふれあう底辺の部分を重視する考え方である。

同じく、緊縮路線の特徴は、ホログラフィー原理の重視というところにも現れている。ホログラフィーとは、三次元の情報を二次元の媒体に収録して再現する技術である。その名前を転用したホログラフィー原理は、最初ブラックホールに隠された情報量を測る問題から派生し、後にもっと一般化された原理（内容はまだ必ずしも確定していない）である。その骨子は、ある体積を持つ三次元空間に含まれる最大限の物理的情報は、その体積ではなく、その体積を取り囲む表面積（つまり、二次元の面積）に比例するということである。したがって、三次元の情報には二次元の情報に削減しても失われないことになる。つまり、宇宙のすべての物理的情報を表現するには、二次元で十分かもしれないのである。とすれば、五次元や十次元も仮定する理論は不要となるのではないだろうか。もちろん、まだ決着がついたわけではないが、緊縮路線の面目躍如といった風情の原理である。

## 8. 量子重力、拡張路線の問題点

では、高次元時空の枠を前提する超ひも理論やランドールの五次元理論という、拡張路線を採る立場（これが「主流」である）についてはどうだろうか。ひも理論のブレイクスルーにおいて、「超対称性」が大きな役割を果たしたことはよく知られている。この概念が物理学理論にもたらす長所と短所は、ランドール（2007b, 13章）によって丁寧に解説されているので、詳しくはそれを参照していただくとして、ここでは要点のみまとめておく。超対称性は、素粒子論のいわゆる標準モデルの難点をいくつか改善でき、重力をになうグラヴィトンをも扱うことができるが、粒子の数を倍増させることになる（フェルミ粒子とボース粒子とは常に対になるはずなのだ）。ところが、そのような粒子は経験的に見つかっていないので、経験、実験レベルでの支持はないに等しいのである。当然のことながら、緊縮路線を採るループ量子重力の支持者たちは、これを重大な欠陥と見る。対称性を拡張してたくさんの方が言えるのはいいのだが、実験的根拠がないのでは形而上学まがいではないのか、と。そこで、超対称性の支持者たちは、来るべき超高エネルギー実験施設の稼働（新粒子が見つかるかもしれない）に大きな期待を寄せているわけである。いずれにせよ、ここで指摘しておきたいのは、拡張路線の強力な枠組みは、経験的な検証可能性とのトレードオフ関係にあるかもしれないという危惧である。

ここで、量子重力は超高エネルギー状態を扱うのだから、検証可能な予測が難しい点では緊縮路線の理論もたいして変わらないではないか、という指摘が出るかもしれない。しかし、拡張路線には高次元の外枠の仮定、あるいはランドールの言葉を借りるなら、エクストラ次元の導入があるので、単なる「高エネルギーによる検証の難しさ」以上の問題がふんだんに含まれているのである。現在、「ブレーンワールド」が最新の宇宙論として脚光を浴びているが、その骨子は、高次元世界（バルクと呼ばれる）の中に二次元以上のブレーン（膜）が複数個存在し、われわれの世界は（見かけ上）三次元のブレーン（これに時間軸が一つつくので四次元世界が生まれる）の一つである、というもの。グラヴィトン以外の粒子はどれかのブレーンに閉じこめられていることになるので、たとえば超対称性が破れて生じるはずの奇妙な粒子群（われわれの世界では見つからない）は、「よそのブレーンに閉じこめられているから、われわれのブ

レーンでは見つからない」という、検証不可能性を逆手に取る議論（うまい言い逃れ）ができることになってしまう。また、われわれの世界が乗っているブレーンとは隔絶したブレーンがたくさんありうるので、他の世界、宇宙がありうるにもかかわらず、その検証は原理的に不可能になってしまう。インフレーション宇宙論でも、極微の宇宙が急膨張する際に多くの隔絶した宇宙が生まれる可能性があったが、ブレーン宇宙論では存在論自体が「インフレーション」を起こして、われわれの手の届かないところに実にたくさんのもので存在しているのだ。

これを、科学哲学の意味論的アプローチ（前述 5 節）から見れば、高次元の量子重力理論は、理論の基本的仮定の部分から、実に多彩な存在論と現象が出てくるが、そのほとんどは経験的にチェックできないところに位置づけられるということになる。この頭でっかちの構造は、モデルの上層部に持ち込まれた仮定の産物だから、その「妥当性」をにわかには信じがたいのである。

しかも、高次元理論の「次元数」にもある種のトレードオフが成り立つことに注目しなければならない。これも、詳しくはランドールの丁寧な解説（ランドール 2007b, 15 章、16 章）に譲るが、十次元超ひも理論と十一次元超重力理論とが等しくなる（別名、双対性）し、五次元理論と四次元理論とが等しくなることすらありうるのだ（ランドール 2007b, 592-3）。だったら、「次元」（とくに、エクストラ次元）とはいったい何なのだ？これは、ランドールが彼女の大著の最後の方でやっと取り上げてくれる問いである。彼女が、不承不承認めかかっているようにも見える、「次元は情報量を表現するための便利な手段にすぎない」（次元数と同じだけの変数が必要）ということであるのなら、緊縮路線のホログラフィー原理や、ひいては、昔ライブニッツが『モナドロジー』で展開しようとした、科学の情報論的アプローチ（Uchii 2008）の重要性がにわかに見直されてくることになる。しかし、これはここで論じるにはあまりに大きすぎる問題である。

## 9. 高次元理論は時空の謎を解明したか

そして、わたしの個人的な意見になるが、高次元理論で最も不満に感じられる

点は、時空の成り立ちについての「謎解き」が謎解きにはなっていない観があることである。この点でも、古典的なニュートン理論と奇妙に類似している。ブレーン宇宙論による時空の「謎解き」を一言で要約するならば、「われわれの四次元時空は、高次元空間のうちの一つの三次元ブレーンに、もう一つ時間の次元が加わったものだ」ということになる。つまり、この「謎解き」はトップダウンで、より基本的なところから時空を組み立てるという構造には全然なっていないのである。「では、その高次元時空はいったいどうしてできたのか」という肥大化した疑問が先送りされて、全然面白くない。ニュートンの絶対時空と五十歩百歩の答えである。

## 10. 科学の存在論と科学的实在論

まだ論じるべき問題は山積なのだが、小論も長くなりすぎてきたので、最後に、話を存在論（ある理論によれば何が存在するか）に絞って、一般の人々にはきわめて誤解されやすい問題に注意を喚起しておきたい。科学者が「異次元は存在する」とか「高次元世界は存在する」と言うとき、これは何を意味すると理解すべきなのだろうか。たいていの人々は、これらの言明を、「科学理論とは独立の世界が存在し、その科学理論が言っていることの、少なくとも重要な部分は本当に真なのだ。つまり、高次元世界は本当に存在する、实在するのだ」と理解するのではないだろうか。この「本当に」「实在する」という言葉が曲者である。

この点がよくわかる実例を一つお目にかけよう。話題のリサ・ランドール『異次元は存在する』で、次のような興味深い一節を見つけた。

そして、五次元世界についても試行錯誤を繰り返していたある日、わたしはたまたまハーバード橋を歩いて渡りました。そのときふと、「五次元世界が存在しないと切り切れる理由は何ひとつないんだ」ということに気がついたのです。（ランドール 2007a, 22）

彼女は、もちろん、科学哲学でいう实在論（どういう立場かは、すぐに説明する）を擁護しているわけではなく、自分の研究を進めるための主観的な確信が

生まれたきっかけを述べているにすぎない。しかし、わたしが眼を剥いたのは、この「存在しないと言える理由はない」という弱い根拠が、本のタイトルでは「異次元は存在する」というセンセーショナルな言葉に（編集者によって）置き換えられたことである（そして、巻末の若田光一のコメントのタイトルが「宇宙には見えないものが確かに存在する」となっていることに注意！）。科学哲学ではこのようなすり替えは決してやってはならない。実在するという理由を示さなければ、科学的実在論の意義はないのである。しかし、素人や、一部の科学者は、このようなすり替えの誘惑にかかりがちなのである。

しかし、いやしくも科学哲学を研究するものにとっては、こんな素朴で分析の欠如した理解では話にならない。少なくとも、（１）科学理論内部の存在論と、（２）そういった存在論を主張する科学理論自体の真偽の問題とを区別しないと、無用の混乱が生じるだけである。

たとえば、素粒子論で「クォークが存在する」と言われるとき、この理論内部の言明としてはクォークが存在するのは当たり前で、それはこの理論でクォークが基本的な存在物として仮定されているからにすぎない。では、「銀河系中心部にブラックホールが存在する」という場合はどうだろうか。一般相対性では、ブラックホールが基本的存在物として最初から仮定されているわけではない。しかし、「ブラックホール」の特徴づけは理論から導かれ、その特徴付けから予測される兆候が観測によって確認できたと見なされるなら、先の言明は確からしいと見なされ、それを要約したものとして、先の言明は科学的に真であると認められるかもしれない。「ブラックホールが存在する」という意味が、ここまでのことなら、科学哲学者はことさら異議を唱える必要はないのである。たとえて言うなら、「わたしの目の前にマックのコンピュータが一台存在する」という言明に、（事実マックがあって見てさわれるのなら）、何も問題がないのと同様である。要するに、科学内部での一定の手続きにしたがって「存在の証明」が経験的にできるので、その手続きが満たされたということのを要約したのが「存在の言明」なのである。この意味で「中間子の存在」が認められたので、湯川秀樹はノーベル賞を授与されたのである。同じ意味での、原子の存在、電子の存在、そしてブラックホールの存在には、よほどへそ曲がりでない限り、科学哲学者は異議を唱えない。

しかし、次のステップが重要な一線を越えることになる。それが「科学的实在論」という哲学的な立場にほかならない。この立場では、科学理論の経験的成功（諸種の現象を説明し、実験的検証に十分にたえる）が理論評価の重要な基準であることは当然認めるが、そのような成功を収めた理論は、理論とは独立に存在する実在世界について正しい知識、少なくとも近似的に正しい知識を与えると見なしてよい、という主張にまで踏み込む。たとえば、クオーク理論が経験的成功を収めた場合、「この理論はこれだけの成功を収めたのだから本当に正しく、クオークは実在する」と主張するのが实在論者である。「本当に」「实在」という言葉は、レトリックではなく、「科学的手続きで存在を証明されたものは实在の証である」という、もう一段階踏み込んだ（メタレベルでの）主張を表している。

しかし、实在論者のこの議論（もちろん、他にいろいろ補強する論法を彼らは補うのだが、それを当面无視しても本質的なところには影響がない）、われわれがすでに見たオイラーの論法と大差ないではないか。絶対空間や時間の「实在」は、ニュートン力学がいかに大きな成功を収めても決して示されていない。この歴史的教訓を知ってか知らずか、偉大な科学者の言辞をタテにした科学的实在論擁護はその後も繰り返されている。これに冷や水を浴びせたのが、（もう少々古くなったが）アーサー・ファインの『シェイキーゲーム』（1986）だった。量子力学に関するアインシュタインの「实在論的理論」（簡単に言えば、諸種の物理量が、観測するかしないかに依存せず確定しているような理論）の擁護は、「科学的实在論擁護」ではないことを、綿密なテキストの読みによって示し、科学的手続きによる通常の「存在証明」を超える「实在証明」は無益であると説得的に論じたのである。ある理論の正当性をその理論の外側から（つまり、メタレベルで）示すためには、当の理論よりも強力な枠組みや言語を用いなければならない。しかし、科学的手続き以上に強力な存在証明の手段を、われわれはいったいどこに持っているのだろうか。

かくして、わたしがたどり着く結論は次の通りである。量子重力の緊縮路線、拡張路線のいずれについても、彼らの理論はモデル構築の試みと理解すべきである。それぞれの理論において、基本的な存在論を展開するのは自由である。

現象の組織化を異なった形で試みることも自由である。しかし、それぞれのモデル構造の中で、経験とふれあう底辺部分での検証は絶対に不可欠である。なぜなら、現実の世界で、われわれに対して否応なく現れてくる経験的現象こそ、科学に謎解きが要求されている当のものだからである。そのような検証の積み重ねで、仮定されたある種の存在物については、科学的手続きによる「存在証明」を認めてもいい。しかし、その証明に単なるレトリックを加えるだけで「実在証明」にすり替えようとするのは、科学者も哲学者も厳に慎まなければならない。しかし、この哲学的な意味での「実在証明」が得られないからといって、量子重力の様々な試みや、科学理論構築の一般的な営みの値打ちがいささかも損なわれることはない——「数学的な美しさ」を過度に追究して経験をないがしろにしないかぎり。

## 文献

- 川合光 (2005) 『はじめての〈超ひも理論〉』講談社現代新書、2005
- ランドール、L. (2007a) 『異次元は存在する』NHK 出版、2007
- ランドール、L. (2007b) 『ワープする宇宙』NHK 出版、2007
- 竹内薫 (2005) 『ループ量子重力入門』工学社、2005
- 戸田山和久 (2005) 『科学哲学の冒険』NHK ブックス、2005
- 内井惣七 (1995) 『科学哲学入門』世界思想社、1995
- 内井惣七 (2004) 『アインシュタインの思考をたどる』ミネルヴァ書房、2004
- 内井惣七 (2006) 『空間の謎・時間の謎』中公新書、2006
- Bousso, R. (2002) “The holographic Principle”, hep-th/0203101 v2
- Dobado, A. (2005) “An Elementary Introduction to the Holographic Principle”, hep-ph/0506027 v1
- Euler, L. (1748) “Réflexions sur l’espece et le temps”, *Leonhardi Euleri Opera Omnia*, series tertia, vol. 2, 376-383. Uchii’s English translation at: [http://www.bun.kyoto-u.ac.jp/phisci/Newsletters/newslet\\_41.html](http://www.bun.kyoto-u.ac.jp/phisci/Newsletters/newslet_41.html)
- Fine, Arthur (1996) *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*, 2<sup>nd</sup> ed., University of Chicago Press (1<sup>st</sup> ed., 1986). 初版の邦訳『シェイキーゲーム』(町田茂訳)、丸善、1992
- Greene, Brian (2004) *The Fabric of the Cosmos*, Penguin Books.
- Smolin, Lee (2001) *Three Roads to Quantum Gravity*, Basic Books.
- Suskind, L. (1994) “The World as a hologram”, hep-th/9409089 v2
- ’tHooft, G. (1993) “Dimensional Reduction in Quantum Gravity”, gr-qc/9310026 v1
- Uchii, S. (2008) “An Informational Interpretation of Monadology”, *Proceedings of Logic, Methodology, and Philosophy of Science*, to appear.
- Van Fraassen, Bas (1980) *The Scientific Image*, Oxford University Press.