

書籍紹介

ブライアン・グリーン『エレガントな宇宙』（草思社、2001年12月刊）

学校の歴史授業で現代史を学ぶ機会がほとんどないのと同様に、物理学でも数学でも、高校時代までに学べる理論は、高々、17-18世紀止まりである。専門家でもない限り、日常に使用する数学は整数の四則演算、壁塗りや板張りの面積計算程度で、これなどはギリシア時代の数学の域を出ない。ほとんどの人々は人類が探求し続け、打ち立てた最新の科学的発見や理論を知ることなく生涯を終える。

しっかりした科学教育を受けていれば、UFO騒ぎや麻原の空中浮揚などに惑わされることもないだろうが、残念ながら我々の科学知識は最先端の水準から見て、何百年も遅れている。人類が地球や宇宙をどこまで解明したか、これからどのような世界が見えてくるのか。本書はそのような関心を抱いている読者を対象にしている。

非ユークリッド幾何学

「三角形の内角の和は180度である」、「直線上にない一点を通り、その直線に平行な直線は1本だけ引ける」、「平行線は交わらない」。われわれが学校教育で教わる数学である。ギリシア時代のユークリッドによって体系化された幾何学（ユークリッド幾何学）の公準の一つだ（平行線公準）。しかし、数ある公準の中で、これだけは基本公理から論理的に導けないことがギリシア時代から知られており、以後の数学者はこの公準の論理的な導出に苦心した。

ところが、19世紀になって、この平行線公準を否定する幾何学が発見された。つまり、「三角形の内角の和は180度にならない」、「平行線は複数引けて、かつ交わる」という公準を設定しても、矛盾無く幾何学が創られることが証明された。ロシアのロバチェフスキーとハンガリーのボヤイがほぼ同時に、「三角形の内角の和が180度より小さくなり」、かつ「平行線が少なくとも複数引ける」幾何学を樹立した。これが非ユークリッド幾何学である。彼等の発見よりほどなく、今度はドイツのリーマンが「三角形の和が180度より大きくなる」幾何学を樹立した。これも非ユークリッド幾何学で、リーマン幾何学と呼ばれる。

素人にはいったいこんな幾何学に何の意味があるのかと疑問が生まれる。机の上に描く三角形の内角の和は、歪んで描かなければ、180度より変りようがない。しかし、よく考えて見ると、地球儀の上に三角形を描くと、どんな三角形もその内角の和が180度より大きくなる。外側に膨らんだ三角形ができるからである。つまり、建築現場や家屋の面積計算の仕事には我々の学んだ幾何学で十分だが、地球や宇宙を相手に幾何学を考えると、リーマン幾何学などの非ユークリッド幾何学を使用しなければならないことが分かる。

とすると、我々の狭い日常視覚の世界と、人間の視覚を超える宇宙の世界では、異なる原理が作用しており、適用される数学も違うということだ。地球上で人間が経験できる狭い範囲に限定する場合にはユークリッド幾何学が有効だが、ある一定の境界を越えるとそこには非ユークリッドの世界が広がる。

学校教育ではこのようなことを教えてくれないが、非ユークリッドの世界を知らない限り、実はアインシュタインの相対性理論も理解できない。なぜなら、アインシュタインの一般相対性理論とは、重力による宇宙（空間、時間）の歪みの理論だからである。アインシュタインは発想に優れており、宇宙空間が一様な空間ではなく、質量の重い星の周りを重力によって変形され歪んだ空間が取り囲むと考えた。まさに非ユークリッドの世界を物理学的に解釈したのである。

アインシュタイン自身は数学が得意ではなく、彼の大学時代の先生（ミンコフスキー）や友人（グロスマン）、妻（ミレヴァ）がアインシュタイン理論の数学的な定式化に貢献したといわれている。とくに相対性理論にリーマン幾何学が適用できると教えたのは、ブダペストに生まれブダペストの学校教育を受けたドイツ系のグロスマンである。グロスマンは高校時代にスイスに移住し、そこで高校を卒業してアインシュタインと一緒にスイス連邦工業大学に通った。

アインシュタインは相対性理論ではなく、「光量子仮説」でノーベル賞を受賞しているが、ノーベル賞賞金の半分を離婚した妻ミレヴァに渡した。それほど、彼女の貢献が大きかった。また、現在、一般相対性理論の隔年の国際会議は「マーセル・グロスマン会議」と称されている。グロスマンの貢献の大きさに敬意を表してのことだ。本書『エレガントな宇宙』にアインシュタインがリーマン幾何学を適用したのは、彼の先見性と非凡さの現れと持ち上げているが、相対性理論確立の実際のプロセスはそれほど単純でなかった。

本書のテーマ

前書きが長くなったが、評者は本書を新しい宇宙論を扱ったものだと思い込み購入した。ところが、中身を見るとそうではなく、量子力学の最先端の研究を紹介するものだ。英語は *“superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory”* となっている。訳すと、「超弦（ひも）、隠された次元、究極理論の探求」ということになる。なにやら小難しいが、簡単にまとめると、「素粒子の実体は「ひも」（string）のような一次元の物質であり、この「ひも」理論から量子力学が直面している矛盾を解決して、物質の最終的な実体を明らかにする究極理論が樹立される。その理論的な核心となるのが、我々の目には見えない隠された次元である」ことを、非専門家に説明するために書かれた書物である。著者グリーンは現代物理学の世界でも有数の天才物理学者と評価されている。アメリカでは第一線の研究者が初級者向けのテキストを書く。日本の大学教授は素人向けのテキストを書くことはない。大学教授は研究論文を書いても、初級テキストなど書くものではないと考えるからである。アメリカには「優れた研究者は優れた教育者でもある」という哲学があるようだ。

さて、現在の物理学の世界を見ると、地球上の狭い物理現象を説明するのにニュートン力学が使用され、宇宙のマクロの物理現象には相対性理論が、原子を構成するミクロの素粒子の物理現象には量子力学が使用されている。ニュートン力学は相対性理論の特殊理論とみなすことができるから、現在の物理学は簡単にいうと、相対性理論と量子力学から構成されている。

ここからが問題である。相対性理論と量子力学の棲み分けは、適用分野ではっきりしているようだが、この棲み分けが不明瞭になる分野がある。それはブラックホールとビッグバンである。この両者に共通しているのは、非常に大きな質量の星（宇宙）が収縮して非常に小さな体積の途方も無く重い物体に転換されることだ。たとえば、地球が直径2センチ程度の物体に収縮するという事例がブラックホールを生み出す質量に対応する。このような物体の物理解析では、相対性理論と量子力学が収斂する。同じことは、ビッグバンの解析についても言える。

ところが、この極限の状態に相対性理論と量子力学の二つの理論を適用すると、非常に矛盾した結果が表れ、説明がつかなくなる。ビッグバンとブラックホールの二つの現象は、相対性理論と量子力学が両立しない事象なのだ。これまでの科学理論の発展から言えることは、この種の矛盾が現れる場合、どちらかの理論が正しくないか、あるいは両方の理論が完全に正しくなく、別の一般理論が必要になる可能性を示唆している。そこでこれを解決する理論として注目されているのが、「ひも理論」である。究極の物質は粒のようなものではなく、弦のように振動する「ひも」（弦）であり、これを前提して量子力学を再構成すれば、相対性理論との矛盾が解決できるというのが、「ひも理論」である。現在、最高級の物理学の頭脳がこの問題に取り組んでいる。まさに、現代物理学の最先端の研究・論争なのである。

しかし、素粒子の研究ではどこまで物質の実体に迫ることができるのか、何が究極の物質なのかについて、研究者の判断が異なっている。そもそも究極の物質を探ることができるのか、素粒子は無数の階層から構成されているのではないかという予測がある。だが、「ひも理論」は「ひも」が究極物質だと主張する。

「ひも」と隠された次元

物体は分子から構成され、分子は原子から構成され、原子は陽子と電子から構成され、陽子は中性子とその他の素粒子から構成されと、究極の物質はだんだん小さくなる。人間世界の1mmは非常に小さな長さだが、素粒子の世界では巨大な長さだ。1mmの何百万、何千万分の1の世界が、素粒子の世界だ。そのような世界を我々の目で見ることができないが、物理学者はそれを確かめるために原子を分解させる実験装置（加速器）を作ってきた。

ミクロの素粒子の世界は奇妙だ。素粒子の世界では確定論的な決定ができない。素粒子の運動と位置は確率論的にしか決定できない。アインシュタインがどうしても量子力学を受け入れることができなかった点だ。そのような素粒子の運動は何から成り立っているのか。素粒子は何か粒のような物体だと前提されているが、

果たしてそうなのか。有限の階層にあるのか、それとも人間には到達できない無限の階層から成り立っているのか。

「ひも理論」学者はこれに最終結論を与える理論と自負する。素粒子の最後の形態は「粒」のようなものではなく、「ひも」のような振動運動を行う長さをもった一次元の実体だというのである。「ひも」が弦の振動運動のように動くと前提すると、素粒子の振る舞いを説明することができ、かつ相対理論との矛盾が解決する。この理論を矛盾なく樹立するためには、いくつかの理論仮説が必要になる。

その中心になっているのが、「隠された次元」(hidden dimension)である。それによれば、「ひも」理論が新たな量子力学の理論として一般性を獲得するためには、素粒子の世界が九次元からなる世界であると仮定するとうまい具合に説明がつくという。地球上の可視的な世界は三次元だが、宇宙やミクロの世界はもっと多くの次元から構成されていると考えて不思議はない。実際には二次元で構成されるものが、一つの次元が巻き上げられていて、見た目には一次元に見えることだって考えられる。たとえば、二次元の紙を丸めて筒のようにして、遠くからみると一次元の線のように見えるが、そこには次元が一つ隠されている。これは喩えにすぎないが、そのような巻き上げられて我々の目には見えない時限が六次元あると仮定して、それに我々の知る三次元空間と時間の一次元を付加して十次元の世界を仮定するのである。

隠された六次元を有する空間は、「カラビ-ヤウ空間(図形)」(CALABI-Yau Manifold)と呼ばれ、「ひも」学者はこの空間を分析する研究を行っている。評者がサーフした限りでは、次のサイトにこの図形の一つを見ることができる。

www.lactamme.polytechnique.fr/Mosaic/images/CAYA.11.16.D/display.html

このような六次元空間を前提にした理論では、複数の「ひも」理論モデルが構築され、一つに定まらないという。その難点を解決されるための理論が「超ひも」(superstrings)理論で、これは隠された次元を一つ増やして七次元にしたものである。既存の三次元空間と時間の四つの次元を加えて、十次元空間とも呼ばれる。この空間を前提すると、六次元の場合にモデル化される複数の「ひも」理論が一つに統合されるという。だから、「超ひも」理論は大統一理論(theory for everything)になるというのである。

こうして「ひも」学者は、「カラビ-ヤウ空間」という新しい幾何学を樹立し、これを使った分析を積み重ねて、新しい素粒子の世界を理解しようとしている。これが実現した暁には、「ひも」理論はミクロとマクロの世界の理論を統一する究極理論(the ultimate theory)になるというのが、「ひも」学者の意気込みである。

物理学者の意気込みは、本書を通してよく分かる。最先端の学者がどのようにして研究をおこなっているかが、ひしひしと伝わってくる書物である。他方、「ひも」理論が究極理論になりうるという議論を、素直に受け入れるのは難しい。なせに量子力学が物理学の理論として認知されてから、まだ百年も経っていない。人類の歴史の中で、宇宙やミクロの世界が分かりだして、まだ百年も経っていない

いのだ。まして、太陽系の成り立ちや、銀河系の成り立ちや構造についても、その理論的な仮説が立てられたのは最近のことだし、観察データそのものが極めて少ない。生体や地球、さらには宇宙についての人類の知識はまだそのほんの初歩的な段階にあるのではないか。これから人類が生存していく限り、地球や宇宙への知識が深まっていくことになるが、これからの何百年何千年の過程で既存の理論をひっくり返すような発見やデータが出てくるはずだ。「ひも」レベルの「素粒子」の実験データや宇宙の観察データがほとんどない状況で、数学モデルだけから「宇宙の究極理論、万能理論が樹立される」と考えるのは、あまりに傲慢、いや楽天的にすぎはしないか。

宇宙の悠久さ

こういう問題の重要性を理解するためには、宇宙のマクロの世界や素粒子のミクロの世界が、我々の日常の常識からいかにかけ離れた世界であるかを知らなければならぬ。我々の常識ではとうてい理解できない世界が広がっているからだ。逆に言えば、我々が地球上で毎日経験し、可視的な世界は、宇宙のほんの特殊な世界でしかないのだ。その不思議さを感じ、理解できない人は永遠に宇宙を理解できないだろう。

光が光子の波であり、電磁波の一種であることが分かったのは20世紀になってからである。そして、光の速さ（光速）が一定で、電磁波も光速の速さで1秒間に地球を七周半もする速さだ。光にとって1秒はとても長い時間だ。そのお陰で、我々は電話やインターネットの世界を瞬時的に利用できる。太陽からの光も、光速で地球にやってくる。およそ8分間で太陽からエネルギーを運ぶ電磁波の光が地球に届き、地球の生き物を育む。太陽が水素の核融合でエネルギーを生み出していると分かったのも、20世紀も半ばになって漸く分かったことだ。まだ40億年近くも水素を燃やすほど燃料があるという。途方も無い世界だ。逆に見ると、その燃料が途絶えた時に太陽は死滅し、それにつれ太陽系は終末を迎える。終末期に太陽は膨張し、水星や金星を飲み込むほどに膨れる。地球は膨張する太陽に飲み込まれるか、生き物が住めない世界になってしまう。

このような悠久の時間から見ると、地球上に知的な生物が文明を築いた時間は、宇宙のほんの一瞬のできごとでしかないのだ。直径数キロメートルの小惑星が衝突しただけでも、人類は死滅してしまう。宇宙とはこのように無常無慈悲な無機の世界なのだろう。

これまで多くの天体物理学者が地球に似た惑星を探し、知的な生物の存在可能性を探ってきた。多くの学者は、太陽系は特別な惑星系ではなく、ありふれた惑星系だから、宇宙に広がる銀河には地球に似た星はたくさんあるだろうと推定してきた。しかし、これまでそのような星が見つかっていない。ということは、知的生物が生存する現在の地球は、非常に稀な条件がいくつも揃って偶然に、何千万何億万分の一の確率で現れる、宇宙にとって稀な現象なのではないかという仮説も可能である。かつ、そのような知的生物が存在できる宇宙時間はきわめて短

いと考えれば、宇宙から知的生物の生存を暗示するような情報がまったく届かないことも理解できる。その意味で、人間がこの地球上に生まれ、このような社会生活を送っているというのは、宇宙の歴史の中でとても稀有な時間なのではないだろうか。

太陽が膨張を始める前に、人類は別の惑星へ移動するという物語も描けるが、それは映画の世界だけに限られる。光速で移動しても人が生きる時間内には別の惑星体系に到着することはできない。相対性理論によれば、光速で移動できれば時間が縮むから、倍の時間を使って移動できるかもしれないが、それでも人が住める惑星に辿りつくことなど到底できないほど宇宙の距離は途方もなく大きい。1秒は光にとって長い時間だが、1光年は宇宙時間にとって1秒にもならない短さなのだ。もっとも、太陽が膨張するはるか以前に、別の原因で人類は終末を迎える可能性が高い。

このような存在である人類が、いったい宇宙をどこまで知ることができるのか。それは永遠の探求になるはずだ。だから、21世紀のこの瞬間に、ビッグバンやブラックホールの観察データもなしに、究極理論が人間の頭の中だけから出てくるとは到底考えられない。そのような理論がでてきたとしても、それは拡張された量子力学であり、20世紀物理学の一つの到達点を画期するだけのもので、いずれ新たな観測データや実験データによって限りなく修正を加えられていくことになるう。

科学の統一の時代

素粒子の世界の解明が進むにつれ、分裂していた科学が再び統一の方向に向かっている。これは非常に興味深い現象だ。人体のミクロの世界の解明に、分子生物学、生物化学、生物物理学、遺伝子学がすべて必要になる時代になってきた。いわば新しい学際分野が開かれつつある。遺伝子の分析を治療に役立てようと思えば、化学、物理学、生物学、数学がみな必要になる時代になった。DNAのモデルチップも教育用に作られる時代になっている。新しいチップ基盤の開発でも半導体産業は素粒子の世界に入り込んでいる。人類の科学も工業も、可視的世界には見えない世界に入り込んでいる。そして、そこには可視的世界の常識や想像からは考えられないような世界が広がっている。

「ひも」理論は直接にこれらの応用科学に影響するものではないが、素粒子の新しい理論的解明によって、原子や分子の運動に新しい説明を与える可能性がある。それがナノ世界の技術を発展させる力になるかも知れないし、生化学に新しい解明の視点を与えてくれることになるかもしれない。それでも、人類の人体、地球、宇宙の理解は、まだ始まったばかりだという謙虚さが必要だ。人類が存在する限り、その探求が続けられるだろう。それに終わりはないはずだ。