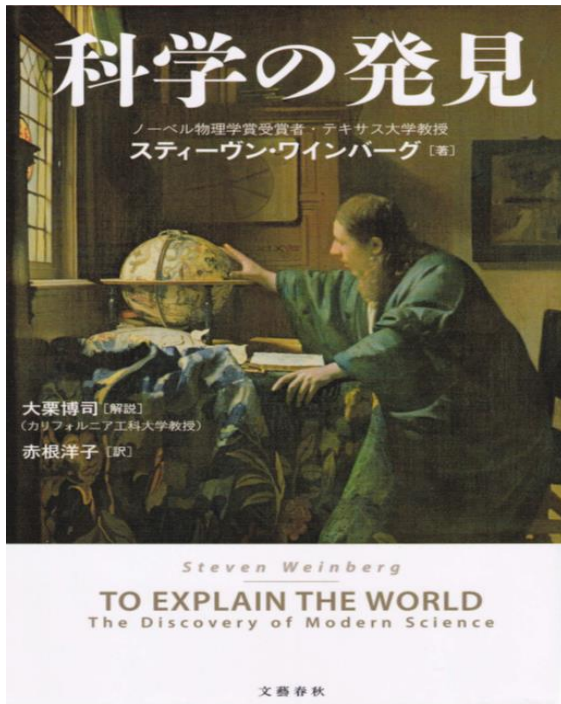


タイトル「科学の発見」（全 428 ページ）

出版社：文藝春秋

2016 年 5 月



著者「スティーヴン・ワインバーグ」 Steven Weinberg

1933 年、アメリカ生まれ。理論物理学者。カリフォルニア大学バークレー校、マサチューセッツ工科大学、ハーバード大学などを経てテキサス大学オースチン校の物理学・天文学教授。2021 年 7 月没。量子論の統一理論への第一歩となる、「電磁力」と「弱い力」を統合する「ワインバーグ＝サラム理論」を 1967 年に発表し、79 年にノーベル物理学賞を受賞する。

専門にとどまらない深い教養を備え、一般向けにも多数の著作を発表する、現代で最も尊敬される科学者のひとり。

本書はテキサス大学で教養学部生向けに行った科学史の講義をもとに執筆された。現代の科学的方法論がいかに発見されたか、という観点から過去の科学者をさばいた本書は歴史家や哲学者の大反響を呼び、2015 年欧米の論壇で最も物議をかもした一冊となった。

本書のコアコンテンツ

はじめに 本書は不遜な歴史書だ

科学の目標は、自然現象を純粋に自然現象として説明することである。科学は累積的な営みである。

新しい理論は常に、それ以前に成功していたいろいろな説を、改善して組み入れていく。そして以前の説がうまく機能する場合は、なぜそれがうまくいくのかまで説明できる。

古代や中世の科学者たちには、こうした認識は無縁だった。これらはすべて、十六世紀～十七世紀の科学革命の時代に多大の労苦の末に獲得されたものである。現代科学のようなものが最初から目標とされていたわけでは、まったくなかった。それでは、科学革命はどのようにして起こり、科学はどのようにして現代のようなものになったのだろうか。これこそが「科学の発見」を探求する本書のテーマである。

第一部 古代ギリシャの物理学

第一章 まず美しいことが優先された

ゼノンは、運動の不可能性を証明するために数々の逆説を展開している。たとえば、競技場の走路を走りきるためには、まずその距離の半分を走り、それから残りの距離の半分を走り、そのまた残りの半分を走り……ということを無限に続けなければならない、よって、走路をすべて走り切ることは不可能だ、という逆説がそれである。現存する断片から判断できる限りは、これと同じ論法で、「いかなる距離も走る切することは不可能であり、よってすべての運動は不可能である」とゼノンは主張したようである。

もちろん、ゼノンの論法は間違っている。

特筆すべきは、むしろ「運動が不可能であるなら、なぜ物体は動いているように見えるのか」を彼らが説明しようとしていない点である。実際、タレスからプラトンにいたる古代ギリシャの哲学者たちは誰一人として、より深いレベルの現実に関する自らの理論が見かけ上の世界をどう説明するのか、詳らかにしていないのである。

第二章 なぜ数学だったのか？

ピタゴラスの定理は、「幾何学的作図には、整数比で表せない長さが含まれることがあり得る」というもう一つの偉大な発見に直結した。直角二等辺三角形の、直角をはさむ二辺の長さがどちらも1（単位は何でもいい）であるとき、この二辺が作る正方形の面積の和は $1^2 + 1^2 = 2$ である。よって、ピタゴラスの定理に従って、斜辺の長さはその平方（二乗）が2となる数でなければならない。しかし、その平方が2となる数を整数比で表すことはできない（テクニカルノート5参照）。

現代の用語を使えば、これは「2の平方根などの数が無理数（整数比で表すことのできない数）であることの発見ということになる。

第三章 アリストテレスは愚か者か？

現存するアリストテレスの著作は、主にリュケイオンでの彼の講義ノートだと思われる。それらが取り扱うテーマは、天文学、動物学、夢、形而上学、論理学、倫理学、修辞学、政治学、美学など驚くほど多岐にわたっているが、その中に、一般的に「物理学」と翻訳されているジャンルがある。

リンドバーグは、「どこまで現代科学を見越していたかという基準でアリストテレスの業績を判断するのはアンフェアだし、無意味である」と述べている。さらに同じ著作の第二版「哲学体系や科学理論の正しい判断基準は、それが現代思想をどれだけ先取りしているかではなく、当時の哲学的・科学的問

題の解決にどれだけ成功したかである」と主張している。

この意見には賛成しかねる。(哲学については措くとしても) 科学において重要なことは、その時代特有の問題を解決することではなく、世界を理解し説明することである。本書を読み進めるうちに読者は、どのような説明が可能かを、さらにどのような問題がこうした説明に繋がるかを発見するだろう。科学の進歩とは、主に、どんな問題を問題にすべきかを発見することだったのである。

第四章 万物理論からの撤退

アレキサンドリアの学者たちは、現実的な成果を上げることのできる具体的な現象の理解に精力を注いだ。その結果、工学や流体静力学(訳注: 気体・液体といった流体の変形や力を扱う流体力学の一部)が発達し、中でも第二部のテーマである天文学は大きな進歩を遂げた。

第五章 キリスト教のせいだったのか?

プラトンの考察は宗教に満ちあふれている。神が惑星の軌道を定めた、と『ティマイオス』で述べているし、惑星そのものを神々だと考えていたかもしれない。

三一三年、キリスト教はコンスタンティヌス一世によって公認され、三八〇年、テオドシウス一世によって国教と定められた。この時代に、ギリシャ科学の偉大な業績は終わりを迎えようとしていた。

重要な原因は、「異教徒の科学は、キリスト教徒が取り組むべき霊的な問題から人の関心をそらすものだ」という初期キリスト教徒に蔓延していた考え方にあったものと思われる。

もう一つの要因は、キリスト教が、教会での立身出世の機会を、知的な(つまり違う道を選んでいれば数学者や科学者になったかもしれない)若者に提供したことだった。

第二部 古代ギリシャの天文学

第六章 実用が天文学を生んだ

現代の街中とは違って光害のない夜空を観察するうち、多くの古代文明の観測者たちは、星々がいくつもの例外を除いて、(この例外については後述する)互いの位置関係を変えないことを明確に理解した。しかし、こうした「固定された」星々がちりばめられた天空は、毎晩、天のある一点(これは常に真北であることから、天の北極と呼ばれる)を中心として東から西へ回転しているように見える。

グノーモンのおかげで、各季節の日数(春分から夏至まで、夏至から秋分までの日数など)が正確に数えられるようになった。

ある意味、太陰暦は太陽暦よりも便利である。月の形を見れば、前回の新月からだいたい何日たったのかすぐわかる。残念ながら、一年は大陰暦では割り切れない。一年は太陰暦を十二倍したよりもおよそ十一日長い。したがって、太陰暦では春分・秋分や夏至・冬至の日付が定まらない。

近代まで、暦の作成は天文学者の主な仕事の一つだった。一五八二年、ローマ教皇グレゴリウス十三世の後援の下で現代の暦が採用された。

第七章 太陽、月、地球の計測

ギリシャ天文学の最も目覚ましい業績は、地球、太陽、月の大きさ、および地球から太陽、月までの

距離を測定したことである。得られた結果は数値的には正確ではなかった。しかし、それは世界の本質について量的結論を引き出すために数学が正しく使われた初めての例だった。

アリストアルコスと現代の天文学者や物理学者の本当の違いは、彼の観測データが誤っていたことではなく、彼がデータの不確実性の評価を行おうとしなかったこと、あるいはそのデータが不完全かもしれないことを認めてさえいなかったことにある。

古代世界に地動説が定着しなかった理由を述べるのは簡単である。地球が動いていることを我々は感じない。そしてそれを感じなければならぬ理由がないことを、十四世紀まで誰も理解できなかった。また、アルキメデスを含めて誰も、動いている地球から惑星の動きがどう見えるかをアリストアルコスが解明していたことに言及しなかった。

第八章 惑星という大問題

エウドクソスとカリポスの同心天球説では、太陽と月と各惑星はそれぞれ別個の何重かの天球を割り当てられ、それぞれの一番外側の天球はすべて、恒星がちりばめられた天球と全く同じように回転すると考えられた。これは現代の物理学者たちが「ファイン・チューニング」と呼ぶものの、古代における一例である。科学理論にファイン・チューニングが現れることは「どこかが間違っている」という自然からの嘆きの声のようなものである。

物理学者で哲学者でもあったピエール・デュエムは、二十世紀初頭に書いた著書の中で、プトレマイオス派を支持しているが、テオンやアドラストスはそのモデルに実体を持たせようとしたことには批判的であった。ことによると、信仰心の厚いデュエムは、「科学は、観察結果と一致する数学的理論の構築のみにその役割を限定すべきだ」と考え、すべてを説明しようという包括的な努力に対しては否定的だったのかもしれない。

私はそのような見解には共感できない。現代物理学の営みは物事の単なる記述ではなく、説明（「説明」という言葉の一般的な意味合いで）だと思うからである。「記述」と「説明」を明確に線引きすることはたしかに難しい。世界に関するある法則を「説明する」とは、それがさらに基本的な法則からどのように導き出せるのかを示すことだと言えるだろう。

第三部 中世

第九章 アラブ世界がギリシャを継承する

ヨーロッパの天文学者に最も大きな影響を与えたアラブ人は、八五八年頃メソポタミア北部で生まれたアル＝バッテリーニー（アルバテニウス）である。彼はプトレマイオスの『アルマゲスト』を用い、さらにそれに訂正をも加えて、天の赤道と黄道がなす角度（およそ二三・五度）、一年及び各季節の長さ、春分点歳差、恒星の位置、をより精確に測定した。ピッパルコスが計算に用いた弦の代わりとして、（弦と密接な関係にある）正弦法をインドから導入したのも彼である（テクニカルノート 15 参照）。彼の著作は、コペルニクスやティコ・ブラーエに頻繁に引用されている。

中世イスラム世界で科学に対する敵意が次第に高まっていったことを立証するものは、アル＝ガザリーの著作だけではない。一一九四年、バグダッドから遠く離れた、イスラム世界の西端コルドバ（ムワッヒド長の支配下にあった）で、あらゆる医学書や科学書がイスラム神学者たちによって燃やされた。

第十章 暗黒の西洋に差し込み始めた光

翻訳によって最も大きな直接的影響力を及ぼしたのはアリストテレスの著作だった。

アリストテレスの著作はキリスト教会全体から歓迎されたわけではなかった。聖アウグスティヌスの先例などを通じて、中世キリスト教会は従来、アリストテレスよりもプラトンや新プラトン主義から遥かに強い影響を受けていた。

一二七七年に異端宣告された命題は、異端とされた理由によって分類することができる。まず第一に、聖書の記述に直接矛盾する内容が含まれる命題である。たとえば、世界の永続性を述べた命題がそれにあたる。

宗教的権威を否定する真理探究法を述べているために、異端とされた命題もある。

また、「哲学的・科学的推論は、神の自由を制限することにつながるのではないか」という、アル=ガザリーを悩ませたのと同じ問題を提起する命題も異端とされた。

アリストテレス及びアキナスの命題の禁止は長くは続かなかった。一三二五年には、異端宣告はパリ司教によって撤回された。

異端宣告とその撤回という十三世紀の出来事は、おそらくこう要約することができるだろう。異端宣告はアリストテレス絶対主義から科学を救い、その撤回はキリスト教絶対主義から科学を救ったのだと。

第四部 科学革命

第十一章 ついに太陽系が解明される

十六～十七世紀の物理学と天文学の革命的变化は、現代の科学者から見ても歴史の真の転換点だ。コペルニクス、ティコ、ケプラー、ガリレオの計算と観測で太陽系は正しく記述され、ケプラーの三法則にまとめられた。

コペルニクスは短い匿名の論文を書いた。

コペルニクスの全体的なアイデアを最もシンプルに具体化すれば、「地球を含む各惑星は、太陽を中心として円形の軌道上を一定の速度で運行している。周転円はどこにもない」というモデルになっただろう。

科学の将来にとって本当に重要だったのは、同時代の天文学者たちがコペルニクス説を受け入れたことだった。

コペルニクスの理論は、一五五一年に天文学者エラスムス・ラインホルトがこれを使って、任意の日付における惑星の黄道上の位置を算出できる新しい天文表（プロイセン表）を作成したことから信望を得た。

一五七七年にはティコは彗星の観測を行い、それに日周視差が見られないことを発見した。これはまたしてもアリストテレスの説に反する発見だったが、今回の発見は、月の軌道以遠の天空で変化が起きることを示すだけに留まらなかった。今回の観測結果は、「アリストテレスの同心天球にしろプトレマイオスの天球にしろ、そんなものがあるとすれば、彗星はそれらを突き抜けてしまっただろう」ということも示していた。

ヨハネス・ケプラーは、プラトン以来天文学者を悩ませてきた、「惑星の運行を等速円運動でうまく

説明できないのはなぜか」という問題に初めて正しい答えを出した人物である。

ケプラーは、当時の一般的な考え方に従って軌道を円形と想定し、太陽を中心とする透明な天球に乗って惑星は運行し、円形の軌道を描くと考えている。

『新天文学』第五十八章（全七十章）で、ケプラーはついにこれを明確にする。彼は「地球を含めた惑星は、(太陽を中心とする、ではなく)太陽を一つの焦点とする楕円軌道上を運行している」と結論付けた（これはのちにケプラーの第一法則として知られるようになった）。

「天文学は、現象の数学的記述だけに関わっていればよい。これに対して、物理学とは現象を真に理解するための学問であり、物理学とはすなわちアリストテレスの物理学のことだ」という、アリストテレス信奉者の旧態依然とした考え方に挑戦している。

そしてガリレオ・ガリレイが現れた。

ガリレオは、ニュートン、ダーウィン、アインシュタインと並ぶ、史上最大の科学者の一人である。望遠鏡の導入と使用によって観測天文学に革命をもたらし、彼の運動の研究は現代実験物理学の模範となった。

偉大な六つの発見

1. 一六〇九年十一月二十日、ガリレオはまず望遠鏡を三日月に向けた。すると、月の明るい面に凹凸があることが分かった。

2. 3. 4. 省略

5. 一六一〇年九月、ガリレオは五番目の偉大な天文学上の発見をした。望遠鏡を金星に向け、金星も月と同じように満ち欠けすることを発見したのである。金星が満ち欠けすることはプトレマイオス説でもコペルニクス説でも予想されることだったが、満ち欠けの形は両方で異なるはずだった。プトレマイオス説では金星は常に地球と太陽の間にあるから、金星が半分以上輝くことは絶対にはないはずである。これに対してコペルニクス説では、金星は地球から見て太陽の向こう側にある時には全面に太陽の光が当たる。

これは、プトレマイオス説が誤りであることを示した最初の直接証拠だった。

6. ガリレオは、太陽表面を観察するための独創的な方法を思いついた。望遠鏡を使って太陽像をスクリーンに投影するという方法である。彼の六番目の発見—太陽表面を横切っていく黒点—は、この方法によって成し遂げられた。

一六三三年四月、ガリレオは裁判にかけられた。罪状は、一六一六年の異端審問所の命令書に違反したことだった。拷問器具を見せられたガリレオは司法取引を試み、虚栄心に駆られて言い過ぎたと認めた。にもかかわらず、彼は「異端の濃厚な疑い」で終身刑を言い渡され、地動説の撤回を宣誓させられた。

第十二章 科学には実験が必要だ

ここで「実験の始まり」という場合の実験とは、自然に関する普遍的理論を発見、ないし検証するために行われるそれのみを指している。

十七世紀の実験には、それまでの実験になかった点の一つがあった。実験結果を積極的に公表し、物理理論の正しさを判断する際にこれを役立てられるようにした点である。この傾向は十七世紀初頭、流体静力学の研究（一六一二年のガリレオの『水中の物体について』など）に現れた。さらに重要だった

のは落体の運動に関する定量的研究で、これはニュートンの研究にとって不可欠の前提条件となった。空気圧の性質に関する研究と並んで、これが現代物理学の真の始まりとなった。

『光に関する論考』序文でホイヘンスはこう説明している。

[本書には] こうした、幾何学の証明ほどの確実性をもたらさない、それどころか確実性とはほど遠い証明が見受けられるだろう。幾何学者は不変で議論の余地のない公理によって命題を証明するが、本書では、原理はそこから引き出される結論によって証明されるからである。物事の性質上、他のやり方は不可能である。

これこそ現代物理学の方法を言い表した、考えられる限り最上の表現である。

容器からポンプで空気を抜くことによって、ボイルは空気が音の伝達、燃焼、生命の維持に必要であることを立証した。彼は、気圧計の周囲から空気を抜くと水銀柱が低くなることを発見した。水銀柱を使うことによって、ボイルは空気の入りや温度変化を起こさせずにガラス管内の空気と圧力と体積を変化させ、圧力と体積の関係を調べることができた。一六六二年『新しい実験』第二版で、彼は「圧力と体積の積は常に一定である」と報告した。これがボイルの法則である。

第十三章 最も過大評価された偉人たち

科学史におけるベーコンの名声は、一六二〇年に出版された『ノヴァム・オルガヌム（新機関、あるいは自然の解釈に関する真の方向）』によるところが大きい。ベーコンは極端な経験主義的科学観を表明し、アリストテレスのみならずプトレマイオスやコペルニクスまで切り捨てている。新発見は、第一原理からの演繹によってではなく、自然を偏見にとらわれない目で注意深く観察することから直接生まれてこなければならない、と彼は主張した。

十七世紀～十八世紀の科学者たちは、プラトンやアリストテレスの対局としてベーコンを引き合いに出した。だが、ベーコンの著作から実際に影響を受けた科学者がいたとは私には思えない。ガリレオが実験を始めるのにベーコンの助言は必要なかったし、私が思うにそれはボイルやニュートンについても同様だろう。

デカルトが倫理哲学や政治哲学や形而上学について書いているのなら、彼の業績を評価するうえで、その科学的問題に関する誤りが問題になることはないだろう。だが、デカルトが「自らの理性を正しく導き、科学における真実を探求する方法」について書いている以上、その度重なる誤りは彼の哲学的判断に影を落とさざるを得ない。

デカルトの最大の貢献は、曲線上や面上の点の座標を満たす方程式によって曲線や面を表す、解析幾何という新しい数学的方法を考案したことだった。

解析幾何を使うと、二本の曲線が交差する点の座標や二つの面が交差する曲線を表す方程式を、曲線や面を定義している二つの方程式を解くことによって求めることができる。現在、ほとんどの物理学者は幾何学的問題を解くとき、エウクレイデスの古典的方法ではなくこのような解析幾何を用いている。

第十四章 革命者ニュートン

現在ではライプニッツとニュートンはお互い独自に微積分法を発見したと判定されている。ニュー

トンはライプニッツよりも十年早く発見したが、研究結果を発表したのはライプニッツの功績である。一般的に、公表を決意することは、科学的発見というプロセスにおける決定的な要素である。公表するという行為は、「この研究結果は正しい。よって、他の科学者の利用に耐えられる」という論文執筆者の判断を意味している。だからこそ、現在では、科学的発見の功績は通常それを最初に発表した人のものとされているのである。だが、微積分法を最初に発表したのはライプニッツではあるけど、微積分法を科学に応用したのはライプニッツではなくニュートンだった。ライプニッツは、偉大な数学者ではあるが、自然科学には何ら貢献していない。

ニュートンの運動と重力の理論は、歴史に最大級の影響を与えた。

重力の研究を始めたときのことを、ニュートンは五十年後に振り返って次のように書いている。

私は、重力は月の軌道にまで及んでいるのだと考えるようになった。そして、(天球内部を回転する天体が天球を押している力を推定する方法を発見していたので)「惑星の公転周期と軌道中心からの距離は三対二の比例にある」というケプラーの法則から、私は、惑星をその軌道にとどめている力は軌道中心からの距離の二乗に反比例するに違いないと推論した。軌道上の月を地球表面の重力と比較したところ、ほぼ合致するとわかった。

ニュートンは、潮の満ち引きには月だけでなく太陽も関係していることを知っていた。大潮は、新月あるいは満月の時に起きる。太陽、月、地球が一直線に並んでいるために、重力の影響が増幅するからである。しかし、やっかいなことに海への重力の影響は大陸の形や海底の形に大きく左右される。そこまで考慮に入れるのはニュートンにも不可能だった。

これは物理学の歴史に共通するテーマである。ニュートンの重力理論は惑星の運行といった単純な現象の予測には成功したが、潮汐のような、それより複雑な現象を定量的に説明することはできなかった。現在われわれは、量子力学という理論(クオークを原子核内部の陽子と中性子の中に保っている強い力に関する理論)について同じような状況にある。エネルギー電子とその反粒子が崩壊する際の、強い相互作用をする様々な粒子の生成といった、高エネルギー状態のプロセスがうまく説明できるため、この理論は正しいと信じられている。しかし、この理論は、陽子や中性子の質量といったものの正確な数値の計算には使えない。計算が複雑過ぎるからである。ニュートンの潮汐理論と同じく、この場合も辛抱して待つのが正しい態度である。

第十五章 エピローグ：大いなる統一を目指して

これから科学がこの還元主義の道をどこまで進んでいくのかはわからない。人類の持つ手段ではこれ以上の進歩は不可能だという限界が来るかもしれない。現在、水素原子の質量のおよそ 10^{18} 倍という質量(「プランク質量」と呼ばれている。同じ距離にある二つの電子間の電氣的反発力と同じ強さの重力を持つために粒子が持っていなければならない質量のこと)を基準にすることによって、重力及びその他のまだ発見されてない力の標準モデルの諸々の力と統一できるのではないかと考えられている。だが、人類の経済的資源の全てが物理学者の自由裁量に任されたとしても、そんな巨大な質量をもつ粒子を実験室内で創造することはできないだろう。

あるいは、人類の知的資源のほう尽きてしまうかもしれない。真に基本的な物理法則を理解するだけの能力は人類にないかもしれない。あるいは、全科学の統一枠に収めることが原理的に不可能な現象に遭遇するかもしれない。例えば、意識を引き起こす脳内のプロセスというものは十分に理解で

きるようになるかもしれないが、意識ある感覚そのものを物理学の用語でどのように記述するかは見当がつかない。

それでも、我々はこれまでこの道を長い間歩んできたし、この道はまだまだ続いている。これは壮大な物語である。天空の物理学と地上の物理学はニュートンによって統一された。電気と磁気の統一理論が開発され、それで光を説明できると分かった。電磁気の量子理論が拡張されて弱い磁力と強い核力を包含するようになり、科学と生物学までもが物理学を基礎とする（不完全ながら）統一された自然観に組み入れられた。さらに基本的な物理理論へと、我々の発見する幅広い科学法則はこれまで還元されてきたし、今も還元されつつあるのである。