

第2部 新しい時代の物理学

4. 古典物理学の限界

第1部で述べたように、人類は古代より自然を単純な究極原理によって理解しようとしてきた。そして、古代のインド・中国やギリシャなどの国々における文明の中で、すでにこの究極原理を求める欲求が見られたが、しかしこの時代における探求は、単純な経験と観察とから得られた自然に対する不確実な認識をもとにした推察によるものであり、その真偽を検証するにいたらない、ただ頭の中で答えを考える思弁的なものにすぎなかった。

自然を理解しようとする探求は、その後もずっと継続されて近代に至るにおよび、その探求の過程において論理的に、検証的に自然を理解しようとする態度が生まれた。これが即ち、自然または万物を探求する自然科学の誕生である。

自然科学のなかでも、特にその基礎として十七世紀に近代物理学が確立し、それが更に発展して古典物理学を形成したが、物理学の重要な特徴は、数学によって論理的に理論を体系化し、そして観察や実験によってその理論を実証することにある。研究的な側面から具体的に言えば、物理学は、自然界に存在する物質（万物）をその研究の対象とし、物質（万物）の本質や構造及びその変化や運動の法則を明らかにすることをその目標としている。そして、これらの問題に対して、論理的に答えようとするのみならず、更に観察や実験によって証明しようとするものである。

物理学は自然科学のなかで、自然を理解しようとする探求に最も深くかかわっている一分野であるが、その物理学は現代までに二度の大きな革命を経てきた。第一の革命は近代物理学の確立であり、第二の革命は現代物理学の創立である。

現代物理学は、二十世紀に誕生した量子力学、特殊相対性理論、それと一般相対性理論によってもたらされたものである。それで、この三つの理論を、現代物理学の三本柱と言えよう。実際、現代物理学は（特殊なものを除いて）この三本柱の上に成り立っている。そして、それより発展して、新しい物質観や宇宙観などがもたらされたが、これらについては、次の章で探求したいと思う。

他方、十六世紀末から十七世紀にかけて誕生し確立された近代物理学は、更に発展して古典物理学を形成したが、現代物理学が三本柱の上に成り立っているのと同様に、古典物理学も三本柱の上に、即ち力学、熱力学、それと電磁気学の三本柱の上に成り立っているものであると、筆者は思っている。それは、ほとんどのマクロ世界の現象は、この三つの理論を適用することによって説明できるからである。近代物理学の確立、そしてその発展

による古典物理学の形成について、この章で、以下に探求していきたいと思う。

近代物理学は、「近代物理学の父」と呼ばれるガリレイの「振り子の法則」の大発見をその幕開けとし、そして「物理学の歴史において最も偉大な創造的天才の人」と言われるニュートンの「万有引力の法則」を含んだニュートン物理学の完成に至るまで、およそ百年をかけて確立された。

ガリレイは「自然という書物は数学の言葉によって書かれている」と述べているが、又科学では観察が不可欠で最も重要な事だと言うことをも、先駆けて初めて説いた物理学者である。1583年のことであった。当時19才であったガリレイは、地中海に面した商業都市ピサの大聖堂で、説教をほとんど聞き流しながら、高い天井からワイヤで吊されていたシャンデリアの振れに興味をもち、自分の脈拍を使ってその振れを計ったという。即ち、ガリレイはシャンデリアの振れを観察し、自分の体を測定儀器としてその振れを測定する実験をしたのである。大聖堂のシャンデリアには、いろいろな大きさのものがあり、またシャンデリアを吊しているワイヤの長さもさまざまであったが、その振れの観察からガリレイは驚くべき事実に気付き、重要な真理を発見した。

物理学的用語で言い表せば、シャンデリアは振り子であり、振り子の振れが一往復するのにかかる時間をその周期と言うが、ガリレイが発見したのは、振り子の周期は、おもり（シャンデリア）の重さに関係せず、おもりを吊しているひもの長さ（振り子の長さ）にだけ比例すると言う真理であった。振り子の周期に関するこの真理を法則として表したのが、あの有名な「振り子の法則」である。ガリレイの「振り子の法則」の発見が近代物理学の幕開けであると前に述べたが、これは又同時に運動の科学である力学の発端でもあると言えよう。「振り子の法則」を発見したガリレイは、さらにこの法則のもっと奥底に秘められている重要な謎を解き明かした。そして、その答えは当時の人々の常識を大きくくつがえすような驚くべきものだった。

当時の人々は、手で支えられている物体は、手から放されると、地面に引きつけられて垂直に落下していき、物体の重さが重いほど、地面に引きつけられる力がより大きいので、落下する速度がより速いと考えていた。さて、振り子の場合の物体（おもり）は、ひもによって吊り下げられているので、垂直に落下することができず、その垂直に落下しようとする力が、横方向への動きの変換されて振れるのである。若しも、当時の人々の常識で考えられているように、重い物体ほど落下する速度が速いのなら、振り子の横方向に変換されたおもりの動きも、重いおもりのほうが、軽いおもりよりも速く動き、従ってその周期がより短くなるはずである。ところが、ガリレイが発見したのは、振り子の運動（周期）はおもりの重さに関係しないと言う事であった。

しかしもっと重要なことに、ガリレイにとっては、振り子の問題はこれだけでは終わらなかった。下方向への落下という現象が、振り子の横方向の動きに変換されることに気づいたガリレリは、この両者の現象の関係から、「振り子の法則」より出発して、「落下運動の法則」を解き明かそうとしたのである。即ち、若しも振り子の周期がおもりの重さに関係せず、同じ長さの振り子であれば、重いおもりの振り子でも軽いおもりの振り子でも、皆同じ周期で動くとすれば、おもり（物体）の自由落下の場合でも、重さの如何にかかわらず、すべての物体は皆同じ速度で落下することになる。このような結果は、当時の人々にとって、とうてい信じ難いことであり、はたまた当時の人々よりも科学知識の高い現在の多くの人々にとっても、なかなか受け入れ難いことである。

ガリレリは、この落体の運動法則を検証するために、そしてそれはまた振り子の法則の正しさを確かめる事にもなるのだが、板でつくった斜面の上で球を転がす実験をした。斜面に球を静かにおくと、球は静止状態から動き始め、次第に速く転がっていく。球の速度はだんだんと速く転がっていき、同時に球の到達距離も時間とともに増加していく。しかしガリレリは、これらの増加の現象を数式（代数方程式）で書き現していなかった。現在我々が普通に使っている数学の手法、例えば代数記号や数式、微積分、又は三角法の概念（タンジェントを除いて）などは、当時はほとんど未だ発見されていなかったか、あるいはガリレイが信用しなかったので、使用されなかったのである。その代わりにガリレリが使った数学の道具は、初步的なものだった。数値計算には、ユークリッドの『原論』に定義されてる比と比例が使われ、論証にもやはりユークリッドから学んだ幾何学的なものがほとんどだった。

例えば、いま検討している斜面上の球の運動で、ガリレイは転がっていく球の到着距離が時間とともに一秒ごとに伸びていく有様を測定し観察した結果、第一秒間に到着した距離を、距離の1単位にとると、 t 秒後には球は t^2 の位置に到着することを見いだした。つまり、ガリレイは実験による観察で、斜面上で転がる球の動く距離の時間的変化は、それらの距離を進むのに費やされる時間間隔の2乗の比となることを見いだしたのである。この結果をガリレイは、数式を使って表現するかわりに、傾斜した平面に沿って落ちる、あるいは自由落下する物体が動く垂直距離は落下時間の2乗に比例するという「時間の2乗則」で定式化したのである。

そしてガリレイは更に、この結果が一体何を意味するのかを考えた。斜面上で球を転がすと、時間とともに一定の割合で到達距離が伸びていくことは、即ち一定の割合で速度が速くなることである。一定の割合で速度が増加していく割合、つまり加速されていく割合を「加速度」というが、これがガリレイによる加速度の発見である。そしてガリレイは、

▲
加速度が生じたのは、落下する物体に常に下向きの「何らかの力」が作用しているからであると考えた。この力はニュートンが発見した重力である。

ニュートンは地球の重力を万有引力のなかに含めて「万有引力の法則」で、これを数式で示したのであるが、地球の重力が加速度を生みだすこととは、ニュートンよりも一世代前のガリレイがこの時すでに発見していたのである。しかし、残念なことにガリレイはこれをニュートンのように、明確な数式示すことができなかったのである。ともあれ斜面上で球を転がす実験を実施し、物体の落下の様子を詳しく調べ、それによって加速度を定量的（数値的）にとらえた最初の人物であるという点で、ガリレイは「近代物理学の父」と呼ばれるようになった。

ガリレイの力学は、主に等速度あるいは等加速度で運動する物体を扱っている。等加速運動では、多くは重力加速度運動を扱って、以上のような多大な成果を残したが、上に述べたように、研究の結果を明確な数式（代数方程式）で示すことがなく、数値計算も比や比例を使い、それで定理を示していた。ガリレイは、加速度運動とは別に等速運動を研究したが、その得られた等速運動に関する定理も、次に紹介するそのいくつかの定理のなかで見られるように、比や比例で示されたのである。

まず、一つの物体の等速運動について示した定理は、つぎのような内容のものであった。一様で一定の速さで運動する物体が、二つの距離を移動するとすれば、これらの二つの距離を移動するのに必要な時間間隔の比は、これらの距離の比となる。そして、二つの物体の等速運動については、つぎのような内容の定理を示した。二つの物体が一様な、しかし等しくない速さで、等しくない距離を移動するとすれば、それに必要な時間間隔の比は、距離の比と速さの比の逆数の積となる。

ガリレイの力学を構成するもう一つの、そして最も重要な要素である「慣性」というものについて次に見てみたいと思う。ガリレイは、若しも重力加速度がなかったら、物体は等速運動をするはずであると考えた。そして、このことを確かめるために、ガリレイは斜面を水平にして、球を転がしてその動きを調べた。完全な水平面において球は、手で押さない限り、静止したままである。しかし手で押して初速を与えると、球は一定の速度を保ったまま永久に動いていくのである。

しかし現実には、球の運動が永久に続くことはない。球も平面も完全に滑らかではないために生じる摩擦の影響によって、球はいずれ運動を停止をするのである。だが、若しもこの摩擦を無視すれば、運動する物体は速度をおとすことなく、永久に同じ速度のままで動いていくのだ。ガリレイは、これを「慣性」と呼んだ。そしてガリレイは、これを次のように説明している。即ち、摩擦のない水平面に物体を投射するとすれば、もし平面が無限

に広ければ、この物体はその平面上を等速度で永久に運動するというように説明している。この言葉には、現実の状況を簡単な理想形へ抽象化するというガリレイの才能が表されている。

水平面に静かに球を置けば、球はずっとその位置に静止したままでいる。即ち、慣性により球は永久に速度ゼロ（静止）の状態を保つからである。それで、球の運動の有様を見ようとするためには、球に力を加えて初速を与えるなければならない。水平運動の実験で、ガリレイは自身の手で球を押して初速をつけたのである。。手で球を押すと手応えのようなものを感じるはずである。何度も実験を重ねていくうちに、その手に感じた手応えの大きさから、ガリレイは驚くべき真理を発見した。即ち、「重い物体は動かしにくい」という真実である。

物体には質量という固有の不变量があり、重い物体ほど質量が大きい。だから質量とは、物体にある固有の「動かしにくさ」だといってもいい。大きな質量の物体は、動かしにくく、または止めにくい。これが「慣性の法則」である。ガリレイが球を押した時に指先で感じたのは、質量のもっている「動かしにくさ」だったのである。それ故に、重い物体ほど動かしにくいという真実に秘められている意味は、慣性による「動かしにくさ」は質量に比例することである。

手を放れて自然に落下する物体には、重力により初速が与えられるが、この垂直に落下運動をする物体にも、慣性は垂直方向に働いているはずである。それで落下物体は慣性によって同じ速度で進もうとしているのだが、これに重力による加速度が加わるので、落卜する物体は時間とともに速度が速くなることになる。ところで、重力の大きさは物体の質量に比例するので、質量の大きい物体ほど、より大きな力で地球に引きつけられる。つまり物体は重いほど、より大きな力で地球に引きつけられていることは確かである。

物体に加わる力が大きければ大きいほど、速度がより大きく加速されるはずであるが、では何故ガリレイのいうように、物体は重さの大きさに関わらずに皆同じ速度で落下するするのだろうか？それは上に述べたように、重力の大きさも「動かしにくさ」も、ともに質量に比例するので、重さによる影響と動かしにくさとが相殺されて、重い物体も軽い物体も皆同じ速さで落下するのである。重力による加速度があるということだけでは、重さの異なる物体が同じ速さで落下する理由にはならない。慣性が存在することによって初めてこのように、落下運動をする物体の速さが重さに関係しないという謎を、明快に解くことができるのである。

等速度運動と等加速度運動とを別々に研究したガリレイは、更にこの二つを組み合わせて投射体の運動をも実験して研究し、投射運動の法則を確定した。ガリレイはもしも空気

による抵抗を無視すれば投射体の運動は、投射されたときに水平方向に与えられた初速によって決まる水平成分と、重力加速度によって決まる垂直成分とによって決まることを見てとっている。これは今「ベクトル」と呼ばれている方向と大きさとをもつ物理量が、互いに直角をなす成分に分解できるという手法を、先取りしたものであるといえよう。また、ガリレイは、投射体のたどる軌道が放物線であることをも証明している。

ガリレイの力学（運動の科学）には、現在「運動学」と呼ばれている分野のほとんどが含まれている。そしてその研究成果はいずれも、ガリレイに続く最も偉大な後継者であるニュートンが、力学の分野における理論を更に広く深く推し進めて古典力学を築きあげていくために欠かせないものとなつたのではなかろうか。ともあれ、ここで特筆すべきことは、これらの成果は観察と測定によって証明したものであり、それはガリレイが科学理論の正否は観察と測定によって決められると堅く信じていたからである。また、その観察と測定は、当時ガリレイの使えた、あるいは編み出した手段によって、できる限り正確になされたものであった。

ガリレイはまた、新たに発明された望遠鏡を使って天体を観測した。望遠鏡は 1609 年に、オランダの眼鏡職人が発明した光学装置であるが、光学の知識が豊富でレンズ研磨の技術にも熟達していたガリレイは、短時間内にオランダ職人が作ったものよりも性能の高い望遠鏡を作りあげた。そして、自作の望遠鏡を使ってガリレイは、昼と夜の空を見上げては天体を観測した。そうした天体観測からガリレイは、いくつかの重要な発見をした。1610 年ごろのことである。ガリレイは、木星の四つの衛星、月面の山脈、金星の満ち欠け、そして太陽の黒点などを発見したが、それのみならずガリレイはまた、その天体の観測より太陽が宇宙の中心に位置するとした天体力学を導きだしたのである。

天体の運動についてはガリレイ以前にすでに、古代から中世にかけて天動説が広まっていた。特にアリストテレスに至り、天動説の精髄ともいえるアリストテレスの宇宙体系が提案されていた。簡潔にいえば、天動説とは地球が宇宙の中心に静止していて、他の天体はすべて地球を中心としてその周囲を、それぞれの天球面上でまわっているとする宇宙観である。しかし天動説によって地球を中心としてまわっている七つの星（太陽、月、火星、水星、木星、金星、土星）の運動を説明しようとすると、膨大な計算を必要とするのみならず、全体で 80 を越える円運動を組み合わせなければならない。このように、天動説宇宙は、惑星の運動の観測が進むにつれてますます複雑な体系となつていった。

そして、天の詳しい観察から天動説は崩されることになった。天動説を否定して地動説を最初に唱えたのは、神が創造した宇宙は、こんなに複雑な宇宙である筈がないと疑ったコペルニクスである。地動説では、地球が宇宙の中心に静止しているという特別な地位を

否定し、地球は自転しながら、他の惑星と同じように、宇宙に静止している太陽のまわりを公転しているというのである。つまり、コペルニクスは太陽を宇宙の中心に据え、惑星が太陽のまわりを回る宇宙論を提唱したのである。そして、コペルニクスの時代の人々の宇宙は、この太陽系で閉じているものだった。

ところでガリレイは、凸レンズと凹レンズを組み合わせて天体望遠鏡を自作し、前で述べたように、それを使用して天界を観察した。そして、天の川を観察した結果、ミルクを流したように見える天の川は、実は無数の「太陽」が集まったものであることを発見したのだ。この時から、人々の宇宙は、太陽系で閉じているものから一挙に、無数の星が散らばっている星界へと拡大していった。

ガリレイはまた、自分でなした天界の観測結果から、木星の四つの衛星が木星を中心として回っているという証拠、そしてまた金星の満ち欠けの観測から、金星が太陽を中心として回転運動をしているという証拠をつかんでいた。ガリレイの望遠鏡はまた前で述べたように、月面の山脈や谷、そして太陽の黒点をもとらえていた。こうした天体の観測から導かれたのは、太陽が宇宙の中心に位置するとした天体力学であった。そしてガリレイは、コペルニクスが提唱していた太陽を宇宙の中心に据えた天動説宇宙論を強く支持する意向を、公開して宣言した

ガリレイは、太陽を宇宙の中心に据えたコペルニクス体系（天動説）への支持を宣言したのみならず、天体力学を用いて地球の自転と公転を現実の事実であると主張した。しかし当時の教会の教義では聖書の記述により、地球が宇宙の中心に静止しているものとされていた。このような望遠鏡の観測結果と教会の教義との衝突は、ガリレイに災難をもたらした。ガリレイは教会側から激しい批判と攻撃を受け、果ては宗教裁判にかけられた。当時の宗教裁判による刑罰は、最悪の場合は火あぶりの死刑であった。ガリレイは生き延びて研究を続けるために、自説を撤回せざるをえなかた。しかし伝えられているところによれば、裁判長には聞こえないようにガリレイはつぶやいた「それでも地球は動く」と。

聖書の記述と観測の結果との矛盾を解くために、ガリレイは聖書についての考え方を、裁判にかけられる前から次のように述べている。即ち、聖書の言葉を文字どおりに受け取るのは間違っていることもあると考え、聖書は直接的な観察と矛盾しないように解釈しなければならないと述べた。そしてガリレイはさらに、観測と教義が矛盾したら観測が優先されるべきだと力説した。また自然現象に関する議論では、聖書の記述の引用からではなく、感覚的経験と不可欠な実証から始めるべきだと説いている。そして、神は、最初に自然を通して、次には特にその教えによって理解されるとの立場をとっている。自然についていえば、これは厳格に不変なものであり、この点は、文字通りの意味とはいくらか異なる

る解釈がありうる聖書とは違っているとして、自然研究こそ神の証明にとって重要であると説いている。

ガリレイのこのような聖書に対する見かたは、とても原理的である。統一思想によれば、神は相似の法則によって創造をなされたのである。それで、その創造した自然を通して神を理解することができるるのである。『原理講論』のなかで、「無形にいます神の神性を、我々は如何にして知ることができるだろうか。それは、被造世界を観察することによって、知ることができる」と記述されている所以である。統一原理はまた、聖書のなかで書かれている比喩を、正しく解釈することを重要視している。だから、このような観点から見て、ガリレイは自然と聖書とを正しく理解していると思われる。これはガリレイが、実は信仰の深い天主教徒ではあったが、しかし盲目的でなく、理性的な信仰をもった科学者であった一面を窺わせるものであり、その偉大さをあらためて示しているものといえよう。

ともあれ、宗教裁判において教会との対決を回避し、研究を継続する道を選び、裁判官の提示した解決案に応じ、罪を認める答弁書を提出したガリレイであったが、しかし判決は予想以上に厳しく終身刑が宣告された。ガリレイには友人が多く、事態の改善のために立ち上がった友人たちの活動によって、ガリレイへの刑罰はシエナの大司教のもとでの監視へと減刑された。その後ガリレイは、アルチエトリにある別邸に戻る許可を教皇に求めて許可され、自宅監禁下で監視されることになった。ガリレイは、1633年後半に自宅へ居を移した。そして三年間、『二つの新科学対話』の執筆に集中した。ガリレイはこの本で、自然の運動（一つの科学）に関する自分の研究をまとめ、物質の強度（もう一つの科学）に関するいくつかの問題を提起した。ガリレイの最後の代表作であるこの本は、1637年に完成し、1638年に出版された。

ホーキングは「ガレリイはおそらくどんな人物よりも現代科学の誕生に貢献した。」とガリレイを評価し、さらにまた、ガリレイは「人間はこの世界の仕組みを理解でき、さらに、そのためには現実世界を観察すればよい、と説いた最初の人物の一人だった。」と述べている。実際ガリレイは、科学史上における最初の自然学者であったが、それのみでなく、権力に弾圧された最初の科学者でもあった。ガリレイは1642年1月に世を去り、同じ年のクリスマスに、その偉大な後継者となるニュートンが生まれた。ガリレイの時代に続き、近代物理学はこれよりニュートンの時代に移ることになる。

ニュートンはガリレイの築き上げた基礎の上に、質量、運動量、作用（力）等の概念、運動の三法則に基づいた力学体系や万有引力の理論を構築した。ニュートンの力学は今でも計り知れないほど重要である。また、物理学のその他の部門では、主として光学の分野において実験面及び理論面で色々な貢献をなした。ニュートンは偉大な物理学者であった

のみならず、優れた數学者でもあり、微積分を発明した。数学を使わなければ、物理学を完全に理解することは不可能だとも言われていることを考え合わせば、ニュートンが物理学史上において最も偉大な創造的天才の一人と評価されている由来がよくわかる。

ニュートンの重要な著作として、二部の傑作をあげたいと思う。『プリンキピア』及び『光学』である。『プリンキピア』は1680年代に執筆が始められたが、1687年になってから公開された。一方の『光学』は1704年に出版された。『プリンキピア』と『光学』とはニュートンの人格の変化を反映しているかのように、互いに異なった特徴をもっている。『プリンキピア』は世離れしたケンブリッジで書かれたもので、非常に読みにくく理解し難いといわれているが、『光学』はロンドンに移り住んだ後に、ケンブリッジと全く違った社会的で政治的な環境のもとで書かれ、ずっと読みやすくなっている。それが理由となっているのだろうか、ニュートンの後継者たちは『光学』を頻繁に引用していたが、他方の『プリンキピア』はめったに取り上げなかつたようである。ともあれ、この二つの傑作は、ニュートンの重要な大部分の研究成果を記録していると思われる所以、以下にその内容をもとにして、ニュートンの物理学に対する主な偉大なる貢献を見てみたいと思う。

『プリンキピア』は、科学文献の中でも最高傑作の一つであるが、しかし最も理解し難い本の一つでもある。ニュートンは、『プリンキピア』を執筆し始めた当時にはすでに微積分の流率を発明していたが、しかし微積分や代数学を使わずに、古代の幾何学の形式で『プリンキピア』を書いたのが、その理解を困難にした一つの原因であったと思われる。ともあれ、『プリンキピア』には、ニュートンの力学体系の重要な二つの法則、即ち運動に関する法則と重力の法則（万有引力の法則）が述べられており、そしてさらにこれらの法則を出発点として、ニュートンの「天体世界の体系」が描かれている。

先ず運動に関する法則であるが、これは通常「運動の三法則」と呼ばれている有名な法則である。『プリンキピア』は先ず、力学の最も基本的な二つの概念「物体の量」（質量）と「運動の量」（運動量）の定義から始まる。そしてこの後にあの有名な運動の三法則が続く。これらの法則の内容（考え方）は、物理を学んだ現在の人々にとってはなじみ深いものである。

第一の運動法則は、ガリレイの慣性に関する法則であり、他から作用（力）を受けない場合の物体の運動について述べたものである。

法則1：あらゆる物体は、他から力が加えられない限り、静止状態、あるいは直線上の等速度運動状態を永久に続ける。

▲
第二の運動法則は、他から力を加えられた場合の物体の運動について述べたものである。

法則2：力を受けると運動の方向と速さが変化するが、その変化は加えられた力に比例し、力が加えられる直線方向に起こる。

第三の運動法則は、二つの物体間に作用し合う力の条件について述べたものである。

法則3：すべての作用に対して、常に向きが逆で大きさの等しい作用（反作用）が存在する。すなわち、二つの物体が互いに及ぼす作用は必ず等しく逆の方向を向く。

以上がニュートンの運動の三法則である。今日の人々にとって、これらは単純で簡単に理解できる法則であるが、しかしこれらの法則に述べている事実は、十七世紀の日常世界では観察できなかった現象であるので、当時の人々の理解力をはるかに越えるものであった。これより、ニュートンのこれらの考え方がいかに際立ったものであったかがわかる。例えば、当時の権威者であるアリストテレスは、運動している物体はだんだんと速度が落ちて、ついには静止状態に戻る傾向を本性的に持っているという。ニュートンの運動の第一法則はこのアリストテレス説に真っ向から反対するものである。また例えば、重力によって生じる運動を含めて、ニュートンの運動法則は、さまざまな運動を計算するのに何世紀にもわたって現在にまで使用され、その計算結果が実際に正確に運動を予言していることを思えば、この古典的な運動法則がどんなにかすばらしいものであるかがよくわかる。

さて、次に、ニュートンの重力の法則（万有引力の法則）について見てみたいと思う。この法則は十七世紀にニュートンが提唱して以来、しっかりと定着しており、質量のある二つの物体間には重力が作用し、その強さはそれぞれの物体の質量の積に比例し、この二つの物体間の距離の二乗に逆比例して弱まっていく。それ故に逆二乗法則とも称される。この万有引力の法則は、物理法則のなかで最も古くて、且つ最も重要なものの一つである。そして、中性子星やブラックホールといった奇妙な天体が関係するいくつかの例外を除き、どんな二つの物体間にも適用されるものである。この二つの物体は何でもいい。リンゴと地球でもいいし、地球と月でも、太陽と惑星でも、木星とその衛星でもいいのである。

しかし、引っぱり合うふたつ物体の種類よりも、ここでもっと重要なのは、ニュートンが、木から落下するリンゴを見て、リンゴを下にひっぱる力と、月を地獄のまわりの軌道上に保っている力とは同じものであると見抜き、地上の物体と天体とが同じ法則に支配されていると考えたことである。そしてニュートンは、この考えを試すために、月や惑星の

様々な動きを計算し、それを天文学者の観察したデータと比べて、両者がぴったりと一致するという結果を得た。このようにしてニュートンは、地上の物体と天体とを同じように支配する万有引力の法則（重力の法則）を確立したのである。

以上に述べた成果は、ニュートンが自然に対する広範囲にわたる経験を統一する原理を発見した最初の科学者であったことを示している。即ち、ニュートンは自然の中の無限の多様性から統一的な概念を引き出し、数学を使ってそれを表現し法則としたのである。そして、このような仕事があったからこそ、ニュートンが後の科学者に強い影響を与えているのである。

『プリンキピア』に対する考察を終える前に、ここでニュートンが『プリンキピア』の終りの部分に述べている「天体世界の体系」について見てみたいと思う。ニュートンは、運動の三法則、逆二乗の法則、そして惑星や衛星の観測で実際に得られたデータ等をもとにして、その天体世界の体系を構築した。それは逆二乗法則に従う向心力によって、惑星は太陽の周りを、衛星は惑星の周りを梢円軌道を描いて運動するというものである。そして、この向心力によってケプラーの三法則をも証明している。また、色々な細かい問題を、例えば地球の形の計算、潮汐の理論、地球上の異なる地点での重力の違い、月の軌道の計算などを取り上げている。

しかし、月の軌道の計算では、太陽の影響をいれると、計算が複雑で長たらしくなり、ニュートンは満足のいく解を得ることが出来なかった。ニュートンが太陽の影響をいれるために編み出した方法は、まず地球と月との相互作用を正確に解き、それに太陽の「摂動」効果を含めて修正する近似法であった。だが、この摂動理論に必要な計算は長たらしくて面倒で、ニュートンは高精度の解を得るに至らなかったのである。これはニュートンの力学は、二つ物体の相互作用の問題は、簡単に取り扱うことが出来、且つ正確な解を得ることが出来るが、しかし三体問題や三つ以上の物体の問題には、正確な答えを出すことが出来ないという避けようのない限界があることを示している。

さて、『プリンキピア』に就いてはこれぐらいにして、次に、ニュートンのもう一つの傑作である『光学』に就いて見てみたいと思う。ニュートンは、この本のなかで、光線の反射、屈折、回折、干渉などの光線のおもな物理的性質に就いて、色々な実験をし、且つこれらの実験の結果を理論で以て説明している。だがここでは、ニュートンの行った色々な光学実験の詳細に就いては触れないことにする。それらの実験方法や結果などは、少なからずのニュートンの関する本の中で紹介されているので、興味がある場合にはそれらを参考にされたい。ここではただ、光線の本質や性質に対するニュートンの理論に就いて、以下に見てみたいと思う。

ニュートンは『光学』の中で、「光線は、輝く物質から放射されるきわめて小さい物体なのではないか？ そのような物体は媒質中を直線的に通過し、影の方向へ曲がることはない。それが光線の性質である。」と述べている。即ちニュートンは、光線を小さな粒子の軌跡であると考えたのである。そしてまた、物体はこのような光の粒子に何らかの光学的作用（力）を及ぼすに違いないと考えて、「物体が離れたところから光に作用し、その作用によって光線が曲がり、この作用は最小距離で最も強くなるのではないか？」と述べている。ニュートンはこのような粒子と作用（力）とを基本要素として光学力学を構築して、光学の物理学的な諸性質を説明した。

まず、反射と屈折は、媒質が違えば光学的な力も違うと仮定することで説明している。そして、回折は、物体の近くを通る光線は、遠くを通る光線よりも、強い影響を受けると仮定することで説明している。以上の諸現象はみな光線を粒子と考えた光学力学によって説明したものであるが、しかしニュートンリング（一種の干渉現象）に対しては、光線を継続した反射しやすい部分と透過しやすい部分の繰り返しであると仮定して説明している。これは光線に周期性、つまり波のような性質を与えたことになる。しかしニュートンは、粒子としての観点は捨てなかったので、これでは光線の二重性（粒子と波動）という厄介な問題に出くわすことになる。

この問題に関しては、1930年代までにヤングとフレネルによって、当時知られていた光のすべての性質を波動説によって簡単に説明できることが証明されたので、ニュートンの粒子説はこの時に否定され、長い間ずっと忘れ去られてしまった。だが、1905年になって再び粒子説がアインシュタインによって提案されたのである。アインシュタインは、古典物理学では波動現象として取り扱われた光は、実はとびとびの離散的なエネルギーを持つ粒子（光子）であると提案して、波動説では説明の出来なかった光電効果の実験結果を説明したのである。しかし、光が波動であるという現象は実在しており、ここで、解決がつかなかかった問題、光が波動であり粒子でもあるという二重性を持っているという奇妙な問題に又出くわすのである。この問題の解決には量子力学の出現まで待たなければならぬので、後の章で量子力学を探求するときまで、その解決を待ちたいと思う。

終りに、『光学』の巻末に記述されている二つの概念、ニュートンのエーテルと原子についての考えを簡単に見てみたい。先ずエーテルデであるが、重力、光学的な力、光線、熱などを伝える媒質をエーテルと呼び、その姿をニュートンは、次のように説明している「この媒質は空気よりはるかに稀薄で、弾性が高く、機敏なのではないか？ あらゆる物体に容易に浸透するのではないか？ そして天空全体へ広がっているのではないか？」と。そして原子については、ニュートンは原子を、力の世界のなかで次のように位置づけてい

る「小さな物体粒子は何らかの能力、効力、力を持っており、それを使って離れたところから光線に作用し、反射、屈折、回折を起こすだけでなく、互いに作用して自然現象の大部分を生じさせているのではないか？」と。

以上おおまかであったが、『光学』の探求はこれぐらいにして、最後にニュートンの望遠鏡について見たい。ニュートンが設計製作したのは、ガリレイの製作した光をレンズによって屈折させて焦点を結ばせる屈折望遠鏡とは違って、光を凹面鏡によって反射させることで焦点を結ばせる反射望遠鏡であった。ニュートンの考案したこの方式は、屈折による方式よりも解像度を高くすることができ、また鏡筒の長さも短くすることができる。実際、その完成品は長さがわずか15センチであったが、倍率は40倍もあり、これは長さ1.8メートルの屈折望遠鏡にも匹敵するものであった。

ガリレイの望遠鏡に劣らず、ニュートンの望遠鏡も大きな賞賛を受けた。ニュートンは、1671年にロンドンで開催された王立協会の会合で、その望遠鏡を紹介し、その会合に参加した光学の科学や実用に関して最も著名な学者たちの絶賛を受けたのである。ニュートンの業績の中で、理論科学や数学よりも、その反射望遠鏡の方がより早く科学界の注目をあびたのである。以上に挙げたのはニュートンの主な業績の中の幾つかにすぎない。物理学の諸分野でのみならず、ニュートンは化学やその他の科学分野で、そしてまた政治や行政方面でも多くの貢献をしているが、この章で検討する範疇に入らないので、それらに就いてはここでは割愛する。

さて近代物理学を構築する第一本の柱の運動の科学である力学に就いての探求をこれぐらいにして、次の第二本の柱の熱の科学である熱力学を探求をしたいと思うが、その前に、ガリレイとニュートンに挟まれるように登場して活躍したデカルトが提唱した、近代科学の推進の仕方—デカルト主義—について見てみたいと思う。本来ならば十六世紀から十七世紀にかけての近代自然科学の黎明期を探求するのに、その時代的な歴史発展の順序からいえば、コペルニクスの地動説、ガリレイの実験と発見、デカルトの方法論、というように並べて行くべきであるが、本文章ではガリレイからニュートンへと引き継がれていった古典力学体系の構築の継続性を重んじて、デカルトに先だって、先にニュートンの業績について探求したのである。

直線直交座標系を現在でも「デカルト座標」と呼んでいるように、デカルトは座標の発明でよく知られている。空間に座標を導入することによって、空間のすべての点が明確に数値で表わされるようになったことにより、つまり宇宙空間を、そして自然を数量化することが可能になったことにより、近代科学がスタートしたとも言えよう。それ故に、座標は偉大な発明だったのである。そして、空間のすべての点を座標で、つまり数値で表わ

すという概念は、図形の数値化を可能にし、それによって、幾何学と代数学との結合をもたらしたのである。

座標系の発明もそうであるが、デカルトは近代科学に対して、更に広範囲にわたり甚大な思想的貢献をなしている。特にデカルトは、その『哲学原理』の中で近代科学の推進の仕方に就いての基本的な原理をまとめている。デカルトが提唱したその推進の仕方（方法）は、デカルト主義とも呼ばれるが、その中身は、これを以下のような三点にまとめることができる。

まず第一番目は、理性を基礎として選んだ、確固として成立すると考えられる公理の上に、理性に基づいた法則を立てるという方法であり、これは公理主義とも呼ばれる。実際、目で見えないミクロの世界の研究で、よく公理を基にして厳密な論理によって法則が導きだされるが、たとえ観測できなくても、それは真であるというのである。このように、この種の研究では、現象の本質をより根源的なものに求めるためには公理主義に基礎を置かなければならなくなるのである。

つぎに第二番目は、世界はすべての経験に先立って、数学の堅固な基礎の上に記述されるとし、物理学における数学（特に、幾何学）の有効性を主張したものであり、デカルトはその具体的な方法として代数幾何学を工夫している。そして、この第二番目の方法は、第三番目の方法と結びついで、近代物理学の重要な手法を構築した。

最後に第三番目は、公理を選ぶ場合に保存原理を重要視することを基本方針とすることである。つまり、自然界は複雑多岐でさまざまに変化するが、しかしその中にはなんらかの不变量があって、それを基準にして推論を組み立てていくという方法である。デカルトは、力が働いていなければ、運動量が保存されることを発見している。この運動量の保存則は、座標系の原点をどこに移動しても（変換しても）運動の法則は変わらないことから導かれる。このように、ある変換に対して不变な性質を見いだし、それより保存則を構築していくというのが第三番目の方法である。そのために、物理法則を幾何学的に表現して（第二番目の方法）、その変換則を調べることが重要になる。

以上が、デカルトによってまとめられた近代科学の推進の仕方についての基本原理である。その推進の仕方は、より根源的な原理や物質に還元させていく方向のものであり、より根源的なものを探求する作業を無限に継続して、積み重ねて行けばいいというのである。この精神は、自然科学において十七世紀後半から現在に至るまで貫かれ、物理学のみでなく、科学技術や工学方面においても多大な成果をあげている。以上、自然科学の推進、発展におけるデカルト主義の重要性を見てきたが、ここで本来の予定である熱力学の探求に戻りたいと思う。

熱の科学である熱力学とは、物質（主に気体や液体）の温度や圧力や熱などのいろいろな現象の中に潜んでいる一般的な法則を探求する物理学の一分野である。定量的な科学として熱の理論が誕生したのは十八世紀後半のことである。その時、熱は質量のない液体であると考えられ、その液体は「熱素」と名付けられた。熱素理論の基本的な前提は、熱を保存されるものであるとしたことである。そしてこの前提は、カルノらの熱理論の先駆者たちにとって、熱の理論を構築し、展開するのに非常に有用であった。

しかし、1840年代になると、マイヤー、ジュール、ヘルムホルツらによって、熱は保存されるという学説は批判をうけ、攻撃されて、熱素理論は否定されてしまった。でも、その当時には新しい熱理論は、まだ構築されるまでにはいたっていなかった。新しい熱理論の構築は、1850年代にまで待たなければならなかった。この年代になって始めてトムソンとクラウジウスとによって新しい熱理論が構築され、彼らの理論は後に熱力学と呼ばれるようになった。そして、トムソンが「エネルギー」と呼んだ内的な性質を、すべての系が持っているという考えは、彼らの理論の構築上において欠かすことの出来ない考え方となつた。

トムソンは、このエネルギーは、系を構成する分子の無秩序な運動に関係すると考えていて、しかしこの時には確固とした分子論はまだ確立されていなく、いろいろな異論が多くだったので、トムソンは分子論的な立場からエネルギーに関する理論を精密化することが出来なかつた。それでも、保存されるのはマイヤーらによって批判されたように熱でなくて、エネルギーが保存されるのだと結論し、それを簡単な微分方程式で表現した。これが熱力学の第一法則であるが、この法則については後で熱力学の三つの法則を検討するときに、さらに深く分析したいと思う。

エネルギーの他に、「エントロピー」と呼ばれる物理量が熱力学で使用されるが、このエントロピーの概念はクラウジウスによって導入されたものである。クラウジウスはこのエントロピーと熱や温度との関係を単純な微分方程式で表し、宇宙ではエントロピーは最大値へ向かって増加する理論を形式化した。これがクラウジウスによる熱力学の第二法則である。しかし、クラウジウスもトムソンと同じように、分子論的に理論を推し進めていくことをためらつた。当時の分子仮説がまだ危うい立場にあったからである。この熱力学の第二法則についても、後でさらに深く検討したいと思う。

クラウジウスは前進するのをためらつたが、しかし熱力学の研究でクラジウスの強い影響を受けていたギブスは立ち止まらなかつた。1870年代に発表されたギブスの初の二編の論文は熱力学に関するもので、幾何学的作図の方法でエントロピーとエネルギーの関係を討論し、クラウジウスが導きだした、化学的な変化のないあらゆる系の熱力学を記述する

最も重要な微分方程式の正しさを裏うちした。この方程式は、当時はまだ疑念と批判の暗闇の中に立たされており、ギブスがそれに光をあてたのである。ギブスはまた1875年から78年にかけて簡潔な文体で『不均質物質の平衡』という本（論文）を書いた。この本は、根本的な基礎から適用範囲の広い基本的な微分方程式を導き、さらにその基本方程式から、物理や物理化学の分野におけるいろいろな細かいテーマ、例えば気体、混合物、相変化、化学反応、電気化学などに対する応用法を導いている。ギブスのこの本は、クラウジウスやトムソンが追い求めた熱の理論よりも、ずっと幅広く、深く将来への理論的発展への道を開いたものであると言えよう。

1870年代の多くの物理学者は、自身の理論を説明するのに分子仮説を使うのをためらった。それは当時は分子の存在を直接証明する実験的証拠がなく、もしも分子仮説が間違っていたら、それとながる自分の理論が損なわれるの恐れたからであろう。クラウジウスがそうであったように、ギブスもその著書『不均質物質の平衡』のほとんどの部分ではそうしているが、ある基本的な点に思い至ったときには、例えば化学反応の平衡を詳細に計算するときに必要とあれば、彼はためらわずに分子を使ったのである。しかし、このような少數の例外を除き、この頃の熱力学はほとんどマクロな物理量の関係だけを取り扱っていたのである

ところが、十九世紀終りに入って、物質が原子やその集合体である分子によって構成されていることが明らかになるにつれて、マクロな物理量がミクロ（原子、分子）の世界とどういう関係にあるかの研究が進み、熱力学に対する本質的な理解が深まってきた。以下にミクロ的な観点から、熱力学の三つの法則について探求したいと思う。

熱力学の体系は、三つの基本概念——エネルギー、エントロピー、絶対温度——及び、三つの物理法則（熱力学法則）とによって構築されている。三つの熱力学法則とは、まず第一のエネルギー保存則と、第二及び第三のエントロピーに関する法則であるが、これらの法則を正しく理解するためには、三つの基本概念の持つ物理的意味をはっきりと知らなければならないと思うので、これらの概念について検討しながら熱力学の法則を探求していきたいと思う。

簡単に言えば、エネルギーとは系が持っている仕事をする能力と定義され、そして便宜上、ポテンシャルエネルギーと運動エネルギーという二種類に分類される。ポテンシャルエネルギーとは、物体又は系のなかに貯えられているエネルギーで、これはその位置、形、状態などによってもたらされたものである。例えば、重力エネルギー、熱エネルギー、電気エネルギー、核エネルギー、化学エネルギーなどは皆これに属する。運動エネルギーとは、運動している物体が持っているエネルギーで、通常この物体が静止に至るまでにする

仕事と定義される。

エネルギーが仕事をする能力という現代的な形で定義されたのは、1850年代のトムソンが初めてである。それまでは、エネルギーと言えば、ニュートン力学で導入された力学的エネルギーにしか解釈していなかった。そして、力学エネルギーは位置エネルギーと運動エネルギーの二側面があり、物体の力学エネルギーは位置エネルギーと運動エネルギーの和に等しく、その全力学エネルギーは一定であるとした。つまり、力学エネルギーの保存則が認識されていたのであるが、しかしトムソンのようにエネルギーの概念に熱を含める考え方には就いては当時は思いもよらないことであった。

トムソンは、エネルギーは系の固有の性質であるという考え方を始めて導入して熱力学的理論を構築したが、自分の理論でのエネルギーを始めは力学的エネルギーと呼んでいた。しかし後にエネルギーは系がもつ実体であることを強調するためにこれを固有エネルギーと呼び改めた。さらにその後ヘルムホルツはこれを内部エネルギーと呼び、この呼び名が定着するようになる。ともあれ、トムソンは、系のエネルギー（内部エネルギー）が熱や仕事の影響で変化するのだと認識した。即ち、系が周囲との相互作用によってエネルギーが変化するのに、二つの方法があり、それが熱と仕事であるというのである。熱力学第一法則とは、力学エネルギーのみならず、熱をも含めたエネルギー保存則である。

マクロ的にいえば、温度や圧力がきまっている状態にある系において、その系が持っている内部エネルギーは通常温度だけの関数である。これに対して、圧力は膨脹しうとして外部に仕事をしようとする。このとき、この系が外部から吸収した熱は、内部エネルギーの増加分と圧力によって膨脹した体積がなした仕事の和に等しく、全体としてエネルギーが保存される。これが、熱をも含めたエネルギー保存則であり、マクロ的立場から見た熱力学第一法則である。

ミクロ的に見れば、系（物質）は分子や原子、電子などの微粒子によって構成されており、系内で微粒子は無秩序的な運動をしている。この運動の激しさは系の温度と比例的な関係にありこれを熱運動という。つまり、系の温度とは微粒子の熱運動の激しさを表すものであり、粒子全体で平均した運動エネルギーである。系のエネルギーはそれを構成している全体の微粒子の運動エネルギーの総和で、これが系の内部エネルギーであり、これは系の温度によって決まり、それ故に熱運動の激しさで決まる。一方、圧力は微粒子が熱運動中に互いに衝突するときの運動量の取りの大きさであり、これもやはり熱運動の激しさで決まる。それで、系に熱が入力されると、熱は微粒子の熱運動のエネルギーに転化し、この熱運動のエネルギーが内部エネルギーと圧力となって現れるのである。これが、熱力学第一法則をミクロ的な立場から質的に表現した内容であるが、量的にいえば、系に

入力された熱、つまり系が外部から吸収した熱は、内部エネルギーの增加分と圧力によって膨脹した体積がなした仕事の和に等しく、全体としてエネルギーが保存されるのである。以上がミクロ的な立場から見た熱力学第一法則の物理的な意味である。

次にエントロピーについて考えたいと思う。エントロピーは、自然界に生じる熱的現象の性質を見やすくするために導入した物理量で、熱的過程において移動した熱を温度で割った量で定義される。しかし、このような定義だけからでは、エントロピーの概念は理解し難い。広い意味で、エントロピーとは無秩序の度合いとも解釈される。つまり、無秩序の度合いが大きい程、エントロピーが高いというのである。この表現だとエントロピーを理解しやすいと思う。ともあれ、エントロピーと自然界の熱的過程とはどんな関係にあるのかを、例を挙げて見てみたい。

例えば、一つの系の中に、高温の部分と低温の部分があって、それを接触させた場合を考えよう。するとこの系の中で自然に温度の高い部分から温度の低い部分へ熱伝導が起こり、この熱的過程（熱伝導）は、もともと高温であった部分と低温であった部分が中間の一様な同じ温度になるまで継続する。また、いったん温度の一様な系となってしまうと、系はもう自然にまた高温の部分と低温の部分とに分かれることはない。このような過程を不可逆過程と呼ぶ。そして、自然界に生ずる熱的現象は不可逆過程であるという事実を、自然法則として述べたのが熱力学第二法則である。

さて、上例に挙げた熱的現象（不可逆過程）を、秩序の度合いの変化の状況から見てみよう。系の始めの高温の部分と低温の部分は、各々純粋な（温度が一様な）状態にあるので秩序の度合いは高い。しかし、熱伝導が起こると、高温部分から熱が流出し、低温部分に熱が流入するので、各々の純粋な状態が崩れていき、秩序の度合いが低くなっていく。つまり無秩序の度合い高くなっていく。従って、エントロピーが高くなっていく。即ち、不可逆過程ではエントロピーは必ず増加するのである。それ故に、上に述べた熱力学第二法則を、自然現象はエントロピーが高くなっていく方向に進むことを述べたものであるとも認識することができよう。

次に、上の熱的現象の例を、ミクロ的な立場から見れば、温度が高い部分の分子の運動エネルギーが、温度の低い部分の分子の運動エネルギーよりも大きく、この二つの部分を接觸させると、温度の違うこの二種の分子の熱運動の過程において、高温の分子がその一部分の運動エネルギーを放出し、低温の分子がそれを吸収する。この運動エネルギーの授受の過程はすべての分子が同じ運動エネルギーを持つまで、即ち系が中間の一様な温度（熱的な平衡状態）になるまで続く。そして、この過程で高温と低温の分子が混ざり合うので、系の無秩序の度合いが増えていく。つまり、エントロピーが増大する。この様に、

自然界は、エントロピーが増えていく方向に向かうのである。クラウジウスはこの熱力学第二法則を、宇宙のエントロピーは最大値へ向かうと表現したのである。

終りに、熱力学第三法則と絶対温度についてみて見よう。前で見たように、物質の温度とは、それを構成する全体の微粒子の運動エネルギーを平均したものである。故に、平均の運動エネルギーがゼロになる状態を温度の原点にとることができる。この原点を温度がゼロ度であるとし、そこから運動エネルギーの大きさに比例した温度目盛りを定義したのが絶対温度である。これはまた、熱力学的温度とも呼ばれる。

この定義より、絶対温度がゼロ度では、系内の微粒子は運動エネルギーがゼロであり、熱運動がなく完全な秩序状態にある。つまり、系の中のすべての微粒子は皆同じ状態にあるので、系は一つのミクロな状態しかとりえない。それ故に、エントロピーはゼロとなってしまう。この絶対温度がゼロ度ではエントロピーがゼロとなること述べたのが、熱力学第三法則である。

以上、熱力学の三つの法則の概念について考察したが、ここで力学や熱力学のみならず、物理学や化学の多くの分野に関わるエネルギー保存則について検討したいと思う。1920年代から1930年代には、非常に多くの力学的、熱的、電気的、磁気的、化学的現象が、互いに転換可能であることが明らかになっていた。例えば、電池は電極間の化学反応（化学的現象）によって電池外で電極をつなぐ電線内に電流が流れ（電気的現象）、あるいは摩擦（力学的現象）によって帶電させる（電気的現象）などは、よく知られて居る転換である。そして、これらの各種の現象が互いに転換可能であることから、共通した何らかの量が、これらの現象に保存されているのではないかと考えられる。転換可能を研究する理論家らは何らかの保存則をもとにして理論を構築しようとしたが、保存されるのは何であるのか、その概念についてほとんど考案もつかなかった。

このような概念の模糊に初めて回答を与えたのがマイヤーであった。マイヤーは1841年に書いた論文のなかで、この問題についての考えを述べている。このマイヤーの考えていた内容を、今の物理学者が使用している用語に言い換えて、その要点をまとめると、次のようなになる。あらゆる物体は変化を受けるが、その変化の原因を我々はエネルギーと呼ぶ。すべての現象は基本的なエネルギーから導き出せる。エネルギーは物質のように不变である。化学者は質量の保存の原理をもとにして、物質の性質を論じるが、物理学者も同様に、エネルギーについて研究し、エネルギー保存の原理を受け入れるべきであるというのであった。即ち、マイヤーの論文はエネルギーの保存の原理を述べていたのである。

このようなエネルギー保存則によって、力学的現象のみならず、熱的、電気的、磁気的、化学的現象等をも含めて、すべてのエネルギーは相互に転換しあうものであり、しかも量

的に一定であることが明白にされたのである。さて、エネルギー保存則の発展の過程について見れば、まずニュートン力学で力学エネルギーの保存則が確証され、つぎにトムソンによって力学エネルギー及び熱をも含めたエネルギーの保存則（熱力学第一法則）が確立された。そして最後に、上に述べた多くの物理学的現象を含んだ広義のエネルギー保存則が樹立されたのである。このように、エネルギー保存則が三段階にわたって発展してきたのは、本当に興味深いことである。第一部の中で説明したことであるが、統一思想又は統一原理によれば、神は三数的な存在であるので、神にかたどって創造された万物は、三数的な存在として現れ、またその成長や発展は三段階（蘇生、長成、完成）の過程を通じてなされる。それで、エネルギー保存則の発展の過程について見れば、蘇生的な段階としての力学エネルギーの保存則、長成的な段階としての熱力学第一法則であるエネルギー保存則、完成的な段階としての広義のエネルギー保存則、というように三段階の過程を経て発展してきたということがわかる。

また三数の例として、ニュートンの運動の三法則、惑星と衛星の運動に関するケプラーの三法則、熱力学体系の三つに基本概念（エネルギー、エントロピー、絶対温度）、熱力学の三法則、古典物理学を構築する三本柱（地球上の物体と天体の運動を統一的に支配する古典力学、熱とエネルギーを扱う熱力学、物質の電気的及び磁気的性質を説明する電磁気学）、そして古典物理学から興ってきた現代物理学を構築する三本柱（原子や原子核を支配する量子力学、空間と時間の関係を扱う特殊相対性理論、重力を説明する一般相対性理論）等が挙げられる。これは、統一思想と物理学との関係の簡単な一例であり、この両者の深い関係を探求するためには、統一思想の内容で、少なくともこの探求に必要な部分を理解しなければならず、それは第三部で紹介する予定であるので、それまで待っていただくとして、次に古典物理学の第三本の柱である電磁気学について探求したいと思う。

電気と磁気（磁石）は、別々に発見されたのであり、発見当初には両者は異質的なものであるかのように考えられて別々に研究され、それらが相互に関連することは思いもよらないことであった。しかし、だんだんと多くの電気的現象や磁気的現象が発見されていくにつれて、この両者は互いに何らかの関係があるのではないかと推測されるようになった。例えば、電気を引き起こす源は電荷であるが、電荷にはプラス（正）とマイナス（負）の二種類があり、同種の電荷には斥力がはたらき、異種の電荷には引力がはたらく。一方、磁気にも電気とほぼ同様に現象がある。即ち、磁石の両端は一方がN極で他方がS極であるが、磁極は磁荷とも称され、同種の磁荷には斥力がはたらき、異種の磁荷には引力がはたらく。そして更に興味深いことに、クーロンは二つの電荷の間にはたらく電気力を実験で測定した結果を公式化して1785年に発表したのであるが、この電気力はまたクーロン力

とも呼ばれ、その大きさは二つの電荷の積に比例し、そしてこの二つの電荷間の距離の二乗に反比例するというのである。これはクーロンの法則と呼ばれる。また、二つの磁荷間の磁気力についても、ただ上の法則内の電荷を磁荷に書きかえるだけで同じクーロンの法則が成立する。このように色々な電気と磁気の間の似通った現象が明らかにされるにつれて、電気と磁気との間には相互関係があるに違いないと推測されるようになった。

電気と磁気が互いに作用しあう電磁相互作用が発見され研究が進められたのは、1820年から1831年にかけてであった。最初に電磁相互作用を発見したのはエルステッドである。彼は1820年に科学者の聴衆の前で行った演示実験で、電線に電流を流すと、近くに置いていた箱の中の磁針が動いたのである。だが動きはとても小さかったので、聴衆に強い印象を与える事ができなかったが、それでもファラデーをはじめ何人かは強い印象を受けた。この電磁相互作用の発見は実に画期的な大発見であった。

エルステッドのこの実験は、電流が磁針を動かす、言葉をかえて言えば、電流が磁針に力を及ぼすという事実を発見したものであり、これまで別質のものと考えられていた電気と磁気は、実は無関係ではなく互いに作用を及ぼしあうことを立証したものであり、電磁気学の開始を告げる重要な出来事であったといえよう。エルステッドは同じ年にまた実験を行い、電流を流した直線状の電線の周囲には環状の磁気効果が生じ、その作用によって磁針が電線と垂直の方向に向くことを示した。エルステッドのこれらの実験は、電気現象である電流が磁気的効果を生み出すことを示すものであった。

このエルステッドの実験が示した事実から、磁気の原因は電流であることを発見したのはアンペールである。彼はエルスエッドの実験結果を数学的な式にまとめあげた。また、電線を螺旋状に巻いたコイルに電流を流すと磁石（電磁石）になることを実験で示した。そして、閉じた電線中で流れる電流は磁石と同等であるという磁石の閉路電流説を提唱した。以上のようなエルステッド及びアンペールの業績により、電気力と磁気力とは密接に関連していることが明らかになったのである。

次の大発見は、ファラデーによってなされた電磁誘導作用であるが、これを見る前にまずファラデーが電磁気に興味を持ち始めた頃からの研究を見てみたいと思う。ファラデーは若い頃、王立研究所の一員となって、当時の学問の主流である化学の研究に没頭して数多の業績をあげたが、1820年にエルステッドの電磁相互作用を発見した実験から受けた強い印象がきっかけとなって、それから電気と磁気に強い興味をもち始め、1821年には磁石が電流が流れている電線を動かす電磁気回転を実験で実証するのに成功した。ファラデーはこの実験結果を論文にして1821年10月に発表すると一躍して有名になり、ヨーロッパでも第一級の科学者となった。現在の電気モーターはこの原理が実用化されたものである。

その頃には、電磁気学の科学者の間には漠然とではあるが、電磁気の現象には必ずその反対の事柄も起こりうるという信念があった。それで、エルステッドが電流は磁針を動かす、あるいはもっと端的にいえば、電気は磁気に転換することを発見すると、すぐにその逆があってもいい、即ち磁石によって電流を生じさせないものだろうか、つまり磁気を電気に転換できないものだろうかと考えられた。実際、エルステッドもアンペールもこの疑問を解こうとして、いろいろな実験を試みたのだが、いずれも成功しなかった。この後もこの問題はずっと十年間もの間、磁気を電気に転換しようとする、つまり磁石によって電流を発生させようと試みる科学者を悩まし続けてきた。それが、1831年になって始めてファラデーによって、ついに電流を発生させることに成功したのである。これが前に述べた、ファラデーによる電磁誘導作用の大発見である。

電磁誘導作用とは、磁荷（磁石）の運動によって電流が生じる現象を称するのであるが、ファラデーはいくつかの異なる実験でこの現象を示した。具体的に一つの実験例をあげれば、コイル状に巻いた電線の中に棒磁石を出し入れすると、つまり電線のコイルの中で磁荷を運動させると、このコイルに電流が流れたのである。これは磁石（磁荷）の運動によって電流が生じた、つまり磁気を電気に転換した現象であり、エルステッドの電気を磁気に転換した現象の反対のものである。ファラデーによって始めて発見されたこの電磁誘導作用も、いくつかの実用性を持っている。例えば現在の発電機はこの原理が実用化された電気機械である。

十九世紀で最も偉大な天才的実験家であったファラデーは、1845年に最も難しい一連の実験を開始した。偏光した光を、強い磁石で負荷をかけた固体の誘導体に通過させたときに、偏光した光の光路に影響が与えられるのではないかを調べるものであった。いろいろと実験条件を変えてみたが、どの実験も成功しなかった。最後に、誘導体として鉛ガラスを使って試してみた。偏光した光線に進路に対して、同じ側面に同じ磁極を置いたところ、偏光光線に対して効果が現れたのである。これは、磁気力と光に関係があるという驚くべき大発見であり、光の電磁気性質を証明した重要な実験である。

実験によって多くの事実を発見したファラデーは、実験家として優れていたのみならず、理論家としても驚くべき天才ぶりを發揮している。その重要な独特の理論として場の理論がある。磁気の実験でファラデーは、磁石の上に紙を敷いて鉄粉を撒いた。すると、鉄粉は磁石より受けた磁気力によって整列された力線を描いたのである。この力線を磁力線と呼ぶが、ファラデーはこうして磁気力を実際に見ることが出来るようにしたのである。そしてファラデーは、磁極間の力はこの力線に沿って空間を伝わると考え、そしてこの力線（磁力線）が集まることで場（磁場）が作られると考えていた。場はいったん作られると、

至るところに存在するというファラデーの理論は、ニュートンの遠隔作用とは相容れないものとして、はげしく同僚から反対されたが、しかしファラデーにとって幸運なことに、二人の若い青年が力線や場の概念を受いれ、その理論を支持してくれたのである。その一人がトムソンであり、トムソンは1845年に電気力線の数学理論を構築して、ファラデーを非常に喜ばせた。数学といえば算術ぐらいしか知らなかったファラデーにとって、数学的言語で理論を築くことができなく、そのためにその理論が数理物理学的ではなかったのが、同僚の反対を受けた一つの原因にもなっていたからであろう。

ファラデーは、磁場の理論を一般化し、空間は力線からなる場で満たされており・磁場は磁極（磁荷）によって作られるのと同じように、電場は電荷によって、そして重力場は重い物体によって作られるとした。力線は確かに存在し、空間は力線からなる場で満たされていると考えたのである。そして、その一つの場に別の物体が反応するが、それは遠隔作用ではなく、別の物体が置かれている場所での場の条件によって決まる局所的な作用であるとファラデーは説明した。トムソンと共にファラデーの場の理論を支持したもう一人の若者はマクスウェルであるが、数理物理学者であるマクスウェルはトムソンよりもさらに前進し、20年ほどの間に、ファラデーの場の理論から光の電磁気理論を書きあげたのである。

マクスウェルは、その著書『電気磁気論』のはしがきで、「ファラデーの研究を学ぶにつれ、ファラデーも現象を数学的にとらえてはいるが、通常の形の数学記号で示してはいないのだと悟った。」と述べている。ファラデーの科学者としての人生は、実験と理論的考察が作用し合って創造性が發揮されていたのだといえよう。実験が理論を導き、理論が実験を促したのであり、どちらか一方だけでは決して成功できなかつたに違いないと思う。ファラデーが、実験と理論の両方で同時に、しかも独創的な研究ができたのは、その類いのない稀な才能があったからである。

エルステッドが電流による磁気効果を、アンペールが閉路電流と磁石との同等性を、そしてファラデーが電磁誘導を発見するに至り、電気と磁気の諸現象を理論的に統一するための実験的基礎がこれで出そろい、そしてマクスウェルによって全ての電気と磁気の諸現象を統一する理論が築かれ、電磁気学として体系化された。マクスウェルの伝記作家であるエヴェリットは、ファラデー、トムソン、マクスウェルを比較しながら三人を論じて、ファラデーは「蓄積的な思索家」、トムソンは「直観的な思索家」、そしてマクスウェルは「構造的な思索家」であるとした。構造的に思索するマクスウェルは、上に述べたように、ファラデーが実験的に証明した光の電磁気的性質を含め、あらゆる電気、磁気、電磁気の現象を統一した理論体系を構築したのであるが、その理論は場とその源となる電気と

磁気の成分を表す一連の微分方程式にまとめられたものであった。ここで、マクスウェルが研究に従事してから電磁気理論の構築を完成するまでの道筋を見てみたいと思う。

マクスウェルが14歳の時に書いた初の論文は物理学に関するものでなく、意外にも数学家としての才能を発揮した、梢円の新たな作図法に関するものであった。マクスウェルの科学者としての人生の幕開けはこの梢円であったのである。マクスウェルが電磁気学の研究を始めたのは、1850年の秋にケンブリッジにはいり、優等卒業試験の出来のおかげで奨学金をもらって、トリニティ・カレッジの特別研究員となった平穏な時期からである。マクスウェルの電磁気学に関する初論文『ファラデーの力線について』は、24歳のときに発表された。この論文の目的は、ファラデーによって提案された場の観念に数学的な形式を与えることにあり、トムソンが築いた電気力線の数学的理論よりも奥幅の深いものであり、電場のみならず磁場をも取扱い、さらに数学的に両者の関連を示している。

1860年よりマクスウェルは、ロンドンのキングズ・カレッジで自然哲学の教授を勤めたが、ここでの5年間の勤務期間が、マクスウェルの人生で最も創造性に富んだ期間であった。この期間にマクスウェルは、その第二番目の論文『物理的な力線について』を1861年から1862年にかけて発表している。この論文はファラデーがマクスウェルへの返事の手紙で書いてきた驚くべき提案、即ち、電流を流した導線が周りの空間に磁気的効果を発生させるのに（光が伝わるぐらいの短い）時間を要すると思うが、その根拠となる理由を見つけて欲しいという提案に応えて書いたものである。磁気的効果は（そしておそらく電気的効果も）瞬時にではなくて、有限の時間をかけて伝わるというのは、マクスウェルにとって非常に大きな啓示となつた。そして、マクスウェルは、電気力と磁気力を伝える媒質は弾性をもつてゐるエーテルとして理論を展開した。弾性的媒質は横波に振動を伝えることができ、その波の速さは弾性パラメータで決まるのである。マクスウェルはこの弾性媒質中を伝わる電磁波の速さを計算した結果、その値が測定された光速とほとんど一致したのである。それで、光は電気と磁気の現象を引き起こすのと同じ媒質の横振動からなる、光は電磁波の法則にしたがって場の中を伝わってく電磁的変動であると、マクスウェルは結論づけたのである。

光を電磁気の波と考えるこのマクスウェルの理論は、それまで無関係と考えられてれていた電磁気学と光学という物理学の二大分野を一つにまとめた。しかし、マクスウェルが『物理的な力線について』を発表した当時は、その電磁波の概念はなかなか受け入れられなかつた。実験家が電磁波を研究してみようと思ったのは、その発表から20年ほども経た後のことである。その先導者がヘルツである。1888年にヘルツは電磁波を発生させることに成功した。ヘルツは、発生させた電磁波は秒速3億メートルで光の速さと一致したこと

を確かめたのち、さらに実験でこの電磁波が反射、屈折、回折、偏光をするのを確認し、これが光の波と全く同じ性質をもち、ただ振動数と波長が異なるだけあることを示した。この波は、現在では電波やマイクロ波と呼ばれ、ラジオやテレビの伝播に使われている。電磁波の研究は、その後も多くの科学者によって続けられ、1890年代から1910年代にかけて、きわめて幅広い電磁波のスペクトルが明かにされた。それらを波長の長い方より短い方に順次に並べれば、電波、マイクロ波、赤外線、可視光線（光）、紫外線、エックス線、ガンマ線の順となる。マクスウェルの光を電磁波とした単純な考え方には、提案されてから100年余りも経った現在でも、科学や技術の多方面に多大な影響を与えていている。

マクスウェルは、1865年に第3番目の論文『電磁場の動的理論』を書いた。多くの解説者によって、この論文はマクスウェルの最大の偉業であると考えられている。この論文のタイトルについて、マクスウェルは自分自身で次のように説明している。「ここで提案する理論は、電気や磁気を帯びた物体の近くの空間と関係しているため、電磁場の理論と呼べるだろう。また、その空間には運動する物質があって、それが観測される電磁気現象を生み出すとしているため、動的理論と呼べるだろう。」と説明している。マクスウェルは、この論文で、前の『力線』の論文で獲得した数学的ツールをすべて導き、さらに自分が電磁気モーメント（ベクトルポテンシャル）と呼んだベクトルは電磁気運動量のスケールであることをつき止め、また電磁場のエネルギーを計算した。そして、これらの結果を付け加えて、マクスウェルの電磁気学は完成するに至ったのである。

それから約10年後の1873年にマクスウェルは、自分の理論とエルステッド、アンペール、ファラデーによって発見された電気と磁気の諸現象を2巻の『電気磁気論』にまとめた。この本には、これまでに発見された電気と磁気の諸現象を定性的に記述する数十もの方程式が載せられている。この数十にも達するマクスウェルの方程式は、その後マクスウェルの後継者たち、特にヘルツとヘヴィサイドによって、その数十もの方程式を組み合わせて、たった四つの方程式にまとめあげたのである。マクスウェルの死後20年後のことである。この四つの方程式が有名な「マクスウェルの電磁方程式」（又は簡略して、マクスウェル方程式）と呼ばれているものである。方程式は他人の手によって作りかえられたが、しかし、マクスウェルが『電気磁気論』で提唱した物理的な主張はずっと、永遠に定着しているのである。

マクスウェルの電磁方程式は、電場、磁場、電流、電荷密度をその数学的な構成要素とし、そして電場に関する二つの式と磁場に関する二つの式が対になっており、また電場と磁場の各々に対して、発散（div）の式と回転（curl）という二種類の演算をした式が一つずつある対称的な二対の合計四つの微分方程式で構成されている。この対称的な四つの

電磁方程式を本格的に理解するためには、電磁気学の知識以外に数学の知識が必要であり、それらを説明するのは、宗教・哲学（統一思想）と物理学の関連を検討する本書の役割ではないので、ここでは、ただ本書の目的に従い、簡潔にそれらの方程式の含有している物理的な意義について現代風に解釈して説明したいと思う。

先ず、電場についての二つの方程式であるが、その一つは電場の発散の式 ($\text{div } E$) で、これは電場が電荷（電荷密度に含まれる）によって発生する効果を示し、クーロンの法則を表現するものである。そして別の一つは電場の回転の式 ($\text{curl } E$) で、これは磁場の変化によって回転電場が発生する効果を示し、ファラデーの電磁誘導の法則を表現するものである。次に磁場に関する二つの方程式であるが、その一つは磁場の発散の式 ($\text{div } B$) で、これは電場の発散の式と対をなしているが、しかし磁気の場合には、電場の中の電荷密度に相対する磁荷密度を磁場の中で発見することは出来ない。場の中で全体としてN極とS極が丁度同数で打ち消し合っているからである。従って、磁場の発散はゼロであり、これは磁気のモノポールの存在の欠如を表現するものである。プラス又はマイナスの電荷は単独に存在するが、N極又はS極の磁荷は単独には存在しない、これが電気と磁気の根本的な違いである。さて、磁場に関するもう一つの式は、磁場の回転の式 ($\text{curl } B$) で、広義の電流（普通の電流と変位電流の和）によって回転磁場が発生する効果を示し、一般化されたアンペールの法則を表現するものである。もしも広義の電流の中で普通の電流の項だけ考えれば、これはエルステッドが発見した電流によって回転磁場が発生する効果を現している。

以上の考察の結果、マクスウェルの電磁方程式はそれまでに発見されたすべての電気的、磁気的、電磁気的現象を包含していることが分かる。マクスウェル方程式の適用範囲は非常に広く、その実用性はとても大きい。これらの方程式で表されたマクスウェルの場の理論は、二十世紀に至るまで影響を与えている。その中でも、AINシュタインに及ぼした影響が最も重要なのではないかと思われる。AINシュタインは、マクスウェル方程式の中から手がかりを得て、特殊相対論で新しい空間と時間の概念を提唱し、またマクスウェルの電磁場の理論に倣って重力場の理論を構築したのである。丁度ガリレイの後を継いで、ニュートンが古典力学の体系を完成させたのと同じように、マクスウェルの後を継いで、AINシュタインが古典的な場（非量子論的な場）の体系を完成させたのである。希しきも、ガリレイが世を去った年にニュートンが生まれたのと同じように、マクスウェルが世を去った年にAINシュタインが生まれている。

AINシュタインの相対論は量子化していないが故に、古典物理学（非量子物理学）の範疇に入れることも出来る。そして、1915年11月にAINシュタインが重力場の方程式を定

式化したことによって、古典物理学（非量子物理学）が完成したとも言えよう。量子化を分類の基準にとれば、相対論は確かに古典物理学であるが、しかしその概念が古典物理学のそれとは劇的な違いがあり、且つ現代物理学の中におけるその重要な役割から見れば、相対論は現代物理学における重要な一分野であり、現代物理学を構成する三本柱の中にいれるのは妥当であると思う。さて、ここで古典物理学の探求を終える前に、マクスウェルの業績についてもう一言付け加えたいと思う。

電磁気学のみならず、マクスウェルは電磁気理論に次いで重要な業績とされている気体分子論を提案している。これは分子からなるマクロな系を記述するのに統計的方法を初めて取り入れたものであり、これを基礎にして後の物理学者らがさらに理論を発展させて、理論物理の重要なツールとなる統計力学と呼ばれる一分野を築きあげたのである。天才的な理論家であるのみならず、マクスウェルはまた優れた実験家でもあった。マクスウェルは、1971年にケンブリッジの実験物理学教授に任命され、新設のキャヴェンディッシュ研究所を管理し、その立上がりを手際よく進めている。マクスウェルの新任教授としての就任講義は、実験科学と理論科学の絡み合いについて語っており、印刷されたその講義の内容は、マクスウェルの才能のすばらしさを物語る第一級の史料であり、今でも学ぶべきところが多い。ここで、ちょっと実験と理論の関係について考察してみたいと思う。

前に述べたように、ファラデーの創造性が發揮されて独創的な研究ができたのは、実験と理論的考察が作用し合った結果である。マクスウェルは科学的な観点から実験と理論の関係をその就任講義で説明しているが、ここで私は、統一思想の観点から簡単にこの両者の関係を説明することを試みたいと思う。統一思想によれば、簡略して必要な要点だけみれば、主体と対象が目的を中心として授受作用すれば、結果として新生体が現れる。被造世界における新生体とは、新しく出現するまたは産出される結果物を意味するのであり、そして新生体の出現はとりもなおさず発展を意味するというのである。この思想を今考えている実験と理論の関係に適用すれば、研究している現象の真理を求めようとする目的で、実験と理論が主体と対象の位置に立って授受作用すれば、結果として新生体、つまり新しく出現するまたは産出される結果物が現れる筈であり、それが独創的な研究結果であり、新しい法則であり、そしてそれは研究の進歩、発展をもたらすというように考えられよう。この解釈については、後に（第4部で）さらに詳しく検討してみたいと思う。

以上で、古典物理学を成立させている三本柱（力学、熱力学、電磁気学）についての探求を終えたいと思う。二十世紀以前には、物理学で観測される対象は、殆どがマクロ的な自然界の物理的現象や実験対象であり、それらを説明するのに、古典物理学の理論で充分であった。つまり、それらは古典物理の理論の適用範囲内の対象であったのである。とこ

ろが、年代が移り、二十世紀に入ると、色々なミクロ的な現象が発見され、それらは古典物理学では説明がつかなくなったのである。つまり、古典物理学には限界があることが明らかになり、それらの現象を解明する新しい理論が期待される時代が到来したのである。ここで、二十世紀初頭に発見されたそのような重要な現象を三つあげたいと思う。

まず黒体放射の問題がある。黒体とは、加熱すると放射を発するが、外部から入ってくる放射は反射せずにすべて吸収する物体のことである。黒体から放射する光は、全周波数の領域に及ぶが、しかし非常に高い周波数の波はほとんど放射されていなく、ただ低い周波数で実質的にエネルギーを発している。そして、全領域でのエネルギー分布の形状は、ある周波数で最大値をとる特性をもっていて、この最大値の位置は温度によって決まり、温度が高くなるにつれて周波数の短い方へと移っていく。これが観測から得た結果である。しかしながら、古典物理学の理論が予言するのは、大量のエネルギーが高周波放射で発せられるというのである。それどころか、厳密にいえば、古典的な理論から予言される発散エネルギーの総量は大量どころか、無限大になるのである。これらの結果は、古典的な論法では黒体放射の現象を説明できない、つまり古典物理学には限界があることを示す一つの例である。

次に光電効果の問題がある。実験で、ある一定の周波数の光で物質を照射すると、電子が弾き出されることが観測された。しかし、放出される電子の運動エネルギーを大きくしようと思って、照射する光をもっと強くしても、つまり入射する総エネルギーを多くしても、放出される電子の運動エネルギーの最大値は変わらなかった。古典的な理論から考えれば、入射エネルギーが大きくなれば、電子の運動エネルギーも大きくなる筈である。しかし、実験の結果はそうではなかったのである。この現象が、古典物理学には限界があることを示すもう一つの例である。

最後にラザフォード原子の問題がある。ラザフォードは原子に核があることを発見した後に、原子は、その殆どの質量が集中した正に帯電した小さな核と、核のまわりに軌道運動をしている電子から構成されているという原子像を提案した。この原子像はとても名案ではあったが、しかし物理学者を途方にくれさせたのである。古典的な電磁気理論によれば、軌道運動をする電子（帶電体）は光を放出してエネルギーを失い、螺旋状の軌道を描きながら、ついには原子核の中に落ち込んでしまい、原子は崩壊してしまうからである。しかし実際には、原子はずっと健在している。これを古典的な理論は説明できないのである。これが、古典物理学には限界があることを示す第三の例である。

以上に挙げた三つの現象を理論的に説明するためには、新しい理論が出現しなければならないことは明らかである。物理学は、その基礎理論を改善しなければならない、しかも

劇的に変えなければならない時期にきたのである。これが、本章の冒頭に述べた物理学の第二番目の革命である。二十世紀の新しい世紀に入ると共に、物理学は新しい時代を迎えたのである。そして、この新しい物理学の始まりは、上述の三つの問題を三人の物理学者が各別に解決したことに発端があったのである。その過程を、次の章の冒頭で検討して、新しい物理学への探求の幕開けにしたいと思う。

5. 現代物理学への歩み

黒体放射、光電効果、ラザフォード原子の三つの問題を、プランク、アインシュタイン、ボーアの三人が各々理論的に解決したのであるが、この三人の物理学者はたまたま新しい物理学である現代物理学を成立させる三本柱である量子力学、特殊相対性理論、一般相対性理論の創立に関わった天才的な学者である。ここで、三問題、三学者、三本柱と三数ばかりが出てくるが、これは素晴らしい事ではなかろうか。と言うのは、統一思想によれば、神は三数の存在であり、現代物理学がこのように三数の関わっていることは、その創立が神の意に叶うであるのを示すのではないかと、私には思われるからである。そして、その今後の発展も、神の意に叶うように進められればと、願っているものである。そうすれば、私が物理学を専攻し、また統一思想を勉強したことが、究極的な真理を探求する観点からみて、あながち無駄ではなかったと自己安慰できるのである。つい道はずれして個人の感想を漏らしてしまったが、急いで本題に戻ろうと思う。

黒体放射の問題を解決したのは、プランクである。観測の結果と一致するような黒体放射の強さ（エネルギー）の周波数分布（スペクトル）を示す公式には、ウイーンの公式とレイリー・ジーンズの公式があった。前者は波長の短い領域で観測結果とよく合い、後者は波長の長い領域でよく合った。プランクはどちらの公式にも、観測結果と合う各々の領域内で、部分的にはあるが真理が含まれている考えて、この二つの公式をつなぐ公式を考えた。そして全波長領域で観測結果と非常に一致する公式をプランクは見出だしたにだが、その理論的な根拠を与えようと、六年間（1894年以来）も苦闘した。しかし、なかなか成功しなかったが、プランクはそれでも、この問題は物理学にとって基本的に重要なものは自覚していたのである。凍りつく小道を歩きながら沈思默考の末、プランクはついにこの公式の奥に隠されていた真理を見つけ出したのである。プランクは、光のエネルギーは量子化された単位でしか伝わらないと1900年に提唱した。つまりある特定の周波数をもつ光には、それ以上は分割できないエネルギーの基礎的なエネルギー単位量（プランク定数 h と周波数 f をかけた量 hf ）があり、その中間値は決してありえない。そして、各周波

数の放射はその基礎的な単位量の整数倍で構成されているという。このエネルギーの基礎的な単位量(hf)は量子と呼ばれ、そしてこの仮説をプランクの量子仮説といふ。

光のエネルギーは連続的であるという古典的な考え方からみれば、プランクのこの光の量子化は常識はずれの突飛な仮説である。六年間もの格闘の末に、なんともならないから自棄っぽちに提案したのだと、プランク自身も回想している。しかし結果からみれば、これは驚くほどの先見の明があった仮説である。この仮説によれば、周波数が高すぎると、エネルギーの量子(hf)が大きくなりすぎ、一単位に含まれる最小限のエネルギーが大きすぎて、光はその周波数で放射できないことになる。したがって、黒体の放射はほとんどが低い周波数でなされ、高い周波数は自動的に除外され、全く観測の結果と一致するのである。このように、プランクの量子仮説は、黒体放射の問題を解決したのである。

次に、光电効果の問題を解決したのは、アインシュタインである。プランクが量子仮説を提唱した5年後の1905年にアインシュタインは、光电効果に関する論文を発表し、光の量子が単なる数学上の抽象的な概念ではなく、実質のものであると立証し、量子論に確証を与えた。光电効果で、放出される電子の運動エネルギーに限界がある測定結果を解釈するのにアインシュタインは、放射は個々の光の量子(光量子 hf)によって構成されていて、一個の量子が一個の電子にぶつかってその電子を弾き出すので、放出される電子の運動エネルギーの上限がつねに同一であり、また入射光を強くしても入射すれば量子の数が増えて、光はより多くの電子を放出させるだけで、個々の電子の運動エネルギーはある一定の値以上にはならないと、極めて妥当な説明を与えた。そしてアインシュタインは、これは光量子が実在することの明らかな証拠であると考えた。このように、アインシュタインの光量子仮説は、光电効果の問題を解決したのである。

そして、ラザフォード原子の問題を解決したのは、ボーアである。原子核のまわりに軌道をえがいて回っている電子が、核の中に落ち込むのを避ける手段を、ボーアは1913年に発表した。ボーアの原子像は本質的には、電子は核のまわりを、ある決まった距離を隔てた多数の円形軌道上でのみ回ることにある。これ故に、ラザフォード原子にまつわる困難は、ボーア原子には現れない。それらの軌道を許容軌道と呼ぶが、しかし、それらの許容軌道をどのようにして決めるのだろうか。ボーアはプランクの量子化の概念を電子に適用して軌道を決めたのである。すなわち、電子は波のように上下に揺れながら原子核の回りを回っているとしたのである。この時、安定な波をうるために、一定の半径で円形軌道を描く電子は、その内のまわりを一周する間に整数回で上下しなければならないのである。電子に対するボーアの量子化説も又、前期量子論の重要な一部であった。そしてさらに、ボーアは、原子において、ある一つの軌道にいる電子が他の軌道に移ることのできる唯一

▲
の方法は瞬間的な遷移しかないと提唱した。ボーア原子の各々の軌道は異なるエネルギーをもっているので、エネルギーの保存則を守るために、外側の軌道にいる電子が内側の軌道に移るときには、この二つの軌道のエネルギー差のエネルギーが光量子によって運び去られる。これがボーア原子で、原子が光を放出する過程である。このように、ボーアの原子像は、ラザフォード原子の問題を解決したのである。

さて、三人の物理学者であるが、その量子の概念と原子模型は、量子力学の前期理論であり、それ故にプランク、ainシュタイン、ボーアの三人とも量子力学の創立に関わっており、そして特殊及び一般相対性理論は、ともにainシュタインによって編み出されたものである。だから、量子力学、特殊相対性理論、一般相対性理論を設立の三本柱とする現代物理学は、プランク、ainシュタイン、ボーアによって、幕が開けられたのだと言うことができると思う。このような了解のもとに、次に三本柱の一本一本について次々に探求していきたい。

先ず、第一本の柱である量子力学である。量子力学は、分子、原子、素粒子のミクロな世界を探求する新しい自然科学として、1900年に誕生した。用語上、一般に量子以前と以後の物理学を区別して、前者には古典、後者には量子という形容詞を使う。例えば、古典物理学と量子物理学、または古典力学と量子力学というふうに呼んでいる。さて、量子物理学、量子力学は段階を追って発展してきた。初めは、ただ観測結果と合致するように仮説をたてたのが始まりであり、その仮説は推量によるもので、その基盤になんら物理的な根拠をもたなかった。それが進展して、その推量が具体的な理論に形式化されたのが、前期量子論である。

前期量子論は1900に生まれた。生みの親はプランクである。黒体放射での光の量子化を提唱したプランクの仮説が前期量子論の発端となったのである。そしてその後を継いで、5年後の1905年に、ainシュタインが光の量子は実在のものだと立証し、量子論に重要な貢献をした。しかし、量子論は一夜にして成功したのではない。最初の10年間はなかなか受け入れなかった。1910年になってプランクの仮説が少しは認められるようになったが、それでも原子や分子の分野にはほとんど適用されなかった。それが、1913年にボーアによって初めて水素原子の適用されたのである。ボーアの提唱した原子像により、原子の安定性が保証され、そればかりでなく、とくに予言した水素原子の放射する光のスペクトルが見事に測定値と合致したのである。ボーアが、プランクの量子化の概念を電子にも適用してもたらしたこの結果は、分光学者と、そして量子論に、将来に対する希望をもたらしたものであったのである。

前期量子論で始まった量子化革命の初期に活躍した三人の偉大な先駆者であるプランク、

▲

アインシュタイン、ボーアは、初めは、新しい物理学によるその奇妙な帰結を古典物理学と両立させようと取り組んだが、三人とも成功しなかった。新しい理論は、革命的な理論であるので、全く新しい枠組みで構築しなければならないからであろう。この革命の完成は、次の世代の量子理論家によってなされた。その代表的な理論家に、ハイゼンベルク、シュレーディンガー、パウリ、ド・ブロイがあげられよう。その築きあげた量子力学（量子物理学）の法則は、ミクロの世界を説き明かすものであり、マクロの世界に住み慣れて、古典物理学の法則をもとにして思考する我々にとって、それが奇妙なものに見えるのは、別に奇妙なことではなかろう。

量子化の概念は非常に重要なものであったが、そのために光は粒子と波の二重性を持つことになり、これは古典物理学では解くことのできない謎となった。だが、ド・ブロイ、シュレーディンガー、ボルンによって、粒子と波の量子学的な関係がしだいに明らかになりはじめたのである。ド・ブロイは、プランクの量子化仮説を逆にした非常に優れた発想をした。プランクが放射の波に量子を結び付けたのに対し、ド・ブロイは電子などの粒子も波のようにふるまうと仮定したのである。そして又、運動量 p の粒子は運動量に逆比例する波長の波と結び付けられると仮定した。ド・ブロイのこの理論が予測した電子波は、実際に1927年に、実験的に発見されている。

ド・ブロイの敷いた基礎の上に、シュレーディンガーは、1926年に電子などの粒子の波動方程式を作りあげた。これが、シュレーディンガー方程式として知られている微分方程式である。その物理学に及ぼした影響は非常に大きく、非相対論的量子力学のその後の発展はシュレーディンガーの研究の精密化と応用がほとんどであった。シュレーディンガー方程式を解くと、空間座標と時間の関数で現されている解が得られるが、これは波動としての性質を示しているために、波動関数と呼ばれる。波動関数の物理的な意味について、ボルンは波動関数の絶対値の二乗が空間の任意の場所で電子などの粒子がみつかる確率を表すと結論した。量子力学的な波は、確率を表す統計的なものではあるが、時間とともにどう変化するかをも予言するのである。シュレーディンガー方程式は、量子力学的粒子と結び付いた波の時点的な変化を表すものである。

さて、ド・ブロイは、粒子も波のようにふるまうと仮定したが、それでは粒子でありながら波でもある存在とは一体何だろうか？その背後に秘められた意味を、ボルンは誰もが思いもつかなかった解釈を与えたのである。彼は、波は位置の関数である波動関数であり、それは前に述べたように、その絶対値の二乗が空間の任意の場所で粒子がみつかる確率となる、と提唱した。つまり、粒子はその存在する確かな位置は確かめられないが、ある位置でそれが見つかる確率を特定できるというのである。これは、古典的な従来の考え方か

らみれば、非常に大きな飛躍であった。

だが、普通の人にとって、粒子でもあり波でもあるということは、わかりやすい概念ではない。この矛盾は、粒子のもつ波のような性質は一つの粒子からでは検出できないことから、解決できる。例えば、二重スリット実験で、個々の電子はそれぞれ粒子であり、従って各電子はスクリーン上のある一か所にぶつかるが、しかし、たくさんの数の電子がスクリーンにぶつけられると、その累積的な効果として、それらの位置の分布が波のような輪郭を描くのである。

シュレーディンガーが波動方程式を導いていたのと同じころに、ハイゼンベルクは重要な発見をした。不確定性原理と呼ばれているものである。不確定性原理によれば、ある特定の二つの物理量を同時に正確に測定することは出来ないというのである。この特定の二つの量、例えば位置と運動量で、位置を先に測定してから運動量を測定すると、運動量を先に測定したから位置を測定するのでは、結果が違ってくる。これは我々の常識では理解できないことであり、古典物理学では有り得ないことである。これは量子力学にだけ起きることである。そして不確定性原理では、二つの量の測定順序が異なると結果が違う場合には、この二つ量の不確かさの積は、例えば上の例の位置と運動量の測定において、位置の不確かさと運動量の不確かさの積は、常にプランク定数 \hbar よりも大きくなるのである。位置と運動量だけでなく、他の力学変数にもハイゼンベルクの不確定性原理が適用されるが、中でも最も重要なのが、エネルギーと時間のペアである。不確定性原理は、幾つかの重要な結果をもたらすが、これについては後で見る予定である。

量子力学では、粒子を二種類に分けています。すなわち、フェルミオンとボゾンである。簡単にいって、フェルミオンは物質を構成する粒子であり、ボゾンは力を媒介する粒子である。量子力学的な区分法でいえば、粒子がフェルミオンかボゾンかは、固有スピンという性質によって決まる。量子力学では、スピンは量子化される。ボゾンはスピンの値が0、 $1/2, 1, 3/2, \dots$ などと整数になっている。そして、フェルミオンのスピンは $1/2, 3/2, \dots$ といった半整数になっている。スピンのような、粒子の性質を表す数値を粒子の量子数と呼ぶが、パウリは量子数は四つあるとし、全く同じ四つの量子数をもつフェルミオンが同じ場所にいることは有り得ないという排他原理を提唱した。これを原子を構成する電子に適用すれば、四つの量子数が全く同じである電子は、同じ軌道に入ることは出来ないのである。このきまりに従って電子の各々の軌道に入る数が決まり、原子の構造が決定される。そして、この排他原理があるからこそ、原子は元素周期律や化学反応の基礎となる構造をもてるのである。

以上で基本的な量子力学への導入的な探求を終えることにする。量子論の発展の過程を

統一思想の観点から見れば、前期量子論は成長の秩序的三段階の発生期に相当し、ここまで探求してきた非相対論的量子力学は長生期に属し、そして後で探求したいと思っている相対論的量子力学は完成期の理論と見ることができると思う。量子力学の探求を終える前に、一言だけ付け加えたいことは、量子力学とニュートン物理学の関係についてである。量子力学は、ニュートン古典物理学にとってかわるものではなくて、それを包含しているものである。ミクロの世界の現象を古典物理学が説明出来ず、それで、新たな理論に頼らなければならずして誕生したのが量子力学である。そして、量子力学にはプランク定数 \hbar が出てくるが、マクロの世界から言えば \hbar はほとんどゼロと同じであり、プランク定数 \hbar をゼロとした場合の量子力学の近似がニュートン物理学となるのである。ニュートン物理学は限定条件つきで依然として妥当であり、マクロな世界に適用出来るのである。さて、量子論の探求をここで終えて、次に、現代物理学を構築している第二本の柱である特殊相対性理論について探求したいと思う。

特種相対性理論とは、時間と空間、そして物体の運動についての理論である。相対性理論と言えばアインシュタイン、アインシュタインと言えば相対論と言うように、よく両者が連想されるほどポピュラーではあるが、しかし相対性理論は難しくてよく分からぬと言ふのが定評であるのではなかろうか。問題は理論ではなくて、その概念にあるのだと思う。例えば、時間と空間については、私たちはニュートン物理学の絶対時間、絶対空間、そして時間と空間は別々に独立していると言った考え方慣れており、また直感的にもそう感じている。つまり、空間はすべての物体が動き回る場所であり、動くのはあくまでも物体であって、その運動している場所である空間は永遠に変わらないし、そしてそこを過去から未来へ向かって、時間が一様に流れている。ニュートン物理学の前提として考えていたのが、このような揺るぎない絶対空間と、すべての場所で一様に流れる絶対時間であったのである。そして、そのような時間と空間に対する考え方が私たちの常識になっているのである。しかし、アインシュタインの相対性理論は、時間や空間にたいして、私たちの常識を打ち破る一変した飛躍的な概念をもちだしたのである。すなわち時間も空間も相対的なものであり、また時間と空間は同じもの（互いに変化し合う）といった相対性理論の概念は、ニュートン的な考え方をする私たちにとっては受け入れ難いものであり、それで難しいと思うのである。

アイシュタインは、1905年、26歳のときに、「物理学年報」に4編の論文を発表した。第一が光電効果に関する論文であり、これについてはすでに光電効果の探求のところで述べている。第二は、プラウン運動に関するものである。最後の第三と第四が特殊相対性理論の要となるものである。第三の論文「運動する物体の電気力学」は、特殊相対性理論の

骨格となる長い論文であり、第四の論文「物体の慣性はその物体の含むエネルギーに依存するであろうか」は、エネルギーと質量の関係を論じた短い論文である。

特殊相対性理論は、特殊相対性原理（アインシュタインの相対性原理）と光速度不変の原理の二つの原理を出発点として構成されている。特殊相対性原理とは、「すべての慣性系で、物理学の法則は同じように成り立つ」というものである。ニュートン力学にも、その基礎となっているガリレイの相対性原理がある。それは、「すべての慣性系で、力学の法則は同じように成り立つ」というもので、力学的な現象にだけ適用されるのである。この両者の違いはただ一句だけである。即ち、「力学」という言葉が「物理学」に変わっているだけである。つまり、アインシュタインは、力学的な現象に限定されていた古典力学のガリレイの相対性原理の適用範囲を、電磁気学的な現象をもふくむ物理現象にまで拡張したのである。

そしてもう一つの、光速度不変の原理は、光速度一定の原理ともいいうが、「光の速度はどの慣性系においても等しく常に一定である」というものである。表現を変えて言えば、光の速度は、どんな場合でも、誰にとっても、光源の速度にも関係なく、絶対に変わらないのである。しかしこれでは、アインシュタインの特殊相対性理論の土台となっているこの二つの原理の間に矛盾が見られるようになる。相対性原理にもとづけば、速度は相対的なものになるが、光速度不変の原理によれば、光の速度は絶対的であり、常に何処でも一定不変であるというのである。この両者の言い分は、どちらも間違っているとは思えないが、食い違うのである。そして、それによって、いくつかの奇妙な現象が現れてくる。それらの現象を説明するために、アインシュタインは時間と空間の概念を変えたのであり、そのようにして特殊相対性理論が生まれたのである。

さて、以上述べた特種相対性原理と光速度不変の原理の二つの原理を受け入れると、私たちが今まで考え慣れている絶対空間と絶対時間の世界とは、全く違った世界像が現れてくる。まず、簡単な一例をあげて、時間と空間に対する考え方の変化をみてみたいと思う。相対運動をしている二人がいると仮定しよう。簡単のために、一人のA君は道に立ち止まっているとする。もう一人のB君はあのA君（道）に対してある一定の速さで走っているとする。すると、普通の常識（古典的な理論）から考えれば、A君とB君がみる光の速さは違う、つまりB君のみる光の速さはA君のみる光の速さから自分の走っている速さをひいた値になる。これは、力学の初步的な知識でわかる結果である。しかし、光速度不変の原理からすれば、光速度は誰にとっても不変であるという。すなわち、A君からみても、B君からみても、光の速さは同じである。これは、私たちの常識では、全く理解の出来ない事である。次に、時間と空間に就いて見てみよう。

特殊相対性理論における時間と空間の扱い方によれば、時間と空間の測定値は速さ次第であり、相対的に運動している系においては、それらが混ざり合うというので、私たちの直観に反する幾つかの結論が出てくる。例えば、上のA君とB君の例でいえば、この二人と光が並んでから一秒後には、光はA君から一秒進んだ先の地点にいるが、それと同時にB君からも一秒進んだ先にいることになる。古典的な理論からすれば、この二人が並んでから一秒後の光の位置は同じであるべきなのが、光速度不変の原理によれば位置が違うのである。この矛盾は時間と空間に関する問題があるので、時間と空間に対する考え方をえない限り、説明をつけることが出来ないのは明白である。

アインシュタインは、そういう矛盾を感じるのは、万人に共通の時間や空間を考えているからであり、時間の進み方が、違う立場の人にとって異なると考えれば解決できると考えたのである。速度というのは、進んだ距離を時間で割ったものである。それで、B君のみた光の進んだ距離がA君のそれよりも長いということは、光速度が一定不変であるとすれば、B君の時間の流れがA君のよりも遅くならなければならない。すなわち、より速く運動すると時間の流れがより遅くなるのである。これが、時間の遅れと呼ばれる現象である。特殊相対性理論の法則によってもたらされる奇妙な現象には、時間の遅れのほかに、同時性の観測者依存（同時性の相対性）、運動している物体のローレンツ収縮（長さの縮み）などがあるが、これらについては多くの相対性理論の一般的な書物に紹介されているので、本書ではとりあげないことにする。ここではただ、時間と空間は同じものと考えれば、これらの現象を簡単に説明できることを指摘しておこう。さて、時間と空間が同じものということは、つまり、時間は空間へ、空間は時間へ、互いに変化しあう相対的なものということであり、これこそが特殊相対性理論でアインシュタインが主張する、新しい時間と空間（合わせて時空）の観念である。

また、特殊相対性原理によれば、光の速度は常に一定であるばかりでなく、真空中におけるその速度は、宇宙における最大速度となる。それは、例えば私が光の進んでいるのと同じ方向に走って光を追い抜こうと試みているとしよう。すると、光速度不変の原理によれば、私がいくら加速して速度が速くなつたとしても、私の速度如何にかかわらず光は一定不変の速度で私の前を進んでいるのである。つまり、光を追い越せない、言葉をかえて言えば、光よりも速い速度で進むことはできない、光速度が宇宙における最大速度である結果が得られる。そして上で述べたように、この速度に上限があることより、時間と空間は相対的なものであり、時間と空間は互いに変化し合うという結論が導き出されるのである。このように、光速度不変の原理は、特殊相対性理論の中で非常に大事な前提である。

それのみならず、この速度の上限からさらに、エネルギーと質量も同じものであること

が導きだされる。例えば、いま運動している物体にエネルギーを与えて加速するとする。若しこの加速される物体に、その速度が光の速度の上限を越えるほどの大きなエネルギーを与えたとしたら、物体の速度は速度の上限を越えることができないので、エネルギーが余ることになる。その余ったエネルギーはどこへ消えたのだろうか？ アインシュタインはそれは物体の質量に変化すると考えた。つまり、エネルギーは質量へ変化するのである。またその逆に、質量をエネルギーへ変化させることもできるとし、質量とエネルギーは同じものと考えたのである。これを質量とエネルギーの等価原理という。アインシュタインはこの考え方をもとにして、あの有名な（静止）質量とエネルギーの関係式 [$E = mc^2$] を導きだした。質量とエネルギーが本質的に同じものであるという概念により、古典物理学で互い独立した二つの重要な法則である「エネルギー保存則」と「質量保存則」が、一つの法則「エネルギー・質量保存則」に総合されたのである。特殊相対性理論については、まだまだ多くの語り足りないところがあるが、最後に一言だけ加えて終りにしたいと思う。マクスウェルが提案したエーテルの問題であるが、エーテルが本当に存在するかどうかを検証しようとしたマイケルソンとモーリーの実験で得た否定的な結果に驚いた物理学者たちは、エーテル説の危機を救うためにさまざまな理論を提案したので、ヨーロッパの物理学界は19世紀後半にはエーテルの問題をめぐって大きく揺らいでいた。物理学者たちが考えたエーテルは静止していて、ニュートン力学の絶対空間とワンセットになっているものだった。ところが、絶対空間はアインシュタインによって否定されたのみならず、さらにまた、エーテルの存在を実験で確認することができなかったので、エーテルという概念を物理学にもちこむ必要はないとアインシュタインは明言したのである。実証の学問である物理学に、検証不可能なものをもちこむ必要はないのである。特殊相対性理論の探求は、一応これで終りにして、次に現代物理学を成立させている第三本の柱である一般相対性理論に移りたいと思う。

アインシュタインが特殊相対性理論を発表したのは、1905年のことであった。この理論には、二つの省略し過ぎるところがあると、アインシュタインは懸念した。一つには、物理法則の普遍性が慣性系という特殊な状況に限定されていることである。この理論は加速しているすべての基準系には適用できないのである。慣性系は存在しうる全ての基準系のはんの一部分にすぎないので、これは大きな問題であった。二つめは、重力に関係した問題である。単純な状況で物体が重力に反応する公式はあるのだが、物質のどのような配置にも適用できる重力場の公式がまだ見つかっていないのである。

アインシュタインは1905年からずっとこの二つの問題に取り組んだ結果、1915年に特殊相対性理論を拡張した一般相対性理論が完成された。アインシュタインは一般相対性理論

▲

を構築するにあたり、まず理論の基礎となる二つの原理を定めた。すなわち、等価原理と一般相対性原理である。特殊相対性原理が慣性系にのみ適用されるのを拡張して、すべての座標系に適用されるようにしたのが一般相対性原理であり、「すべての座標系で、物理学の法則は同じように成り立つ」というのである。これで、「ガリレイの相対性原理」から「特殊相対性原理」へ、そして更に「一般相対性原理」へと、ステップ・アップした三つの相対性原理が出そろったわけである。これは、統一思想のいう成長期間の秩序的三段階の標準的な好例ではないかと私は思う。

ここで、アインシュタインが、一般相対性理論を完成するまでの過程の中でのいくつかのストーリー見ていいきたいと思う。1907年の11月のことである。ベルンの特許局で椅子に座っていたときに、アインシュタインに突然一つの思考が浮かんだという。「あるひとりの人間が自由に落ちたとしたら、その人は自分の重さを感じないに違いない」。この啓示に感動してはっとし、それが自分を重力の理論へと進ませ得たのだと、アインシュタインは回想している。落下中の人は重力を感じないということは、落下する座標系では重力が消える事を意味しているのではないかと、アインシュタインは考えた。重力がはたらいている座標系には特種相対性理論は適用できないのである。どんな座標系でも物理法則が成り立つ理論を構築するためには、まず重力をなんとかしなければならないのである。重力場では物体は加速度運動をしている。加速度運動には慣性力が生じる。古典物理学では、この慣性力をみかけの力とし、重力を絶対的な力とみて、両者を別種の力と認識している。しかしこの観念は、またしてもアインシュタインによって否定されるのである。落下運動は加速度運動であるが、落下する座標系では重力が消える、そうなると重力と慣性力とは同じ力ではなかろうかとアインシュタインは考え、それで両者を同じものだとした。これが等価原理である。つまり、加速による効果と重力による効果は区別ができないというのである。そして、この等価原理が、一般相対性理論の中心となった。ところで、等価原理の重要な影響の一つに、重力によって光が曲げられるという現象がある。重力は質量を引きつけるのと同じように、エネルギーをも引きつけることができる。エネルギーと質量は同じであるから、質量が重力の作用を受けるなら、エネルギーもやはり重力の作用を受けるはずである。つまり、光も重力の作用を受けるはずであり、その結果、光は加速されることになる。光の速さは一定不変であるので、その速度が変わる（加速される）ということは、光の進む方向が変えられる結果になる。重力によって光が曲げられる現象を、私は等価原理によって以上のように説明してもよいのではないかと思う。相対論に関する色々な本の著者は、それぞれの思考実験を提案してこの現象を説明おり、興味深いのもあるので参考になさるとよいと思う。アインシュタインは、太陽の重力の影響で光がどれだけ曲

んだ空間の幾何学である非ユークリッド幾何学を基礎にして、新しい重力場を定式化し、一般相対性理論を築きあげたのである。1915年11月に、アインシュタインは「重力場の方程式」と題する論文を発表し、一般相対性理論がついに完成した。アインシュタインのこの重力場の方程式は、時空の本質を簡潔に記述して優雅な方程式である。

一般相対性理論が完成した1915年ごろは、世界大戦でヨーロッパは戦乱の真っ直中にあったが、それでもアインシュタインは研究に没頭し、1917年に「一般相対性理論についての宇宙的考察」と題する論文を発表した。この論文は、完成したばかりの一般相対性理論をフルに駆使して、宇宙の総体を討論した画期的な論文であり、近代宇宙論の幕開けを告げるものとなった最大な業績の一つである。以上でアインシュタインの一般相対性理論を検討を終えたいと思う。

がるかを理論的計算して予言した。この予言は1919年の日食のときに観測されて検証されている。これで、光は直進するという古典物理学の概念が否定されたのである。

ところで光のみならず、空間もまた重力によって曲げられるのである。これを次のような思考実験によって説明しよう。仮に飛行機が高度五千メートルまで上昇した後に、急にエンジンが故障して止まったとしよう。すると、この飛行機は自由落下をし、機内は無重力の状態になる。この時、機内の人々が両手にもっていた二つのボールをしづかに離すと、この二つのボールはほんの少しずつ、徐々にお互いに近づいていく。これは、慣性力は上下方向に平行に働くが、地球の引力（重力）は地球の中心方向に向かっているので、この二つの力の間に僅かながらも角度のズレが生じるからである。しかし、これをボールの立場から見れば、重力場で等加速度運動をしているので、何の力も働いていない筈であるが、それなのに徐々にお互いに近づいていくのだから不思議である。アインシュタインは、この現象を地球の質量によって空間が曲げられるために生じるのであると考えた。つまり、それぞれのボールはどちらともまっすぐに進んでいるのでだが、空間が曲がってお互いに近づくのであると説明した。このように、重力によって空間が曲がり、また光も曲がることが明らかになったが、では重力は時間にどんな影響を及ぼすであろうか？ この問題を次に探求してみたいと思う。

重力によって時間が受ける影響を考えるために、地球の重力によって曲げられた光を考えてみよう。ちょうど道路のカーブしている所では、外側が長く、内側が短いように、この重力で曲げられた（カーブした）光も、内側（地球表面に近い側）が短く、外側（地球表面から、より離れた側）が長い。これを遠くから見ると、曲がっている光の内側での移動距離が、外側のそれよりも短いのが観測される。光速度不变の原理によれば、内側の光と外側の光は同じ速さで進んでいる筈である。それなのに移動距離が異なるということは、同じ速さになるために、経過時間がそれに応じた値にならなければならないことを意味する。すなわち、外側よりも内側が時間の経つのが遅いことになる。内側のほうが重力が大きいので、重力が大きいほど時間の流れが遅いことになる。

以上見たように、一般相対性理論は、重力の時空や光に対する影響を全く新しい観念によって取り扱ったが、特に革命的なのは、アインシュタインが、光が重力によって曲がる現象を空間のゆがみによるとした観点である。つまり、光が曲がるのは空間がゆがんだ結果的な現象であり、重要なのは重力が空間をゆがめることであるとアインシュタインは考えたのである。そして、重力を空間的に把握するには、物質が存在することで空間はゆがみ、このゆがんだ空間が重力を発生させると考えたのである。それで、一般相対性理論を完成させるためには、新しい重力の理論が必要となる。アインシュタインはそれで、ゆが