

ニュートン200年祭に対する アインシュタイン教授の感想

アインシュタイン著
石原純訳

アイザック・ニュートンの名は誰知らぬものもない程科学界に讃えられていますが、1727年3月31日に彼が逝いてから、本年は丁度その200年後に相当するので、之を記念するための祭典や会合が諸処で行われましたが、特にニュートンを生んだ英国では、一層の感激をもって之が迎えられたことは勿論です。ところで私たちはニュートンを思うと同時に、必らず連想されるのはアインシュタイン教授でなければなりません。なぜなら、ニュートンの立てた力学は全物理学の基礎として久しい間信奉せられていたに拘わらず、今世紀になってアインシュタインの相対性理論によりて変更を餘儀なくせられるに至ったからです。私たちはこの両者の関係を正当に解することによって、今日の自然科学の立場を明らかにすることができると云ってもよい程です。ニュートンの力学が自然科学の宝典として認められていた限り、アインシュタインの理論も亦新しい宝典をつくるものでなければなりません。アインシュタイン教授自身がニュートン力学に対してどのような感想をもっているかを知ることが、私たちに取って多大の興味であり、且つ非常に有益なことに相異なると思います。丁度ニュートンの200年祭に当って私たちは幸にも之を聞く機会を得ました。下に訳出したのは同教授が英国マンチェスターの新聞に寄せられた一書であって、単にニュートンの力学に関してばかりでなく、現時の理論物理学の立場を論ぜられたものでありますから、自然科学に注目する人々の参考にもなろうと思います。

(石原純)

ニュートンの逝去の200年祭が今廻って来ました。誰しもの思想がこの輝かしい精神に向かないわけにはゆきません。まことに西洋思想並びに研究の道を^{ひら}き、又実際上の応用を持ち来さしめたものは、彼れ以前及び以後には一人もなかったのです。彼は特別の指導方法に関して天才的創造者であったばかりでなく、彼の時代に於ける経験的素材に精通し、且つ特殊の数学的及び物理学的説述に於て驚くべく独創的でありました。すべて之等の理由で彼は私たちの深い尊敬に値いするのです。けれども彼は、彼自身の優秀さが彼を著名にせしめたよりももっと

それ以上に顕著な人物となっています。それと云うのは、彼が幸運にも世界の知的発展に於ける転回期に遭遇したからでした。この事は、若し私たちが、ニュートン以前には具体的経験の世界のより深い特質を形づくるであろうと見做される物理学的因果律について何等の総合的体系も存在しなかったことを思い起すならば、いかにも明瞭に見られるのです。

実際に古代のギリシヤ文明に於ける大物質学者は、すべての物質現象を、自立的原因としての生物の意志に訴えることなしに、固定法則に従う原子的運動の過程に關聯するものとして仮定しました。デカルトも彼れ自身の学説に於て、この窮極的思想を復活させました。けれどもそれは一つの大胆な仮定に過ぎないのであり、哲学上の一学派の懸案的理念でしかなかったのです。確實な物理学的因果律の存在に対する私たちの信拠を現実に正当ならしめた方法に於て、ニュートン以前には何もかも成就されなかったのです。

ニュートンの目的は次の疑問に対する解答を見出すことであつた。――

「我々の太陽系に属するすべての天体の運動状態が、一つの瞬時に於て知られているならば、之等の天体の運動を完全に計算し得る簡単な法則が存在するであろうか」

ティコ・ブラーへの観測に基づいてケプラーが惑星の運動を云いあらわした經驗的法則¹⁾は既に周知のものであつて、且つ解釈を要請していました。之等の法則は惑星がどんな風に太陽を廻って動くかと云う問題に対しては完全な解答を与えたのです（楕円軌道、等しい時間に経線ベクトルによって等しい面積の描かれること、半長軸と廻轉週期との關係）。併し之等の法則は因果律の要求を満足しません。三つの法則は論理的に互に独立であつて内的連関の何等の徴しをも示しません。三法則は太陽から他の中心体に移る場合に、数量的に之を拡張することができないのです。例えば太陽の周りの惑星の廻轉週期と、その惑星の周りの月の廻轉周期との間に何等の關係もないのです。

けれども主要な事柄は、之等の法則が全体としての運動に関するものであつて、体系の運動の一状態から時間的に之に継続する処のものがいかに展開されるかと

1) 經驗的に確められた惑星の軌道から之等の法則を見出すために絶大の努力が必要であつたことは今日誰でも知っています。併しケプラーが外見上の軌道――即ち地球から観測した方向から真の軌道を確認した方法の優れた点を顧みる人は少ないでしょう。

云う問題に関しないと云うことです。之等は、今日の私たちの術語で云えば、積分法則であって、微分法則でないのです。

微分法則こそは実に近代物理学者の要求する因果律を満足するところの形式であります。微分法則の明確な概念はニュートンの智的業績の最大のものの一つです。要望せられたところのものは単なる思想ではなくて形式的な数学上の方法であったので、その基礎に於ては今日も尚^なお存し、只系統の形式をその後に獲得したものでありました。ニュートンは之をも亦微分及び積分計算法に於て見出だしました。之等と同じ数学的方法に、ニュートンと独立に、ライブニッツが到達したかどうかを考証するには及びますまい。いずれにしても之等の発展はニュートンに取ってぜひとも必要であったので、ニュートンに彼の思想を云いあらわすための手段を与えるために要求せられたのであります。

ガリレイは既に運動の法則の認識に対して重要な第一歩をなしました。彼は次の惰性の法則並びに地球上の重力の場に於ける自由落下の法則を見出だしました。即ち一つの質量（或はもっと精確に云えば一つの質点は、他の質量によって影響せられない限り、一様に直線上に動きます。又自由の物体の鉛直速度は重力の場では時間に比例して増加します。ガリレイの観測からニュートンの運動の法則に達するのは僅少の距離に過ぎないように、今日では私たちに見えるのです。けれども注目しなければならないのは、上記の法則は、それらの述べられている形式の上で、全体としての運動に関するものであるに反し、ニュートンの運動の法則は、質点の運動の状態が無限に小さな時間内に外力の影響を受けてどう変わるかと云う問題に答えるものであることです。無限に短い時間内の現象を考えること（微分法則）に進んだためにこそ、ニュートンはすべての運動に適用される公式に到達したのです。彼は力の概念を既に非常に発達していた静力学の理論から取り入れ、質量の新しい概念を導き入れて力と加速度とを結びつけることができたと過ぎません。ですが実際にこの質量概念は外見上の定義によってよほどおかしなものになっています。今日でこそ私たちは微分係数に相応する概念を形づくるのに慣れてしまっていますが、一般の運動の微分法則と質量概念を展開させる必要とに対し二重の境界線を超えて抽象に進まなければならなかったのですから、私たちはもはやその抽象内容のどれ程のものであるかを容易に実現すること

はできないのです。

併し^{しか}之もまだ運動現象の因果的關係からは遙かな道程であったのです。なぜなら、運動は単に力が与えられた上で運動の方程式によって決定されるに過ぎなかったからです。ニュートンの考えでは、多分惑星運動の法則によって導かれたものではあったでしょうが、一つの質量にはたらく力は、その質量から十分小さい距離にあるすべての質量の位置によって決定されると云うのです。ですから、この連絡が実現されるまでは運動現象の完全な因果的連関が得られなかったのです。ニュートンがケプラーの惑星運動の法則から進んで、いかにして万有引力に対するこの問題を解いたか、又重力と星にはたらく運動力との性質の同一性をどうして見だしたかは普通に知られている処です。それは単に

(運動の法則) + (引力の法則)

の結合に過ぎないのですが、それによってあの驚くべき思想機構が構成されるのであって、之のお蔭で現象が単なる万有引力の影響の下に起る限り、一つの体系の特殊な一瞬時に於ける状態から、前後の状態を計算することができるのです。ニュートンの思想体系の論理的完全性は、体系の質量の加速度の唯一の原因が質量それ自身であらねばならないと云う事実^に横たわっています。

上述の基礎のもとにニュートンは惑星、月、彗星などの運動を細微の点までも云いあらし、その外潮汐の干満や地球の歳差運動をも説明するのに成功しました。この最後のものは特に光輝ある演繹的成果でもあります。天体の運動の原因が日常の経験にそれ程見馴れている重力と同一であることを教えたのは、特に感銘すべき処であったことも確かです。

とは云え、ニュートンの業績の重要さは単に固有の力学に対する有用な^か且つ論理的に十分な基礎を与えたと云うだけに止まりません。第19世紀の終まではそれはすべての理論物理学的研究のプログラムを形づくりしました。どんな物理現象でもニュートンの運動法則に従う質量に關聯しなければならなかったのです。唯々力の法則だけが拡張されて、考察されつつあった現象の種類に適應するようにさせられたに過ぎません。ニュートン自身はこのプログラムを光が惰性的粒子から成り立っていると云う仮説の下に、光学に応用しようと試みました。波

動論の光学もやはりニュートンの運動法則を連続的に拮がっている質量に応用して役立てたのでした。熱の運動学的理論は単にニュートンの運動公式に依拠していたのですし、そしてこの理論は民衆の心にエネルギー保存の法則の認識を準備したばかりでなく、^な尚お亦最も細微の点までも確められた気体の理論や熱力学の第二法則の本質に対する深い概念をも供給しました。電気及び磁気の理論も亦近時に至るまでは全くニュートンの根本思想に導かれて発達しました（電気及び磁気体、遠隔力）。ファラデイ及びマクスウェルの電気力学並びに光学に於ける改革はニュートン以来理論物理学の根本原理に於ける最初の大進歩でありましたが、それすらも^な尚お全くニュートンの思想に指導せられて成就したものでした。マクスウェル、ボルツマン及びロッド・ゲルヴィンは電磁的の場と、その力学的逆作用とを、連続的に分布せられた仮説的質量内に起る力学的過程に帰着させようと再三試みることに決して倦怠を覚えませんでした。^{しか}併し之等の努力が無結果に終り、又は少なくとも無効に歸したために、第19世紀が終ってからは、漸次根本概念に於ける反動が起り、理論物理学は殆ど2世紀の間科学への確固たる^か且つ優れた指導を務めたところのニュートンの骨組の外に流れ出しました。

ニュートンの根本原理は論理的の立場からは全く満足的のものであったのですから、新しい出発への衝動は単に経験の事実の圧迫から来たのでした。私はこの点に立ち入る前に、ニュートン自身が後代の研究者よりももっと^よ能く彼の思想機構の弱点を知っていたことを強調しなければなりません。この事実はいつも私の敬虔な尊敬心を惹起させるのでした。ですから私は少しくそれについて述べたいと思います。

1. たとえ誰しもニュートンがどれ程彼の思想体系を経験の確証に対する必然的主題としてあらわそうと努め、^か且つ直接に経験の事実依存しない概念を出来るだけ少なく導き入れようとしたかを認めたにしても、彼は絶対空間及び絶対時間の概念を用いています。今日に於て彼は之がために^{しばしば}屢々批難されました。けれどもニュートンが特に矛盾のないのはこの点にあるのです。彼は観測し得る幾何学的の量（質点の相互の距離）並びに時間に於けるそれらの変化だけでは物理的の意味に於ける運動を完全に決定することのできないのを認めたのでした。彼は之を有名な水桶の実験で示しています。それですからそこには質量並びに時間と

共に変ずるそれらの距離の外に、生起するところのものを決定する何ものかが加わらねばなりません。この「或るもの」を彼は「絶対空間」に関係すると考えたのです。彼は、若し彼の運動法則が意味を持つべきであるならば、空間が物理的実在性の一種、即ち質点やそれらの距離と同種類の実在性を有しなければならぬことを認めたのです。この明確な認識がニュートンの質点と、並びに彼の理論の弱点とを示します。なぜなら、理論の論理的構成は、こんな陰影的概念さえなかつたら、確かにもっと満足的であったのでしょう。

そうすれば私たちの感覚に関係して完全に明らかな客観（質点、距離）だけが法則に入ることになるでしょうから。

2. 万有引力の効果をあらわすのに直接の、瞬時的にはたらく遠隔力を導き入れることは、私たちの日常経験に於て見馴れている最大多数の現象の特質に相応しません。ニュートンの可逆的万有引力の法則は窮極的の説明として取らるべきものではなくて、単に経験から帰納された規則に過ぎないことを指摘するのは結構ですが、それと共にニュートンは上の反駁に出遇わなければならないわけです。

3. ニュートンの理論は、物体の重さと惰性とが同じ量（質量）で決定されると云う甚だ顕著な事実の説明を少しも与えません。この事実の顕著な性質はやはりニュートンを難じさせました。

之等の三つの点のどれも理論に対する論理的の批難と云うわけにはゆきませんが、それらは云わば単に、自然の過程を思想の完全な且つ統一せる系統によって貫徹させようと努める科学的精神から云って不満足な缺陷を形づくるのです。

ニュートンの運動の理論は、之を理論物理学の全範囲に対するプログラムとして見做したところで、最初の打撃を受けたのはマクスウェルの電気の理論からであります。電気及び磁気物体を通じての物体間の可逆作用は瞬時的にはたらく遠隔力によってでなく、空間を通じて有限の速度で伝わる過程によって起ることが見出だされました。質量と運動との外に、そこには、ファラデイの思念によれば、物理的実在の新らしい種類、即ち「場」があらわれました。始めて之を考慮するようになったのは、機械的方法を借りて思想を進めたためであって、即ち仮説的の空間填充媒質（エーテル）の機械的状态（運動又は歪み）とみて考えられたのです。ところが最も執拗な努力を費したにも拘わらず、この機械的解釈が効を奏し

なかったときに、研究者は徐々に「電磁気の間」を物理的实在の最後の、他に還元し得ない礎石として見做すように慣らされて行ったのでした。場の概念を力学の概念のあらゆる立場からして自由に解放したのはハインリッヒ・ヘルツのお蔭であり、又之を物質的保持者から解放したのはヘンドリック・アントーン・ローレンツのお蔭であります。ローレンツに従えば、物理的の空虚な空間（即ちエーテル）のみが場の保持者として示されるのです。実際にニュートンの力学に於ても空間物理的性質の悉くを取り去ったものではなかったものでした。この発展が完結せられたときに、たとえ万有引力に対する場の理論が十分に知られた事実を缺くために誤謬のないとは保証せられなかったとは云え、之と連絡して誰もはや直接に作用する瞬時的の遠隔力を信ずるものはないのでした。ニュートンの遠隔力の仮説がすてられた後、更に電磁場の理論の発展はニュートンの運動法則に対する電磁的証明を見出し、若くは之を場の理論に基づくもっと精密な法則で置き換える企てに導きました。之等の努力は十分の成功を贏ち得なかったけれども、力学的の基礎概念を宇宙の物理的の概念の礎石として見做すことを断念させるようになりました。

マクスウェル・ローレンツの理論は必然的に特殊相対性理論に導いたのであって、之は絶対同時性の概念を打ち壊すことによって、遠隔力の存在を否定したのでした。この理論の下では質量は不変のものではなくて、エネルギーの大いさに関する（且つ実際に之と同一の）量であります。この理論は亦、ニュートンの運動法則が単に小さな速度に対してのみ成立する一つの極限法則としてしか考えられないことを示し、そして之の代りに、真空に於ける光の速度が極限速度としてあらわれるような、新しい運動法則を与えました。

場の理論のプログラムの発展に於ける最後の歩みは一般相対性理論でありました。数量的にはそれはニュートンの理論を僅か変更しただけですが、性質的には深く位くしたものであります。惰性、万有引力、並びに物体及び時計の計量的性質は場の単なる性質に帰せられ、又逆にこの場は物体に関係させられました（ニュートンの万有引力の法則の拡張、即ちポアッソンの形式づけたものに相応する場の法則）。空間と時間とは实在性を保ちはするが、併しニュートンが当時知られた法則を公式づけ得るためにぜひとも之に与えねばならなかったところの

因果的絶対性（影響を受けるのではなく、之を与える絶対性）を奪い去られてしまい一般化された惰性の法則がニュートンの運動法則の役目を取ることになりました。この簡単な概括で、ニュートンの理論の要素がどの様に一般相対性理論に移り、且つ上に述べた三つの缺点が同時に除かれるようになったかが明瞭でありましょう。一般相対性理論の骨組のなかでは、運動の法則がニュートンの力の法則に相応する場の法則から演繹する事のできるように思われます。この目的が十分に達せられたときに始めて私たちは純粹の場の理論について語る事ができるのです。

ニュートンの力学はもっとずっと形式的の意味で場の理論への路を準備しました。連続的に分布せられた質量に対するニュートン力学の応用は必然的に部分的微分方程式の発見並びに応用に導いたのでしたが、之は逆に、そのお蔭でのみ場の理論の法則が云いあらわされ得るであろうような言葉を供給して呉れました。この形式的の関係から見れば、やはりニュートンの微分法則の概念が後代の発展への最初の決定的の歩みを形づくったものであります。

上に記したところの、自然現象に関する私たちの思想の全発展は、ニュートンの思想の有機的発展と見てもよいでありましょう。けれども、場の理論が尚お活潑に進渉しつつある間に、熱輻射、スペクトル、放射能などの諸事実はこの思想の全体系の使用に一つの限界を暗示しているのであって、その細部に於ける偉大な成功にも拘わらず、今日私たちに完全に打ち勝ち難いようにも見えています。多数の物理学者は、重大な議論はあるにしても、之等の事実面に面して、微分法則ばかりでなく因果律そのもの——従来あらゆる自然科学の最後の基礎的假定であった——さえ或は誤っていないかを疑っているのです。

明瞭に物理的経験と相容れることのできるような、空間時間的構成の本当の可能性さえ否定されるのです。力学的体系が永遠に——経験が所謂直接いわゆるに示す通りに——単にエネルギーの分立的の値、即ち分立的の状態のみを許容しなければならないと云うことは、一見容易に場の理論から演繹し難いように見えます。ド・ブロイ並びにシュレーディンガーの方法は或る意味では場の理論の性質をもつものですが、微分方程式を基礎として、共鳴と同様な思考で、純粹に分立的な状態の成立と、並びにそれらの相互の転移とを経験の事実と一致して演繹しています。

併^{しか}しながらそれは質点の局所指定及び厳格な因果律を廃棄しなければなりません。誰が今日、因果律や微分法則や、ニュートンの自然処理に於ける之等の最後の立場を決定的に捨て去るべきかどうかと云う疑問を敢て決断する程冒険的であり得るでしょうか。

-
- ・『世界大思想全集』第48巻（春秋社，1930年12月）所収。
 - ・底本は縦組みであるが，数式を考慮して横組みにした。
 - ・旧漢字は新漢字に、旧かな使いは新かな使いに変更したが，一部旧漢字のままにしたところもある。
 - ・PDF化には $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X} 2_{\epsilon}$ でタイプセッティングを行い、`dvipdfmx`を使用した。

- ・科学の古典文献の電子図書館「科学図書館」

<http://www.cam.hi-ho.ne.jp/munehiro/sciencelib.html>

・「科学図書館」に新しく収録した文献の案内，その他「科学図書館」に関する意見などは，

「科学図書館掲示板」

<http://6325.teacup.com/munehiroumeda/bbs>

を御覧いただくか，書き込みください。