



始



46  
366



岩波講堂  
物理學及び化學  
別項 I. A.

# 物理學史概觀

石原純

購求  
6.11.16  
帝國圖書館

岩波書店

別 項

I. A.

物 理 學 史 概 觀

石 原 純

## 目 次

	頁
1. 古代に於ける科學的知識……………	1
2. 中世に於ける科學的知識……………	5
3. 近世に於ける物理學研究の端緒……………	01
4. 數理的物理學の起原……………	14
5. 物理學諸部門の成立……………	18
6. 力學理論の發達……………	23
7. 熱の概念の進展……………	27
8. 電氣及び磁氣に關する研究……………	30
9. ニュートン力學の完成……………	35
10. 熱と仕事との關係及びエネルギー原理……………	37
11. 原子論及び非可逆的現象の本質……………	40
12. 光の波動論……………	43
13. 近接作用及び力の場の理論……………	46
14. 分光學及び輻射理論……………	50
15. 理論物理學と認識論……………	53
16. 實驗物理學の進歩……………	57
17. 電子の發見及び其理論……………	58
18. 相對性理論とニュートン物理學の變革……………	61
19. 量子論及び原子構造論の發展……………	66

---

1. 古代に於ける科學的知識 現代に於て我々は物理學や化學やその他自然科學の諸分科がどんな體系を有するかを大體に於て知ることはできるけれども、之等の體形が形成されるのは科學が或る程度に發達して種々の知識の間におのづから理論的關係が見出たされるやうになつてからの事であつて、それ以前に在つては我々は單に我々の要求に應ずる知識の集成だけが存したに過ぎない。古代文明は斯くして種々の自然物に對する觀察と其間に蓄積された經驗に對する理論的考察とによつて始まつた。

論理的考察を行ふがための一つの基礎として原始人の間には既に簡單なる數學が發生した。バビロニアの算術に於ては十進法と共に六十進法が行はれ、累乗及び級數に關する算法や簡單な幾何學の問題が取扱はれ、エチプト初期(前2000年頃)のアーメスパピルス(Ahmes Papyrus, 前2000年頃)に至つては一元一次方程式の問題などがあらはれてゐる。之等の數學は先づ天文上の時間測定、土地の面積の測量、建築の設計、穀物の容積計算等に應用せられて漸次其効果を知らしめた。更にギリシヤ時代に入つてはギリシヤ人の特に形式論理に就て卓越せる才能と形式美に對する鋭敏なる感覺とが幾何學を大いに發達せしめ、ピタゴラス(Pythagoras, 前582-500)、プラトン(Platon, 前427-347)等の研究を経て遂に有名なユークリッド(Euclid, 前330-275)の形式幾何學に到達した。我々は尙ほ之にアルキメデス(Archimedes, 前287-212)及びアポロニオス(Apollonius, 前260-200)の數學をも加へねばならなかつたであらう。之等に

よつて古代の數學は實に近代に於ける解析幾何學及び微積分學の方法なしに達し得るすべてのものを成し遂げたのであつた。

自然物の中で古代人が最も早く注目し且つ研究を重ねたのは天文現象であつた。太陽及び月の外に特殊の天體として惑星が発見せられ、之等の運行に對して漸次精密な觀測がなされると共に、曆年及び時間の決定に關する研究もあらはれ、又日蝕及び月蝕の如き現象の觀測等も行はれた。ギリシヤ時代に至つては天體の構造に對して種々の假説が試みられ、ここに天文學の萌芽が見られるやうになつた。

多くの天體及び地球が球形であると云ふ知識はこの時代に於て殆んど一般に認められた。此説はピタゴラス學派に始まるとも云はれてゐるが、また紀元前第5世紀頃の Parmenides (前539頃)にも歸せられてゐる。ギリシヤ人等は天體がかく球形をなすことに對して彼等に特有な哲學的解釋を下さうとするに甚だ努めた。彼等は現象の理由若くは原因を求めることなしには満足することができなかつたからである。アリストテレス (Aristoteles, 前384-322) は既に月蝕の際に地球の陰影によつて生ずる境界線が曲線をなすことや、南方及び北方に於て見える星の同一でない事實を以て地球の球形を感覺的に示すものとなしたが、一方に於て論理的に球形はあらゆる立體中最も完全なものであり、それ自身の空間に於て廻轉し得る唯一のものであるとの理由で、地球及び宇宙の球形であることの根據となした。彼は又東より西への廻轉はその反對の廻

轉よりも高尚であるが故に天球は之を行ふのであると説いた。プラトンに於ても亦、あらゆる天體は神聖なるもの、生物中の第一のものであつて、その心の完全なる事は之等の秩序正しい運動に反映してゐるとなし、ピタゴラス派の説を繼承して地球を宇宙の中心とし、星がすべて規則正しい等速圓運動をなすと考へたのであつた。月及び惑星の運動の不規則性は當時既に觀測せられて人々の注目を惹いたが、紀元前4世紀のエウドクソス (Eudoxus, 前408-?)によつて始めて種々の廻轉を行ふ球の組合せによつて之を説明する事が試みられた。此説はその後アルキメデスを経てアリストアルコス (Aristarchus, 前270-?), ヒッパルコス (Hipparchus, 前146-126) に及んで益々精密となり、偏心圓及び周轉圓なるものを導き入れて諸惑星の複雑な運動を結果せしめ、遂にプトレマイオス (Ptolemaeus, 140) の天體理論に到達したのであつた。

物質に關する問題はギリシヤに於ては先づ宇宙觀と相結び付いて論ぜられた。ギリシヤの最初の大哲學者として知られたターレス (Thales, 前640-546) は、宇宙を美くしい巧みによつて造られてゐるとし、大地を大洋に浮ぶ圓盤と考へ、水を以て萬物の第一原質即ち元素と假定した。彼は氷、雪、霜の如きものが融けて水になり、岩さへも水に磨滅して消失することや、すべて植物の種子が水によつて成育し、人體等も亦水に歸するとして、水を根元的要素と考へたのであつた。又水の蒸發によつて空氣を生じ、水の激動によつて地震を起すともなした。即ち水は萬物の始め及び終りであると共に又萬象の起因をなすと解した

のである。この時代に於て物質の變化に對しては固より極めて外觀的にしか過ぎない事實のみが觀察せられてゐたのであるから、従つて第一原質なるものを求めるに當つても單なる思考による外はなかつたのである。それ故に之等の解釋に於ても人々毎に其説を異にした。ターレス以後に於てアナクシマンドロス (Anaximander, 前 611-545) は原質を以て無限なる或物となし、アナクシメネス (Anaximenes, 前 588-524) は空氣を之に該當せしめた。そしてエムペドクレス (Empedocles, 前 465 頃) 及びアリストテレスに至つて地、水、火、風を以て宇宙の4元素となしたが、この説は比較的後代に至る迄多くの人々の信する處となつた。

一方に於て之と對立すべき物質假説はデモクリトス (Democritus, 前 460-370) の原子論であつた。彼はアナクサゴラス (Anaxagoras, 前 500-428) 及びレウキッポス (Leucippus, 前 460) の説を繼承して、自然に於て物質が常に微細なる粒子に分解する事實並びに之等の微粒子が再び凝集して大塊となる事實に注目した。即ち水は水に、水は水蒸氣に、岩は砂に、砂は埃になり、更に進んでは埃や蒸氣は眼に見えない微粒となつて消え去り、一方では雲霧、雨等は明白な原因なくして生じ、埃も亦何處からか集まる。之等は萬物が原子から成るが故であつて、原子は常に活動し、數に於て無限であり且つ不可分であるが、其形體及び重さを異にするに従つて種々の物質が作られるとなした。此説が寧ろ近代の原子論に酷似してゐる事は興味ある事柄であるが、當時に於てはやはり一つの思考的可能性によつてのみ考

へられたのであつて、デモクリトスの説いた中には尙ほ靈魂と火とに同一の性質を歸し、其原子は甚だ小さく且つ圓形をなし、従つて滑かに自由に運動し、之を身體に吸ひ込む事によつて生命が保たれると云ふが如き想像をも含んでゐる。此結果として靈魂は身體と共に死滅するとなしたがために彼は後世の人々から嫌惡された傾向もあつた。そして他方でアリストテレス等の哲學説が多く信奉せられたために、物質に關しても前述の4元素説の方が廣く一般に行はれるやうになつた。

ギリシヤ時代に得られた著しい物理學的知識としては此外に、ピタゴラスによつて發見せられた絃の長さと言との關係、ユークリッドの光の反射法則、アルキメデスの挺子の原理、平面の重心位置、浮體の平衡に關する原理等を擧げることができるが、之等はすべて實驗的に見出だされたものである點で上述の諸説と異なり、今日に於て尙ほ殆んど其儘の形に於て認められることは當然である。自然現象中の特異なる種類として琥珀に於ける摩擦電氣及び磁石の引力の如きは既にターレスの時代に知られてゐたと傳へられる。

**2. 中世に於ける科學的知識** 古代から中世に移るに當つては歴史上に於て謂はゆる教父時代及び暗黒時代が続いてゐる。此間にギリシヤの文化はアラビヤに傳へられ、そして再び歐洲に持ち來されてそこに新らしい科學を生むべき母體となつた。之と同時に遠く東方からインドの文化が輸入されてアラビヤに於て西歐文化と結び付く好機を與へた。ギリシヤに於ける形式的論理的なる數學が著しく實用性を加へられた



のは其特筆すべき影響である。羅針盤や火薬が東方から持ち來されたのも多分この時代に於てであらう。天文觀測に関しては大きな石の四方儀や近代の經緯儀の役目をなす二つの廻轉四方儀と水平圓との組合せ等が用ひられ、惑星運動の觀測の如きもよほど精密に行はれるやうになつた。物理學に於てはアルハゼン (Al-Hazen, 965-1038) によつて著はされた光學書の中に反射の法則や球面鏡、拋物面鏡及びレンズの作用が論ぜられてゐる。又人間の眼の説明や、太陽及び月が地平線に近づく時大きく見える理由なども記されてゐる。光の屈折に關する研究は恐らく之が最初である。

アラビヤに於けるモハメット教徒及びこれが西方スペインに迄侵略したムーア人の間にはその宗教的影響によつて魔術的、神祕的、空想的なる思想に多く傾くものがあつた。その結果として天文學は専ら占星術となり、醫學は媚藥の調合の如きを主となし、化學は鍊金術及び不老長生の仙丹を求める事に終始する有様であつた。彼等は最初アリストテレスによつて假定せられた地、水、火、風の4元素が或る密接な結合によつて第二の根原物質を形作り、各の物質は之等の根原物質の含有量に應じて化學的性質を異にすると考へた。即ち諸金屬の性質を説明するために硫黄と水銀とを二つの根原物質として假定し、前者は火に於て變化を受ける性質をあらはし、後者は光澤や膨脹度や熔融度などを與へる外に、他の水銀とアマルガムを作る性質をあらはすとなした。例へば錫は鉛よりも根原物質としての水銀を多く含み、それだけ貴金屬に近づいてゐる。従つて何等

かの化學的方法によつて更に多くの水銀を含有せしめ得るならば、遂には最も貴重な黄金をもより劣等な金屬から變質させることができるに相違ないと彼等は信じたのである。かくして彼等は鍊金術の目的を以て熱心に實驗を行ひ、蒸溜法や冶金術や合金の製法を研究し、その間におのづから多くの化學的知識を獲得した。硫酸、硝酸、王水の如きを作り、硝酸銀や水銀酸化物を得、又葡萄酒滓から加里を海草から曹達を取ることも見出した。彼等は即ち鍊金術そのものに於ては成功しなかつたとは云へ、之によつて科學の上に最も大切な實驗的研究を進めたことに於て豫想外の功績を残したと云はねばならない。

第13世紀に至り歐洲の天地には新精神が勃興し、レオナルド・ピサノ (Leonardo Pisano, 1175-?)、アルベルツス・マグヌス (Albertus Magnus 1206-1280)、トマス・アキナス (Thomas Aquinas, 1225-1274)、ロージャー・ベーコン (Roger Bacon, 1214-1294) 等の先覺者が現はれて之を指導し、ここに謂はゆるルネッサンスの曙光を見るやうになつた。特にベーコンの業績の中には、曆の改良、反射及び屈折、レンズの球面収差、虹、隕石等について論じたものがある。之に次いで羅針盤の應用に伴つて遠洋航海術が發達し、第15世紀から第16世紀に互つて多くの新世界發見が行はれて歐洲人の心を擴大するに與かつた。コロンブス (Columbus, 1446-1506)、マゼラン (Magellan, 1470-1521) 及びその後繼者たちの西方米大陸の發見、ヘンリ公やディアズ (Diaz, ?-1500)、ダ・ガマ (Da Gama, 1469-1524) の南アフリカ探檢の如きその最も顯著なものである。

ルネッサンスの大精神の活動の一焦点とも云ふべきものを我々はイタリーの知的巨人レオナルド・ダ・ヴィンチ(Leonardo da Vinci, 1452-1519)に見ることができる。彼は實に藝術に於ける古今の一天才であると共に科學及び工學に於ける優れた研究者であつた。しかも彼は恐らく純粹な近代的精神をもつて科學の研究に従事した最初の人であつたが、即ち自然に對する觀測と實驗とを以て眞實を求める唯一の方法であるとなしたのであるが、之は僥倖にも彼の藝術完成に對する實際上の必要によつて達せられたものであつた。彼が研究を行つた光學の法則や眼の構造、人體解剖の詳細及び鳥の飛翔状態等は繪畫及び彫刻に於て眞を捉へるために必要とせられたのである。他方で彼は又技師の職業のために種々の力學上の問題を解くことの必要に迫られた。かやうにして彼は、ギリシヤに於て最も多く科學的精神を有してゐたアルキメデスに次いで、近代科學者の最初の一人となることができたのであつた。

近代科學は次節に述べる通りに力學に始まつたのであるが、レオナルドは實に力學に於てガリレイ及びニュートンの先驅者であつたと云はねばならない。當時にあつては固より力の概念が純粹に物理學的に考へられず、却つて或る精神的能力として解せられてゐたが、併しともかくも何等かの力なしには物體の運動が起され得ないことをレオナルドは知つてゐた。そして力は半分の物體に2倍の時間だけ働いて同じ距離を動かすとなした。又同じ重さの水でも靜止せるものと流動するものとは仕事をなす能力の異なることを知つてゐた。落下

運動の加速的であることも彼は實驗によつて確めた。この場合に同一の時間毎に落下する距離は算術級數を以て漸次増すとなした。又空氣中では同一の形及び同一の内容の物體は重いもの程速く落ちるとなしたのは、當時に於ては寧ろ當然の觀察であらう。之等の實驗は高塔の上から物體を落下させて行はれたが、その際物體が東方に偏つて落ちると云ふ事實から地球の廻轉を結論したことなどは確かに其顯著な業績の一つである。この外に彼は挺子、輪軸、水車、及び斜面上の落體の如きを論じた。運動の惰性に就ては明瞭ではないが、屢々之に云ひ及ぼしてゐる。

同時代に於ける科學上の最も偉大な理論として我々はニコラウス・コペルニクス(Nicolaus Copernicus, 1473-1543)の有名な地動説を挙げねばならない。天體の見掛けの運動を反對の方向への地球の運動によつて説明しようとする試みは既にギリシヤのピタゴラス派の學者たるフィロラウス(Philolaus, 紀元前400頃)によつてなされたことがあるが、コペルニクスは同じ思想をこの古代の文獻から得て、彼の手にする觀測材料に當て嵌め、之によつて多くの天體運動がより簡単に説明せられることを見出だしたのであつた。この革命的な理論は異常なる衝動を一般に與へ、特に當時の一大勢力であつたローマ教會をして驚愕せしめ、以後コペルニクスの學説を傳へるものに對し嚴酷なる迫害を加へるに到つたことは周知の事實である。しかしそれにも拘はらず彼の理論は、より精密な觀測によつて漸次確認せられるやうになつた。即ちティコブラーエ(Ticho

Brahe, 1546-1603) の優れた観測と、ケプレル(Kepler, 1571-1630) の之に対する研究とはやがて惑星運動の三法則なるものを結果せしめるに至つた。そしてニュートンの萬有引力の法則も亦之に基づくことは能く知られた通りである。

物理學上の他の業績として我々はこの時代に於て尙ほマウロリクス(Maurolycus, 1495-1575) 及びボルタ(Porta, 1538-1615) の光學的研究、タータリア(Tartaglia, 1506-1557) 及びベネデッティ(Benedetti, 1530-1590) の拋物體及び其他の物體の運動に關する考察、ステヴィヌス(Stevinus, 1548-1620) の靜力學に於ける業績、及びウィリアム・ギルバート(William Gilbert, 1544-1603) の電氣及び磁氣に關する諸研究等を擧げることができる。

3. 近世に於ける物理學研究の端緒 科學的研究が一般に自然に對する觀察と實驗とに基づかねばならないことは今日我々の能く知つてゐる處である。古代に於ても勿論自然の觀察が行はれないわけではなかつたが、その方法は極めて原始的であつて、單に全體の外觀に接するに止まり、各の變化現象に對する分析的考察を缺いてゐた。そして他方に於て之等の自然の外觀を直ちに何等かの形而上學的原理と結びつけることに急ぎ、そこに謂はゆる自然哲學なるものを生じたのであつた。併しながら一度コペルニクスの地動説の如きものによつて古來の天文學説の非なることが示され、しかもそれが事實の観測によつて漸次確められるに及んで、すべて自然の眞理が事實を措いて外にはないことが益々感ぜられるやうになつた。ここに物理學が始めて正當な軌道を踏んで發達したのである。

物理學のかやうな基礎確立に對して独自の役目を果したのは實にイタリアのガリレオ・ガリレイ(Galileo Galilei, 1564-1642) であつた。彼はその一生涯に従事した多くの科學的研究に當つて全く近代的精神を以て之に臨んだ。事實の觀察と分析と、そして又理論的考察の事實に依る檢證とが彼の専心するすべてであつた。當時一般に多大の興味が向けられてゐた天文學に關しては、先づ自ら望遠鏡を作つて諸天體を觀測し、太陽の黒點や、月面の山谷や、木星の衛星、土星の環、及び金星の盈虛等を發見し、又惑星の運動以外に之等の新事實の多くが何れもコペルニクス説と相容れるものなることを説明して、固く地動説を信じた。彼が大學に於てこの説を講ずるや、それがローマ教會の忌諱に觸れて、1615年にはローマ法王廳に於ける宗教裁判に付せられ、以後この説を放棄し且つ之を他に教へざることの誓言を法王の前に述べさせられたが、1633年に至り彼が再び其著書の中に對話的にこの説を記したことが訴告されて、爾後其死に到る迄謹慎を命ぜられ幽閉の日を送つたのであつた。彼は併しその表面に於て此宗教的審判に服従せねばならなかつたに拘はらず科學的事實に對する信條を遂に枉げ得なかつたことは明らかである。

力學上の諸研究に於てガリレイは實に根本的の法則を我々に遺した最初の人であつて、今日の物理學體系が先づ力學に於て形作られたことは、その性質上當然ではあるが、歴史的に見ては即ちガリレイの努力に歸しななければならないであらう。彼は落體の實驗を行つて始めてその速度が一定の時間毎に一定

の増加をなすことを見出だし、斜面上の運動も亦同様であることを示し、更に投げられた物体の運動を水平及び鉛直方向に分解してそれが拋物線を描くことを証明した。

斜面上の運動に關して彼は、或る高さからの落下によつて得た速度が斜面の傾斜に關しないことを見出した。又この速度を以て斜面に沿うて投げ上げられた物体は同じ高さ迄上るべきことを示した。之は實際に於ては摩擦によつて妨げられるけれども、ガリレイは、若し物体がこの場合に、より高い場處に上るとすれば物体がそれ自身の重さによつて低處から高處に至ることとなると云ふ理由で之を否定した。この論據は既にレオナルドの時代から假定せられた謂はゆる永久機關(Perpetium mobile)の不可能性から得られたものであつて、ここに後のエネルギー原理を含んでゐることは注目すべきであらう。ともかくも彼はかやうにして一定の速度の物体が斜面上を昇る高さはその傾斜に關しないと云ふ事實からして、傾斜を漸次に減じて水平面に到達せしめた場合に、その上で物体が一定の速度を保つて無限に運動すべきことを結論した。之は今日我々に知られてゐる惰性の法則に外ならない。物理學が單なる箇々の事實の記述に止まらないで、そこに或る理論的體系が構成せられねばならないことは既にその一端をここに觀取することができる。

ガリレイは尙ほ振子の振動の等時性を見出だして之を時計に利用することの可能性を論じ、伸張及び折斷に對する物質材料の強弱を研究し、水平梁の剛性に關する關係を求め、又流體の

運動等をも論じた。力學以外に於ても彼は種々の實驗を企てた。熱による空氣の膨脹によつて溫度を測ること、振動する絃及び板の音響學上の實驗、音の共鳴及び光速度の測定など之である。

自然現象の觀測に當つては之を測定すべき器械を必要とすること勿論であつて、古代に於てかやうなものが缺けてゐたことが科學の成立を見るに到らなかつた重要な原因をなしてゐる。之に反してガリレイが近代科學の基礎を確立した時代にあつては恰も同時に種々の器械の發明が行はれ、之がために相次いで科學の發達を促すことができたのである。ガリレイが望遠鏡を作つたことは上に述べたが、望遠鏡の最初の發明者としては當時のオランダの眼鏡製作師の二三の名が傳へられて居り、ガリレイはそれを話に聞いて自ら天體觀測に適するものを製作したのであつた。顯微鏡の發明も亦殆んど之と同時に行はれたらしい。ガリレイも亦彼の望遠鏡を改作して顯微鏡となして實驗を行つたと傳へられてゐる。又溫度測定のための空氣寒暖計は同じくガリレイによつて考案せられたが、之はドレッベル(Drebbel, 1572-1634)やアモンソン(Amontons, 1663-1705)などを経て、ファーレンハイト(Fahrenheit, 1686-1736)に至り今日の水銀寒暖計が完成されたのであつた。

ガリレイに次ぐ時代に於て尙ほ同様の意味に於ける發見や發明のうちで我々の注目すべきものを擧げるならば、我々は先づ第一にガリレイの高弟であつたトリチェリ(Torricelli, 1608-1647)の見出だした眞空と之による氣壓の測定とに指を屈せ

ねばならない。トリチェリの真空が大氣の壓によつて生ずることは、ブレイズ・パスカル (Blaise Pascal, 1623-1662) によつて證明せられ、ここに氣壓を測定すべき氣壓計が我々に與へられることとなつた。之に關聯してはメルサンヌ (Mersenne, 1588-1648) が行つた空氣の重さの測定實驗も忘れてはならないであらう。之に次いで尚ほ任意の器内から空氣を排除して真空を得る装置としての空氣ポンプがオットー・フォン・ゲーリケ (Otto von Guericke, 1602-1686) の努力によつて作られたことも特記すべきである。彼が當時マग्デブルグ半球の實驗として知られた有名な實驗を大衆の前に行ひ多大の驚異を一般に與へたことは科學史上に於ける顯著な事實の一つに數へられるものであつた。

之等の事實からして既にこの時代に於ては空氣が研究の興味を中心として多くの人々によつて實驗的對象として取り上げられてゐた事が推察せられるであらう。空氣並びに一般氣體の性質に關する研究の結果はここに續々とあらはれ、ロバート・ボイル (Robert Boyle, 1627-1691)、マリオット (Mariotte, 1620-1684) 等の名によつて我々に知られてゐる法則の發見に導いた。パパン (Papin, 1647-1712) による蒸汽機械の發明の如きもこの時代に屬する。

**4. 數理的物理學の起原** 實驗的物理學がガリレイ以後に於て漸次進んで來た間に科學の一般方法についての考察が先づイギリスの大法官フランシス・ベーコン (Francis Bacon, 1561-1626) 及びフランスのモンターニュ (Montaigne, 1533-1592)

によつてなされ、稍々時代を隔ててはデカルツ (Descartes, 1596-1650) によつて更に詳密に與へられた。このうちベーコンは科學の歸納的方法を明らかにし、又あらゆる科學の種類を對象によつて分類し、それがいかに進むべきかを教へた。彼が科學に於ける假説を認めなかつたのは、當時に於て科學をして實證的となし、古代の自然哲學から脱せしめるために寧ろ貢獻する處が多かつたと云はねばならない。彼の後にイギリスに於てボイルやフックやニュートンの如き大科學者を生むに至つたのはその影響の與かつて力あつたことを證するものであらう。

ベーコンは直接に科學的研究には従事しなかつたけれども、之に反してデカルツは科學の多くの部門に就て種々の仕事をなした。力學、光學、音響學、磁氣學等の外に生理學、解剖學に迄及んだ。併し彼の業績として最も優れてゐるのは恐らく數學にあつた。彼は幾何學の問題に對して代數學を應用する方法を發見した。純粹の幾何學に於ては問題の解は常に個々別々に求められなければならないけれども、之を代數學的に解く場合にはそこに一般的方法が用ひられると云ふ非常な利益があるばかりでなく、他方に於ては代數學の方程式を幾何學的に意味づける場合には全く抽象的な關係を具體化し可視的になす便をもつ。今日の解析幾何學はここに由來し、又之等の便益のために廣く且つ有利に用ひられてゐるのである。

物理學の發展のために解析幾何學がいかに多く貢獻してゐるかを我々は容易に覗ひ知ることはできるが、之に優るとも劣ることなき貢獻をなしたもう一つの數學は實に微積分學であ

つて、その起原が前者と全く同時代にあつたことは偶然にも不思議な事實である。即ちデカルツと殆んど同年輩であつたイタリーのカヴァリエリ (Cavalieri, 1598-1647) によつて導き入れられた極微なる概念が微積分學の出發點を形作つてゐるからである。彼は實際に之を用ひて二次曲線の面積を計算することに成功した。

この時代に於ては特にフランスに於て數學の發達が甚だ著しかつた。デザルグ (Desargues, 1593-1662) は射影幾何學の基礎を置き、フェルマー (Fermat, 1601-1665) は整數論の諸定理を發見し、極大及び極小の問題を論じ、確率について研究した。解析幾何學及び微分學の眞の發明を彼に歸する論者もある。パスカルも亦幾何學や整數論及び確率論について研究する處があつた。そして之等の數學的知識は尙ほ一般に擴まると共に益々發達した。イギリスに於けるワリス (Wallis, 1616-1703)、バロウ (Barrow, 1630-1677)、レン (Wren, 1633-1722)、ニュートン (Newton, 1642-1727)、フック (Hooke, 1635-1703) の如き、オランダに於けるホイヘンス (Hugens, 1629-1695)、ドイツに於けるライプニッツ (Leibnitz, 1646-1716) の如き、何れも數學者として當時に於て優れた人々であつた。ニュートン及びライプニッツの間には微積分學の方法の發明に關し優先權の争ひを生じたことは有名な事實であるが、實際に於ては曩にフェルマーが有限差の計算法によつて行つた處のものをニュートンは彼の謂はゆるフラクシオン (Fluxion) の方法により解析的となし、且つ二項定理の發見によつて之を單純化一般化したのであり、ライ

プニッツは今日我々の用ひる形式や記法を與へて之を整序したのであつた。

之等の數學は種々の觀測器械と相待つて物理學研究の有力なる手段方法を提供した。そしてここに始めて數理物理學の確立を見ることができたのであつた。我々はその最初の典型的なるものをニュートンの萬有引力理論に於て見出す。ニュートンは1665年ケムブリッジ大學を卒業した後、ペスト病の流行によつて大學が閉鎖された間に郷里に歸休し、そこでフラクシヨンの方法を見出し、又重力の理論に考へ及んだのであると傳へられてゐる。彼は即ち地球の重力が月の軌道にまで擴がつてゐると假定して月の加速度を求め、一方では惑星の週期の2乗は太陽からの平均距離の3乗に比例すると云ふケプレルの法則からして、惑星に働く太陽の引力は距離の2乗に逆比例しなければならぬことを導き出し、之によつて月に對する地球の引力をも計算し、之を地球表面の重力と比較して同一の力であることを證明したのであつた。彼は更に16年後に於てフランスの學者たちが行つた地球の大いさの測定の結果を用ひて之を再び計算し、彼の理論の正しいことを一層よく示した。そこで彼は尙ほ進んでこの引力理論を他の惑星木星の衛星、彗星及び潮汐現象にまで應用して益々確實なることを明らかにした。コペルニクス以後、ケプレルやガリレイによつて漸次組み立てられた新天文學はここに至つて全く數理的の形式に於て完成されたのである。

この萬有引力理論は1687年に公けにされた有名な "*Prin-*

*cipia Philosophiae Naturalis Mathematica*”に載せられてゐるが、この書に於てニュートンは又彼の“運動の3法則”として知られてゐる力学の根本法則を数理的に述べてゐる。後代に於て榮えた力学の全内容すべての原理や法則が悉くニュートンの之等の敘述のなかに含まれてゐると云ふことは實に驚くべきことであつて、今日に至る迄彼を以て科學に於ける最大の偉人として推稱するのは決して無理ではない。特に天文學に於て新たに発見せられるあらゆる天體が彼の理論の普遍性を認め、“彼の戴く月桂冠に更に緑の葉を附加する”と云ふことは、實に彼に於て獨擅するところの最大の光榮と云ふべきである。

**5. 物理学諸部門の成立** ガリレイやニュートンの功績によつて物理学のうちで先づ力学現象に関する数理的理論が成立するに至つたと同時に、他種の現象に対しても漸く研究が重ねられて行つた。物理学の種々の部門は我々が自然現象を受け取る感官の種類に應じて成り立ち、それらが互ひに獨立に發達したことは勿論であつた。筋肉に感ずる力の外に眼に感ずる光、耳に感ずる音響、温度感を生ずる熱は各その主要なものであつた。この外に力の特殊の種類として電氣及び磁氣の力が經驗せられ、之等の力を生ずる物質の性質が通常の固體や液體や氣體の外に特別に研究せられた。

歴史的に見て光に関する考察は最古代に端を發してゐる。太陽、月、星及び燈火の如き發光體からは何物かが放射されてゐると考へるのは普通であつた。併し發光體以外の物に關してギリシヤ以前に於ては之と反對に我々が物を見るのは眼から

光が放射されるのに依ると考へてゐたらしい。アリストテレスは若しかやうであるならば何故我々は暗黒に於て物を見得ないのであるかと問うてゐる。

鏡面や水晶又は硝子の球に於ける光の反射及び屈折の現象も早くから知られてゐた。併し之等の關係を精密に數量的に研究し出したのは、ケプレル、デカルツ及びスネリウス(Snellius, 1581-1622)等であつた。又之等の現象の應用としては少く以前にボルタによつて暗箱が發明せられ、次いで17世紀の始に望遠鏡や顯微鏡が作られるに至つたことは既に述べた通りである。けれどもここでも亦數理物理学に屬する光學としての第一歩が踏み出されたのは、オランダのクリスティアン・ホイヘンス(Christian Huyghens, 1629-1695)に始まると云はねばならない。

ホイヘンスの研究のうちでは振子を時計に應用し、1秒振子の長さを決定し、重力加速度の値を之から計算したこと、慣性率や遠心力や二物體の衝突に就て論じたこと、又望遠鏡によつて土星の瘤が環であることを發見したことなど何れも重要である。併し光學に關して光の波動説を稱へたことは確かに彼の最大業績である。彼は即ち光をエーテルなる媒質に於ける波動として假定し、光源から之が發して四方に傳播する有様を幾何學的に論じ、之から反射及び屈折の法則を導き出した。エーテルの分子に彼は極端なる微小さ、硬さ及び弾性を與へて光波をその弾性による波動と解した。又方解石に於ける複屈折の現象を論じ、之に伴つて偏光現象の起ることにも注目した。

光速度の測定に關して、さきにガリレイは信號燈を用ひる方法、デカーツは月蝕の觀測上及び計算上の時刻の差による方法を案出したが實際に於ては之等は非常に大きな光速度の測定に對しては不適當であり、従つて失敗に終つた。そこで新たにデンマークのレーメル (Römer, 1644-1710) は 1675 年に木星の衛星の蝕の週期に一定の差のあることを觀測し、その値を報告したので、ホイヘンスは之に基づいて始めて光速度の値を計算し凡そ音の速度の 60 萬倍であるとなした。この値は今日知られてゐるものに比べて過小であるけれども、當時に於ては之によつて光の速さを髣髴することができたのであつた。

ホイヘンスの光の波動説に反して、ニュートンは 1704 年に於ける彼の著書“光學”のなかで謂はゆる光の微粒説を主張した。ニュートンも亦光學に對して少なからぬ興味をもつて研究したのであつた。レンズが色収差を生ずるのを避けるために凹面鏡を用ひて反射望遠鏡を作つたことや、日光をプリズムによつて分析することにより虹と同様なスペクトルを生ずるのを明らかにしたことや、又今日でもニュートンの環として知られてゐる美しい干涉現象を發見したことなども特記すべきものである。彼は、光線が光素と稱せられる微粒子の放射によつて成立すると考へ、光の色は粒子の大きさを異にするによつて現はれるとなし、之等が我々の眼に衝突して色の感覺を與へるとなした。光線の直線的進行の如き現象を説明するためには此説は確かに波動説に優るとして當時考へられてゐたが、屈折や干涉などの説明に對しては却つて困難を感じたことは

否定せられない。併しながらニュートンの物理學界に於ける多大の榮譽と信用とは彼の説をしてその後殆んど 1 世紀間に亘つて一般に認容せしめた。

光と共に熱に關する研究も 17 世紀の末に於て起つてゐる。アリストテレス以後、火は物質の 4 元素の一つとして久しく信ぜられてゐたが、火や熱の概念は當時に於て頗る不明瞭であつた。古代の 4 元素の外に中世以後の錬金術者は硫黃、水銀及び鹽を以て物質の 3 要素となしたけれども、この要素なる概念も亦甚だ曖昧であつて、之等を科學的探究の根據に置くことは到底出来ないと云ふことを、ボイルは 1661 年に彼の“懷疑の化學者”なる論文において鋭く批評してゐる。然らば科學的に考へて熱は何であるかと云ふことが先づ考察の題目とせられねばならなかつた。當時プロシヤ王の侍醫であつたスタール (Stahl, 1660-1734) は燃焼及び金屬の煅焼について研究し、之等の場合に物質からフロジストン (Phlogiston) と名づける或るものが放出されることを假定した。之は“燃焼する物質、火の精、併し火そのものではない”と考へられた。又金屬は木炭と共に燒くことによつて酸化物たる金屬灰から回收することができるから、金屬はこの過程中に木炭から放出されたフロジストンを吸収すると説明した。この際に木炭が殆んど消滅するのは、それが純粹のフロジストンから成るが故であると解釋された。この説は之等の事實を一應よく説明することができたためにその後久しく一般に信ぜられたばかりでなく、之がために化學的にはそれ以前の錬金術的過程の夢想を轉向せしめて、化



合や分解の實際的化學變化に注目するやうに至らしめた點で貢獻する處は少なくなかつた。

音響に関してはガリレイが始めて之を空氣の振動として解釋し之が鼓膜に達して音の感覺を生ずるとなした。彼の著書の中には協和音と不協和音とを空氣の振動の一致と衝突とに基づくと説いてゐる。又發音體の振動を眼に見ゆるやうにする方法として眞鍮板を鑿で擦つて發音させ板上の塵埃の動くのを實驗した。之は後にクラドニ (= Chladni, 1756-1827) によつて用ひられたものであることは能く知られた通りである。

尙ほ電氣に關してもこの時代に於て漸く種々の實驗が始められた。ゲーリック(1660)は硝子球のなかに嵌込んだ硫黄の球を廻轉軸に据付け、これと布片で摩擦して電氣を發生させた。ボイルも亦同様の起電機を用ひたが、ニュートンは硫黄の代りに硝子球を用ひたものを作り、1676年に王立學會で實驗を行つたと傳へられてゐる。併し電氣の諸現象について科學的考察を施した最初の人恐らくステフェン・グレー (Stephen Gray, ?-1736) であらう。彼は始めて電氣の導體を發見して之を絶縁體と區別し、1729年及び翌年に細絲及び針金を用ひて電氣を800呎の距離に導くことに成功した。又1733年にはフランスのデュフェー (Dufay, 1698-1739) が謂はゆる硝子電氣及び樹脂電氣の兩種の存在を發見し、その作用を研究したが次いでフランクリン (Franklin, 1706-1790) によつて單に一種の電氣の存在を假定すればよいことが論ぜられた。フランクリンが雷電の電氣を地上に導いた有名な實驗は1752年に行はれた。ムッ

シエンブレーク (Musschenbroek, 1692-1761) によるライデン瓶の發見は之に先立つて1746年になされた。

**6. 力學理論の發達** ニュートンによつて確固たる基礎を置かれた力學はそれが實に嚴然とした數學的理論の上に立つてゐることに於て獨自の特色をもつてゐた。すべての物理學的法則關係はそれが精緻なる觀測的事實に對應するに當つて必ず數量的に赴かねばならないのであるが、力學以外の諸現象にあつては事柄が複雑であるだけに、俄かに簡單な數理的理論に導くことはできないのが當然であつた。この間に力學は物質のうちから單に力に對する關係だけを抽象し、その他の性質の如何に拘はらずその運動現象だけを取り扱ふのであるから、ニュートンによつて與へられた法則が殆んど物理的に成立するとなして、その上に種々の數學的定理が導き出されればよいやうに見えた。従つて力學理論は常に數學の發展と相待つて進んだのであつた。

數學それ自身にあつては、ニュートン及びライブニッツによつて微積分學が發明せられて以來續いて第18世紀の數學者たちによつて之を今日行はれてゐる形式にまで整序せられ、又微分方程式が考へられてその解として種々の函數が知られるやうになり、更に變分法が發明せられて連續的函數の性質を一層明らかにすることができたこと等その最も主要なる發展であつた。この時代に於ける數學者のうちにはマクラウリン (Maclaurin, 1698-1746)、ヤコブ・ベルヌーイ (Jakob Bernoulli, 1654-1705)、その弟ヨハン (Johann Bernoulli, 1667-1748) 及びそ

の子ダニエル (Daniel Bernoulli, 1700-1782), モーベルチエイ (Maupertuis, 1698-1759), オイレル (Euler, 1707-1783), ラグランジュ (Lagrange, 1736-1813), クレーロー (Clairaut, 1713-1765), ダランベール (D'Alembert, 1717-1765), ラプラス (Laplace, 1749-1827) 等を数へることができる。そして之等の人々がその数学をそれぞれ力学や天体力学に應用して著しい成果を得たことは云ふまでもない。

質点の運動體系に於てニュートンの原理から運動量恒存の法則、重心恒存及び面積恒存の法則が導き出されることは我々の知つてゐる處であるが、これ等はダニエル・ベルヌーイ及びオイレルによつて殆んど同時に(1746)見出だされたものである。振動中心點の定理は最初ホイヘンスによつて論ぜられたが次いでヤコブ及びヨハン・ベルヌーイにより完全に解かれ、更にダランベールによつて一般化せられて、謂はゆるダランベールの原理を結果するに至つた。活力(運動エネルギー)の原理も亦ホイヘンスによつて用ひられた後、ヨハン及びダニエル・ベルヌーイにより一般化せられ、尚ほオイレル及びラグランジュによつて論ぜられて力学に於けるエネルギー原理を完成した。最小作用の原理は1747年に始めてモーベルチエイによつて云ひ表はされた。作用の量として彼は物体の質量、速度及び距離の相乗積を取つた。彼は同様の原理をフェルマー及びライブニッツに従つて光の運動にも應用した。次いでオイレルによつて作用量は始めて  $\int v ds$  ( $v$ : 速度,  $s$ : 距離) なる積分の形にあらはされ、ラグランジュによつては之が活力原理の成立する限りに

於て用ひられることが示された。

之等の研究によつて我々はともかくも力学諸原理がこの時代に於て基礎づけられた有様を知ることができる。そして我我はそのなかに3種の思想的起原を見出だすであらう。即ちその第一は質量の概念であり、第二は活力の恒存、第三は最小作用の概念である。之等はそれぞれ適當な具體的内容を事實と相結び付いて與へられたときに始めて實際の力學的原理を確立するのであつて、之が力学理論の成立發展の主要なる眼目をなすものでなければならなかつた。

質量は古代から漠然と考へられてゐた“物質の量”なる概念の發展せるものであること勿論である。之には何等かの一定なる量が歸せられねばならなかつたが、最初は感覺によつて判斷せられる“重さ”を以てこの役目を負はせ得る量と考へた。併し重さが場處によつて變ることが知られるに至つて、この外に尚ほ物質に對して一定に残る量として質量なるものが考へられるやうになつた。ニュートンはその運動法則に於て勿論後者を考へ、之と加速度との積を力として定義したけれども、尚ほ質量の定義を運動法則それ自身から導き出すことなしに、却つて想定せられた物質分子の數に比例すべき密度と體積との相乗積を以て質量とすることに満足した。

活力恒存の原理には、無から何等の仕事も生じないと云ふ觀念が根柢に横たはつてゐる。ガリレイが惰性の法則を導き出すに當つて、先づ物体が斜面に沿うて落下する場合に斜面の傾斜の如何に拘はらず同じ高さだけ落ちたものは同じ終速度を

得る事を前提となしたが、若し之が成立しないとすれば、物体が或る斜面を落下した後再びその得た速度を以て他の斜面に沿うて昇るときに、以前の位置よりも高處に達し得ることを示し、重力のみによつて位置を高めることとなるから、之は重さある物体が常に降下して、決してそれ自身で高處に移る傾向を有しないと云ふ事實に矛盾すると論じた。我々はこの事實として假定せられた中に既に活力恒存の原理が含まれてゐることを観取するであらう。

之と同時にガリレイは物体の質量  $m$  と速度  $v$  との積をモメント若くはエネルギーなる語を以てあらはした。デカルツは又之を“運動の量”として名づけ、之が世界全體に於て一定であることを主張した。之に反してライブニッツは運動物体の能力を測る眞の量として  $mv^2$  を假定し、之を活力 (*lebendige Kraft*) と名づけ、静止物体の壓の如き死力 (*todte Kraft*) に對照せしめた。活力に  $\frac{1}{2}mv^2$  なる式を與へ、又之と併せて恒存すべき力と距離との乗積に仕事の名を用ひたのは、コリオリス (*Coriolis*, 1792-1843) である。

最小作用の概念をモーペルチュイが力学に導き入れるに際して彼は之が創造者の全知全能をあらはすものと考へたのであつた。神は自然に於て何等の無益を行はないと云ふ思想がこの根柢に横たはつてゐる。作用の量に對して適當なるものを選んだとき之がニュートンの原理と結び付き得たことは寧ろ偶然であるが併し哲學的には興味ある事柄である。

力学に於てニュートンは主として幾何學的綜合的方法を用

ひたのであつたが、之に對して近代力学は全く代數學的解析的方法による點で著しい特色を示してゐる。複雑なる問題を解決するために後の方法がいかに有力であるかは今日我々の能く知つてゐる處であるが、この方法を最初に導き入れたのはオイレル (1736) であるが、彼に於ては尙ほ力を運動の接線方向と法線方向とに分解してゐる點で幾何學的方法が残されてゐた。今日我々がなすやうに之を三つの直交座標軸に分解してあらはしたのはマクローリン (1742) であつたが、更に劃時代的に最も多くの貢獻をなしたのは、ラグランジュであり、彼の著書“解析力学” (*Mécanique analytique*, 1788) は實に其範を示した重要なものであると云はねばならない。活力  $T$  とポテンチアル  $U$  との差として定義せられたラグランジュ函数なるものが力学に於ていかに重要な役目をもつかを我々は知つてゐる。ポテンチアルの概念はクレローが始めて地球の形狀を流體力學的に論じた際に導き入れられたものであつたが、一般に力の分布を論ずるに當つて重要な量であり、後ラプラス、ガウス (*Gauss*, 1777-1855)、ポアッソン (*Poisson*, 1781-1840)、グリーン (*Green*, 1793-1841) 等によつて大いに發展せしめられた。

7. 熱の概念の進展 熱の概念が久しく明瞭を缺いてゐたのはそれが火若くは焰の現象と混同せられてゐたからである。スツールはフロジストンなる一種の物質を假定して之を熱素として考へたが、既にボイルは或る金屬の煨焼によつて重さの増大する事實を認めてゐたと云ふことであり、その後一般に燃焼によつて生ずるすべての生成物の重さを測ると燃焼以

前の重さよりも増してゐることが見出だされてからは、熱素に對して負の重さを歸せねばならないわけであつた。一方でイギリスの僧侶ヘールス(Hales, 1677-1761)は1729年に硝石を熱することによつて之から“空氣”が追ひ出されることを示したが、又ブラック(Black, 1728-1799)は同様に石灰に酸を作用せしめて發生する氣體を集め、その重さを測つて之が石灰の重さの減少と全く等しいことを見出だした。彼はこの氣體を“固着空氣”と名づけて、石灰中に固着してゐたものであると考へ、逆に之を石灰の溶液中に泡立たせて白い粉末の沈澱を生ずることを實驗的に示した。即ちここではフロジストンの如き假説的物質が現象に關係するのではなくて、却つて實際に空氣と同様な一種の氣體の化學的分解及び化合が行はれるに過ぎないことが明らかにせられた。その後スウェーデンの化學者ベルグマン(Bergmann, 1735-1784)はブラックの“固着空氣”が酸性であることを見出して、“空氣酸”(Aërial acid)と名づけたが、これが炭素と酸素との化合物たる炭酸ガスであることは後に(1779)ラヴォアジエ(Lavoisier, 1743-1794)によつて證せられたのである。

この時代に於て化學は漸く勃興し始めた。1766年イギリスに於てキャヴェンディッシュ(Cavendish, 1731-1810)は彼が“可燃空氣”と名づけた新氣體即ち水素を發見し、1772年ラザフォード(D. Rutherford, 1749-1819)は窒素を、そして1774年ジョセフ・プリーストリ(Joseph Priestley, 1733-1804)は酸素を發見した。プリーストリは水銀を煨焼して得た赤い粉末を加熱分解

して發生する氣體を集めて研究したのであつた。之は煨焼せられた、即ちフロジストンを取り去られた金屬から生じ、併し通常の空氣の如くに無色無臭なる氣體であると云ふ理由で、彼は之を“フロジストン無しの空氣”(Dephlogisticated air)と名づけた。この氣體の中で物體が非常に能く燃焼し、又生物の呼吸を助ける事實から彼はフロジストンが通常の空氣をして之等の作用を妨げてゐるのだと解釋した。之と殆ど同時に(1775)スウェーデンの化學者シェーレ(Scheele, 1742-1786)もまた同じ氣體を發見し、“天上の空氣”(Empyrean air)なる名で呼んだ。之等の研究は多少とも化學的知識を供給することができたが、まだフロジストンなる神祕的存在に對しては何等の事柄をも明らかにすることができなかつた。この點に於て我々はすべての功績をラヴォアジエに歸しななければならない。彼は即ち金屬が空中に於て燃焼する際に残りの物質は以前の金屬より重いこと、又密閉器内で燃した際に器内の空氣の重さが丁度金屬の重さの増すだけ減少することを非常な精密な天秤を用ひて證明した。プリーストリの實驗の場合には煨焼した水銀の赤い粉末が失つた重さが丁度追ひ出された“フロジストン無しの空氣”の重さに等しいことが示された。“酸素”の名は彼によつてこの氣體に與へられたのである。又ブラックの“固着空氣”中には72%の酸素と、28%の炭素とを含むことを見出だし、之を“炭酸”と名づけた。更にキャヴェンディッシュの“可燃空氣”と通常の空氣又は酸素とを化合させて水を作り、前者に水素の名を與へた。之等の實驗によつて彼は一般に

化合又は分解に對して之に與かる物質の全體の重さは少しも増減することなく常に一定に残ることを證明し、之に反して熱の出入によつて物質の重さは變らないことを示した。フロジストン又は熱素が何であるかはここにまだ完全には解決せられなかつたが、それは少なくとも物質の如く重さを有するものでないことが明らかにされたのであつた。

この間に比熱の概念は1772年にウィルケ(Wilke, 1732-1796)によつて導き入れられ、又ブラックは潜熱を發見し、今日の熱學の基礎がここに漸く形作られた。當時ジェームス・ワット(James Watt, 1736-1819)が蒸氣機關の完成に成功したのも之等の研究に依つた處が多い。

**8. 電氣及び磁氣に関する研究** フランクリンに次いで専ら電氣に関する研究を行つた人々の中に我々はエピヌス(Äpinus, 1724-1802), シムマー(Symmer, ?-1763), キャヴェンディッシュ等の名を見ることができる。この間に種々の實驗的事實が我々の知識に加へられて來たが、始めて電氣學及び磁氣學に數量的の基礎を與へることによりその面目を一新せしめたのは實にフランスのクーロム(Coulomb, 1736-1806)であつた。彼は即ち1785年に彼自身の作つた精密な振秤を用ひて、電氣の間及び磁氣の間に働く力が距離の2乗に逆比例すると云ふ法則を確立したのであつた。精密科學としての電氣學及び磁氣學は之に始まると云はねばならない。

併し之と同時に顯著な新事實の發見が相續いて電氣學の範圍を急激に擴張するに至つた。1786年にイタリーの醫學者ガ

ルヴァニ(Galvani, 1737-1798)が蛙の筋肉を銅と鐵とによつて吊す際に電氣の發生することを發見して以來、この事實に暗示を得てヴォルタ(Volta, 1745-1827)はその有名な電堆を發見し、その兩極を針金で連結することにより始めてガルヴァニ電流と稱せられる電氣の不斷の流動を得ることに成功した。爾後多くの人々は競つてこの新しい流動電氣の性質を研究すると共に、之を發生せしめる装置について工夫し、漸次強力な電池が作られた。

ガルヴァニ電流の作用として見出だされた最初のもは化學的分解であつた。ヴォルタ自身は既に之による水の分解に成功し、1800年にパリに赴いてナポレオン一世の面前でその實驗を行ひ、賞牌を受領したと傳へられてゐる。次いでサー・ハムフリー・デーヴィー(Sir Humphry Davy, 1778-1829)は之に関する極めて多くの實驗を行ひ、之によつてナトリウム及びカリウムをその酸化物から分離した。この研究は久しく続けられ、遂に彼の弟子であつたマイケル・ファラデー(Michael Faraday, 1791-1867)をして電氣分解の法則の重大な發見(1833年)に到達せしめた。尙ほ電氣分解の過程に関してはベルツェリウス(Berzelius, 1779-1848), グロツツス(Grotthus, 1785-1822)等の研究があり、リッター(Ritter, 1776-1810)によつて蓄電池が作られたことなども記せらるべきものである。

電流の通ずる針金が熱せられる事も早くから知られた。そしてチルドレン(Children, 1777-1852)やリュック(Luc, 1727-1817)によつて細い針金の熔融することが實驗せられたがこの熱量

が始めて數量的に正確に測られるためには尙ほ數十年後(1842年)にジュール(Joule, 1818-1889)の手を待たねばならなかつた。この間に逆に二つの金屬針金の接續點を熱することにより謂はゆる熱電流の生ずることが1821年ゼーベック(Seebeck, 1770-1831)によつて發見せられたことも注目すべきである。

電流に関する根本的の法則は1827年にドイツのオーム(Ohm, 1787-1854)によつて立てられた。デュフェイやフランクリン以來電氣は重さのない一種の流體と見做されてゐたが、彼は之を丁度温度差の存する物體のなかに熱が流れるのと同様に考へ、ヴォルタの導き入れた電氣張力なるものを温度差と同様の量と見做し、之と電流の強さとの關係を理論的に見出したのである。

之に少しく先立つて1820年に電流に関する他の重要な事實がデンマークのエールステッド(Oersted, 1770-1851)によつて見出だされた。それは電流の磁氣作用であるが、同じ現象は既に1802年にイタリーのロマニオン(Romagnosi, 1761-1835)によつて觀察されたとも傳へられてゐる。この發見はそれ以前に於て全く互に獨立の現象として知られてゐた電氣及び磁氣の間に連關を持ち來さしめた點で特に意味を有してゐたばかりでなく、後に電氣の實用上の多數の偉大な發明を生んだ根原をなすものであつた。

エールステッドの發見が公けにせられた後に間もなくビオー(Biot, 1803-1850)及びサヴァー(Savart, 1791-1841)は之に對する數量的關係を見出だし、又アンペール(Ampère, 1775-1836)

はその一般的理論を與へると共に、圓形のソレノイドに電流を通ずるときに之が全く一つの磁石と同一の作用を生ずることを示し、又之から二つの電流の間にはたらくべき力を推理して之を實驗的に證明した。彼はこの場合に電流間の力を各要素間に存する微分的の力に還元してその法則を求め、丁度ケプラーの法則であらばされた天體運動をニュートンが各質量間にはたらく萬有引力の法則によつて云ひあらはしたのと同様であるとなした。一つの磁石の作用は物理學的に各分子内に圓形に廻轉する電流の存在することによつて説明せられるとなしたのも彼の理論からの當然の歸結であつた。アンペールの之等の理論的研究は實に電磁氣學に對して一つの劃時代的の功績を残したものであつて、殊に磁石の作用を全く電氣の現象に歸せしめたのは當時にあつていかに驚くべきことであつたか、想像するに餘ある程である。

然るに1831年に至つて更に驚くべき發見がファラデーによつてなされた。それは即ち電磁感應の現象であつて、電流と磁石との間の關係を更に一層押し進めたものである。電流の感應は一般に電流又は磁石が導體に對し運動するか又はその強さを變ずることによつて起されるが前者の場合に於ける感應電流の方向に關しては1834年にレンツ(Lenz, 1804-1865)がその法則を簡単に云ひあらはし、次いでフランツ・ノイマン(Franz Neumann, 1798-1895)は1845年にこの法則とオームの法則とを結びつけて感應電流に對する理論を立てた。

之等の事實が發見された後に、電磁氣學に於けるより根本的

の問題が當時の理論物理學者の間に取り扱はれる様になつた。即ちクーロムの法則は靜電氣間にはたらく力を云ひあらはしてゐるが、電氣が導體内に運動する場合には單にこの力のみでなく、尙ほ何等かの他種の力が存在することによつてアンペールの電氣力學的作用や、ファラデー・ノイマンの感應作用を生ずるのであるから、この一般的根本法則を求めることによつて電磁氣學の理論を完全に結果するであらうと考へられた。此問題は1846年に先づドイツのウイヘルム・ウェーベル (Wilhelm Weber, 1804-1891) によつて論ぜられた。彼は電流のなかに互ひに反對の方向に等しい速度で動く正及び負の電氣粒子を假定し、且つ任意の二つの電氣粒子間にはクーロムの力の外にそれらの相對的速度並びに相對的加速度の或る冪乗に比例する力の存することを假定し、之等の粒子の運動によつて形作られた電流の間にアンペール及びノイマンの法則が満足せられるやうに力の大きさを決定しようとした。かやうにして見出されたウェーベルの謂はゆる根原法則なるものは當時知られた事實と一致することはできたけれども、併しそこには尙ほ理論的に果して妥當なるか否か疑はしい歸結が導き出されねばならなかつた。即ち電氣間の相對的速度が一定の値  $v_2c$  に達すると其間の力が零になり、これ以上の速度では反對の符號をもつやうになる事であつて、かやうな限界速度が實際に存するかどうか、又存するとすれば其物理的意味が何であるかは問題であつた。ここに  $c$  なる量は謂はゆる靜電單位及び電磁單位で測つた電流の強さの比をあらはすものであつて、之はガウス

及びウェーベルによつて、之等の兩絕對單位が決定せられた際に導き入れられたものであるが、その後1856年にウェーベルはコールラウシュ (Kohlrausch, 1809-1858) と共に之を實驗的に測定し、光速  $(3 \times 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}})$  と甚だ近似せる値を得たのであつた。

ウェーベルの理論では電流のなかに正負二種の電氣が互ひに等しい速度で反對方向に運動してゐることを假定したが、一般的には兩種の電氣の速度を異なつたものとなし、適當に之等を決定する方がよい。若し一方の速度を零とするならば、フランクリンの假説のやうに一種の電氣だけが動くこと云ふ場合をも之に包括せしめることができる。又電氣間の力が相對的速度にのみ關すると云ふのは、電流と靜電氣との間にかやうな力を見ることのない限り、實驗的事實に反する。それ故クラウジウス (Clausius, 1822-1888) は1876年に電氣間の力が絕對速度によつて與へられるとして同様の理論を立てた。此結果は電磁氣學の歴史に於て甚だ注目せらるべきものであつて特にここに假定せられた絕對速度なるものが物理學的に何を意味するかについては後に極めて重要な問題として論議せられるやうになつた事柄であつた。

**9. ニュートン力學の完成** ニュートンに次ぐ世紀に於て力學理論が之に必要な數學と共に相待つて著しく發達したことは既に述べたが、更に第19世紀に入つてそれは數學者及び數理的物理學者の手によつて殆んど完成の域に達し、種々の特殊の問題への應用をも自由に見るに至つた。純粹の力學現象に關する限りに於てはニュートンの法則は全く公理化せられ、

我々は只之を種々の場合に適用してその數學的歸結を引き出すことのみが力學の問題として残されてゐる觀があつた。ここに數理的物理學なるものの最も自由に展開された独自の領域が存在したのである。

第18世紀に於てフランスが數學活動の中心を形作つたに反して第19世紀に及んではそれが全くドイツに移動した。當時の第一流の數學者として我々はゲッティンゲンに於けるガウス及びリーマン(Riemann, 1826-1866), ケーニッヒスベルグに於けるヤコービ(Jacobi, 1804-1851), ベルリンに於けるワイエルストラウス(Weierstraus, 1815-1897)等を擧げることができる。其他の國々ではフランスのコーシー(Cauchy, 1789-1857), ガロア(Galois, 1811-1832), エルミート(Hermite, 1822-1901), ルジャンドル(Legendre, 1757-1833), ポアンカレ(Poincaré, 1854-1912), イギリスのケーレー(Cayley, 1821-1895), シルヴェスター(Sylvester, 1814-1897), スウェーデンのアーベル(Abel, 1802-1829), ロシアのロバチェフスキー(Lobatchewski, 1793-1856)の如き人人の名が知られてゐる。

力學に於ては既に述べたポテンチアル論の發展は最も注目すべきものであり、多くの問題の解決に對して有力なる手段を供給した。之が電氣學其他の諸問題にも應用せられたことは能く知られる通りである。種々の微分方程式を満足する函數の發見は又力學を進展せしめた主要素をなした。球面函數、圓錐函數、ベッセル(Bessel) 函數、ルジャンドル函數、ハンケル(Hankel) 函數、楕圓諸函數の如き多數のものがある。

力學原理の異なつた形式としてはガウスの最小束縛の原理(1829), ハミルトン(Hemilton, 1805-1877)の最小作用の原理及び正準運動方程式、ハミルトン-ヤコービの偏微分方程式(1866)等多くのものが展開せられ、それぞれの問題への適用を便ならしめた。

ニュートン力學はかやうにして殆んどあらゆる發達を遂げたが、その最後に於てハインリッヒ・ヘルツ(Heinrich Hertz, 1857-1894)が之を形式上全く新らしく立て直さうとしたことを我々は見遁がすわけにゆかない。彼は即ち力學から力の概念を全く取り去つてしまつて單に質量とその運動とによつてすべての力學的現象を云ひあらはさうとした。且つその敘述の最初に謂はゆる最直線軌道の原理(Prinzip der geradesten Bahn)なるものを公理的に假定し、之からすべての法則を演繹しようとしたのであつた。彼のかやうな試みは確かに一つの素晴らしい企圖であつたけれども、實在の質量の外に隱在的質量(verborgene Massen)の如きものを假定せねばならなかつたやうな點に於て認識論上多少の困難を持ち來さねばならなかつたし、この方法を徹底せしめることに十分成功しないで終つた。この原因は種々あるであらうが、恐らく力學に於ける遠隔作用の概念が純粹の近接作用によつて置き換へられなかつたことに其主要なる理由を歸し得るであらう。

**10. 熱と仕事との關係及びエネルギー原理** ラヴォアジエの研究によつて熱がもはや重さを有する物質でないことが明らかにせられた後に、人々は電氣と同様に熱を重さのな



い一種の仮想流体として考へるやうに傾いた。物体内に於ける熱の傳導に関しては1822年にフーリエ(Fourier, 1768-1830)がその有名な數學的理論を完成した。熱が物質でないと云ふもう一つの確實な證據は物體の摩擦によつて熱が殆んど無限に生ずると云ふ事實であるが、之は既に1798年にラムフォード伯(Count Rumford, 1753-1914)によつて始めて實驗せられた。彼はドイツ・ミュンヘンの造兵廠に於て大砲の穿孔作業に際し多くの熱の發生せられるのを見て、水を充たした箱の中で砲銅の圓筒を廻轉し、鑽孔器の摩擦によつて生じた熱が2時間半の後に水を沸騰せしめることを實驗した。彼は之によつて熱を運動と解するやうになつた。同じ年にサー・ハンフリー・デーヴィーは時計仕掛で真空内に於て2箇の氷塊を摩擦して熱を發生し、華氏29度の溫度に於て氷の溶けることを實驗した。

之等の實驗は機械的の仕事によつて熱の發生することを示したが、逆に熱の移動によつて仕事をなさしめることのできるのは當時既に蒸氣機關の如き装置によつて知られてゐた。又サディ・カルノー(Sadi Carnot, 1796-1832)は金屬の棒を交互に熱したり冷したりすることにより伸縮を生ぜしめ、その兩端に結び付けられた物體を動かすことのできる事實を例證して、一般に熱と仕事との間に循環過程の起り得る場合の關係を論じ、熱の全部は仕事に變へることにはできないがその一部分については常に可能であることを示した。この事實は後に數學的にクラウジウスによつて論ぜられ(1850)、謂はゆる熱力學の第二法則として立てられたが、ウィリアム・タムソン(William Thom-

son, 1824-1907)は1851年に之を用ゐて理論的に溫度の絶對零度の存在を證明し、絶對溫度なる概念を導入した。

機械的仕事と熱との間の量的關係については、1842年にロバート・マイエル(Robert Mayer, 1814-1878)が之を理論的に考究し、活力即ち力學的エネルギーが外見的に失はれる處に必ず熱の一定量が發生しなければならないことを論じ、エネルギーと熱との同等を主張した。一方でジュール(Joule, 1818-1889)は一定量の水を溫度1°だけ高めるために費されねばならない機械的仕事の量、即ち熱の機械的當量の精密なる測定に従事し、摩擦による外に電流による熱についても實驗し、1844年その結果を公けにした。之等の研究に基づいて1847年ドイツのヘルムホルツ(Helmholtz, 1821-1894)はベルリンの物理學會において有名な論文“力の恆存について”を發表するに至つた。ここに力と稱せられたものは今日我々の名づけるエネルギーに外ならないのであつて、彼はそれの種々の變化を論じ、依つて“自然全體に於て働かし得る力の量は不變であり、そして増すことも減することもできない”ことを結論した。熱は完全にエネルギーの一種として解すべきものであることが之によつて確立された。

この時以來エネルギーなる概念は物理學に於て甚だ重要なものとなつた。力學に於ける質量恆存の原理は當時既に明らかに知られてゐたし、そして之によつて物質の實在と不滅とが考へられてゐたが、今はそれと同様に宇宙に於けるエネルギーの實在と不滅とが同様の意味に於て語られるやうになつた。

そして物質に對すると同様に、エネルギーに對しても亦實體の概念を歸するやうにさへなつた。

エネルギー恆存の原理によつて宇宙全體に於けるエネルギーの總量は常に一定に保たれるけれども、併し熱力學の第二法則は我々に有用なエネルギーが漸次減少して最後にはもはや我々が何等の仕事をも得られない熱平衡の状態にまで導かれることを示すのである。クラウジウスはこの法則をエントロピーなる一種の量の増大によつて數學的に云ひあらはしたが、ウィリアム・トムソンは之をエネルギーの散佚として云ひあらはし、宇宙は之がために遂に何等の現象をも變化をも生じない死滅の状態に到達すべきことを示した。

宇宙の最後を豫想する處の斯種の論述に於ては、たとへその根據が物理的現象に關する法則から得られたものであつても、既にそれを超越してすべての自然現象に對して適用せられるかの如くに走ることが寧ろその豫想を力強からしめるために必要であるやうに見える。人々は之等によつてエネルギー原理に對して益々根本的の意味を歸しようとした。そして自然に於ける一切の事實を單に之によつて規定せしめようとして、謂はゆるエネルギー論 (Energetik) の如きものが主張せられた。近代のドイツの化學者オストワルド (Ostwald, 1853-) 等はその熱心な主張者として知られてゐた。

**11. 原子論及び非可逆的現象の本質** 物質が原子的構成を有することはギリシヤのデモクリトス等によつて假定せられて以來、屢々科學者の頭腦に想像された。ニュートンも

亦物質を“神がそれを造つた目的に最もよく適するやうな大いさと形とを有し、性質を異にした立體的の重さある、硬い不透性の可動の粒子”から成ると考へたのであつた。併しかやうな原子的構成を證據立てる事實は第18世紀の末に於て化學的知識が漸く豊富になる迄はどこにもまだ確かに見出だし得なかつた。第19世紀の初頭に於てイギリスの化學者ドルトン (Dalton, 1766-1844) は種々の化合物を合成する元素の重さの割合を研究し、之を原子論的に解釋して始めて化合物の1分子が元素の原子の結合によつて成る事實を證明することができた。彼は最も軽い氣體としての水素を單位として當時知られた酸素、窒素、炭素等の相對的原子量を決定し、倍數比例の法則を確立した。ドルトンの研究は1803年以後數年に亙つて發表されたが、次いでゲー・リュサック (Gay-Lussac, 1778-1850) は1808年に氣體の化合の場合の容積關係を見出だし、アヴォガドロ (Avogadro, 1776-1856) は1811年に一定の溫度及び壓力の下で、氣體の同じ容積中には常に同じ數の分子が含まれることを結論した。

かやうにして一度ドルトンによつて導き入れられた原子及び分子の概念は爾後化學に於ては殆んど缺くべからざるものとして認められ、その上に今日の化學の體系が形作られて來たのであつたが、其間に1869年ロシアの化學者メンデレーフ (Mendelejeff, 1834-1907) によつて見出だされた元素の週期性は最も重要な事實として擧げられねばならない。

一方で物質内に於ける分子の運動を以て熱の現象を解釋し

ようとする理論的考察が漸次に發展し、特に氣體の場合に於ては分子の運動が殆んど自由に行はれることが考へられ、分子を完全に弾性的な球體であると假定してそれらの相互の衝突のために各の分子の運動がいかに制約せられるかを論じ、之によつて氣體の諸性質を説明しようとする謂はゆる氣體論がクレーニッヒ (Krönig, 1822-1879)、ジュール、クラウジウス及びマクスウェル (Maxwell, 1831-1879) 等によつて漸次進められた。マクスウェルによつては分子間に於ける速度分布の法則が完全に見出だされ、之によつて熱平衡の場合に一定の速度を有する分子の数が決定せられた。熱は之等の分子の運動エネルギーの平均値によつてあらはされたのである。

熱の現象はかくて全く分子論的に説明することができたけれども、ここに尙ほ計らずも重大な困難が潜んでゐた。それは、熱力學の第二法則によつて熱現象は常にエントロピーの増大する方向にのみ起り、その逆の變化を示さない點で非可逆的現象であるのに反し、分子の運動は力學の法則に従ふ限りにおいて全く可逆的現象でなければならないと云ふことに存してゐた。可逆的變化のみを行ふ分子の體系に於て何故に非可逆的な熱現象があらはれるかは全く理解に苦しむ問題でなければならなかつたが、之が解決は1866年に至りボルツマン (Boltzmann, 1844-1906) によつて遂に與へられた。彼に従へば、エントロピーの小なる状態を確度論に於て分子間に於ける速度分布の確度がより小さい状態に相當し、従つて之がより大なる状態に向つて轉移することが常に確からしいこととなる。熱力學

の第二法則は即ち之を云ひあらはすものであるから、それは絶対に必然的ではないが蓋然的に成立すると云ふのであつた。物體の分子の数は實際に於て非常に大きいから我々はこの法則からの外れを見ることは殆んどできないけれども、若し限られた少數の分子間に起る現象を見るならば、この法則が必らずしも成り立たないことは、現にブラウン運動として知られる現象に於て經驗せられることはクリスチアン・ウィーナー (Christian Wiener, 1826-1896) によつて指摘せられた。尙ほブラウン運動の厳格な理論は1905年にアインシュタイン (Einstein, 1879-) 及びスモルコフスキー (Smoluchowski, 1872-1917) によつて與へられ、實驗的にはスウェドベルヒ (Svedberg)、ペラン (Perin)、シュミット (Schmid) 等によつて精密に研究せられた。

ボルツマンは上述の見解に立つて、熱力學第二法則から歸結せられた宇宙の死滅は必らずしもその唯一の最後の状態ではなくて、却つて完全な熱平衡が起つた後に於ても分子運動の偶然性のために再び之から外れる状態のあらはれ得る確度は決して零でないことを論じ、宇宙創造の可能性をここに認めようとした。尙ほ分子の體系の運動を論ずる統計力學は理論的にアメリカのギブス (Gibbs, 1839-1903) によつて大いに進展させられた。

**12. 光の波動論** 光に関してはホイヘンス及びニュートンの理論が提出せられてから殆んど1世紀の間著しい進歩を見なかつた。一般的にはより多くニュートンの放射説が行はれてゐたやうに見えたが、干渉現象等の説明に於てニュートン

自身も既に光線に沿うて或る性質が週期的に同じ距離を隔てて繰返すことを假定し、且つこの距離は靑色に於て最も短く、赤色に於て最も長いことを認めてゐた。1800年に至つてトーマス・ヤング (Thomas Young, 1773-1829) は之等の事實がホイヘンスの波動説によつて遙かによく理解せられることを示し特に重なるの原理 (Principle of superposition) を導き入れてニュートンの色の環やその他の干渉現象を完全に説明した。次いでフレネル (Fresnel, 1788-1827) は 1815年に障害物に沿ふ光波の進行を數學的に論じ、影が直線的に生ずるのは波長の非常に短いためであることを明らかにし、ここに謂はゆる廻折現象の理論をも展開した。

光の波動性はかくて當時一般に信ぜられるやうになつたが、この波動は空氣に於ける音波と同様に、エーテルの弾性によつて生ずる縦波として考へられてゐた。然るにフレネルがアラゴ (Arago, 1786-1853) と共に結晶の複屈折によつて生ずる常光線及び異常光線の干渉について實驗せる間に、意外にもこの兩光線が同一の光線から分れたにも拘はらず或る事情の下には全く何等の干渉をも起さないことを見出だした。この實驗の結果からヤングは 1817年に、光は縦波でなくて横波でなければならないことを結論したのであつた。そしてこれによつて稍以前に (1808) マルス (Malus, 1775-1812) が反射及び屈折光線に於て見出だし、之を偏り (Polarization) と名づけたところの性質をも明瞭に説明することができるやうになつた。

之等に対する數學的理論はすべてフレネルによつて大成さ

れた。そして光の波動論は當時知られた一切の現象を殆んど完全に説明することができるやうに見えたが、尙ほ重大なる困難がこの理論に對してあらはれねばならなかつた。なぜなら、エーテルが氣體の性質を有するとするならば、弾性體理論によつてそのなかには單に縦波しか存在し得なかつたからである。縦波と共に横波の存在が可能であるためにはエーテルを無理にも固體であると考へねばならなかつたし、更に縦波が全くあらはれないためには、エーテルは完全に不可縮でなければならなかつた。

エーテルのかやうな奇妙な性質については、ウィリアム・タムソンは之を普通の物體と比較することの非なる理由を説いた。エーテルは寧ろ普通の物體から外れた極限的の性質をもつことは當然であり、且つ光の振動の如き極めて速い振動に對してはどんな物質も固體の如き性質を呈するの考へ得られないことではないと論じた。併しそれにも拘はらずエーテルの問題は尙ほ何等かの謎を藏して人々の頭腦に安定し得なかつたやうに見えた。

それは他方で更に物體の運動がエーテルに及ぼす影響について困難な問題が起つてゐたからでもあつた。既に久しい以前、即ち 1727年にブラッドリー (Bradley, 1692-1762) が恆星の位置を觀測して見出だした光の錯行現象や、1842年にドップレル (Doppler, 1803-1853) が見出だした、光源と觀測者との相對的運動による色の變化の如き現象に於ては觀測者の運動にも拘はらずその周圍に於けるエーテルが靜止してゐることを示すや

うに見える。併し實際に運動してゐる流體の内部に存在するエーテルは流體と共に運ばれるか否かを知るために、1851年にフイゾー (Fizeau, 1819-1896) は流水中の光速度を測る有名な實驗を行つたところが驚くべきことにはこの場合に光速度は多少水の流れによつて影響されるけれども、エーテルが水と共に動くと考えた結果とは異なることを見出だした。この事實は既にフレネルのエーテル理論によつて次のやうに説明せられてゐた。即ちエーテルは真空中に於て一定の密度を有するが、物體内部にはこの外に或る密度のエーテルが加はつてゐるのであつて、後の部分のエーテルだけが物體と共に運ばれるのである。之に反してストークス (Stokes, 1819-1903) はエーテルを可縮性の流體として考へて理論を立てたが、却つて多くの困難を免がれなかつた。斯くして第19世紀の後半に於てはエーテルは遂に解くことのできない謎として残つてゐた。

**13. 近接作用及び力の場の理論** 弾性媒質内に於て力が傳はる場合には先づ物質の一部が或る變形を起し、之が隣れる部分に對して弾性的に影響を及ぼし、漸次かやうに近接的に作用して遠方に達することは明らかである。之に反して單に空間内にあらはれる力、即ちニュートンの萬有引力やクーロムの電氣力及び磁氣力や、アンペールの電氣力學的作用の如きは何れも遠隔作用として假定されてゐた。即ち互に力を及ぼす二つの物體が空間的に相隔たつてゐるに拘はらず一方が他に及ぼす作用は少しも時間を要することなく瞬時的に到達すると考へられてゐた。かやうな假定は二つの物體が共に靜止

してゐる限りは特にその正否を論ずる必要がないために、原始的にはその儘認められて來たのであるが、少しく作用傳達の機構にまで立ち入つて考へようとするならば、遠隔作用なるものの可能性に就て疑を抱き始めることが寧ろ當然である。それ故に電氣の間に働く一般的の力の法則についてウェーベルが一つの理論を立てた當時に於て既にガウスは遠隔作用の代りに近接的に傳達する作用を考へ、之を數學的に云ひあらはさうとしたが、十分の成功を見ずに終つた。その後1858年にドイツの數學者リーマンは電氣間のポテンチアルが一定の速度  $c$  を以て傳はると假定し、之を云ひあらはす微分方程式を形作り、依つて之が實驗的事實と一致するがためには、 $c$  は電流の靜電單位及び電磁單位の比として知られてゐる量に等しくなければならぬことを見出だした。次いで1869年にカル・ノイマン (Carl Neumann, 1832-1925) は作用の傳達に關して稍々異なつた假定<sup>(1)</sup> をなして、ウェーベルと一致する結果を得た。併しウ

(1) カル・ノイマンはポテンチアルが一つの電氣から發する場合に、その出發時刻  $t$  に於ける他の電氣  $e'$  の位置を考へ、その距離を  $r$  とすれば、ポテンチアルは常にこの  $r$  に沿うて進むことを假定し、従つて之を  $t$  に於ける電氣の相對的位置及び速度のみの函數となして計算した。之に對してリーマンの假定を對照すると、リーマンの場合にはポテンチアルの進行がその出發より以後の時刻  $t'$  に於て  $e'$  に到達すべきことを既に最初から豫想してゐるかのやうに見えるのであつた。之は一見因果律に矛盾するやうに思はれるけれども、同様の關係は屢々自然法則にあらはれるのであつて、舊來の因果律に對する我々の思想は寧ろ之と一致するやうに改められなければな

エーベルの理論は單に電氣の相對的速度のみを取り入れてゐる點で事實に反することは後にクラウジウスによつて指摘せられた通りであつた。

之等の理論が専らドイツに於て行はれてゐた間に、全く獨立にイギリスに於ては近接作用の理論がファラデーの手によつて發展せられてゐた。彼が電氣及び磁氣の周圍に存在すると考へた力の場なる概念は實に理論的に卓越せる效果を持ち來したのであつた。彼は媒質内部に於て謂はゆる指力線を想像し、之に沿うて電氣若くは磁氣の或る偏極が存在することを假定し、之によつて相隔たつた電氣間の又は磁氣間の力が結果することを説いた。又電流の周圍に於ける磁氣の場に於て同様の特殊状態(彼は之を Electrotonic の状態と名づけた)が存在し、そこに置かれた導體の之に對する關係が變化するに従つて、導體に感應電流が生ずるのであるとなした。

ファラデーのこの理論は、後にマクスウェルが批評した通り、それ以前の人々がすべて囚はれてゐた物體上の電氣とか磁氣とかの假想的對象から眼を移して、彼等が距離の外に何物をも考へなかつたところの空間に現象に對する實際上の對象を見出だしたものであつた。彼は 1838 年に蓄電器の電氣容量が二枚の導體間に物質を挿入することによつて増されることを實驗し、謂はゆる電媒質が電氣現象に關與する事實を確め、恰も彈性媒質内に於けると全く同様の近接作用が電媒質内に起らないのであり(石原純,『自然科學概論』,第九章第一節參照)従つて單にこの點でリーマンの理論を否とするわけにはゆかない。

ことを推論した。

ファラデーは之等の思想を單に言葉を以て云ひあらはしたに過ぎなかつたが、そこに述べられたすべての概念に數量的の定義を與へ、之等を矛盾のない完全な數學的理論に組み立てるためには、マクスウェルの手を待たねばならなかつたのであつて、後者は實に今日の電氣學理論を大成したところの最大の功勞者である。彼は 1855 年の論文に於て始めてファラデーの指力線に關する思考を數學的に云ひあらはし、爾後引續いてその理論を發展せしめたのであつた。彼が二つの電氣又は磁氣の間に作用する力を完全に兩者を隔てる空間に於ける張力即ちマクスウェルのストレスと稱せられるものによつて數學的にあらはし得たことは、媒質の近接作用に對する最も直接の表現であつた。

マクスウェルがファラデーの理論に補足した最も重要な點は變位電流の概念を導き入れたことである。導體内に流れる電流はこの變位電流の補足によつて始めて常に閉回路を完成することができるのであり、そして兩者が相合して始めて周圍の磁場が決定せられるのであつた。この關係と、他方にファラデーの感應電流の法則を云ひあらはしたものが相待つて、マクスウェルの電磁場理論の根本方程式が形作られてゐる。マクスウェルは之を用ひて始めて電磁場内に波動の進行することのできるのを論じ、その速度が丁度眞にリーマンの見出だした値  $c$  と一致することを導き出した。この  $c$  なる値は一方で眞空中に於ける光の速度の觀測値と甚だよく近似し、且つここ

で理論的に導き出された電磁波は光と同じく純粹に横波であると云ふ結果から、マクスウェルは遂に光を以て電磁波の一種に外ならないとして、謂はゆる光の電磁論を稱へるに至つた。

マクスウェルがこの理論を公けにしたのは1873年であつたが、同年ボルツマンはこの理論からの一つに歸結とせられた物質の電媒常數と光に對する屈折率との關係を種々の氣體に就て實驗し、大體に於て成立することを確め、尙ほヘルツは1888年に適當の電氣的裝置によつて實際に電磁波を作ることに成功し、且つその性質を検して全く理論の正しいことを證明した。この電磁波が後に無線電信及び電話として多大の實用に供せられるやうになつたのは周知の通りである。

マクスウェルの理論はその後ヘルツやヘヴィサイド (Heaviside, 1850-1925) やポインティング (Poynting, 1852-1914) 等によつて尙ほ形式的に新しい概念を補足せられて整序せられ、今日一般に知られる電磁理論の形式を得るに至つた。只運動物體に關してはそこに再び論議を集めたことは後に記す通りである。

**14. 分光學及び輻射理論** ニュートンがプリズムによつて日光を分析することによつて分光學の基礎を置いてから、久しい間この方面の研究はその儘に取り残されて居たが、第19世紀に入つてから分光器の發達と共に著しい進歩をなすやうになつた<sup>(1)</sup>。1802年にイギリスのウォラストン (Wollaston,

<sup>(1)</sup> 1810年にゲーテ (Goethe) はその有名な著「色彩論」に於てニュートンに對する激烈な反駁を行つたけれども、物理學的には多くの

.766-1828) は始めて日光中に暗線の存することを見出だしたが、1814年に至りフラウンホーフェル (Fraunhofer, 1787-1826) によつてこれが一定の線であることが確定せられた。1859年にキルヒホッフ (Kirchhoff, 1824-1887) 及びブンゼン (Bunsen, 1811-1899) は種々の物質の色焰のスペクトルを研究し、或る化學的元素はそれに固有な一定の波長のスペクトル線を常にあらはすことを見出だし、尙ほこの元素が色焰中に比較的低温に於て存在するときはその背後から來る十分に強い光から自己に固有なスペクトル線のみを吸収して之を暗線としてあらはさしめることを確めた。之によつて日光に於ける暗線即ちフラウンホーフェル線なるものは太陽面上に存する一定の物質が太陽球體から來る光を吸収してあらはす處のものであることが知られ、爾後之等のスペクトル線の研究によつて太陽に存在する物質元素を地球上のそれらと比較することができるやうになつた。そして1862年にはハッギンス (Huggins, 1824-1910) によつて既に多くの星のスペクトル線が研究せられ、その後引續いて天體物理學の新らしい部門が發展するに至つた。

日光のスペクトルに於ける熱の分布についてはハーシェル (Herschel, 1738-1822) が1800年に研究し、謂はゆる赤外線を發見し、之が物體から生ずる輻射熱と同一であることを示した。之に次いで間もなくリッター (Ritter, 1776-1810) は紫外線を發見し、スペクトルの領域が連続的に可視光線の兩側に擴がること

が知られた。  
意味を残さなかつた。

又各の元素が発する固有のスペクトル線の波長の間には一定の関係の存することが先づ最も簡単な水素スペクトルの場合にバルマー (Balmer, 1825-1898) によつて1885年に見出だされ、爾後多くの元素に於て同様に種々の系列を形作るスペクトル線が観測せられるに至つた。アルカリ金属に於ける系列の公式は1890年にカイザー (Kayser, 1853-) 及びルンゲ (Runge, 1856-) によつて定められ、次いで1895年にリドベルヒ (Rydberg, 1854-1919) は一般的の公式を作つた。

輻射熱に関してはキルヒホッフが先づ1859年に一定の温度に於ける一定の波長の熱線に對しては輻射能と吸収能との比がすべての物體について同一であるべきことを論じ、すべての輻射熱を吸収するやうな物體を完全の黒體と名づけ、依つてその輻射能は單に温度にのみ關することを示した。次いでこの輻射能は絶對温度の4乗に比例することは、1879年に至りステファン (Stefan, 1835-1893) によつて實驗的に見出だされ、又ボルツマンにより熱力學的考察を之に應用して理論的に證明された。

黒體の輻射を箇々の波長に分解して考へるときに、各の波長に對し、即ちスペクトルの各部分に對しエネルギーがいかに分布されるかと云ふ問題がその後屢々論ぜられたが、1896年にウィーン (Wien, 1864-1928) が理論的に導き出した法則は實驗上低温度の輻射については成り立つけれども、高温度に對しては之と全く異なつた見地からレーリー (Rayleigh, 1842-1919) によつて1900年に得られた法則に従ふことが確められた。前者

は熱力學上の考察に基づき、之に反して後者は氣體論に於ける統計力學上の考察を用ひたものであつた。之等兩者の結果が何故に相容れないかについては當時理論上の困難な問題として見做され種々の論議を招致した。ジーンズ (Jeans, 1877-) の如きは飽くまでもレーリーの法則の正當なることを主張したが、不幸にしてルンマー (Lummer, 1860-1925) 及びプリングスハイム (Pringsheim, 1859-1917) の行つた精密な實驗の結果は遂に之と一致しないで、1900年に別に一つの新しい大膽な假定の下にプランク (Planck, 1858-) が導き出した處の法則に勝利を興へた。この假定こそ即ちエネルギーを不可分のものとする謂はゆる量子の假説であつて、之を中心としてやがて第20世紀の初に於て理論の混亂期があらはれたのであつた。

**15. 理論物理學と認識論** 第19世紀に於て理論物理學は大いに發展して物理學及び之に關聯する科學分科の中心となり、指導者となるに至つた。それ以前に主として行はれた數理物理學の方法は現象を數理的に記述して法則を求め、且つ種々の與へられた條件の下に數學的解答を導き出して實際の問題に適用することを目的としてゐた。流體力學、彈性力學やフーリエの法則に基づく熱傳導の問題や、靜電氣分布の問題の如き何れも數理物理學者の手によつて取り扱はれて行つた。之に反して理論物理學はより根本的の問題を取り扱つた。最初はやはり種々の假説によつて現象の記述を目的とする純粹の現象論的方法によるより外はなかつたが、例へば熱や電氣を流體と同様に考へてその傳導を記述する如きに止まつてゐたが、漸



く之等に對する多くの事實が知られ、之等をすべて説明することのできるためには、尙ほ進んで現象の本質を追究せずにはゐられなくなつた。物體の熱を分子の運動として解し、之によつて熱現象がいかん説明せられるかを論じ、光を彈性波動として解してその諸現象を導き出し、又磁石の作用を分子電流によつて説明し、更に電氣及び磁氣現象を媒質の張力状態によつてあらはし、進んでは光を電磁場の波動と同一であるとする如きは、物理学に於ける實に顯著な理論である。之等の理論によつて外見上全く異なる如く思はれてゐた諸現象の間に漸次本質的關係の存することが見出だされたのは、既に述べた處によつて知られる。そして之と同時に物理学の理論が實在の認識に干與すべき十分の理由が見られるであらう。

何が實在であるかと云ふ問題は久しく哲學に於て論ぜられて來た處のものである。自然現象特に物理現象に關する限りに於て我々は先づ感覺を働かしてのみ之等を知覺し意識することができる。それ故に感覺のみが我々の疑ふことのできなない實在であつて、感覺的事實の上に見出だされる物理學的法則は感覺的現象間の關係を云ひあらはしたものに外ならないかやうな見解は専らドイツの實證論的哲學者エルンスト・マッハ (Ernst Mach, 1838-1916) によつて強調された。之によれば物理的法則は單に現象論的に事實を記述することができさへすればそれで足りるのであつた。多くの可能な假説や理論のうちで我々はその何れを採用するかは、それが最も簡單であると云ふやうな思惟經濟的の判斷によるのであるとマッハは説

いた。第16世紀に於けるフランス・ベーコンの現實主義の哲學から由來する思想によれば、科學の目的は事實の原因を探つて之を説明するにあるとせられ、爾後多くの科學者たちもさう考へてゐたが、併し原因と稱せられる處のものは事實の背後に存在する實在ではなくて、單に複雑な事實的關係に於てあらはれる處のものを簡單な概念によつて置き換へたものに過ぎない事は、既にキルヒホッフによつて論ぜられ、マッハも亦上述の見解から之を主張し、科學の目的は記述にあつて、説明ではないとした。此記述主義や現象論的方法は第19世紀の多くの物理學者によつて承認せられ、其結果として出來るだけ無用の假説を避けるための努力が費された。併し乍ら之によつて或る場合に於ては直接に我々の感覺に觸れない對象を否定しようとする人々もあらはれた。オストワルドの如きは、エネルギー論を認めて之によつてすべての現象を云ひあらはすものとなしたが、之に反して久しく原子や分子を單なる假說的存在と見做し、分子運動を論ずる氣體論をさへも正常な理論として肯定するに躊躇した。

一方マッハの感覺論は我々の感覺そのものが必ずしも常に客觀的であり得ないのに反し、我々が科學に於て求める處のものが純粹に客觀的のものでなければならぬと云ふ點から反對論を招いた。プランクは物理學的對象としての諸概念が古來漸次に感覺を離れて純粹に客觀的に對象間の關係即ち法則によつてのみ定義せられるやうに發達して來た事實を指摘し、我々の科學の目的は之等の客觀的、非人間的な對象關係の

渾然たる體系としての世界形像 (Weltbild) を構成するにあるとなし、且つ我々の物理学の歴史が示すところから推測してかやうな世界形像として可能なものは最後に恐らく唯一つしか存在しないと論じて、マッハの思惟經濟説に反対した。この見地に立てばかやうな単一的な世界形像を構成すべき諸概念が我々の認識し得る唯一の實在でなければならないのである。そしてすべての假説や理論はこの認識に到達するための階段に外ならない。

この世界形像として古く考へられてゐたものは、デカルツに始まつた力學的自然觀である。之によればすべての物質現象は窮極的に力學の法則によつて支配せられるのであつて、實際に物理学が發展するに當り、その理論はこの方向に進むやうにも思はれた。熱を分子の運動とすることや、光を彈性エーテルの波動とすることなどは勿論さうであり、又マクスウェルが電磁場の法則を求める際にも全く弾性及び流體力學の法則に倣つてその理論を形作つたのであつた。只併しその理論の最後の形に於ては之を電磁場の媒質の力學的機構によつて説明する事が殆んど不可能に陥つた事實からして漸く力學的世界觀に對する疑問が萌さないわけにはゆかなかつた。マクスウェルの光の電磁論が確認せられるに至つてからは、電磁場の媒質は即ち光の媒質たるエーテルと同一者と見做されねばならなくなり、エーテルの彈性的性質に對して既に擧げられた多くの困難と相待つて、もはやエーテルを力學的に考へようとする企圖は見棄てられずになかつた。そして之に代つて單にエー

テルを電磁學的に解するやうに傾き、後の電磁的世界觀への過渡を形作つた。

**16. 實驗物理学の進歩** 物理学に於ては實驗が根本的に必要であり、且つ凡ての觀測が出来るだけの精密度をもつて行はなければならないために、種々の精密器械や實驗裝置の進歩と共に之等の實驗及び測定に従事する事が漸く専門的になされるやうになつて來た。第19世紀に入つては物理学上の諸器械の發達も特に著しかつた。力學、熱學、光學、電氣學に互つてそれぞれ重要な實驗や測定が行はれた。異常な高温度や低温度が實現せられ、高度の眞空が作られ、又強大な電壓を起し磁場を作つて、之等の環境の下に物質の諸性質の研究が行はれるやうになつたことも注目すべきである。

第19世紀に於ける顯著な實驗物理學者としては、氣體の研究者としてデー・リュサック、熱學に於てデュロン (Dulong, 1775-1838)、プチー (Petit, 1791-1820)、ルネオー (Regnault, 1810-1878)、ジュール、デュワール (Dewar, 1842-1923) 光學に於て、フラウンホーフェル、アラゴ、フィゾー、フーコー (Foucault, 1819-1868)、ローランド (Rowland, 1848-1901)、電磁氣學に於てゼーベック、エールステッド、ピオー、ファラデー、ホイートストーン (Wheatstone, 1802-1875)、ウィーデマン (Wiedemann, 1829-1898)、コールラウシュ、フェッダーセン (Feddersen, 1832-1918) 等を擧げる事ができる。ジュールの熱の機械的當量の測定 (1843) やフィゾー (1849) 及びフーコー (1854) の光速度測定の如きは精密常數測定として特に有名であつた。

すべての測定単位として絶對的なものを確定することは物理學的に重要な仕事の一つであり、測定精度が進むに従つて特に必要となつた。度量衡に関する単位を世界共通にするための提議は1790年にタレーラン・ペリゴール(Talleyrand-Perigord, 1754-1838)によつてフランスの議會に提出され、1799年メートル法が確定發布されたが、1833年ドイツのガウス及びウェーベルは電氣及び磁氣の単位を定めると共にメートル法を絶對単位として採用する事の適切なるを論じて以來漸次之が一般に用ひられた。1870年から數年に互りばりに於て國際會議が開かれ、1875年始めてメートル條約の調印が行はれて國際原器が確定されるに至つた。更に1908年ロンドンの會議で電氣單位が確定された。そして單位確定を機としてこの他種々の問題に就ても國際共同事業が進められて來た。

**17. 電子の發見及び其理論** 稀薄な氣體内に於ける放電現象は最初ファラデーによつて注目せられたが、1859年に至りブリュッカー(Plücker, 1801-1868)は職工ガイスレル(Geissler)の手によつて作られた真空管を用ひて之を研究し、次いでヒットルフ(Hittorf, 1824-1914)、クルックス(Crookes, 1832-1919)及びゴールドシュタイン(Goldstein, 1850-1931)等の研究によつて陰極から發する放射線の性質が漸次明らかにせられた。1895年に至りベランは陰極線を形作る粒子が陰電氣を有することを確證し、翌年ウィーヘルト(Wiechert, 1861-1928)、J. J. タムソン(J. J. Thomson, 1857-), 及びカウフマン(Kaufmann, 1871-)はその質量の極めて小さいことを見出だし、これを物質原子を構

成する共通要素として考へられた電子として解するにいたつた。

電氣を有する微粒子としては既に電氣分解の場合にあらはれるイオンが知られてゐた。之は最初1806年にグローツス(Grothuss, 1785-1822)によつて假說的に考へられ、1858年にコールラウシュ及びヒットルフによつて確められ、更に1887年にアレニウス(Arrhenius, 1859-1927)の解離理論によつて一般に認められたものである。イオンが常に一定の電氣素量の整数倍に等しい電氣量を有すべきことは、ファラデー(1833)の見出だした電氣分解の法則から結果する。そしてこの電氣素量の大體の値はJ. J. タムソン(1898)の帶電霧粒に於ける實驗的測定から知られたので、陰極線電子の有する電氣量も亦之に等しいことが假定された。

第19世紀の終末に於ける物理學界は實にこの電子の發見によつて非常に賑はされた。これに伴つて1895年にレンチェン(Röntgen, 1845-1923)によつて有名なレンチェン線即ちX線が發見せられ、翌年にはベックレル(Becquerel, 1852-1908)によつて始めてウラニウムの放射性が見出だされ、更に1898年にはピエール・キュリー(Pierre Curie, 1859-1906)及び其夫人(Marya Curie, 1867-)によつて著しい放射性元素ラヂウムが發見せられ、之に續くラザフォード(E. Rutherford, 1871-)の研究によつて之等の放射性元素が $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ なる三つの放射線を發し、 $\beta$ 線は陰極線電子から成ることが知られたからである。又之と同時に1896年にゼーマン(Zeeman, 1865-)が見出だした謂はゆ

るゼーマン効果、即ち光のスペクトル線が磁場によつて分岐することは、ローレンツ (Lorentz, 1853-1928) によつて物質原子内に準弾性的に束縛せられた電子の振動を考へることにより之を説明することができ、且つ分岐線の偏りの有様及び分岐の大きさから電子が実際に陰電氣を有し又陰極線に於けると同じ質量を有することを證明した。

之等の事實によつて物質原子の構成要素としての電子が一般に確認せられ、之に對する理論を形作ることが重要な問題として見做された。この電子論に對して最も多く貢獻したのはローレンツであつて、1895年以後屢々之を論じた。原子内部に於ける束縛電子の假定によつて物質の電氣偏極や光の分散を説明し、圓形に運動する電子の假定によつて磁性を説明し、又金屬内部に於て原子間を自由に運動する電子によつてその電氣及び熱傳導を説明した。後に尙ほ磁性の理論に對してはランジュヴァン (Langevin, 1872-) が自由電子の理論に對してはドルーデ (Drude, 1863-1906) が之を發展させた。

電子の運動の理論に關しては、陰極線電子の存在がはじめて1879年にクルックスによつて示された後に、一般の電氣的微粒子について1881年にJ・J・タムソンによつて論ぜられ、それが電氣及び磁氣の場を運ぶために一種の惰性を示すこと、丁度電流の自己感應現象と同じであることが明らかにせられた。彼は之を電磁的質量と名づけたが、マクスウェルの電磁場理論に基づいて精確に之を計算すると、この質量は一定の電子に對して決して一定でなく速度と共に増大するのであつた。1902年に

アブラハム (Abraham, 1875-1922) は電子を球形の剛體と假定して、電磁的質量が速度にいかに関するかを計算し、それが運動の方向に於けると、之に垂直なる方向に於けると値を異にすることを見出だした。同年カウフマンが陰極線電場及び磁場に於て屈曲せしめて質量を測定したときに、實際に種々の速度に對してアブラハムの理論と能く一致する結果を得たことによつて、アブラハムは電子の質量が純粹に電磁的のものであつて、從來力學に於て假定せられてゐたやうな一定の質量は之に歸せられないことを強調し、電子がすべての物質の構成要素たる以上我々は物質を全く電磁的にのみ解釋しなければならないと論じ、依つて古來の力學的世界觀に代るに電磁的世界觀の成立すべきを説いた。かくて第20世紀の初頭に於て電子論は勝利の榮冠を以て全物理學を風靡するの觀があつた。

**18. 相對性理論とニュートン物理學の變革** 第19世紀の後半に物體の運動によつて光を傳へるエーテルがいかに関影響されるかが問題となり、エーテルの性質について喧ましく論ぜられたが、マクスウェルの光の電磁論が出てからは同じエーテルをして電磁場の媒質たらしめなければならなくなつたので、もはや之を彈性體として見做すことの到底不可能なることが悟られた。併しその上に於ても尙ほエーテルが物體と共に運ばれるかどうかは依然として問題に残されてゐたのである。なぜなら、マクスウェルの理論は靜止物體に關する限りに於て形作られ且つ實證せられたに過ぎなかつたからである。

運動物體に對する一般の電氣力學は先づヘルツによつて試

みられた。彼はその際物体と共に運動する観測者に対してマクスウェルの方程式が成立することを假定し、之を静止座標系に轉換した。この事は運動の相對性を主張する限りに於て正しいと考へられたけれども、併しこの際に物体と共に電磁場の媒質としてのエーテルも亦同じ運動をなすことが暗黙の中に含まれてゐる。このヘルツの理論は不幸にして先づ電場に於ける電媒質の運動によつて磁場が生ぜられると云ふレンツェンの實驗(レンツェン電流, 1888)に於て事實と一致しないことがアイヘンワルド(Eichenwald, 1903)によつて示され、又電媒質の磁場に於ける運動については H. A. ウィルソン(H. A. Wilson, 1904)の實驗と齟齬することが見出だされた。

他方で尙ほエーテルの問題を解決すべく、1881年にマイケルソン(Michelson, 1852-1931)によつて地球の運動が光の進行に及ぼす影響が實驗された。彼は太陽の周りの地球の運動の方向並びに之と垂直の方向に一定の距離だけ往復せしめた光を干涉せしめて實驗を行つたが、更に1887年にモーレー(Morley, 1838-1923)と共に繰返した精密の實驗に於て、光速度に對する地球運動の影響の少しもあらはれない事を見出だした。若し我々が空間に静止せるエーテルを假定するならば、この實驗に於て地球の運動の影響が十分に見られねばならない筈であつたのに、事實が之を否定するに至つたことは當時の人々を寧ろ少なからず驚かした。しかもヘルツの電氣力學がやはり事實との一致を缺くことによつて、ここに理論の混迷が惹起されずにはゐなかつた。

1893年に至りフィッツジェラルド(Fitzgerald, 1851-1901)は、静止エーテルの假定の下に物体が運動の方向に短縮するとすればマイケルソンの實驗が説明せられることを提言した。次いで之と獨立にローレンツも同じ思考に到達した。更に1904年に至つてローレンツは地球上に於て測つた光速度が地球の運動の影響を少しも示さないためには、長さの短縮の外に、場處によつて時計の進み方の異なることを考慮に入れねばならないとし、運動観測者に対するかやうな時計の指示を局所時と名づけた。尙ほ又ローレンツは一方で同じく静止エーテルを假定し、電子の理論に基づいて運動物体の電磁場の方程式を導き出したが、その結果はアイヘンワルドやウィルソンの實驗で示された事實を満足させることができた。かくて彼は當時知られたすべての事實の説明には辛うじて成功したやうに見えたけれども、運動観測者が何故に静止観測者とは異なつた長さや時間を用ひて現象を記さねばならなかつたかと云ふ形而上學的疑問には何等答へることができなかつた。

1905年にアインシュタイン(Einstein, 1879-)は相對性理論の最初の論文を發表した。互ひに一様に運動する二つの座標系は物理現象の記述に對して何等の差別をも有しないと假定し(相對性原理)、尙ほマイケルソンの實驗は一様に運動するすべての座標系に於て光速度の値の一定なる事を示すとなし(光速度不變の原理)、之等の前提から空間の長さ及び時間に對するローレンツの轉換式を導き出した。彼によれば、エーテルは最早やどの座標系に對して静止するかを決定する必要がないのであ

つて換言すればエーテルとは各の座標系に於ける観測者が單に周圍の空間に於て電磁場の媒質を考へるときに之に名づける處のものに過ぎないのであり、空間そのもの以外に何等の物質的對象を意味するのではないのであつた。彼は又運動座標系に於てマクスウェルの電磁場方程式を考へ、之をローレンツ轉換式に従つて静止座標系に轉換して同一形式の方程式を得、それを運動物體の電磁場方程式となした。そして之が光及び電磁場に関するすべての實驗の結果を満足することを證明した。

更にローレンツ轉換式を假定した上で、力學の方程式をすべての座標系に於て同一形式に保たせるためにはニュートンの運動法則に多少の變更を加へる必要があつた。即ち力と加速度との比として定義せられた質量は決して一定のものでなく、速度の函數として與へられ、且つ運動の方向と之に垂直なる方向とでその値を異にすること、丁度アブラハムの電磁的質量と同様である。それ故ここではカウフマンの電子質量に對する實驗が速度によるその變化を示したことは、必らずしも電子の質量が電磁的であるがためではなくて、却つて一般的に相對性原理に従ふがためである。又この場合にアインシュタインは物體の静止エネルギーが静止質量に比例することを導き出し、依つてエネルギー並びに質量恆存の原理が本質的に同一なることを結論した。質量と速度との關係については陰極線やその他高速度で運動する電子に於てカウフマン(1906)、ブッヘル(Bucherer, 1907)、ベストルマイヤー(Bestelmayer, 1908)、フ

ブカ(Hupka, 1910)、ノイマン(G. Neumann, 1914)等の實驗が行はれ、大體に於てアインシュタインの式の成立することが證明せられた。

アインシュタインはその後相對性理論を等速運動に限らずして任意の運動にまで擴張することに苦心努力した。彼は1905年の理論(特殊相對性)に於てニュートン力學の假定してゐた空間及び時間の轉換關係(ガリレー轉換)を改めて、ローレンツ轉換を以て之に代へたが、そこでは尙ほニュートン力學に於けると同様に力學方程式の成立すべき一群の座標系即ち惰性系なるものを認めねばならなかつた。併し之が他の座標系から差別せらるべき形而上學的根據はやはり何も存在しない。アインシュタインは先づ一樣の重力の場に於ける物理現象は一樣に加速せられた座標系に於けるものと全く等しいことを指摘し(相等原理)、遂に任意の座標系に屬する空間をリーマン幾何學の成立する空間と見做す事によつて、一般に萬有引力の場を空間の歪みとして云ひあらはすことに成功した。彼は數學者グロスマン(Grossmann)の助を借りてこの理論を數學的に完成し、1915年ベルリンのアカデミーに於て之を發表した。當時歐洲大戰が開かれ、ドイツはまさにその戰亂の渦心にあつたために、この論文の擴まり方も遅れてゐたが、太陽の近傍を通過する光線はその強大な萬有引力の場によつて屈曲せられるであらうと云ふ理論からの重大なる豫言は天文學者の注目を惹き、イギリスでは1918年の休戰條約の直後に翌年5月29日の日食の機會を待つて之を検すべき企圖が進められ、觀測隊を遠く

アフリカ及び南米ブラジルに派遣した。そしてこの観測の結果が理論を全く満足せしめることが、1919年11月にロンドンの學會で発表せられるや、一時に天下の視聽を之に集め、絶大なる驚異を湧かしめた。

アインシュタインは1917年に宇宙論を発表して、宇宙空間の大きさがすべての物質の量によつて決定せられる有限のものであることを論じ、又1929年には更に新らしい幾何學を導き入れて萬有引力の外に電磁氣力をも空間に於ける變形によつて云ひあらはし、物質の存在を全く空間及び時間の性質に歸せしめようと企てた。

相對性理論が物理学に持ち來した影響の重大なることは恐らく未曾有のものであつた。空間及び時間や質量や力の如き根本概念を新たにせしめ、多くの法則を變更せしめた點で、それはニュートンによつて基礎づけられた我々の物理学の一大變革でなければならなかつた。従つて當初に於ては物理学上及び哲學上から非常に多くの異論が輩出する有様であつたが、今日に至つてはそれは本質的にはもはや動かすことのできない物理学理論として一般に認められ、アインシュタインの名はニュートンと相並んで物理学史上に印せられるやうになつた。

**19. 量子論及び原子構造論の發展** 第20世紀の物理学が相對性理論によつてその軌道を轉向した間に、之と相並んで重大な意味をあらはしたのは量子論であつた。それはプランクが輻射の法則を實驗の結果と一致せしめるために偶然にも導き入れた處のエネルギー量子の假定に始まつたものであ

る。このエネルギー量子の値は輻射の振動數に比例してゐた。そこで1905年にアインシュタインは光の化學作用や螢光作用や光電効果などがすべて振動數の大なる程強く、全體の光の量には關係しない事實からして、光は決して波動として空間に擴がるものでなく、却つてそのエネルギーは粒子的に他の物體に達し、量子の大いさに従つて作用を呈するものであるとなし、之を光量子の假説と名づけた。この關係はその後尙ほ多くの實驗によつて確められ、特に光電効果に對しては極めて精密に成り立つことが1916年にミリカン(Millikan, 1868-)によつて示された。

1907年にアインシュタインは物體原子の熱振動が輻射と平衡にあるためにはプランクの輻射法則で與へられるエネルギーを有しなければならないと論じ、之によつて原子熱に對する公式を導き出した。溫度が十分に高ければそれはヂューロン及びプラー(1819)が實驗的に見出だした式と一致するが、低溫度に於ては之と著しく外れる。併しネルンスト(Nernst, 1864-)及びその弟子達が液體空氣の溫度に於て實驗した結果はアインシュタインの式の能く成り立つことを證明した。アインシュタインは物體原子の振動數に對して一定の値を假定したが、その後1912年にデバイ(Debye, 1884-)は物體が行ひ得るすべての彈性振動の存在を考慮に入れ、之等の振動數に相當するエネルギーの總和を計算して、一層能く事實と一致する公式を得た。この外にプランクの輻射エネルギーの式を土臺とする考察は金屬の電子論や磁性の理論に應用せられ、同様に低溫度に

於ける性質を或る程度まで説明することができた。

プランクのエネルギー量子は振動数に比例するものであつて、この場合の比例定数  $h$  が普遍的定数として考へられた。プランクはこの定数のディメンションが力學に於ける作用量と同一であることから之を作用量子と名づけ、量子論の本質はその意味を明らかにすることにあるとした。そして簡単な週期的運動即ち圓形若くは楕圓形の軌道上の運動に於て運動量  $p$  と座標の微分  $dq$  との積の積分  $\int pdq$  が  $h$  の整数倍となるべきことを論じた。この關係は1913年にボール(Bohr, 1885-)によつて始めて水素原子内の電子運動へ應用せられてそのスペクトル法則(バルマー系列)の説明に成功してから、俄かに原子構造の理論の發展を見るに至つた。

原子内部に於て一定の軌道を周廻する電子を假定し、之によつて原子の性質を説明しようとする試みは最初1903年にJ.J.タムソンによつてなされた。タムソンは電子の陰電氣を中和すべき陽電氣が原子球體に一樣に配布せられ、電子の軌道は却つて球の内部にあることを假定したが、之に反し我國の長岡半太郎は陽電氣核を中心としその外部に周廻電子を置く原子模型を考へた。1909年に至りラザフォードは實驗的に陽電氣核の極めて微小なることを示して以來、同様の模型が原子に對して確立せられるやうになつた。他方で1912年ラウエ(Laue, 1873-)によつてレンチェン線の干涉が発見せられ、之が光と同じ性質を有することが知られてから、種々の物質の發するレンチェン線のスペクトルの研究がモーズリー(Moseley, 1888-1915)

によつて行はれ、之と共に放射性物質の化學的研究からして原子内部に於ける周廻電子の數を云ひあらはす量としての原子番號なるものが確定せられるに至つた。そして當時水素に於ては只一つの周廻電子の存することが知られてゐたのである。

ボールの原子理論は、それ以前のものの何れも性質的説明を以て終つてゐたのに比べて、數量的に極めて精密にスペクトル線の振動数をあらはすことができた點で、劃時代的のものであつた。特に又水素と同一の模型によつて考へられるヘリウムイオンの發するスペクトルに於ては陽電氣核の質量が4倍となり、從つて核が質量中心の周りに運動する影響さへも明らかにあらはれることがパーシェン(Paschen, 1865-)の精密な測定によつて證明せられたことなど甚だ著しいものであつた。更に1915年にはゾムマーフェルト(Sommerfeld, 1868-)がボールの理論を一般的に擴張し、電子の運動を相對性理論に從つて計算することにより謂はゆるスペクトル線の微細構造なるものを見出だし、之がヘリウムイオンのスペクトルに於て全くパーシェンの觀測と一致することを示し、又1916年にシュワルツシルド(Schwarzschild, 1873-1916)及びエプシュタイン(Epstein, 1883-)は曩に(1913)シュタルク(Stark, 1874-)によつて見出された電場に於けるスペクトル線の分岐即ちシュタルク効果をこの理論に基いて導き出し、水素のスペクトルに於てシュタルクの觀測せる數十本の分岐線をも正しく計算することができたのは、いかに理論の優れてゐるかに對して人々を驚嘆せしめた。



爾後原子理論の發展は年と共に眼醒ましく行はれた。そのなかでポールは原子内部に於て周廻する電子の各には一定の量子数が歸屬すべきことを見出だし、原子が構成せられる場合に最初の電子は先づ最も安定なる軌道、即ち量子数の小なる軌道に配置せられ次に第二、第三等の電子が、若し可能ならば前者と同一の量子数を有し、且つ對稱的に位置する軌道に、然らざれば次に安定なるその外部の軌道に配置せらるべきことを論じ、依つてすべての物質元素の原子に於ける周廻電子の配置を豫想した。1920年にコスター (Coster) 及びヘヴェシー (Hevesy) が見出だした新元素ハフニウムの性質がこれによつて豫言せられた處のものと一致せることはポールの理論に取つて有力な支持であつた。

量子論は之等の多數の事實の味方を得て益々その地歩を固めたに拘はらず、その理論的根據に於ては尙ほ不十分であり特に古典的諸理論との間に存する矛盾をいかに解くべきかについて絶えず悩んだ。即ちポール・ゾムマーフェルドの原子理論に於て根本法則として  $\int pdq$  が  $h$  の整数倍なることを假定するのはよいが、電子が之によつて規定される運動をなす限りに於てエネルギーは一定であるとせられてゐる。併し之に反してマクスウェルの電磁場理論は電子のかやうな曲線運動に伴つて必らずエネルギーの輻射が行はれなければならないことを要求してゐる。たとへ電子に對して或る量子的法則を認めるにしても、人々は尙ほ之がために電磁場理論を棄てるわけにはゆかなかつた。更にアインシュタインの光量子假説に於て

は、光に對して昔時ニュートンが假定したやうな粒子的性質を歸屬せしめてゐるが、之と電磁場理論に従ふ波動傳播とは遂に相容れない要素を含んでゐる。之等の點がいかにそして何時になつて解決せられるであらうかは久しく疑問として殘された。

けれども時期は意外にも比較的早く到達した。1925年にハイゼンベルグ (Heisenberg, 1901-) は原子内部に於ける電子の可能な状態を單に量子数の函数としてマトリクスによつてあらはし、之等のエネルギーや輻射振動数の間に謂はゆる量子力学なるものを發展せしめた。彼の見解に従へば、電子に關する之等の量のみが我々の觀測に可能なものであつて、之に反して電子の軌道やその上の運動過程の如きは原理的に觀測し得ないものであるから、ここに電磁場理論を應用して之をあらはさうとする如きは抑も無意味であり、單に觀測諸量の間關係を事實に基づいて記述すればよいと云ふのである。この量子力学はボルン (Born, 1882-)、ヨルダン (Jordan, 1902-) 及びその他の人々によつて發展せしめられた。

更にこれと同時にもう一つの解決の道が拓かれた。同じく1925年にド・ブローイー (L. de Broglie, 1892-) は物質粒子のエネルギーを光量子のエネルギーと同一視することによつて粒子の運動の代りに或る位相波の傳播を以てあらはすことのできるのを論じ、原子内部に於ける電子はかやうな位相波の干涉によつて一種の定常的状态があらはれ、そこにエネルギーの集中せる状態に外ならないとなし、干涉條件が即ち量子法則を與へ

るものであることを説いた。この理論は1926年にシュレーディンゲル(Schrödinger, 1887-)によつて波動力学として完成された。彼に従へば、光の現象を光線の進行によつて云ひあらはす幾何光学が干渉や廻折の如き現象に對してはもはや波動光学にその位置を譲らねばならなかつたやうに、電子の運動を古典力学及び電磁場理論によつて云ひあらはすことは軌道の彎曲の極めて小さい場合には成り立つが原子内部に於ける周廻運動の如き場合には新しい波動力学を必要とすることを我々は事實によつて認めねばならないのである。實際にこの理論によつてあらはされた電子の波動性はダイモン(Dimon, 1926)によつてヘリウムに於ける電子の散亂の場合に、又デヴィソン(Davisson)及びジャーマー(Germer)によつて結晶に於ける電子波動の干渉として、及びその後多くの同様の實驗によつて確められるに至つた。

量子力学及び波動力学は、之等によつて我々が始めて量子論と古典諸理論との間に路を通ずることができたやうに思はれる點で、量子論の發展に於ける異常なる成果であると云はねばならない。兩者はその出發點に於て全く相異なつてゐるが其結果に於ては互ひに相一致し、不連続量の間に成立つ前者の數學的關係と全く連続的な後者の數式とは又互ひに轉換し得るものであることが後に明らかにせられた。尙ほ兩者に於て取り扱ふ函數の性質が統計的確度を云ひあらはすべきものなることがボルン等によつて示され、原子内部の状態を記述する法則は單に蓋然的にのみ知られるものであることが明らかにせ

られてから、自然法則の必然性即ち古來の因果律に對する論議が盛んに行はれるやうになつた。

附記 本講座に於ける“物理学史”は桑木成雄博士によつて執筆せられる豫定であつたが、同博士の事情により俄かに不可能となつたので、この“物理学史概観”を以て之に代へることとした。従つて極めて短時日の間に筆を執つたので、十分に詳説する暇なく、概観に止めたことに就ては偏に讀者の諒恕を乞ふ(著者)。

昭和六年七月二十五日印刷  
昭和六年七月三十日發行

岩波講座  
物理學及び化學

第二十四回配本 1  
(別項)

編輯者 岩波茂雄  
東京市神田區一橋通町  
印刷者 島連太郎  
東京市神田區美土代町  
印刷所 三秀舎  
東京市神田區美土代町

發行所  
岩波書店  
東京市神田區一橋通町

終