

量子論の成立と従来の発展

マックス・プランク著
石原純訳

1920年7月2日ストックホルムに於けるスウェーデン王立科学アカデミーでなされたノーベル講演)

今日私に負わされた義務、即ち私の論文に関係する公開講演をすると云うことの意味を私が正しく解するとすれば、この寄附の篤志的創立者に対する感謝の念によってこの問題の重要性を深く肝銘している私に取っては、之に最も能く対応させるために、諸氏の前に量子論の成立の歴史を大体に於て述べ、且つ之と関聯して短くこの理論の従来の発展と、物理学に対するその現在の意味とについて一つの形像を描き出すより外はないと私は信ずる。

私は20年前の日に立ち帰って、その当時物理学的作用量子なるものの概念と大いさとが始めて現在する経験事実の範囲から剥ぎ出されるに至ったこと、並びに最後に剥落に達した迄の長い、錯綜した路を想い出すと、今日私にはこの全体の発展が、有名なゲーテの言葉、「努力する限り人は迷う（『ファウスト』）」と云うことに対する一つの新しい説明としてあらわれて来る。そして倦まずに研究する者の努力した全体の精神労作も、彼が屢々眼立つ事実によって、あらゆる彼の十字及び横断旅行の最後には、遂に真実に対して少くとも一步だけは実際に断じて近づくと云う拒むことのできない証拠を捉まない限りは、根本から云って無益に且つ望みなく見えるかも知れない。必要な仮定は、たとえ効果に対する保証にはならなくとも、勿論一定の目的の追跡であって、最初の失敗によって目的の光力は曇らされはしない。

私に取ってはかような目的は久しい以前から輻射熱の標準スペクトルに於けるエネルギー分布に対する疑問の解決であった。グスターフ・キルヒホッフが、任意の輻射及び吸収をする、一様の温度の物体を限界とする洞空内に形作られる熱輻射の性質を研究して、之が物体の性質に無関係であることを示して以来¹⁾ 単

1) G. Kirchhoff 「熱及び光に対する物体の輻射能及び吸収能の関係について」 Gesammelte Abhandlungen. Leipzig, J. A. Barth, 1882, S. 597 (§17).

に温度と波長とに関し、その外物質の特殊な性質には少しも関係しないところの一つの普遍的函数の存在が証せられ、この顕著な函数の発見によって始めて、熱力学の第一の問題でもあり、従って亦全分子物理学のそれでもあるところの、エネルギーと温度との間の関係をより深く透見することができるのであった。之に到達する唯一の方法は、自然にあらわれるあらゆる種類の物体のうちで、輻射能及び吸収能の知られた何等かのものを求め、之と定常的エネルギー交換をなしている熱輻射の性質を計算することであった。そうすれば之はキルヒホッフの法則によって物体の性質には無関係に出て来なければならない筈であった。

この目的に向って特に都合のいい物体として、私にはハインリッヒ・ヘルツの直線振動体なるものが思われた。振動数が与えられた場合のその輻射法則を、ヘルツは少し以前に完全に解いた¹⁾。若し周囲を鏡壁で囲まれた洞空内にかようなヘルツ振動体の多数が存在するならば、電磁波を出し且つ受け取ることによって、音響の発音体並びに共鳴器と同様に、互いにエネルギーを交換し、遂には洞空内に定常的な、キルヒホッフの法則に相応する、謂わゆる黒〔体〕輻射が出来上らねばならなかったであろう。私は当時、今日から見ればよほど素朴的に感じられる期待をもっていた。即ち古典的電気力学の法則は、之を十分に一般的に取り扱い特殊の仮説を遠ざけたならば、期待される過程の本質を理解し、之によって要望せられる目的に到達するに十分であると考えた。それ故に私は先ず直線共鳴体の輻射及び吸収の法則を出来るだけ一般の基礎の上に発展させた。しかも実際には廻り路をしたのであったが、その当時根本に於て既に完成されていたローレンツの電子論を用いさえしたならもっと節約することができた筈であった^{しか}。併し私は電子仮説をまだ本当には信用しなかったから、共鳴体から適當の距離にその周囲に置かれた球面を通して出入するエネルギーを考察する方法を選んだ。その際単に純粹真空に於ける過程だけが考に入るのであるが、それさえ解れば共鳴体のエネルギー変化に対する必要な結論を引き出すことができる。

この研究の長い系列のうちの一つ一つを現在する観測と比較し、特にブェルクネスの減衰測定と比較して試めすことができ、そして実際に証明されたので²⁾、それから一定の固有週期をもった共鳴体のエネルギーと、定常的エネルギー交換の際に周囲の場に於けるエネルギー輻射の相当するスペクトル領域に属するもの

1) H. Hertz, Ann. d. Phys. 36, S 1, 1889.

2) Sitz.-Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. v. 18. Mai 1899, S. 455.

との一般的関係を立てることができた。その際、この関係がまるで共鳴体の性質に関係しないし、特に亦その減衰常数にも関しないと云う注目すべき結果が得られた。——この事情が私には非常に喜ばしい歓迎すべきものであったと云うのは、輻射のエネルギーの代りに共鳴体のエネルギーを置き換えることができ、従って多くの自由度から集合せられた複雑な体系の代りに唯一の自由度の簡単な体系があらわれると云う点で、全体の問題を簡単にさせたからである。

勿論^{もちろん}この結果は本来の問題に着手する準備的の歩みを意味するに過ぎなかつたので、今や問題はその全体の恐ろしい高さで益々険しく持ち上って来た。之を屈服させようとする第一の試みは失敗した。なぜなら、共鳴体から出た輻射は何等かの特有な方法で吸収された輻射と差別され、それによって一つの微分方程式が得られ、之を積分して定常的輻射の性質に対する特別の條件に達することができよう^と云う私の元来の希望は虚構であることがわかつたからである。共鳴体は単にそれが放出するところの輻射にのみ反応し、隣接せるスペクトル領域に対しては少しも感じないのであった。

その上に、共鳴体は周囲の輻射の場のエネルギーに一面的の、即ち非可逆作用を及ぼすと云う私の意見は、ルードウィッヒ・ボルツマンの激しい反駁を招いた¹⁾。彼は即ちこの問題に於ける豊富な経験をもって、次の証明を導いた。古典的力学の法則によれば、私の考察した過程の各は全く反対の方向にも起るのであるのであって、例えば一度共鳴体から放出された球面波は逆に外方から内方へ常に縮小する同心的球面に於て進んで遂には共鳴体に達するまで凝縮し、之に再び吸収せられ、従って之をして他方に、以前に吸収せられたエネルギーをそれが到来したのと同じ方向に再び空間に送り出させるようにする。そして私はたとえかような、内方に向けられた球面波のような、特異的過程を特に制限する仮定、即ち自然的輻射の仮説を導き入れて除外することができたとは云え、併し^{しか}之等のすべての解放の際に、全問題^なの核心を完全に捕捉するためには尚お一つの本質的な連絡項が缺けていなければならないことが明瞭に示された。

そこで私には問題を一度反対の側から、即ち熱力学から取り扱ってみるより外に方法がなかつた。この土台に立つ方が元来確実であると私は感じた。実際にここでは熱理論の第二主則に関する私の以前の研究が役立って、それによって、私は直ぐに、温度でなくて却って共鳴体のエントロピーをそのエネルギーと関係づ

1) L. Boltzmann, Sitz.-Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss.v. 3. März 1898, S. 182.

けることに豫め気附いた。それもエントロピー自身でなく、そのエネルギーに対する第二微分係数を取ると、之が共鳴体と輻射との間のエネルギー交換の非可逆性に対する直接の物理的意味をもつのである。けれどもその時代に私は尚およほど現象論的に傾いていたから、エントロピーと確度との間の関係について立ち入って尋ねることをしないで、先ず現在する経験の結果だけを振り向いて見た。丁度その時分、即ち 1899 年に、興味の全面に立ったものは、少し以前にウィーンの立てたエネルギー分布法則¹⁾であって、その実験的検証が一方ではハンノーヴァーの工科大学に於けるパーシェンによって、他方ではシャルロツテンブルグの国立研究所に於けるルンマー及びプリングスハイムによって行われていた。この法則は輻射の強さの温度による関係を一つの指数函数によってあらわしている。之によって限定された共鳴体のエントロピーとエネルギーとの間の関係を計算すると、上に述べた微分係数の逆の値、——之を私はここに R であらわそう——がエネルギーに比例すると云う注目すべき結果が出る²⁾。この全く簡単な関係はウィーンのエネルギー分布法則の完全に^{こうてき}恰適な表現とすることができる。なぜなら、エネルギーに対する関係から一般に確立せられたウィーンの移動法則³⁾を用いて波長への関係が常に直接に引き出されるからである。

全体の問題としては一つの普遍的自然法則に関するものであり、且つ私はその当時も亦今日でも、自然法則はより一般的であればある程より簡単であると云う意見を徹底的にもっているのであるから、只どんな形式をより簡単のものと見做すかと云う問題は必ずしも疑問がないわけではなく、終極的に決定することはで

1) W. Wien, Ann. d. Phys. 58, S. 662, 1896.

2) ウィーンのエネルギー分布によれば一つの共鳴体のエネルギー U の温度との関係は次の式であらわされる。

$$U = a \cdot e^{-\frac{h}{T}}$$

それ故共鳴体のエントロピーを S とすれば、

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU}$$

であるから、本文の R なる量に対しては

$$R = 1 : \frac{d^2 S}{dU^2} = -bU$$

なる値が出る。

3) ウィーン転移法則によれば、振動数 ν を有する共鳴体のエネルギー U は

$$U = \nu \cdot f \left(\frac{T}{\nu} \right)$$

である。

きないにしても、ともかく私は一時は、 R なる量がエネルギーに比例すると云う定理に於てエネルギー分布則の全体の基礎を見るべきであると信じていた¹⁾。この見解は併し間もなく新らしい測定の結果に対して成立しないことがわかった。即ちエネルギーの小さな値若しくは短い波に対してはウィーンマックスの法則が結果に於てすぐれて確められたけれども、長い方の波に対しては先ずルンマー及びプリングスハイムがかなりの外れを見出だし²⁾、中にもルーベンス及びクルバウムが螢石及び岩盤の赤外残留線で行った測定³⁾ではまるで異った有様を示し、或る事情の下にはそれが寧ろ再び簡単な特性をもつように思われた。つまり R なる量がエネルギーそのものでなく、エネルギーの二乗に比例し、エネルギーと波長とが大きくなればなる程、益々精密にそうなるのである⁴⁾。

そこでかようにして直接の経験によって函数 R に対し次の二つの簡単な限界が確定された。エネルギーが小さければエネルギーに比例し、大きければエネルギーの二乗に比例すると云うのである。それ故一般の場合に対しては R をエネルギーの一乗を含む項と二乗を含む項との和に等しいとなし、且つ小さなエネルギーに対しては前者が大きなエネルギーに対しては後者が主要の項となるようにするより外はなかった。そして之で従来の実験的検証に対しかなり満足的に立つことのできる新らしい輻射公式が見出だされたのであった⁵⁾。経験による終極的の精密な確証については勿論今日でもまだ求めるわけにはゆかないのであって、寧ろ新たな検証が是非とも望ましいことであろう⁶⁾。——

だが、輻射公式が絶対に精密であるとして確証されたとしても、それが単に僥

1) Ann. d. Phys. 1, S. 719, 1900.

2) O. Lummer und E. Pringsheim, Verhandl. der Deutschen Physikal. Ges. 2, S. 163, 1900.

3) H. Rubens und F. Kurlbaum, Sitz-Ber. der Preuss. Akad. d. Wiss. v. 25. Oktober 1900, S. 929.

4) 即ち大きな T に対してはルーベンス及びクルバウムの実験によって $U = cT$ であり従って4頁脚注2)に述べた計算の方法によって

$$R = 1 : \frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{U^2}{c}$$

である。

5) 即ち

$$R = 1 : \frac{d^2 S}{dU^2} = -bU - \frac{U^2}{c}$$

と置けば、積分によって

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU} = \frac{1}{b} \log \left(1 + \frac{bc}{U} \right)$$

となり、之から輻射公式

$$U = \frac{bc}{e^{\frac{b}{T}} - 1}$$

が出る。Verhandlungen der Deutschen Phys. Ges. v. 19. Okt. 1903, s. 202 参照。

6) W. Nernst und Th. Wulf, Verh. d. Deutschen Phys. Ges. 21, S. 294, 1919. 参照。

倖的に達せられた内部挿置公式を意味するに止まるならば、尚お確かに限局された価値をしか有しなかったであろう。それ故私は之を定立しようとする当初からして、之に実在的の物理学的意味を与えると云う問題を取り扱ったのであって、この疑問が私をしておのずからエントロピーと確度との間の関係を考察せしめるように、即ちボツルマンの思考径路に導くに至った。そして私の生涯の最も緊張した仕事が二三週間続いた後に暗黒が照らされ、新たな想いがけない展望が曙光を見せ始めた。

ここで少しく餘談に亙ることを許されたい。ボツルマンによれば、エントロピーは物理学的確度を測るものであって、又熱理論の第二主則の本質は、自然に於て一つの状態がより確からしければ確からしい程、より^{しばしば}屢々あらわれると云うことに存するのである。ところで自然に於てはいつもエントロピーの差だけが測られて、エントロピーそれ自身は決して測られないし、従って一つの状態の絶対的のエントロピーについては或る任意さなしには全く云うことができない。けれどもそれにも^{かか}拘わらず適当に定義されたエントロピーの絶対量を導き入れることは、そのお蔭で或る一般法則が特に簡単に公式づけられると云う理由から、寧ろ^{むし}歓迎されるわけである。私の見る限りでは之はエネルギーの場合と全く同様である。エネルギーも亦それ自身では測ることができないのであって、只その差だけが測られる。だから以前にはエネルギーを計算しないで仕事を計算していたのであり、^{しばしば}屢々エネルギー恒存の法則を論究したところのエルンスト・マッハの如き人は、^{そもそ}抑も観測の範囲を超えて逸出するすべての想像に赴くことを根本的に否定したために、エネルギー自身について云うことをいつも避けていた。同様に熱化学に於ても最初はいつも熱の出入だけに、即ちエネルギーの差だけに止まり、遂にウィルヘルム・オストワルドをして、^も若し熱量的の数量の代りにエネルギー自身をもって計算するならば、多くの複雑な考察がずっと簡単になると云う印象を惹起ししめるまでに至った。エネルギーの式に於て最初は尚お未定に残されていた附加常数はその後エネルギーと惰性との間の比例性に関する相対論的法則によって決定的に確定されるようになった¹⁾。

エネルギーに対すると同様に、エントロピーに対しても、従って亦物理学的確度に対しても、附加常数を、例えばエネルギーと共に（若しくは寧ろ^{むし}温度と共に）同時にエントロピーが消滅するように確定する事によって、絶対的の値を定義す

1) エネルギーの絶対量は即ち惰性的質量と光速度の二乗との積に等しい。

ることができる。かような考察方法に基づいて共振体の体系に於ける一定のエネルギー分布の物理学的確度を計算するに当って一定の比較的簡単な結合方法が行われ、その結果として輻射法則によって限定せられたエントロピーの式が精密に引き出された¹⁾。之は私に多くの迷誤を解くために特別に価値ある報償を与えてくれた。そして私の論文を送ったのに対する返事のなかで、ルードウィッヒ・ボツルマンは私の提供した思考方法に対して彼の興味と根本的の賛成とを示してくれた。

このような確度考察を数量的に行うためには、二つの普遍的常数の知識が必要である。その各は独自の物理的意味をもっているから、之等を輻射法則から逆に計算すれば、それによって全方法が単に計算上の技巧にしか過ぎないか又は之に実在的な物理的意味が含まれているかと云う疑問を試めすことができるのである。第一の常数は寧ろ形式的の性質のものであって、温度の定義と関係している。温度を理想気体に於ける一分子の平均運動エネルギーとして、即ち或る非常に小さな量として定義するとしたならば、この常数は $\frac{2}{3}$ なる値をもつであろう²⁾。之に反して慣習上の温度測度に於ては常数は非常に小さな値を取るが、之は^{もちろん}勿論一箇の分子のエネルギーと密接な関係に立っているから、精密に之を知ることは一分子の質量及び之に関係する量の計算に帰せられる。この常数は^{しばしば}屢々ボツルマン常数と称せられているが、ボツルマン自身は私の知る限りでは決して之を導き入れたのではなかった——と云うのは、多分ボツルマンは種々の機会に之について言明したように見えるものの³⁾、この常数の精密な測定を実行することを全く考えなかったと云う特有の事情によるのである。ところが最近20年間に於て実験技術がまさに暴風的の進歩をなしたことは、それ以来一箇の分子の質量を一つの惑星の質量と殆んど同じ精密さをもって測るために一つの方法ばかりでなく沢山の方法さえも発見されたと云う事実によって何ものよりも^よ能く説明することができる。

1) Verhandlungen der Deutschen Phys. Ges. v. 14. Dez. 1900, S. 237.

2) k が第一輻射常数をあらわすならば、一般に一つの気体分子の平均運動エネルギーは

$$U = \frac{3}{2}kT$$

である。それ故 $T = U$ と置けば $k = \frac{2}{3}$ となる。之に反し習慣的の温度測度（ケルビンの絶対温度）では T は沸騰する水と氷結する水との間の温度の差を 100 とするように定義せられている。

3) 例えば L. Boltzmann, Zur Erinnerung an Josef Loschmidt, Populäre Schriften, S. 245, 1905. 参照。

私が之に相当する計算を輻射法則から行った時には、得られた数の精確な検証が全く不可能であり、只その大いさの程度の許容性を決定するより外はなかったのに反し、間もなくラザフォード及びガイガー¹⁾は、アルファ粒子を直接に数えて電気素量の値を $4.65 \cdot 10^{-10}$ 静電単位に等しいと決定することができ、之が私の計算した数 $4.69 \cdot 10^{-10}$ と一致することは私の理論の可用性に対する決定的確証として見做される^{みな}ことができた。その後レーゲネル、ミリカン等²⁾の更に進歩した方法はこの値を少しく高めるように導いた。

輻射法則の第二の普遍的常数の解釈は第一の常数のそれよりももっと遙かに不便であった。この常数はエネルギーと時間との積をあらわすから、私は之を作用量子と名づけた。最初の計算ではそれは $6.55 \cdot 10^{-27}$ エルグ・秒であった。之はエントロピーに対する正しい式を得るのに缺くことのできないものであった——なぜならそれのお蔭によってのみ確度考察の土台になる確度の「要素的領域」即ち「実施空間」の大いさが決定されるからである³⁾——のに反し、之を何等かの適当な形^かで古典的理論の範囲に嵌め込もうとするすべての試み^{みな}に対しては、間隔あり且つ反抗的でもあった。之を無限に小さいと見做^{みな}することができた間は、即ち大きなエネルギー若しくは長い時間週期に於ては、総ては滞りなく整えられた。けれども一般の場合にはどこかで罅隙^{かげき}があらわれて、振動の弱く^か且つ速い方へ移ってゆけばゆく程隙が益々著しくなるのであった。この罅隙^{かげき}を架橋しようとするすべての試みの失敗は間もなくもはや疑いの餘地を残さないようになった。作用量子は単に一つの仮想的の量に過ぎなかつたであろうか。そうすれば輻射法則の全演繹はまるで幻影的であり、無内容的の公式遊戯をしかあらわさなかつたであろう。或は又併し輻射法則を導き出すことに実在的の物理的思想が土台になっていたの^{しか}であろうか。そうであるとすれば作用量子は物理学に於て根本的の役目を演じ、之と共に何等か全く新らしい、従来まだ知られなかつたものがあらわれて、ライブニッツ及びニュートンによって微分法が基礎づけられて以来、すべての因果関係の連続性の仮定の上に築かれた我々の物理学的思考を根本から覆させるように見えたのであった。

経験は第二の方を正しいと判断した。この判断^{しか}が併しそれ程速^かかに且つ疑もな

1) E. Rutherford und H. Geiger, Proc. Roy. Soc. A. Vol. 81, 162, 1908.

2) R. A. Millikan, Phys. Zeitschr. 14, S. 796, 1913 参照。

3) 或る物理的状态の確度の計算は即ちその状態が実現せられるところの等確度の箇々の場合の数を算えることに帰せられる。そして之等の箇々の場合を互いに一定に限定するには各の箇々の場合の概念を一定に決定する必要がある。

く下されることができたと云うのは、熱輻射のエネルギー分布則の検証によるのではなく、亦私が与えたところの、この法則の特殊の演繹によるのではなく、寧ろ作用量子を研究に役立たせたところの研究者たちの間断なく前進する仕事のお蔭である。——

この範囲に於ける最初の突進をなしたのはアインシュタインであって、彼は一方に於て作用量子によって限定されたエネルギー量子を導き入れると、光の作用に於てなされた沢山の顕著な観測、例えばストークスの法則、電子放射、気体イオン化などに対し簡単な説明の得られることを指摘し¹⁾、他方では共振体の体系のエネルギーに対する式を固体のエネルギーと同一と見做して固体の比熱に対する公式を導き出し、之が比熱の変化、特に低温度に於けるその減小を全く正しく与えることを示した²⁾。之によって種々の方向へ沢山の問題が投げられ、多方面に互って之等が精密に研究された結果、漸次に無数の価値ある材料があらわれて来た。ここで私の課題は之等の業績の全体に関して単に不完全な報道をしようとするのではない。只進歩しつつある知識の路に於ける最も重要な特質的の事柄を挙げて見ようとするに過ぎない。

まず熱及び化学的現象について、固体の比熱に関しては、アインシュタインの考察の原子の唯一の固有振動の仮定に基づいていたが、ボルン及びフォン・カルマンから実際にもっと能く適応する多様な固有振動の場合に拡張せられ³⁾、又デバイは固有振動の特質に関する仮定の大胆な簡単化によって固体の比熱に対する比較的簡単な公式を立てることに成功した⁴⁾。之は特に低温度に対してネルンスト及びその弟子たちの測定した値を非常によく与えるばかりでなく、亦固体の弾性的及び光学的性質ともよく相容れる。更に気体の比熱の場合にも作用量子が注意される。既にネルンストは早く、振動のエネルギー量子が廻転のエネルギー量子に相応しなければならないことを指摘したが⁵⁾、之によって気体分子の廻転エネルギーは亦温度が低下すると消滅することが期待されねばならなかった。水素の比熱に関するオイケンの測定はこの結論の確証を与え⁶⁾、又アインシュタイン及びステルン、エーレンフェスト等の計算が今日まで精密に満足な一致を得られ

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17, S. 132, 1905.

2) A. Einstein, Ann. d. Phys. 22, S. 180, 1907.

3) M. Born und Th. v. Kármán, Phys. Zeitschr. 14, S. 15, 1913.

4) P. Debye, Ann. d. Phys. 39, S. 789, 1912.

5) W. Nernst, Phys. Zeitschr. 13, S. 1064, 1912.

6) A. Eucken, Sitz.-Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss., S. 141, 1912.

なかったのは、水素分子の模型に関する我々の知識がまだ不完全であるために外ならない。量子条件によって特徴づけられた気体分子の廻転が事実上自然に存在することは、赤外線に於ける吸収帯に関するブジェラム、バール、ルーベンス及びヘットネル等の研究でもはや疑うことができないのであって、たとえこの顕著な廻転スペクトルの遺憾のない説明は今日ではまだ与えられないとしても、それは問題にならない。

物質のすべての結合性質は結局はそのエントロピーによって条件づけられるのであるから、エントロピーの量子論的計算は亦化学変化のすべての問題への通路を開く。気体のエントロピーの絶対値に対して特質的なものはネルンストの化学的常数であって、ザックールは之を直接に私が振動体の場合に應用したのと類似した結合的方法で計算し¹⁾、之に反してステルン及びテトロデーは測定から得られる材料と密接に結びつけて気化過程の考察を用いて蒸気及び固体状態に於けるエントロピーの差を決定した²⁾。

これ迄考察した場合はいつも熱力学的平衡の状態に関する事柄であって、即ち測定は之に対して単に多数の粒子及び長い時間に関する統計学的平均値をしか与えないものであったが、電子衝突の観測は直接に研究せられた現象の力学的個性に立ち入るものであって、それ故フランク及びヘルツによって行われた謂わゆる共鳴ポテンシャルの測定若しくは電子が中性原子に対する衝突によって之に光量子の放射を起させるために少くとも有しななければならない限界速度の決定は、之より直接には望み得ないような作用量子測定の一方法を与える³⁾。バークラの発見したレントゲン・スペクトルの固有線を刺戟することに対しては亦ウェブスター、ワグネル等の実験によって同様の方法が形作られ、それも全く相一致した結果に到達している。

電子衝突によって光量子が発生するのは、光線、レントゲン線又はガンマ線の照射による電子放射に対し逆の過程をなすものであり、ここでも亦作用量子並びに振動数によって限定せられたエネルギー量子が特有の役目を演ずることは既に早く次の著しい事実に於て知られた通りである。即ち放出せられた電子の速度は照射の強さに関しない⁴⁾、単に投射光線の色にのみ関する⁵⁾。数量的関係に於て

1) O. Sackur, Ann. d. Phys. 36, S. 958, 1911.

2) O. Stern, Phys. Zeitschr. 14, S. 629, 1913. H. Tetrode, Ber. d. Akad. d. Wiss. v. Amsterdam, 27, Febr. und 27. März 1915.

3) J. Franck und G. Hertz, Verh. d. Deutsch. phys. Ges. 16, S. 512, 1914.

4) Ph. Lenard, Ann. d. Phys. 8, S. 149, 1902.

5) E. Ladenburg, Verh. d. Deutschen Phys. Ges. 9, S. 504, 1907.

も上に述べた光量子に対するアインシュタインの関係が各方向に保証せられ、特にミリカンは放射電子の逸出速度の測定によって之を確め¹⁾、又光化学作用の発生に対する光量子の意味はワールブルクによって発見された²⁾。

既にこれ迄私の挙げた。物理学の多様の範囲に互った経験^{しか}を総合すると、作用量子の存在に僥倖する確実な証明資料を呈示してはいるが、併し量子仮説はニールス・ボーアの原子理論の基礎づけと発展とによってその最も強固な根柢を得たのであった。なせならこの理論は、スペクトル分析の発見以来分光学の夢幻国への入口を開こうとするあらゆる試みに執拗に反抗していた門扉に対して、久しく求められていた鍵をこの作用量子に於て見出だすように運命づけたからである。そして路が一度び開放された後には、この全範囲並びに物理学及び化学の近接範囲について新たに獲得された知識の流れが急劇な高潮をなして注ぎ込んだ。最初の輝かしい成功は水素及びヘリウムに対するバルマー公式の演繹、並びにリドベルグの普遍的常数を純粹に既知の数量に帰着せしめたことであつた³⁾。そこに水素とヘリウムとで僅小の相異のあることさえも、必然的に重い原子核の微弱な運動によって限定されるものとして認められた。之に引き続いて光及びレントゲン・スペクトルに於ける他の系列の研究が到る処効果のある、そして今漸くその根本的意味を闡明せられたリッツの結合原理を用いてなされるに至つた。

ところが分光学的測定の特別の精密度を以て特別に眼立つ証明力を要求することのできた之等の多数の一致に関して、それでもやはり偶然に弄ばれているのだと信ずるような傾向をもった人々でさえも、最後にその疑を棄て去らねばならぬ時期に迫られてしまった。それはゾンマーフェルトが、多くの目自由度をもった体系へ量子化の法則を意味深く拡張し、尚お相対性理論^なによって要請せられた惰性的質量の変化をも考慮して、水素並びにヘリウム・スペクトルの微細構造の謎を解きほごすところの魔術公式を導き出すことのできるのを示したこと⁴⁾、並びにそれが現在可能な最も微細な測定、即ちパーシェンのそれらによって全く確証されねばならなかつたことによつてである⁵⁾——これこそ海王星がまだ人間の眼で眺められなかつた以前に、その存在と軌道とをルヴェリエによって計算せられ

1) R. A. Millikan, Phys. Zeitschr. 17, S. 217, 1916.

2) E. Warburg, 気体に於ける光化学的現象の場合のエネルギー変換について, Sitz.-Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. von 1911 an.

3) N. Bohr, Phil. Mag. 30, S. 394, 1915.

4) A. Sommerfeld, Ann. d. Phys. 51, S. 1, S. 125, 1916.

5) F. Pachén, Ann. d. Phys. 51, S. 901, 1916.

たと云う有名な業績と全く功を等しくするものである。更に同じ路を進んで、エプシュタインはスペクトル線の電氣的分岐に関するスタルク効果の完全な説明に到達し¹⁾、デバイはマンネ・ジグバーンの研究したレントゲン・スペクトルのK系列の簡単な解釈に成功し²⁾、之に引き続いて原子構造の暗黒な秘密が多少とも効果的に闡明せられた沢山の研究さえも行われるに至った。

之等のすべての結果を完全に述べるためにはもっと多くの耳馴れた名がここには是非とも挙げらねばならないのであるが、ともかくもそれによって事実を看過しようとしなない批判者には、雑色的にあらゆる種類に亙っている過程のどれに於てもいつも同一の量として、即ち凡そ $6.51 \cdot 10^{-27}$ エルグ秒としてあらわれるところの作用量子に普遍的物理学的常数の体系に於ける十分の公認権を帰するより外の何等の判決をも残さないにちがいない³⁾。丁度一般相対性^の思想が自由の軌道を打開して未曾有の効果にまで進んだのと同じ時に、自然が^{やや}もすれば最も見遁がされ易い場処に於て一つの絶対、即ち実際に不変的な単位を啓示し、そのお蔭で時空要素に含まれた作用量が任意を離れた全く一定の数によってあらわされ、従ってその従来の相対的性質を脱衣するに至ったと云うことは、恐らく稀有の偶然として見ねばなるまい。

勿論^{もちろん}作用量を導き入れただけではまだ現実の量子論は創造されるわけにゆかない。実際にそれ迄には研究は恐らく尚^なおオラフ・レーマーによる光速度の発見からマクスウェルの光の理論の建設に至るまでよりも遙かに遠い路を歩まねばならなかったのである。作用量を公認せられた古典的理論に導き入れるために最初からそこに横たわっていた困難は、既に上に私の述べた処である。この困難は年々に滅ぜられるどころか却って益々高められ、そしてたとえその間に猛烈に進撃するところの研究がそれらの或るものを暫らく押し退けたとは云え、取り残されて尚^なお爾後の補足を待っているような缺陷は良心ある組織学者をして益々苦痛ならしめた。殊にもボーアの理論に於て作用法則の建設に基礎として役立つところのものは、尚^なお数十年前にはどんな物理学者からも疑もなく素直に棄て去られたにちがいがなかったであろうような或る仮説の結合である。原子のなかで或る全く一定の、量子的に特徴づけられた軌道だけが特別の役目を演ずると云うことは

1) P. Epstein, Ann. d. Phys. 50. S. 489, 1916.

2) P. Debye, Phys. Zeitschr. 18, S. 276, 1917.

3) E. Wagner, Ann. d. Phys. 57, S. 467, 1918, —R. Ladenburg, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektronik. 17, S. 144, 1920.

まだしも許され得るものとせられたかも知れないが、之等の軌道に於て一定の加速度をもって周廻している電子が、何等のエネルギーをも輻射しないと云うのは既にそう容易にはゆかない。まして放射せられた光量子のはっきりと限定せられた振動数が放射する電子の振動数と異なっていると云うに至っては、古典的学派に於て教育せられた理論家を取っては、奇怪千万な、殆んど理解に堪えない要求として感ぜられねばならなかった。

併^{しか}しながら数が到決を下し、その結果は、今や以前に反して役目が漸次に換つて来るようになった。最初は或る新らしい未知の要素を一般に確実と認められた外枠に多少とも寛大な繫縛をもって適合させると云うことであつたのに反し、今やその侵入者が保証された地位を奪ってしまった上で、他方では攻勢に転じ、既に今日ではそれが古い外枠を何等かの方法で突き破ってしまうであろうことは確かである。只疑問とすべきは、どの場処^かで且つどんな程度に之が成功するであろうかと云う点に過ぎない。

若し今日この熱烈な闘争の豫期すべき結末について豫想を述べる事が許されるならば、古典的理論のうちで熱力学の大原理が量子論に於ても亦その中心的地位を依然として保つばかりでなく、更に相当に拡張されさえもするらしく思われる。古典的熱力学の根本に於て思考実験が意味したところのものを、量子論に於ては先^まずエーレンフェストの断熱仮説¹⁾が意味し、そしてクラウジウスがエントロピーの測定に対する出発点として、物質体系の二つの任意の状態は可逆的過程による適当な処置によって互いに変化させることができると云う根本法則を導き入れたように、吾々にはボーアの新らしい思想が彼の開拓した異境の内部に於て全く相当せる路を開けてくれる。

細微に互つてはそれは特別に一つの疑問であり、之に完全に答えるには私の意見ではもっとそれ以上の闡明^{せんめい}が期待されなければならない。光量子のエネルギーが完全に放射された後にどうなるであろうか。それはホイヘンスの波動論の意味であらゆる方向に伝播し、いくらでも大きな空間を占有し、終極なしに稀薄になってゆくであろうか。又はそれはニュートンの放射論に従つて抛物体の如くに唯一の方向に飛んでゆくであろうか。第一の場合には量子はもはや、電子をその原子束縛から解放し得る程にそのエネルギーを一つの空間点に集中することがで

1) E. Wagner, Ann. d. Phys. 57, S. 467, 1918, — R. Ladenburg, Jahrb. d. Radioakt. u. Elektronik. 17, S.144, 1920.

きなくなってしまうであろうし、第二の場合には、マクスウェル理論の主要な勝利、即ち静的及び動的の場の連続性並びに最も微細の点までも探究せられた干渉現象に対する従来の全理解が共に犠牲にせらねばならなかったであろう——両方とも今日の理論家にとってには歓迎せられない帰結である。

けれどもそれ以来今でも変りはないが、即ちいずれにしても科学は一度はこの困難なディレンマを征服し、今日吾々に不満足に見えるところのものがその暁にはより高い場処からまさに特殊の調和と簡単さによって特徴づけられたものとして眺められるであろうと云うことは何等疑い^{しか}を挟む餘地はない。併しながらこの目的を達するまでは、作用量子の問題は絶えず研究をいつも新たに刺戟^かし且つ実らせて止まないであろうし、そしてその解決に対抗する困難が大きければ大きい程、それは結局吾々の全物理学的認識の拡張と深化とに対して益々重大なものとなるであろう。

-
- ・『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。