

# 熱輻射論と量子論の起源

天野 清著



# 目次

<b>第 1 章 熱輻射論の背景</b>	<b>3</b>
1. 序 説 . . . . .	3
2. 19 世紀のドイツ工業の発展と国立物理工学研究所 . . . . .	3
3. Hermann von Helmholtz . . . . .	5
4. 19 世紀後半に於ける理論物理学の新領域とその認識論的基調 . . . . .	6
<b>第 2 章 Wien の変位則までの熱輻射論</b>	<b>10</b>
5. Kirchhoff 及び Boltzmann の熱輻射研究の影響 . . . . .	10
6. 国立研究所に於ける熱輻射の実験的研究の開始 <sup>1)</sup> . . . . .	13
7. W. Wien と熱輻射の変位則 . . . . .	15
<b>第 3 章 熱輻射分布法則の実験的理論的研究</b>	<b>21</b>
8. 黒体輻射の実験 . . . . .	21
9. Wien の熱輻射分布式 . . . . .	22
10. Max Planck の登場 . . . . .	26
11. 輻射理論研究と Energetik 論争 . . . . .	28
12. Planck の初期の理論と実験の進展 . . . . .	31
13. Lord Rayleigh と Wien の式の批判 . . . . .	34
<b>第 4 章 量子論の誕生</b>	<b>39</b>
14. 新輻射公式 . . . . .	39
15. 輻射式の演繹と Boltzmann , Energieelement の着想 . . . . .	42
<b>第 5 章 熱輻射論と量子論の生長</b>	<b>48</b>
16. エネルギー量子と学界の反響 . . . . .	48

1) この節の内容は量子力学史 (『天野清選集』第 1 巻) にくわしく述べてある。

17. Solvay 会議と量子論の普及 . . . . . 50

18. 其後の状況 . . . . . 52

## 第1章 熱輻射論の背景

### 1. 序 説

現代物理学の理論的基礎である量子論は、今世紀の始め、熱輻射の研究から誕生した。

熱輻射論は、現在でこそ其後の原子物理学の急速な展開に依って蔽われて、量子論にとっても単なる古典的応用分野になってしまったのであるが、およそ量子論のような科学史上稀に見る画期的な学問体系がその中から誕生して来たと云うことは、この熱輻射研究の歴史がそれ自身としても、あらゆる角度から検討される資格があることを物語るものではなからうか。事実、本論の叙述が明かにするように、19世紀末年に於ける熱輻射論の発展は、科学史が闡明すべき幾多の一般的な課題に、具体的な実例を以て、豊かな示唆を与えるのである。

熱輻射の研究は、この方面に重要な法則を発見した Kirchhoff, Stefan 及び Boltzmann<sup>1)</sup>, Wien, Planck の名を列ねても、既に暗示されるように、19世紀後半のドイツ学界を中心として遂行されたのであるが、就中本篇が取扱おうとして居る Wien, Planck に依るその究極的な完成は主としてベルリンの国立研究所で行われた実験を根拠とするものであった。この実験そのものを推進せしめたのは、一方では当時大躍進を遂げつつあったドイツの工業と技術であり、他方では漸く完成の域に達しながらも、既に自身の中にそれを超えて進むべき新理論の胎動を孕んで居た古典理論物理学である。従ってその両者に就て一応の考察を試みることは、熱輻射論から量子論の創成に至る極めて重要でありながらしかも未開拓に遺されて来た歴史を現実の地盤から把握するために省略することの出来ない前提であると信ずる。

### 2. 19世紀のドイツ工業の発展と国立物理工学研究所

19世紀の末葉近く、ヨーロッパ諸国の中で、最も暴風的に躍進したのはドイツであった。1870～71年の普仏戦争の結果、プロシヤは多額の償金とアルサス、ローレン(豊富な産鉄地方)を獲た。これはドイツ帝国の結成を助け、宰相 Bismarck 治下に蓄えられた生産力は90年代に入って驚異的に展開した。

1) Stefan と Boltzmann は師弟共にオーストリアの人で、ウイーンを中心として活動したがドイツ学界に直接影響を及ぼして居るので、ここに名を列ねても差支えないであろう。後者は自ら「ドイツの Professor」とも言っている。

元来、前世紀の半ば頃までのドイツは寧ろ農業国であって、国内の経済的発展の水準でも、植民地政策でも、英仏に比べて著しく立遅れていた。この事情があったため、後に至って保護政策を強力的に遂行する必要が起ったが、他方、最新の技術を直ちに工業化する上には従来旧式の技術に基く生産設備との摩擦が少く、従ってイギリスが悩んだ設備更新の渋滞、資本浪費を免れ、却て技術改良の活発な要求と奨励が見られた。これはまた、一部の保守的勢力を抑え官民提携して物理、化学の研究を鼓舞する結果ともなり、理化学、工業の教育施設（例えば高等工業学校）の急速な増設、拡張も行われ、科学者や技術家の夥しい増加を来したのである。このドイツ国内の情勢が、熱輻射研究の歴史に反映している種々相は我々が後に見る通りである。

冶金工業は近代工業の樞幹であると云われるが、世紀末のドイツで、その発展のテンポが最も急調で世界の驚異となったのが、まさにこの製鉄、製鋼の冶金工業であった。〔統計の示すところによると、1890年英国の半ばに足らなかったドイツの鉄鋼の生産額は94年にまず鋼鉄で、1901年に銑鉄で英国に追い付いた。この期間こそ我々の主題とする国立研究所の熱輻射研究の時期である〕。これに伴って電気工業、機械工業も隆盛を来し、化学工業に至っては、稍以前から既に世界に冠たるものがあった。更にまた生産力の急激な発展に応じて原料資源を獲得し商品市場を開拓するために、上述の強力政策を背景として、機械の生産、鉄道の拡張と並んで、巨大な軍需工業が実現され、ドイツの“鋼鉄時代”を到来させた。その結果90年代の半ば以来、冶金工業を枢軸として最も典型的な形態で、企業の合同や資本の連合が行われたことは周知の通りである。

これらの大工業が我々の課題とする物理学の分野、熱輻射の研究に及ぼした影響は、後にも具体的に示す通り、極めて直接であり顕著であった。まず冶金工業の重要な工程である熔解、鍛錬、焼入の高温作業、加熱技術は高温測定乃至熱輻射研究の最も実際的な一つの動機であった。この冶金工業と密接な関係にある瓦斯事業は都市照明の急速な発展を来した。ドイツでは逸早く電灯による照明（アーク灯及び電灯）も現われ、それは電球製造工程に欠くことの出来ない真空技術を進歩させ、X線を含む原子物理学の実験に重要な補助手段を提供したが、他方、照明のエネルギー経済の見地から、瓦斯マンツルや電灯の灼熱織條（当時は主として炭素線）の輻射エネルギーの分光的な分布が、いわゆる光経済（Lichtökonomie）

の基礎的な問題として重要な研究対象になって来た<sup>1)</sup>。

こうして90年代の初め以来、物理学と直接な共同研究を要する工業部門の躍進に伴い 我々がまさにその人の業績を語ろうとして居る Willy Wien 自身の言葉を借りれば 「研究室の竈を出てまだ冷めやらぬ物理学のパンが頻繁に食卓に上せられるようになった<sup>2)</sup>。」

近代ドイツ工業の特質は、それが科学的精神を以て貫徹されて居るところに見られ、これはアングロ・アメリカンの工業が全くの企業家気質から発生したのとは著しい対照をなす、とは屢々ドイツの学者が誇るところである<sup>3)</sup>。ここに幾分の誇張は認めるとしても、この技術と科学との提携を早く体現したドイツの重要な国家的施設として、ベルリン Charlottenburg の Physikalisch-Technische Reichsanstalt (国立物理工学研究所、略して P.T.R. ともいうが、我々は国立研究所と呼んでおく) を挙げることに異論はあるまい。我々の問題と因縁の浅くないこの国立研究所は、1887年 Werner Siemens の寄附を基金として設立され、Hermann von Helmholtz が初代の総長 (Präsident) となって研究を指揮したのである。

### 3. Hermann von Helmholtz

19世紀後半のドイツの学界に最も影響力の大きかった人は恐らく Helmholtz であろう。その業績が生理学や物理学からさらに広汎な領域に亘ったばかりではない、天賦の着想、巧妙な実験の背景に、哲学的洞察と数学的才能を渾然と融合させた彼の人格は「およそ見得るものはすべてこれを捉えその声に聴かんと決意して、全身これ眼これ耳」とも言うべき強烈な探究精神の印象を彼に近づき得たすべての人に与えたとは、ベルリン大学で彼に親炙した精神史家 Wilhelm Dilthey の評である。彼こそ単なる生理学者乃至物理学者でなく、真に自然探究者であった。研究の厳密性と徹底性が実を結び先進国イギリスを凌駕するばかりに当時頓に昂揚されたドイツ科学精神の象徴として、彼の像がベルリン大学の正面を飾るのも相応わしいことと言わなければならない。しがも彼はまた稍以前では Faraday、同時代者では Lord Kelvin (W. Thomson) や Maxwell や Rayleigh の如き英国の学者の業績を高く評価し<sup>4)</sup> 自らそれを発展させてドイツ学界への普及を図ることに努

1) O. Lummer, Grundlagen, Ziele und Grenzen der Leuchttechnik, (1918)

2) W. Wien, Neuere Entwicklung der Physik, Leipzig (1919) 中の Physik und Technik. s. 86,

3) Richard Lorenz, Die Entwicklung der deutschen chemischen Industrie, Leipzig (1919) 特に s.15-20。前期の Wien のと共に第一次世界大戦末期の講演である。

4) Helmholtz は 1852 年の秋英国の学会に出席し、Faraday から忘れ難い好印象を受けそれから英国を愛するようになった

力を惜しまなかった。William Thomson は或る英国の学界に際して、「物理学に於ける指導的地位は、Faraday の死後 Helmholtz に依って、ドイツに移った」と公言したということである。

彼の薫陶を受けた門下生は数多いが、Heinrich Hertz のほか、Willy Wien や Max Planck を初め、初期の国立研究所の研究者達が何れもその中の逸足であった。従って我々がこれから採り上げようとしている熱輻射の研究には彼の影響が非常に大きかったのである。

ドイツでは、Helmholtz 以前には、理論と実験の物理学が相互の交渉のあまり緊密でない二つの分科に分裂して居て、英仏に比しては見るべき業績も少数であった。彼に至って初めて、ドイツに一つの全体的統一をもった科学としての物理学が出来上ったのである。ベルリンでは彼は実験物理を代表していたが、自分の研究は殆んど理論的なものであって、この点は Maxwell と似て居る。このように理論と実験とを非常に密接に交渉させながら研究を進めるといふ彼が学界に与えた方向によって、ドイツ科学の飛躍が可能となったのである。Hertz や Wien のような理論と実験を駆使した人達は彼にして初めて持ち得る門下生であった<sup>1)</sup>。

彼は Röntgen の X 線発見や、相対性原理の先駆をなす Lorentz の論文が発表された前年に歿し、其後の物理学は彼の生前に予想もされなかった方向に発展したのであったが、理論的に最も目覚しかったドイツでその発展を培ったのは外ならぬ彼であった。

Helmholtz の確信では、自然科学は工業の進歩という物質的目標を追求することを主眼とすべきでなく、精神の支配を拡張し確立すべきであり、従ってすべての科学は先ず認識に役立つべきである。認識の進歩は自然に実際的な応用を齎すものとされた。この彼の信念は 1887 年 10 月から物理部と工学部の研究を開始した国立研究所の指導にも見事に実現されたわけである。

#### 4. 19 世紀後半に於ける理論物理学の新領域とその認識論的基調

さて上述のような環境の中でドイツの理論物理学は当時どんな状態に在ったであろうか。19 世紀後半の理論物理学の特に原理的な発展を概括して云えば、その特徴は、従来断片的な経験的法則の集積に止まって居た熱、光、電磁

た。もつとも彼の母にはアングロサクソンの血統もある。ドイツの学界が未だ英国に対して遅れていた時代に育ったこととて後のドイツの学者と多少異なるのは止むを得ない。

1) W. Wien, Hermann von Helmholtz, zu seinem 25-jährigen Todestage, Naturwiss. 7, s. 645(1919)

気現象に関する理論が、あたかも力学に見るような厳密な数学的演繹に貫かれた体系的理論に統一され、一応の完成を見た点にある。それらに<sup>しばしば</sup>‘dynamical theory’の名が冠せられる所以である。

ところが、この場合模範となった力学そのものの意義や、いわゆる機械的自然観に対しては漸く批判の声が聞かれるようになって来た。即ち一方では空しく崩壊した Schelling, Hegel 等の思弁的形而上学の批判として、他方では社会主義思潮や進化論を機縁として流行した俗流唯物論への反動として、多少とも反形而上学的に解釈された Kant の学説の影響を受けて、認識論的傾向をもつ科学論が勃興した<sup>1)</sup>。

力学の課題を記述に求めた Kirchhoff, 更に意識的に従来力学を批判した Mach や Hertz は、古典力学の実質的な法則そのものを疑ったわけではなかったが、なお<sup>ひそ</sup>潜かに来るべき世紀の大変革への心構えを準備したと言えるであろう。しかし当時新たに生れた理論物理学の部門としては、熱力学、気体の運動学的理論及び電磁力学（殊に場の理論、電磁輻射の理論）を挙げることに大きな異論はないと思われる。これらが<sup>いず</sup>何れも熱輻射論の基礎に採り入れられて、重要な役割を演じながら、他方では認識論上の論争の足場となったのは注目に値することである。

熱力学は、Mayer, Joule, Helmholtz によってその第一主則（エネルギー恒存則）が確立されて、物理学の全領域に測定し得る統一と相互転化の量的関係を規定した。Carnot を先駆とする W. Thomson, Clausius 等の第二主則はこれに加えて、エントロピーや絶対温度のような重要な概念を与え、従来力学に依って解決されなかった現象の推移する向きを指示した。これが神話的な実体の介入する余地を失わせることによって、現象論的・実証的な Energetik の発生<sup>の</sup>因となり、Helm, Ostwald, Mach 等にその代表者を見出すことになった。我が Planck も亦その影響を受けたのである。

これに反して学界の一部にはどこまでも力学的世界観を徹底させようとする根強い底流があった。即ち当時躍進しつつあった基礎化学に影響され Krönig(1856), Clausius(1857) が分子の運動に依って気体の法則を説明し、Maxwell(1860) が初めて有効に確率論を応用して、気体分子の速度分布則を導くに及んで学界の注目を<sup>ひ</sup>惹いた気体の運動学的理論がその現われの一つである。

1) この 19 世紀の最後の 4 半期に於ける「科学の哲学」の思潮についてはさし当り我々はその代表的な一例として Helmholtz の「理論物理学講義」の序論を挙げる事が出来る。

原子論の熱烈な主張者であった Ludwig Boltzmann が ,Energetik が独壇場を誇っていた当の第二主則にこの理論を適用し , エントロピーの増大を , より確率の大きい状態への推移としていわゆる H 定理に依って基礎づけるに至り , Energetik 対 Atomistik の論争は愈々熾烈<sup>いよいよしれつ</sup>となった。しかも Boltzmann の輝かしい業績にも拘らず<sup>かかわ</sup> , 原子的過程の知識が貧しかった当時の物理学にあっては , 気体の運動学的理論は未だ特に現象論的立場で取扱えないような問題にその威力を発揮するに至らず , ここに物理的には不生産的であるとしてその効果を否定し論難する攻撃が絶えなかった<sup>1)</sup>。この理論の一般化であるエネルギー等配分則が , 時に経験と矛盾した結果を与える事実も不利であった。実は後に知れたことであるが , この原子論の立場を徹底的に遂行するためには , 古典理論は自らを否定して量子論へ転化しなければならない悲劇的運命を担って居たわけである。

電磁力学の領域では Faraday の直観的な力線が Maxwell の場の理論で数学化され , mechanical model を作らなければ理解し得ないという古典物理学の大立物 Lord Kelvin の嘆声を外に漸く直観的モデルの断念を余儀なくさせる理論の建設が始まった<sup>2)</sup>。しかも , Helmholtz の高弟 Hertz による Maxwell の理論の帰結たる電磁波の実験的証明は , モデル構成の問題を沈黙させて , 輻射の電磁的理論に絶大の信頼<sup>もたら</sup>を齎らし , 若い世代の学者の中にはその中に研究テーマを求めるものも少なくなかったのである。熱輻射の理論も亦この情勢に著しい影響を受けたのであった。

これを要するに , Helmholtz の指導や Hertz の実験の影響を別にすると我々が取扱う Wien , Planck の業績を中心とする熱輻射論から量子論の誕生に至る研究の理論的部分は , 間接には Maxwell に淵源しているが , 直接には Boltzmann の鋭利な研究が及ぼした深刻な影響の下に展開された。実に Boltzmannこそはその大胆な思想に依て量子論誕生を理論的に準備した第一人者である。

以上が本書で取扱われる熱輻射論の背景の極めて簡単なスケッチである。これを当時の社会の政治 , 経済及び技術の発展の詳細な叙述で基礎づけ , 哲学的思潮

1) この Boltzmann の業績が科学史上極めて重要な意義を有するものであるとは寺田寅彦博士も繰返し語られたのであるが , 当時 Mach 等には随分極端な皮肉を浴びせられた。(例えば E. Mach, Prinzipien der Wärmelehre, 3te Aufl s. 364) その上 Loschmidt や Zermelo の迷理が益々 Boltzmann を戦慄に馳り立てた。

2) しかし「公式 (formules) で思惟せずに像 (image) で思惟する」という Poincaré の評は Kelvin 一人に当てはまるのではなく , 我々の熱輻射論に於ても Kirchhoff , Boltzmann , Wien 等何れもその証明に直観的な思考実験を用いて居る。

との関連を分析することは、近く他の箇所に発表される論文に譲らなければならない。

## 第2章 Wienの変位則までの熱輻射論

### 5. Kirchhoff及びBoltzmannの熱輻射研究の影響

量子論の端緒となった熱輻射研究の歴史を十分に叙述するには、KirchhoffやBoltzmannの業績まで遡らなければならない。我々が以下に語ろうとするWienやPlanckの理論的研究も、国立研究所の人達の実験も、まさしくKirchhoffやBoltzmannに依て指示された研究方法を継続し、展開し、検証することから出発したからである。しかし、余りに歴史を遡ることは却って問題の所在を曖昧にしてしまおそ恐れがないではない。我々はその詳細な記述を断念して、ただ我々の問題と直接関連する事項だけを摘記するに止めよう。

温度の高い物体から輻射として熱エネルギーが放散されることは誰でも経験して知っている。この熱輻射線が目に見える普通の光線と本質的には同じもので、ただ波長が長いいわゆる赤外線であることも既に19世紀の初めから知られていた。物体の温度が上昇して摂氏600°近くなると、暗い所では赤く見え始め、更に高温になるに従って次第に輝きを増し、色も赤から黄、白熱と変化する。しかしこの光は燃焼の焰や放電管などの光とは異って、単に固体の温度上昇によって発するので「温度輻射」とも言われる。

ところがKirchhoff<sup>1)</sup>が1859年熱輻射に関する彼の法則に想到したのは、よく知られている通りHeidelberg大学で親しい同僚である化学者Bunsenと協同し、Fraunhofer線の反転を実験し、輝線スペクトルを各元素の特性として認識した際であった。これから彼は分光学を確立して新元素ルビヂウム、セシウム等の発見となったのである。しかも彼は、当時二三の学者が試みたように、輝線スペクトル発生の機構を強いて臆測しようとはしなかった。却って問題を熱輻射体に限定して、熱力学に依り、輻射能と吸収能との比があらゆる物体を通じて一定である、という彼の法則の証明に努力した。

各元素の特殊性を語る輝線スペクトラムの謎は、半世紀以上を経て、Niels Bohrに依って量子論で解決された。これに対し、固体の一般的性質を示す熱輻射論がまず作用量子のイデーを準備したのは奇しき運命である。Kirchhoffが同時代の

1) Gustav Robert Kirchhoff, 1824 3/12—1887 10/17

研究者、例えば Stewart 等に対して有する真の優先権は、法則を逸早く感付いたり、蓋然性を与えたりした点にはなくて、思考実験の手段によって一般的に厳密な証明をしたところにある<sup>1)</sup>。この行き方が後のドイツに於ける熱輻射の理論的研究の模範となったのである。例えば Kirchhoff が導入した 黒体 の概念を取上げて見よう。彼は思考実験を遂行する必要上、投射されたあらゆる輻射を完全に吸収してしまう物体を想定したが<sup>2)</sup>、この単に理想上考えられる物体の概念が、実は後に続く実験や理論に極めて大きな役割を果し、また今日でも果しつつあることを指摘したい。即ち、Kirchhoff 以後現在に至るまで、黒体の熱輻射に関して得られたすべての重要な理論的法則はこの 黒体 の輻射に関連して定式化されているものばかりである。Kirchhoff が明瞭に意識して「黒体の輻射能は波長と温度との函数である。この函数を見出すことは極めて重要な課題である。その実験的決定には大きな困難が横たわっているにも拘わらず、それを実験によって知り得るといふ希望は根拠があると思う。というのは、個々の物体の性質に依らない今迄に知れている総ての函数が簡単な形をしているように、それも簡単なものであることは、殆んど疑いが無いからである。この課題が解決されて初めて、証明された命題の全面的な効果が明かとなる」<sup>3)</sup>と書き遺した言葉は後の実験家達に目標を指示するものとなった。

ただ其後の歴史に鑑みて遺憾であったのは、この黒体が、単に思考実験の目的ばかりでなく、実際の実験にも必要欠くべからざる重要な概念であったのに、Kirchhoff がそれを十分に強調しなかった点である<sup>4)</sup>。殊に「一つの空洞が等温度の物体に取囲まれ、その物体が輻射を透過させないと、この空洞の内部に在るすべての輻射束はその質と強度の点で、あたかもそれが同じ温度の完全黒体から発したとまさに同じ性質を有し、かくて物体の性状や形態には無関係で、ただ温度のみに依る<sup>5)</sup>」(1861年の論文)という実験技術上からも貴重な彼の命題が30年

1) Priority の問題は Kirchhoff, Zur Geschichte der Spectralanalyse etc. Pogg. Ann. 118, p.94-111(1863) 及び Stewart の答弁 Phil. Mag.(4) 25, p.354-360(1863) 等に見られる。Stewart は自分の説明を highly probable, if not rigidly demonstrated と云って居る。

2) すべての輻射を完全に吸収する物体は常温では完全に黒く見える筈であるから「黒」体と名付けられたのであるが高温度では同じ温度にある通常の物体より輻射電子が大きいので却ってこの黒体の方が輝いて見える。

3) Pogg. Ann. 109, s. 292(1860)

4) B. Stewart は黒体という代りに lampblack という具体的な名前と呼んでいるが、これでは黒体の理論的意義を明かにすることが出来ない。Maxwell も不幸にしてその著 Theory of Heat で Kirchhoff の法則を述べるのに lampblack を標準とした。

5) この空洞輻射と黒体輻射とが等しいことを明言する重要な命題は、やはり多少漠然とした点はあるが、Kirchhoff 以前に Stewart にも見られた。Rep. Brit. Ass. 1861 p.97 (Kayser による)。いな、18世紀にも言われたことだというところが W. Gerlach は西歴9世紀のアラビアの学者 Abu Muhammad Ibn Hazm al-Andalusi の「色彩に関する論究」

以上も一般学界の知識とならなかったのは大きな損失であった。

Josef Stefan(1835–93) が、物体が発する全輻射エネルギーは絶対温度の 4 乗に比例して増加するという法則を提案した<sup>1)</sup>のは、彼が全く偶然にもほぼ黒体に近い条件で実験をした Tyndall や F. de. la Provostaye 及び P. Desains の材料を利用した為で、彼自身としては黒体という条件を考えず一般に成立つものと信じてであった。ところが Stefan に引続いてこの法則を検証した十指に余る多くの学者も、皆黒体条件を無視したので結果は区々となり、Stefan の提案を否定するものが多かった。この混乱は理論なき実験が如何に盲目であるかを訓えるものである。

この間黒体条件を明白に認識して書いたのは Boltzmann 一人であった。彼は Wien 大学で学んだ時の師 Stefah の 4 乘法則を、理論的に証明するという因縁になったのであるが、その準備的証明をなす論文の中で「自分は既に長い間、熱輻射の実験的研究を、一部分は全輻射として、他は分光的に始めている。それには等温度の壁で取囲まれた空洞の輻射を、この壁の小さい孔か隙間から出して、それを黒体輻射の代りとし、Christiansen が少し前に擦り傷をつけた金属の輻射が強いことの説明に利用した原理を応用した。平滑な物体の輻射と比較すればその輻射能も決定されるであろう」と注意して居る<sup>2)</sup>。しかし Boltzmann が実際どの程度実験したかは明かでない。彼は Stefan の実験に対しても、格別黒体条件の批判をしなかった。そこでこの問題は Wien と Lummer が 1895 年に三度目の発見をするまでは忘却の闇に没したのであった。

Boltzmann による Stefan の 4 乘法則の証明は、A. Bartoli が、輻射が気体のように物体へ圧力を及ぼすとすれば第二主則と熱輻射が矛盾しないことを論じたのに示唆されたものである。彼は同様の思考実験により、先ず熱力学的に輻射圧と温度との関係を得て、次いで当時一般にはまだ採用されて居なかった Maxwell の光の電磁論<sup>3)</sup>を利用して、4 乗の法則を導いたのである<sup>4)</sup>。彼の洞察力と勇気

---

の中に、閉じた家の壁に二つの孔があるとき、その後黒幕が有っても無くても遠くから見ると共に同じように真黒に見えるという記述があることをある古代研究家の報告から引用して居る。漠然たる記述にはっきりした優先権を論じるのは無理であろう。

- 1) J. Stefan, Über die Beziehung zwis ehender Wärmestrahlung und der Temperatur, Wien. Ber. 79 B.2 Abt. s. 391–428(1879)
- 2) Boltzmann, Über eine von Hrn. Bartoli entdeckte Beziehung den Wärmestrahlung zum Zweiten Hauptsatze, Wied. Ann. 22. s.31–39(1884) 尚 O. Lummar, Geschichtliches zur Verwirklichung der schwarzen Strahlung はこれらに関して興味ある文献と思われるが、直接見ることが出来なかった。Boltzmann の実験を Lummer は信じていない。
- 3) ラジオメーターで実験的に輻射圧を証明したのは P. Lebedew (1900), Nichols & Hall (1901) である。
- 4) L. Boltzmann, Ableitung des Stefanschen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie, Wied. Ann. 22, s. 291–194(18884)

がよく現われて居る。H. A. Lorentz はこの Stefan-Boltzmann の法則を「理論物理学の真珠」と讃えて居るが、輻射を理想気体と同様に取扱う点など後のいわゆる Lichtquantengas に通するものがあり、若い Wien 等は大いに影響を受けたのであった<sup>1)</sup>。

## 6. 国立研究所に於ける熱輻射の実験的研究の開始<sup>2)</sup>

Wien や Planck の理論的研究の端緒となった熱輻射の実験的研究は、ベルリンの国立物理工学研究所を中心として行われたものであるから、その結果の重大な意義に鑑みて、この実験研究の動機や経過を瞥見して見よう。これは、量子論のように全物理学の基礎に画期的な変革を齎した<sup>もたら</sup>学問が、そもそも如何なる経路を辿って誕生するかを具体的に闡明するものとして、科学史に寄与するところがあるろうと信ずる。

既に §3 に触れたように、国立研究所はその物理部も工学部も、1881 年の 10 月から研究を始めたのであるが、我々の関心を有する熱輻射の問題は、物理、工学両部の熱学及び光学の研究室の協同研究であった。基礎研究を主眼とした物理部も、当分はその頃から澎湃として起った産業技術の諸要求に応じて、全くそれに没頭しなければならなかった<sup>3)</sup>。しかし輻射研究の最初の動機は、工学部の光度単位の設定に関するものであった。

ドイツ瓦斯・水道連盟 (Der deutsche Verein von Gas-und-Wasserfachmännern) は当時なお盛に行われて居た都市の瓦斯灯照明の基礎問題として、光度測定<sup>ガス</sup>の標準に関する混乱を解決しようと数年来努力を続けて居た。元来この瓦斯照明工学の方ではいわゆる標準蠟燭<sup>ろうそく</sup>が光の単位として普く行われて居たのであるが、ちょうどこの時代に勃興して来た電灯照明の方では、Siemens の有名な電気工学者 Friedrich von Hefner Alteneck (1845–1904) の考案した醋酸アミルのランプ<sup>さくさん</sup>を用いて居た。そこで標準蠟燭とヘフネル灯との精密な比較が必要となったわけで、瓦斯・水道連盟では此の仕事を、ちょうど研究を開始した国立研究所に依頼したのである。

国立研究所では直ちにこれを引受けたのであったが、従来の光度計は精度が低

1) E. Mach は彼の Prinzipien der Wärmelehre の 1896 年の初版、其後の訂正した各版共に Stefan-Boltzmann の法則や Wien の変位則に一言も触れて居ず、熱輻射による冷却の法則として不正確な Dulong-Petit の公式のみを屢々取上げて居る。この点 Mach の叙述は適切でない。

2) この節の内容は量子力学史 (『天野清選集』第 1 巻) にくわしく述べてある。

3) これは ZS. f. Instrumentenkunde 13, (1893) s. 113 等にも詳細に説明されている。

くてこの目的に役に立たず，ここに O. Lummer<sup>1)</sup>，E. Brodhun 協力の数年に亘る「光度測定の研究」が着手され，先ず有名な光度計が考案され，それによって両光度単位の比が確定された。瓦斯・水道連盟もその結果に基いて，1890年6月にはヘフネル灯を光度標準として採用した。そこで国立研究所ではヘフネル灯の検定を始めることになったがそのためには一定不変の光度単位の確立が先決条件であった。

1881年パリで開催された第1回電気工業展覧会は，Edisonの電灯を広く普及させる機縁となったが，この際電気会議が開催され，初めて電気単位及び測光問題が国際的に討議された。測光に関してその委員会は仏人 Violle が提議した白金の融点の輻射に拠る光度単位を検討することになり，その後数回の会議で，(1893年のシカゴの会議には Helmholtz も Lummer 等と共に遙々大西洋を渡って出席したのであるが) ドイツ側委員の熱心な反対にも拘らず，結局，Violle 単位の  $1/20$  が標準の燭光 bougie décimale として採用された<sup>しま</sup>。

国立研究所では幾多の困難<sup>2)</sup>を克服して研究した結果，この白金光度単位が頗る非実用的で不精確であるという結論に達した。この研究の道程で輻射を絶対測定するためにボロメーター（輻射計）の製作<sup>3)</sup>に着手し，非常な技術的難関を突破してその完成を見たことは後の熱輻射研究で国立研究所の優位を約束するものとなったのである。

一方この研究に必要な，高温物体の輝度測定は，当然物理部熱学科の高温測定研究と不可分の関係を有って来た。高温測定は，元来 L. Holborn がやって居た，鋼の硬化温度がその磁力に如何なる影響を及ぼすかという問題と，前記の灼熱物体の温度測定により絶対的な輻射の量を十分精確に決定出来るか否かという問題との，両方に跨った目標を有したのである。この目的のために Holborn は，それまで Lummer 等の光度標準の研究を手伝っていた Willy Wien と協同し，Le Chatelier の Element と呼ばれ，今日でも標準的なものとされている白金 白金口

1) Otto Richard Lummer(1860–1925) は 1884 年から 87 年まで Helmholtz の下でベルリン大学の物理研究所の助手を勤めて居たが，国立研究所に転じて光学の領域に活躍した 1905 年以後 Breslau 大学教授。

2) 1 例を挙げると光度単位に用いる純白金であるが，その頃はロンドンの Johnson Matthey Co. のものが商品として最純で，不純物は 0.02% 以下であった。ドイツではそれまではこれより遙かに粗悪であったが，この光度単位の問題で国立研究所の化学部と Hanau の W. C. Heraeus が協力し 0.01% 以下に不純物を除去し，ein entschiedener Erfolg der deutschen Gewerbtätigkeit と喜んだという。ZS. f. Instr. 11. s. 149–170(1891) 参照，Wien も国立研究所に入所して光度単位を手伝ったのであるが，Helmholtz は簡単な装置で実験することが好きで，白金の加熱も瓦斯でやらせたので湿度が安定せず苦しんだという。

3) この製作の苦心は ZS. f. Instr. 14. s. 261(1894) から詳細に知ることが出来る。今日では熱電対が進歩したため余り用いられないが初期には殆んどこれであった。(17 頁註 2 参照)

ヂウム (10%) 熱電対を空気温度計と比較して、初めて 1430°C に達する高温まで検度を行った<sup>1)</sup>。(従来 Le Chaielier は、彼の熱電対の動電力と温度との関係を決定するのに、Violle の定めた各種金属の融解点をそのまま利用していたので不精確なものであった。)この Holborn-Wien の詳細な研究は、単に高温度目盛の画期的進歩として、彼等自ら報告したように「技術の多くの部門にも甚だ重要であった<sup>2)</sup>」ばかりでなく、その後の熱輻射研究の準備作業としても、輻射の温度を精確に決定する手段を提供するものとして、極めて有益であった<sup>3)</sup>。ここに光度標準と高温測定の研究が互に提携して、その頃物理学界に注目の的となりつつあった熱輻射の問題に努力を傾注する端緒が開かれたのである。

## 7. W. Wien と熱輻射の変位則

Willy Wien<sup>4)</sup>は、1861 年東プロイセンに地主の子として生まれた。彼は少時学問に格別の本能も示さなかったが、農業にも不適當で、当時として生活に余り当てのなかった物理学を生涯の天職として決定するまでには長い間迷っていたことが回想記に興味深く書かれている。1882 年から 86 年にかけて Göttingen, Heidelberg 及び Berlin に遊学したが、其際 Helmholtz や Kirchhoff の影響の下に、金属の刃形の端で光が廻折する場合の実験で、それが刃形の物質に依って異なるという珍しい現象を見出し<sup>5)</sup>Helmholtz にも認められてベルリン大学の学位論文となった。“Untersuchungen über die bei der Beugung des Lichts auftretenden Absorptionserscheinungen” と題するその Dissertation<sup>6)</sup>の終りにテーゼとして「I. 現代に適する唯一の哲学は、Empirismus と Idealismus とを首尾よく統一することに存する<sup>7)</sup>。II. 理論物理学のより深刻な完成は、その基礎を分子論にもたなければならぬ。III. 光学で得られた観測は、電磁的な光の理論を更に構成して行くに際し、特に電気の本質に関する我々の表象を解明するに適切なものとなる<sup>8)</sup>」と書いているのは、この時代の Helmholtz 門下の若い学徒の関心と予感を

1) L. Holborn u. W. Wien, Über die Messung hoher Temperaturen; Wied. Ann. 67, s. 107(1892)

2) Wien は後に Chemische Industrie に “Ein Pyrometer für technischen und wissenschaftlichen Gebrauch” という小さいパンフレットにこの熱電対の使用法や価格等を書いた広告文を書いている (1895)。

3) 物体の温度を一定にして、一定な光度標準が得られるかどうかこの研究の一つの目的であった。

4) 詳しくは Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien(1864 1/3-1928 3/30) 彼の業績は M. v. Laue と E. Rickardt が彼の歿した際 Naturwissenschaften 17. s. 675(1928) に書いた Nachruf に見ることが出来るがそれは Wien 自身の回想記等と併せて Wilhelm Wien, Aus dem Leben und Wirken Physikers, Leipzig(1930) に収められている。

5) この現象は大きな角の廻転で起るもので今日でも理論的に十分解明されていない。

6) Wied Ann. 28. s. 117(1886) にも同一内容のものが発表されているがテーゼはない。

7) Wien は Dilthey や Zeller に学んだのでその影響も見られる。

8) まだ Hertz の電磁波の実証は行われて居なかったことは注意されたい。

物語るものとして興味深い。

Wien は 1889 年国立研究所に入って Helmholtz の助手となり、92 年にはベルリン大学の私講師を兼ねた。彼は当時最も活発に論じられた Maxwell の電磁論に努力を傾注し、Poynting の出したエネルギーの流れに関して “Über den Begriff der Localisierung der Energie”<sup>1)</sup> という長い論文を書いたが、前述の通り、光度標準や高温測定に従事したことも機縁になって、ここに Boltzmann の Stefan の法則証明以来、理論的にも極めて豊かなテーマを供するよう見えた熱輻射の問題へ注意を向けたところが幾許もなく、大して勞せずして、1893 年有名な 変位則 の確立となり、96 年の分布式発表に及んだ。しかし、黒体輻射の実験は Lummer と共同で取掛ったばかりで国立研究所を去り、Aachen の高等工業学校へ転じ、そこで陰極線やカナル線の優れた研究を開始した。Hertz の影響等で、陰極線の本質に就て波動説が優勢だったドイツで逸早く粒子性を認めたのは Wien の功績である<sup>2)</sup>。その後 Giessen 大学を経て Würzburg に転じ、第一次世界大戦当時大学総長も勤めたが、1920 年から 28 年に歿するまでは München 大学の教授であった。カナル線研究ではドイツ第一の権威者で、1922 年（大戦当時の科学奉仕で真空管を製造した時の経験を利用し）高速真空ポンプの偉力を発揮させて、カナル線の荷電粒子と中性粒子の発する線の区別を確立した如きは、Wien のような理論と実際両方面の才能に恵まれた人にして初めてなし得る Meisterarbeit であるといわれる。晩年には Schrödinger が提出した波動力学に深く関心を抱き、陰極線の廻折を実験していたそうであるが、初めて粒子性を主張してから 30 年後に波動性の証明に努力したのはこの間の学問の変遷を一身に経験したのものとして興味が深い。

Wien は早く優れた業績を挙げ、1911 年には熱輻射研究の功績で Nobel 賞を受けたので、英国へ渡った際は、もっと年寄りだと思っていた彼が案外若いので驚かれたそうである（Wien は Planck より 6 歳若い）。

彼はいかにもドイツ人らしい風貌で、その人格と識見に依って学会にも枢要な地位を占めたが、Annalen der Physik を編輯し、Harms と協同で監修した Handbuch der Experimentalphysik の刊行も晩年を飾る事業であった。

1) Wide, Ann. 45 s. 685(1892)

2) ‘Die elektrostatischen Eigenschaften der Kathodenstrahlen’ Verh. d. D. Phys. Ges. s. 165(1897) の結論に見られる。

話は元に戻って 1893 年 Wien は「黒体輻射の熱理論の第二主則に対する新しい関係に就て」と題する論文をベルリン学士院に提出し、Helmholtz がこれを朗読して呉れた（Wien は一生忘れられない喜びとして居る<sup>1)</sup>）。その当時は、輻射そのものへ熱力学を適用することはまだ一般的には承認されて居らず<sup>2)</sup>、Helmholtz も Wien の論文を見るまでは可成り懐疑的な態度を取って居たし、Lord Kelvin の如きは、Wien の企てを評して、‘Thermodynamics are going mad’ とまで言い、一生その説を変えず、1904 年にも Wien に、空虚な空間へエントロピーの概念を適用してはいけないと話したそうである<sup>3)</sup>。しかし若い Wien には、熱の構成部分としての輻射へ、熱力学を適用出来ることは殆んど自明に思われたという。ここにも新旧時代の推移が窺われ、熱力学の偉大な建設者達にも、歴史の変位則は例外を措かないことを感ぜしめる。

前に述べたように灼熱した物体の温度が上昇するにつれてその発する輻射が著しく光輝を増しつつ次第に短波長へ移って行くことは、高温作業をするものには古くから広く知られて居た事実であるが、Ampère の如き学者は既にこれを理論的に考察して居り、Kirchhoff も明瞭にこれを叙述して居る。19 世紀の 60 年代から 80 年代の終りにかけては、多数の実験家がこの法則を探究した。その中で特筆するに足る貢献があったのは、後に動力による飛行機の完成に最初の成功者となって世間的にも知られたアメリカの優れた実験物理学者 Samuel Pierpont Langley(1834–1906) であった。彼は、古く A. F. Svanberg に依て考案され(1849)ては居たが余り實際化されないで居たボロメーター<sup>4)</sup>の輻射測定に対する重要な意義を認めて、その改造を成し遂げ(1883)、赤外線研究の画期的な開拓者となった。Langley は就中太陽のスペクトラムや、煤を塗った銅の種々の温度での熱輻射エネルギーの分布、孤光のそれ等に、従来とは格段の差のある優れた業績を発表し、その方法や結果は当時の他の学者の典拠となって居た。(ただ彼の結果は波長の測定の点で極めて不十分であった。そのために一部分を除き彼のエネルギー分布は岩塩プリズムの分散そのままに発表された。これが Rubens や W. Michelson の

1) Wilhelm Wien, Aus dem Leben s. 16–17.

2) 稍以前のことはあるが Maxwell はその名著 Theory of Heat で “We must bear in mind that temperature is a property of hot bodies and not of radiations, .....” と書いた。E. Wiedemann, Wied. Ann. 34. s. 447(1888); 38, s. 487(1888) は既に輻射に対して温度の概念を導入するの必要を指摘して居た。

3) Wien, Aus dem Leben. 及び Die Entwicklung von Max Plancks Strahlungstheorie. Naturwiss. 6, s. 203(1918) 参照。

4) Bolometer はギリシア語の βαλη (放射) から来た述語で温度による電気抵抗の増加を利用した輻射計である。θερμός (熱) πυρ (火) を語源とする Thermometer, Pyrometer の如くである。

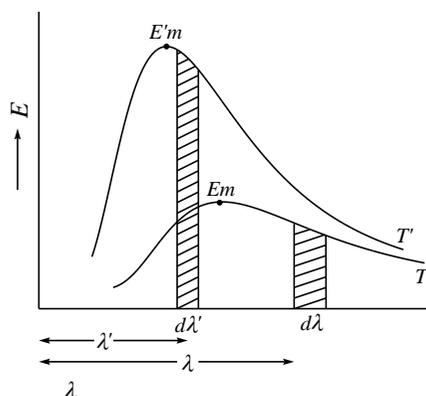
誤解を起し  $\lambda_{\max}^2 T = \text{const.}$  という誤った式の根拠とされた。)

Langley のほか W. de. W. Abney 及び Festing の白熱電灯のスペクトラム研究 (1884 年), J. Stössel の白金線を電熱した場合の種々の温度での分光光度測定など, 時代の要求に応じた研究であるが, 特に, H. F. Weber は白熱電灯の物理的理論を建てると称して, Langley 等を含む従来 of 研究者の材料から, 純経験的に熱輻射の分布式を作り, エネルギーの最大密度に相当する波長  $\lambda_{\max}$  は, 絶対温度  $T$  に逆比例して変位する ( $\lambda_{\max} T = \text{const.}$ ) という規則を導いた (1888)。R. v. Kövesligethy も異なる分布から同じ規則を得た (1885, 87, 90)。この、 $\lambda_{\max} T = \text{const.}$  なる式こそ Wien が以下に述べるように理論的に演繹した変位則の特別な場合に外ならない。

Wien は, 従来 Boltzmann によって証明されて居た, いわゆる Stefan-Boltzmann の 4 乗法則は, 全輻射のエネルギーに関するもので, 熱輻射のスペクトラム中の各波長に就ての法則が未だ得られて居ない点を補足しようと思立った。そして極めて巧妙な思考実験を考案して目的を達したのである<sup>1)</sup>。

彼は先ず予備定理として, 空洞内の全体の輻射エネルギー密度が等しい場合には, 各個の波長のエネルギー密度も等しくならねばならないことを, 思考上の可逆過程に第二主則を適用して証明して分布が常に黒体輻射となっていることを示す<sup>2)</sup>。次に輻射を閉じ込めた空間の容積が変化し, エネルギー密度が増減する場合に, 壁の運動によって輻射線に生じる Doppler 効果を考えて, 波長  $\lambda$  の変化に対する微分的関係を得る<sup>3)</sup>。これをエネルギー密度の変化の微分関係と併せて, それぞれの積分から。

$$\lambda^4 \phi = \lambda^4 \phi_0$$



第 1 図 Wien の変位則

温度が  $T$  から  $T'$  へ上昇すると横座標は  $T/T'$  の割合で縮まり, 対応する縦座標は  $T'^5/T^5$  の割合で増す。波長範囲  $d\lambda$  は  $T/T'$  の割で縮まる。この曲線が囲む全面積は  $T'^4/T^4$  の割合で変わる。

1) 数学的に云えば, これまで波長 (正しくは振動数) と温度との二つの変数の函数であった輻射密度を一変数の函数に還元したと云える。Planck, Warmestrahlung, s. 69-70

2) 量子論の初期に提出された P. Ehrenfest の Adiabatenprinzip (断熱原理) はこの Wien の考えからも示唆されている。

3) Balfour Stewart は初期の輻射論に優れた研究をしたが, Doppler 効果に依って熱力学の第二主則が破れはしないかと考えて実験したという。A. Sohuster, Progress of Physics, p.21. による。

## Wien 変位則の実験的証明

(Lummer-Pringsheim, Verh. d. D. Phys. Ges. 1. 1899)

絶対温度	$\lambda_n$ in $\mu/s$	$E_m$	$\lambda_m T$ $\mu.deg$	$E_m T^{-5} \times 10^{17}$
1646	1.78	270.6	2928	2246
1460.4	2.04	145.0	2979	2184
1259.0	2.35	68.8	2959	2176
1094.0	2.71	34.0	2966	2164
998.5	2.96	21.5	2965	2166
908.5	3.28	13.66	2980	2208
723.0	4.08	4.28	2950	2166
621.2	4.53	2.026	2813	2190
		平均	2940	2188

の関係が出る。これに温度  $\vartheta$  に関する Stefan-Boltzmann の法則

$$\vartheta^{-4}\phi = \vartheta^{-4}\phi_0$$

を適用して結局

$$\lambda\vartheta = \lambda\vartheta_0$$

なる変位則 (das Verschiebungsgesetz) を得たのである。

この Wien の論文は、例えば輻射線を三つの垂直方向へ分けて論じる点等にも欠陥<sup>1)</sup>がないではないが、Bartoli や Boltzmann の先例ありとはいえ、当時まだ実験で証明されて居なかった輻射圧を大胆に利用して、熱力学的可逆過程を構成した点、殊に Doppler 効果の巧妙極まる適用ぶりなど、正に歴史的価値あるもので、Wien の才能を遺憾なく発揮していると言えよう。

翌年 Annalen der Physik に出した「輻射の温度とエントロピー」(Temperatur und Entropie der Strahlung) という論文は一般に輻射の熱力学的本質を明らかにして電磁力学の立場から議論を精密にしたものである。従来 Kirchhoff や Boltzmann は熱輻射へ第二主則を適用したが、輻射そのものへ温度の概念を直接適用することを提案したのは前述の通り E. Wiedemann である。これに対して Wien は更にエントロピーの概念をも適用したのである。またその序文に物体から完全に解放された時にも、輻射の温度を輻射自身の状態から決定する可能性は、Kirchhoff の

1) Wien は Wied. Ann. 52, s. 132.(1894) で上記の論文を詳細にしたがこの点には触れず、M. Thiesen, Verh. d. Phys. Ges. 2. s. 65(1900) が訂正した。この問題とピストンの速度が任意に大きい場合については M. Abraham, Ann. d. Phys., 14. s. 263(1904) 及び Theorie der Elektrizität II. s. 310 以下参照。尚 Planck の Warmestrahlung の記述が有益な参考となる。それは坂井卓三、熱輻射(岩波講座、物理学)にも見られる。

定理から出る一つの結論として、温度一様の空洞の輻射を利用すれば得られるとし、黒体の輻射を安定な熱平衡の状態として定義した。これは後の彼と Lummer との共同論文の眼目を述べたものとして、国立研究所の実験に決定的な意義をもったのである。

## 第3章 熱輻射分布法則の実験的理論的研究

### 8. 黒体輻射の実験

この頃 Hannover に居た Friedrich Paschen(1865–1947) は固体の輻射法則の探究を明確な目標とし、先ずその予備的実験として、スペクトラル・ボロメーターの改良、螢石や岩塩のプリズムの分散率の決定、鋭感検流計(感度  $3.3 \times 10^{-12}$  amp. astatic のもの)の考案のような測定装置の基礎的研究から、空気中の  $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2\text{O}$  による輻射線の吸収等の周囲条件の検討に至るまで、ちょうど Langley の場合のように極めて良心的に一步二歩と困難を解決して行った。1895 年には高等工業学校の物理学及写真学の講師となり研究を進めたが、彼 Paschen は黒体の理論的重要性は認識し乍らも、空洞輻射が黒体輻射と理論上同等なものである点を洞見し得なかったので、酸化鉄を初め、煤、白金、炭素棒等の熱輻射を測定し、それを黒体に近い順序に配列して、それから鋭い洞察力を働かせて、黒体の法則を発見しようという様な迂路を探らなければならなかった。

しかし彼は、先ず任意の波長  $\lambda$  に於けるエネルギー密度  $E$  と最大密度  $E_m$  との比  $E/E_m$  が、すべての温度で  $E/E_m$  の同じ函数となることを見出したが、これは Wien の変位則に相当するわけである。更に彼は分布式の形式として、

$$E = c_1 \lambda^{-\alpha} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$$

を見出し  $\ln E$  は等色線として  $1/T$  の直接函数となり測定の内挿外挿を容易にし、高温測定を簡単に公式化する可能性を開拓したのである。Paschen の見解の中には、すべての物体の熱輻射はただ常数を異にするのみで黒体輻射と同型の上式に従う、というような不正確な意見も見られ、実験に就ても後に国立研究所の側から批評を受けた。それにも拘らず、彼が固体の輻射に重要な材料を提供して貢献のあったことは否定出来ない。後には分光學上の功績も認められ、1924 年から国立研究所の総長に任ぜられたが、1933 年の政変で、ユダヤ人の故を以て退職、客員となりナチ学者 Stark が代った。

さて国立研究所では前述のように Lummer 等が中心となって、光度単位から熱輻射へと研究が進められつつあったが、彼等も亦個々特殊な輻射体の研究が効果

の少いことを認め、白金の表面に金属酸化物を塗布することによって黒体に近づける等の方法を試みたが成功せず、ここに黒体条件は根本的に考え直されることになった。

この課題を解決したものが1895年のWienとLummerの協同論文「絶対的黒体の輻射法則を検証する方法, Methode zur Prüfung des Strahlungsgesetzes absolut schwarzer Körper」である。

彼等は云う、「TechnikにもWissenschaftにも均しく重要なこの問いに非難の余地無く解答し得る為めには、先ず絶対的黒体の輻射を研究し、且つこの理想的黒体に代るべき方法を見出さねばならない」。即ちWien-Lummerが探った方法は、等温度の壁に囲まれた空洞に小さい孔を開け、そこから輻射を取り出すことであって、後から考えると一見極めて簡単なこと乍ら、Laueも評するように、これはコロンブスの卵であって、実験家からは顧みられなかった解決案であった(§5参照)。この着想はBoltzmannにも見られ、この頃には多少とも他の研究者にも感付かれ始めたことであるが、しかもWien等が初めて空洞輻射を実現した栄誉を担う所以は、彼等がこの問題の重要性を強調して学界に認識させ、実際的な球状空洞の例について、小孔に依て生ずる誤差の程度まで明確に計算して自ら実験に着手した点にある<sup>1)</sup>。この方法の採用によって初めて黒体輻射の実験は軌道に乗り、今日もなお標準的なものとして用いられている<sup>2)</sup>。

Lummer-Wienは1896年の初めから協同して実験を開始し、600°Kまでは硫黄の温槽中に銅の空洞を入れて、その中から発する輻射を測ることとし、より高温ではシャモット炉に入れ、瓦斯で1400°位まで加熱し、その温度は以前にWienがHolbornと共に空気温度計で検度して置いた白金白金ロヂウム熱電対で測ることにし、予備実験に着手した。

## 9. Wienの熱輻射分布式

その頃Wienは、前年の未発見されたばかりのRöntgen線をベルリンの病院に関

1) Wied. Ann. 56. s. 451(1869), Chas. E. St. JohnはWied. Ann. 56巻のWien-Lummerの論文の直前に、Über die Vergleichung des Lichtemissionsvermögens des Körper bei hohen Temperaturen, und über den Auerschen Brenner, Wied. Ann. 56. s. 433-450(1895)で、逆に特殊の輻射体を研究して居る。彼は種々の物体の輻射能を比較するため順次に一つの炉に入れて熱したところ、総てが等しい光を発したので、この偶然的発見に促されて、その理由を正しく認識し低温の陶器管を測定直前に挿入して炉壁の輻射を遮り、黒体化を避けて測定した。論文の表題から知れるように彼も照明の問題に関連して研究したのであるが、斯く同じ様な研究が文字通り踵を接して現れたことは当時の技術の要求が背景にあることを認めざるを得なくする。

2) 白金の凝固点も約40年の後黒体条件の実現を俟って初めて価値ある光度標準となった。

係して研究を始め、当時困難であった真空技術を習得するのに忙しかった。この夏には Holborn と共に München へ派遣され当時空気液化を完成して冷凍工業に一新紀元を画した Karl Linde の工場低温測定を行った<sup>1)</sup>。その結果、今迄空気液化の器械が塞るのは固形窒素のためと想われて居たのが実は固形炭酸に過ぎないことを見出したのもいかにも初期らしい(窒素の凝固点は  $-210.5^{\circ}\text{C}$  であるが固形炭酸は  $-72.5^{\circ}$  で出来る)。しかし、熱輻射、X線、液体空気(翌年は陰極線、カナル線)と当時の最新の重大問題に一時に手を出して業績を挙げて行った Wien の才能には驚く外はない。他方では国立研究所の実験の傍ら Paschen の研究の進捗にも刺戟され黒体輻射の分布式を理論的に演繹しようとして企てたのであった。その結果が論文“Ueber die Energievertheilung in Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers”，黒体の発射スペクトラムに於けるエネルギー分布に就て Wied. Ann. 58, ss. 662-669(1896)である。

既に 1887 年(後にモスコウ大学の私講師になった)Wladimir Alexandrovitsch Michelson という人は、熱輻射分布式の理論的導来を企てた。彼は空洞中の輻射を考察し乍ら、固体のスペクトラムの連続性は、固体を構成する「原子の振動の完全な無秩序性に」由来するから、これは確率計算の問題であるとし、この原子群が Maxwell の速度分布則に従い、その振動数がそれぞれ各原子の瞬間の速度に比例すると仮定して分布式

$$E_{\lambda} = B_1 T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{c}{T\lambda^2}} \lambda^{-6}$$

を導いている。これを彼は Langley の結果と比較したりして居るが、それは誤解である。この考察には気体と輻射とのアナロジーが極めて顕著であって、偶然ではあるが光量子のアイデアは寧ろ粗笨とも云うべきこの研究の中にも胚胎して居ることを見逃せない。

しかし Michelson の式は、H. F. Weber によれば、実験と合わない<sup>2)</sup>。そこでは

- 1) Wied. Ann. 59. s. 213(1896) 水素温度計と比較した白金抵抗線及鉄コンスタンタン熱電対に依て測った。彼等は酸素点を  $-182.3^{\circ}\text{C}$  としたが今日の値と  $0.67^{\circ}\text{C}$  しか差がない。(Wien の多方面には感嘆するが、後年彼はもっと成功の見込をつけて仕事にかかる方が有効だったと回顧している)
- 2) Weber はここに引照された Untersuchungen über die Strahlung fester Körper (固体の輻射に関する諸研究)という論文の中で「エヂソン・ランプ及び新しいクルト・ランプの炭素」の輻射分布式として経験的に

$$E = \frac{c\pi}{\lambda^2} e^{-\frac{aT}{b^2 T^2 \lambda^2}}$$

の形を出し、 $\frac{\partial E}{\partial \lambda} = 0$  の条件で  $\lambda = 0$ 、 $\lambda = \infty$  及び後の Wien の変位則に相当する  $\lambda = \frac{1}{bT}$  で、これが満足されることを示している。「黒体」ということは少しも言っていない。しかし Rayleigh 卿は、Weber のエネルギー分布式は

## Weber は実験式

$$E_\lambda = C \frac{1}{\lambda^2} e^{aT - \frac{1}{b^2 T^2 \lambda^2}}$$

を提案したのであるが、この式からは前述の通り  $\lambda_m T = \text{const.}$  という法則が正しく出るのに、Michelson の式からは  $\lambda_m^2 T = \text{const.}$  が出て、理論的に承認出来なくなる。又 Lord Rayleigh も輻射式演繹の基礎となる原子の運動量の分布を考えて見ると Weber の式の方が簡単な分布から出るからその方が優<sup>い</sup>って居るとした。

しかし Wien は、実験曲線が似て居る点から見て Maxwell の速度分布則を利用することを Michelson の glücklich な思想として、先ず空洞中に適当な気体を想像し、その発する輻射、即ち振動の波長は分子の速度のみに依り、その強度はこの速度の函数であると仮定して<sup>しま</sup>う。これは随分問題になる大胆な仮定ではあるが、Wien は熱力学だけからでは輻射の分布式は出ないと考えたので、差当り簡単な仮定をしたわけである。この結果、波長が  $\lambda$  と  $\lambda + d\lambda$  の間にある輻射の強度  $\varphi_\lambda$  は、1. この週期の振動を発射する分子の数に比例し、2. 速度の函数、従って  $\lambda$  の函数と比例する。即ち、速度分布則から、 $v$  と  $v + dv$  の間の速度を有する分子の数が、 $ve^{-\frac{v^2}{a^2}} dv$  に比例 ( $a$  は平均速度に比例し、従って  $a^2$  が絶対温度  $T$  に比例する) することを考慮すると

$$\varphi_\lambda = F(\lambda) e^{-\frac{f(\lambda)}{T}}$$

が得られる。これに変位則を考慮して、

$$\frac{f(\lambda)}{T} = \frac{c_2}{\lambda T}$$

とおき、Stefan-Boltzmann の法則により、

$$\int_0^\infty F(\lambda) e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} d\lambda = \text{const. } T^4$$

とすると、 $F(\lambda)$  を  $T$  の<sup>べき</sup>冪級数に展開して積分し、級数の比較により、結局

$$\varphi_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$$

---

Michelson の分布よりもその根拠とすべき輻射を発する分子運動量の分布が

$$\text{Weber : } \phi(x) = e^{-c^2 x^2}$$

$$\text{Michelson : } \phi(x) = e^{-c^2 x^2} (1 - 2e^2 \lambda^2)$$

で簡単であるから尤もらしいとした。Phil. Mag. 27, p.460(1889)。変位則の点でもよいわけである。

なおこの H. F. Weber という人はその頃からスイス・チューリッヒのポリテクニクム (高等工業学校) の教授で後に Einstein も学生として、この人の講義を聞いた。Einstein の輻射への関心がこの Weber の研究に因縁があるかも知れない。

を得る。これが Wien の輻射分布式で、たまたま Paschen が前述 (p.21) の式を知らせて来たので、Wien も自信を得、その式中の  $\alpha$  は 5 でなければ Stefan の法則に合わない結論したのであった。

この Wien の分布式を導く思想には後に批評されたように粗笨<sup>そほん</sup>な点はある。しかし Einstein も初期の光量子仮説<sup>しほしほ</sup>で屢々この分布式を利用した位で不連続的な見地に立つ極めて新しい内容をもつものであり、その発見法的 (heuristisch) な意義は高く評価すべきである。

1894 年巨人 Helmholtz が歿<sup>ぼつ</sup>して以来、嘗ては彼と共に Weierstrass, Kronecker, Kummer, Kirchhoff 等を擁して華かであったベルリン大学も流石<sup>さすが</sup>に寂寥を感じしめるものがあつた。理論物理学の講座に Planck は居<sup>い</sup>たが、彼には未だ目覚しい業績はなく、大学の声望を保持するには足りなかつた。国立研究所では、精密実験の巨匠で、有名な実験物理の教科書を著した Friedrich Kohlrausch (1840-1910) が Helmholtz の後を襲<sup>う</sup>つて Präsident となつた。Helmholtz は、学問の自由に対しては彼のベルリン大学総長就任演説からも知れるように、夙<sup>つと</sup>に高い見識を有つていたし、何より彼の威大な権威に依<sup>よ</sup>つて<sup>1)</sup>、国立研究所でも純物理学的な研究に対して外部から兎や角掣<sup>とかくせいちゆう</sup>肘を加えられることはなかつたためである。元来 1890 年以来 Bismarck に代つて名実共に新しいドイツの独裁者となつた Wilhelm 二世も學術の振興には熱意を示したのであるが、何分にも時代は正に帝国主義の段階へと転回し、国立研究所に対しても政府当局の統制は次第に強化され、Kohlrausch の力では研究の統制に対する当局の意の有るところを斥けるわけには行かなくなつて来た。これらの事情から Willy Wien は、Kohlrausch の勧めもあり、前述の輻射分布式と温度測定を最後の置き土産として、Ph. Lenard が Heidelberg へ去つた後任として、1896 年秋から Aachen の Polytechnische Hochschule の員外教授としてベルリンを去つたのである。その地で Wien がカナル線等の実験研究に入り、Lenard の置いて行つた真空装置を活用した事情を叙述することは他の機会<sup>ま</sup>に俟たねばならない。

Lummer は Wien が去つたので、この年の秋から (研究所員でなく自発的な協力者となつた) E. Pringsheim と共に、いよいよ黒体輻射の本格的実験に取掛つた。

1) H. v. Helmholtz, Über die akademische Freiheit der deutschen Universitäten, (1877)

黒体炉による測定はこれが最初であって先ず<sup>ま</sup> 1300°C 附近までの全輻射に対して Stefan-Boltzmann の 4 乗法則を数%の精度で確めることが出来た。「これらの輻射の実験は、加熱面を通しての熱の透過という技術的な問題に促されて始められたもの」であり、「その場合には各種の金属や金属酸化物の反射、発射、吸収が大きな役割を演ずる」。それらの研究では、Lummer と Kurlbaum との白金及び特に酸化鉄に就ての実験が主となり、白金光度単位は寧ろ従<sup>むし</sup>となったと報告されている<sup>1)</sup>。(1897-98 年の Reichsanstalt の Tätigkeitsbericht, ZS. f. Instr. 1898 参照)。

分光的な分布は、初めの中はボロメーターの種類によって異なる結果が出たりして、なかなか煩わしいものであったが、次第に改良され、1898 年には電気炉も採用されて、実験は進捗<sup>しんちよく</sup>し、それは Paschen が前に出した結果をとにかく再現するかに見えた。(但し Wien の式と  $\alpha = 5$  で一致させるのはまだ充分でなかった)。

## 10. Max Planck の登場

Max Planck<sup>2)</sup> は 1858 年 4 月 23 日北独逸<sup>ドイツ</sup>の Kiel に生れた。彼の父 Julius Wilhelm von Planck と伯父 Gottlieb は法律学の教授であり、曾祖父 Gottlieb Jacob Planck(1751-1833) はプロテスタント神学者であった。この家系は我が Planck の人格にも深く影響しているのであろう。一語をも苟く<sup>いやし</sup>しない厳正な立論の背後に、民族精神の深さを秘めた敬虔な態度は、近年の彼の講演にも感得される。彼は少年時代父が München 大学に転じたのに伴われてそこで成長し、教育を受けたのであるが、1874 年には早くもその地の大学に学ぶことになった。

München で Plank が勉強した初め、彼の物理学の老師 Jolly<sup>3)</sup> は、当時物理学は殆ど完成の域に近づき、何処かの隅に塵や泡を見付けて検討したり整理したりする仕事しか残って居ない、という意味のことを語ったそうである。Jolly は正にこの弟子が、彼の予想を根本的に覆す大変革の創始者になろうとは夢想もしたかったのであろう<sup>4)</sup>。しかしこうした見方は Jolly 一人ではなく、当時の学者に共通であった。例えば、我々の主題は Kirchhoff の研究から始まったことは前述の通り

1) これは製鋼方面への応用を顧慮したものである。Lummer 等の研究に技術的応用がいつも強調せられているのは、輻射研究が Lummer の個人的な学問上の興味から始められた為周囲の近視眼者流が国立研究所の仕事としてはたして適当かどうかというような疑惑をもっていたのに答える意味もあったのであろう。(Forschung und Prüfung. 50 Jahre Phys. Tech. Reichsanstalt. s. 264, 1937 参照)

2) Planck の伝に就ては『量子力学史』(「天野清選集」第一巻) 23 頁の註参照

3) Phillip Gustav von Jolly(1810-1884)

4) Heinrich Hertz は工科ではあったが、Planck と殆ど入れ換りに München に学び、次第に抑え難くなった純粋科学への熱望を同じ Jolly の溝筈に燃やしたのであった。

であるが、彼の分光分析などは何人の目にも画期的な新しい展望を与えるものであった。ところがこの Kirchhoff 自身は、珍しい現象がそれまでに発見されずに居るとは考えなかったので、根本的な観点を改革するような新事実が発見されるとは思いもかけなかったのである。Maxwell の如き人ですら、実験的な発見は（例えば Rayleigh が窒素の密度を精確に測って、空気から採ったものと化学的に得たものとの喰違いからアルゴンを発見したように）何か精密な測定の残留効果として発見されるであろうと考えて居た<sup>1)</sup>。

Planck は 1877 年ここを卒業後、ベルリンに学んで親しく Helmholtz, Kirchhoff 及 Weierstrass 等の教を受け (1877-78), 厳密なドイツ科学の精神を感得したのであるが、就中有名な Clausius の熱力学の第二主則に関する論文を知って感奮し、München 大学へ提出した学位論文 (1879) も「力学的熱理論の第二主則に就て<sup>2)</sup>」であった。この一般的研究の後、彼は溶液論等の熱力学の特殊問題に向ったが、Kiel 大学在任中、Göttingen 大学の懸賞に応募した論文「エネルギー保存の原理<sup>3)</sup>」は有名な古典的著述となった。この当時は理論物理学の正教授の地位は極めて少なく、Planck はこのために 10 年以上も私講師や員外教授に甘んじなければならなかった。この間には、流星の彼も迷って、Helmholtz の門を叩いたこともあったが、時世の動きを高所から達観して居た偉大な師は、理論物理学の教授が将来必ず増員されることを説いて弟子を諭したという。

ところが 1887 年ベルリン大学では Kirchhoff が歿した。Hertz や Boltzmann はベルリン大学への招聘を辞退したので、その後任の意味もあって、Planck が新に設置された理論物理学の Institut へ員外教授として招かれた。

1892 年には正教授にすすみ、次いで学士院へ選出されるに及んで、ベルリンの物理学協会での交際<sup>4)</sup>は、機関誌の編輯や会の役員たる立場も手伝って、国立研究所の人々と連絡を密接にさせることになった。この事情は彼の従来の研究方面とも相俟って、Planck が当時学界の興味を惹いて居た熱輻射論の問題に専心する機縁となった。その頃の Boltzmann や Hertz の盛名は勿論であるが、彼より 6 歳も若く、一私講師に過ぎない Wien も着々その才能を発揮して業績を示しつつ

1) A. Schuster, The Progress of Physics, 1875-1908. p.9.

2) "De secunda lege fundamentale doctrinae caloris" ss. 61. München(1879)

3) "Das Prinzip der Erhaltung der Energie", ss. 247. Leipzig(1887)

4) これについては Naturwissenschaften 6(1918)195 頁に Max Planck zum sechzigsten Geburtstag と題して A. Sommerfeld が書いて居り、1860 年 Drude の死後は Wien と共に Annalen der Physik も編輯した。

あったのに対し、Helmholtz の死後はベルリン大学の物理学科も淋しいという噂などもあり<sup>1)</sup>、責任ある講座の担当者たる Planck は奮起を促されたことと思われる。しかも彼が ‘ohne Hast ohne Rast. 焦らず休まず’ 地味な理論的研究を迷わずに続けたところに、彼の klassisch な性格が見られ、やがて運命が微笑みかけて来たのである。

## 11. 輻射理論研究と Energetik 論争

Planck は嘗て Kirchhoff が提出して、この頃漸く学者の重要な研究目標となった問題、即ち、物質の特殊な性質に依らない熱輻射の普遍的函数を見出すという目標 (§5) に向って出発した。この点は Wien の場合と異るところはないが、ただ Planck は、音響のそれと似て Hertz の線型振動体が電磁波を発射し吸収し、空洞内に平衡を作ることに依て黒体輻射が成立する。それには古典電気力学を、特殊の仮定をせず充分一般的に取扱えば期待された目的を達し得るであろうと考えた。これは Wien の考え方に比べると全く合理的といわなければならない。そこで、Planck はまず「共鳴に依る電磁波の吸収及び発射<sup>2)</sup>」から手をそめた (1896)。

彼は研究の結果、共鳴体のエネルギーと輻射のエネルギーとの間に、共鳴体の性質やその減衰常数に関係しないような一般的な関係を確立し、多数の自由度を有する後者の代りに唯一つの自由度を前者に置き換えて問題を簡単化することが出来た。しかしこれは単に準備的な解決であって、却って共鳴体は自己の発する輻射のみを吸収するという結果は、この方向から定常的な輻射の性質に関する特殊の条件を得ようとする Planck の最初の希望を裏切ってしまった。その上、共鳴体が周囲の輻射の場に一方的な不可逆的作用を及ぼす、という彼の見解は、この方面でも一権威であった Boltzmann から激しく反駁され、数次の応酬の後、Planck は自然輻射の仮説に依ってそれを補綴しなければならなかった。即ち、純粹の電磁論は Maxwell の式が時間に就て可逆であるから、それ自身としてはエントロピーを考えることが出来ない。そこで丁度 Boltzmann が、熱力学の第二主則の力学的解釈に分子的無秩序性 (molekulare Unordnung) を用いたのとアナロークに、自然輻射 (natürliche Strahlung) の概念を導入し、輻射のエネルギーが、それ

1) 稍後であろうが、Boltzmann, Populare wissenschaftliche Schriften. S. 408. Reise eines deutschen Professors ins Eldorado 中で、彼はアメリカの学者がベルリンの衰微を言い、近年では多く Cambridge や Paris へ留学するが、Boltzmann がベルリンへの招請を断らなかつたら余程よかつたろうと言ったと書いている。

2) Absorption und Emission elektrischer Wellen durch Resonanz, Berl. Ber. 21, März, (1895) 及び Wied. Ann. 57. s. 1 (1896)。なお Berl. Ber. 20. Feb. (1896) 及び Wied. Ann. 60. s. 577 (1891) 参照。

を組成する個々の部分振動へ完全に無規則に分布するものとしたのである<sup>1)</sup>。それにも拘らず目的を達するにはなお未だ「本質的な連結項が欠けて居るに相違ない」ことが明かとなって来た<sup>2)</sup>。

そこで Planck は問題を一度反対の側面から、即ち Boltzmann や Wien がやった様に、熱力学の方から取扱う外はなかった。そこでは彼の第二主則に関する以前の研究が役立って共鳴体のエントロピーとエネルギーとを関係づけることに気が付いた。けれども彼が自ら告白したところに拠ると、当時（1899 年頃）なお彼は余りに現象論的に傾いて居たので、このエントロピーと確率との関係に就て立入って考察することをせず、ただその頃発表されて居た実験的材料にのみ注目して居たそうである。この Planck のいわゆる現象論的態度に就ては二三の挿話がある。

周知の如く、後には Mach 流の Positivismus に反対する大立物となった Planck も、その当時にいくらか批判的な素質を有つ研究者が殆んど誰でも経過したように、一時は自ら断乎たる実証主義者として、Ernst Mach の影響の下に立って居たそうである<sup>3)</sup>。H. Hartmann の書いた Planck 伝に拠ると、恐らく 80 年代の初期のことであろう。彼は、「将来原子論と連続論とが生死を賭した闘争を行う時が来るであろうが、結局に於ては原子論を棄てて、連続的物質の仮定を採らねばなるまい」と書いて居たそうである。もちろん Planck 程の人であるから、単に Mach の追隨者だったわけではなく「力学的自然観を偏狭であるとする Mach とは意見を異にする」という文章も「エネルギー保存の原理」中にも見られないではない。併し同書中に「凡そ使用に堪える物理学上の定義は、定義さるべき概念を究極に於て感覚による直接の知覚から生じた概念に迄還元し、問題の量を多少とも正確に数値で表わすために、ただ直接な観測のみを必要とするようにせねばならぬ」(s. 103) と論じ、また、力の概念は、筋肉感と結びつく点に、エネルギー概念より長所があるとし、「基礎的な物理学的概念は直接に特殊の感覚から導き出される」と Kirchhoff に反対して居る (s. 170-172) のを見ると、1908 年に Mach

1) Ann. d. Physik (4) 1. s. 73 (1900) 参照

2) この辺は Nobel 講演に叙べられている。若し Planck が統計力学の考え方に慣れて居て、エルゴード定理やエネルギー等配分則等を駆使したら、この辺の考え方は全く変っていて、Rayleigh-Jeans の式に行き当る外はなかったであろう。ところが幸か不幸か彼はまだ実際には現象論的で、実験材料が示すような Wien 型の分布をどこまでも眼中に置いていたので熱力学へ移ることになった。

3) M. Planck, Naturwiss. 28. s. 778(1940), Planck の学風や仕事を明確に完成化して居る意味で 古典的 というのもとより誤りではないが、彼が Kirchhoff の流れを汲んで、論文や著述に多分の 記述主義 的傾向を見せて居るのは見逃せない。19 世紀としては彼の学問も新しいスタイルに属して居たのである。

に反対して書いた「物理学的世界像の統一」の中で、力の概念から筋肉感の除去を、一般に言って、物理学の人間の感覚からの解放を、主張する彼とは全く正反対であって、我々を驚かすのである。我々はこの事実によって彼のような古典的に完成した学者にして、なおこの間に経過した思索と探究の歳月が如何に深刻なパトスの経験であったかを知るのである。

このような当時の彼の認識論上の立場は、上述の振動子の場合にもエントロピーの場合にも明瞭に露われて居る。即ち共鳴振動子というような要素的存在を仮定すると、ともすればその力学的機構に就て揣摩臆測に耽り勝ちなものであるが、Planck は彼の共鳴子には殆んど何も特殊な機構を仮定しなかった。かえって彼が強調したところに依ると、熱力学的考察では、総て急激に不規則に変化交替する過程の個別相は問題ではなく、「粗視的 (makroskopisch) な」観測で示されるものだけが重要であった<sup>1)</sup>。当時彼は気体の運動学的理論には万服の信頼をもって居らず、また、少し前に発表された Lorentz の電子論 (1892) を用いれば簡単となるべきものを、やはりそれを顧みないで、迂路をとる結果ともなった。この Planck の方法論に関連して興味ある逸話がある。

1891 年 Halle で開かれた学会で Planck は、有名な化学者であり、エネルギー論の鼓吹者であった Wilhelm Ostwald と轡を並らべ、原子論的立場の闘士であった Boltzmann に反対し Atomistik を排撃した<sup>2)</sup>。このとき三者の論戦白熱したあまり、Boltzmann は昂然として、「エネルギー自体が原子的に分割されて居ないという何の理由があるか」と云い放ったそうである。Ostwald は、その時はもちろん誇張として笑ったが、心中この思想の大胆さに打たれ永く忘れることが出来なかったと告白して居る<sup>3)</sup>。もっとも、この時 Planck が何と評したかは、Ostwald も記憶にないそうである。

ところが数年を経て、1895 年の秋、Lübeck での自然科学者大会では、Energetik の精神を鼓吹する Ostwald の「科学的唯物論の克服」に対し、この度は、Planck は Boltzmann と共に彼の独自の立場からではあるが、一つの反駁を試みて居る<sup>4)</sup>。

1) H. A. Lorentz, Max Planck und die Quantentheorie, Naturwiss. 12. s. 1077(1925)。

2) 後 Planck は Clausius の熱理論の第二主則のために喜んで共鳴し、Ostwald の浅薄な Energetik と戦うべきであったのに、却って Boltzmann の敵手に引入られて原子論を攻撃したことを遺憾として居る。Naturwiss. 28. s. 779(1940)。

3) W. Ostwald, Lebenslinien, II. s. 116. f. W. Gerlach もこの話を引用したがエネルギー原子のイデーは Boltzmann の書物のどこにも発展させられて居ないから、これは議論の拍子の言葉らしいとした。Naturwiss. 24. s. 712 f.(1936)。しかし必ずしもそう言い切れないことは後述の如くである。

4) M. Planck, Gegen die neuere Energetik, Wied. 57. s. 72(1896)。同じ Annalen でこの論文の直前に、L. Boltzmann が、Ein Wort der Mathematik an die Energetik, s. 39-71 を発表して居る。

Planck によると、力学的な自然観には限界はあるがそれは深刻な、或程度まで非常に困難な研究に依ってのみ解決さるべきものである。これに反し、Energetik のような、外見上普遍性を有ちながら、実は空疎な主張は、たとえ矛盾は生じないとしても、それは「その概念が曖昧なために、経験で検証されるような新しい結果を全然出せないからである」と断じ、自己の存在を防衛するために現実の問題を避け、経験の武器で如何とも出来ない形而上学的領域へ逃避するような理論に依って、初学者がディレッタント的迷想到に耽ることを戒めるのは自分の義務である。宜しく偉大な先人の真摯な業績に沈潜して根本的に研究すべきであると説いた。後年の彼の面目は既にここにも躍如として現われて居る。

Einstein は、後に Planck を讃えてこの論説に言及し、「真摯な科学的思索の同志は何人も、ここで反撃されたような（註: Energetik 流の）論文を読過する際に殆んど抑えることの出来ない憤満を、この清新な小論の講説によって慰すことが出来る」と述べ<sup>1)</sup>、また Sommerfeld は、Planck の科学的な個性は熱力学に根ざすが、しかもこの Lübeck の学会では一見 Energetik を弁護しそうな Planck が、よくその弱点を指摘したのは、彼が原子論的方法へ内面的転向を成し遂げる以前だけに興味があると書いて居る<sup>2)</sup>。

## 12. Planck の初期の理論と実験の進展

Planck が黒体輻射の分布式のため実験上の材料を求めた 1899 年の初め頃、最も信頼するに足るデータは、例の Hannover の Paschen と H. Wanner の結果<sup>3)</sup>、並びに国立研究所の Lummer 及び Pringsheim のもので<sup>4)</sup>、それは或程度まで Wien の分布式を裏書きするかに見えた。即ち  $E = c_1 \lambda^{-\alpha} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$  で  $\alpha = 5.2$  とすると Paschen の実験がよく再現されたのである。ただ少し前に H. Beckmann が、Rubens の残留線 (Reststrahlen) の方法で  $24\mu$  の赤外線につき実験し、Isochromat (等色線) について Wien の式の常数が可視範囲で Paschen が出した  $c_1 = 14500$  に対し、 $24250\mu \cdot \text{deg.}$  となって著しく変り、Wien の式は厳密には成立たないと見出して居たが<sup>5)</sup>、実験方法が新しい上に困難なものであるからそれが正しいものであるとはまだ充

1) A. Einstein, Max Planck als Forscher, Naturwiss. 1, s. 1077(1913)

2) A. Sommerfeld, Naturwiss. 6. s. 17(1918)。

3) F. Paschen u. H. Wanner, Ber. Ber(1899)s. 5.

4) Lummer u. Pringsheim, Verh. d. D. Phys. Ges. s. 23(1899)

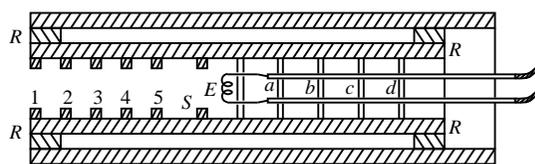
5) H. Beckmann, Inaug. Disert. (Tübingen), Abhängigkeit der Strahlungsintensität des schwarzen Körpers. Hannover bei Edel(1898).

分に認められて居なかった。

このように Wien の分布式が信頼されて居たので、Planck が共鳴子のエントロピーのエネルギーに関する第二次微係数の逆数がエネルギーに正比例する<sup>1)</sup>という簡単な仮定と変位則とから、Wien の分布式が導かれるのを発見したとき、これこそ正しい法則であると信じて熱心に支持したのも無理はなかった。Planck はこの当時 簡単性 を<sup>しばしば</sup>屢々強調したが<sup>2)</sup>後にも「全問題は一つの普遍的自然法則に関するものであり、且つ自分は当時も亦今日もなお、自然法則はそれが一般的であればある程簡単である、という見解を身に徹して確信して居るので、どんな定式化をより簡単なものと見るかという問いには疑問がないわけではなく、終局的に決定することは出来ないとしても、ともかく一時は、自分は量  $R$  がエネルギーに比例するという命題にエネルギー分布則全体の基礎を看取すべきであると信じて居た」と回想して居る<sup>3)</sup>。

これらの Planck の努力は、彼自身も云ったように、<sup>いづ</sup>何れも「光の電磁説の見地からする熱力学第二主則の熱輻射現象に対する意義に就ての研究」として、総括することが出来るが<sup>4)</sup>、前述の如く Boltzmann の批難に鑑みて、自然輻射の仮定をした彼は、Wien の分布式は第二主則を電磁的輻射論へ適用したものに外ならないから仮りにこの式の妥当性に限界が在ったとしても、それは熱力学の第二主則の限界と一致するものでなければならぬとまで主張した<sup>5)</sup>。

こうした間にも国立研究所では、Königlich Porzellan Manufaktur(王立磁器製造所)から多数の枠を備えた耐火管を提供され、ここに実験物理学は、 $1600^{\circ}\text{C}$  近くまで望み通りの精度で黒体輻射を与える装置を得るに至った(Lummer-Kurlbaum)。



第 2 図 黒体炉

耐火物や炉材が熔鉱，製鋼炉に用いられ文字通り重工業の母胎であることは周

1)  $R = \frac{1}{d^2 S} = -bU$ ,  $S$ : エントロピー,  $U$ : エネルギー

2) 例えば論文「ウイーンの分光分布式の一つの改良に就て」を見られたい。

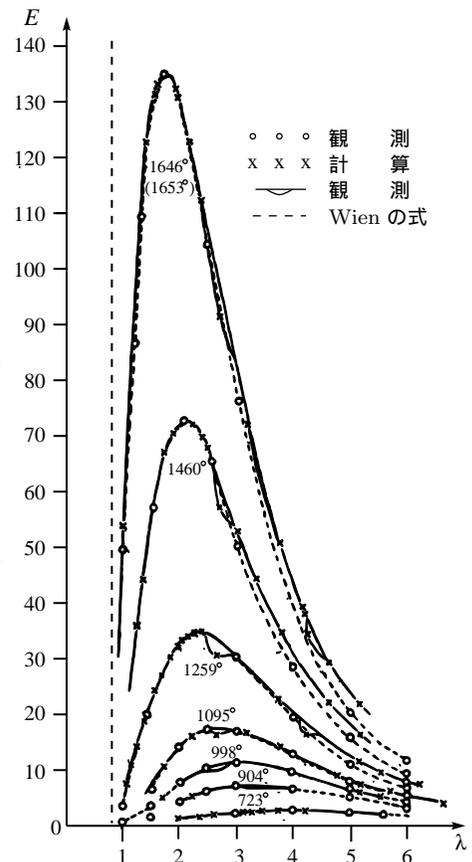
3) Planck の Nobel 講演に依る。尚我々はここで E. Mach が思惟経済の立場から 簡単性 を重要視したことを想起するが、それが Planck では理論的基礎づけの可能性を意味するものへ移行しつつある。後の Poincaré の説とも比較される。

4) Berl. Ber. 4. Feb., 8. Juli; 16. Dec., (1897), 7. Juli (1898); 18. Mai, (1899), 71. Naturforscher Versammlung in München での報告等これらは Über irreversible Strahlungsvorgänge Ann., d. Phys. 1. s. 69-122 (1900), 補遺 6, s. 818 (1901) 及び Entropie und Temperatur strahlender Wärme, Ann. d. Phys. 1. s. 719 (1900) に総括されている。

5) 前註の最後の論文

知であるが、近世初期にはヨーロッパの王や領主はその時代に珍重された東洋の陶磁器を模倣したりして工芸品としての陶磁器を生産して収入の一部とする為に、製造所を経営するものが少なかった。このベルリンの王立磁器製造所はかの Friedrich 大王 が、この流行政策に従い、1763 年民間から買い上げて経営を始めたもので、今日なお世界的名声を保って居る。国立研究所の実験は、この製造所から提供された耐火物に利便を得ること少くなく、前に Wien が Holzkorn と共に研究した空気温度計の耐火用容器もそれで、よく高温研究の目的を達したのであった。

Lummer-Pringsheim は更に長波高温へ範囲を拡張して輻射エネルギー分布の測定を続けたのであるが、その結果以前から多少その傾向が見られて居た Wien-Planck の分布公式 (今日 Wien の分布式と呼ばれるものがこの時にはこう呼ばれていた) からの偏差が波長が増大すると共に次第に著しくなってきた。即ちベルリン大学の教授兼研究所の客員で、赤外線研究の権威者であった Rubens の所有する Sylvin (加里岩塩) のプリズムを用いると  $18\mu$  までは殆んど完全に輻射を透過せしめたので、長波の測定が可能となったところ、Wien の式に依ると等色線ではエネルギーの対数と絶対温度の逆数とが直線関係となるべきものが波長では相当の彎曲が見られた。更に理論上常数たるべき  $c_2$  の値は長波となるにつれ大きな値を採らなければならなくなった。この Wien の式からの偏差の事実は既に 1899 年 9 月に München で開かれた自然科学者大会でも報告されたが、11 月に物理学協会に提出した論文では、今日でも尚屢々見られる分布曲線 (第 3 図) が得られていたのであるが、ここに於て、偏差はもはや観測誤差の範囲を超えるものとなっ



第 3 図 種々の温度  $T$  (abs.) における黒体輻射の分光的分布

ていたのであるが、ここに於て、偏差はもはや観測誤差の範囲を超えるものとなっ

た<sup>1)</sup>。即ち右図は螢石プリズムによる測定で、波長  $6\mu$  まで描かれているが、この範囲でも既に Wien の式に依る計算値は観測値よりも遙かに低くなっている。(観測値が低いと実験にも疑いが起るが、その点都合がよい。斜線の部分は炭酸ガス等の吸収による輻射の損失である。)

Lummer-Pringsheim はこの報告の後半 ( s .230 以下 ) で、「科学的技術的に興味ある問題」として普通に加熱及び照明工学上重要な場合の高温度の決定や各種の灼熱体の性質を研究し、それを黒体 白金の系列の法則から理解しようとして、白熱電灯用の炭素線、アーク灯、ネルンスト・ランプ、アウエル・ランプ、アルガン・ランプ、蠟燭等照明上重要な物質を調べ、「光源の Oekonomie に就ての判断」を得ようとした<sup>2)</sup>。

国立研究所では M. Thiesen<sup>3)</sup> や数学者の Jahnke が、実験結果を整理して実験式を作った。例えば Lummer-Jahnke の

$$E = c_2 T^{5-\mu} \lambda^{-\mu} e^{-\frac{c_2}{\lambda T} \nu} \quad (\mu = 4, 1.3 > \nu > 1.2)$$

の如きは、大体測定の誤差以内で、よく実験を表現することが出来た。しかし我々はこの式が二つの未知常数  $\mu, \nu$  を含むから、任意性が多く、従って理論上の価値が少いこと、及びこの  $\nu$  の値は理論的に基礎づけ難いことを注意せねばならぬ。

### 13. Lord Rayleigh と Wien の式の批判

この頃英国の大物理学者 Lord Rayleigh (John Williams Strutt 1842-1919) は Planck とは見解を異にし、Philosophical Magazine に一文を寄せ<sup>4)</sup>、理論的な側面から見ると Wien の式は殆んど一箇の臆測に過ぎないとし、特に長波長、高温度では、Wien の式によると輻射密度が殆んど止つて了う、という実験で検証され得る難点を指摘した。Rayleigh は分布式の変更を示唆すると云って、得意の振動論から、まず

1) 理論家としてこの問題に対して深い関心を有し、Wien の式と Beckmann や Lummer-Pringsheim の実験との喰い違いを名著 Lehrbuch der Optik(1900) に載せた。(当時 Annalen der Physik を編輯して居た) Paul Drude の炯眼には敬服する。

2) Lummer u. Pringsheim, Verh. d. P. Ges. 1. s. 230 以下及び ZS. f. Instrumentenkunde 1900, s. 147f 及び 1901, s. 114f 参照、また、熱輻射と照明工学の問題は、0. Lummer, Grundlagen, Ziele und Grenzen der Leuchttechnik(1918) に興味ある叙述が見られる。瓦斯マンツルの青白い光もルミネッセンスでなく純粹の湿度輻射であることは、後に Rubens が  $106\mu$  まで測定して確めた。Berl. Ber. (1921), s. 8-27。

3) M. Thiesen, Verh. d. phys. Ges. 2. s. 65-70(1900)

$$E = c_1 \lambda^{-\frac{5}{\nu} \sqrt{\lambda T e} - \frac{c_2}{\lambda T}}$$

4) Lord Rayleigh, Remarks upon the Law of Complete Radiation.

立方体に閉じ込められた空気の振動のアナロジーに<sup>よ</sup>って、振動数が $\nu$ と $\nu + d\nu$ との間の固有振動の数を求め、各振動へ古典統計力学の帰結であるエネルギー等配分則(equipartition of energy)を適用して、輻射密度が $kT$  ( $k$ は Boltzmann の常数)に比例するという、後に Rayleigh-Jeans<sup>1)</sup>の式と呼ばれるものを導いた。もっともそのままでは短波に対して輻射密度が限りなく大きくなって到底問題にならないので、根拠は明示せずに $e^{-\frac{c\nu}{\lambda T}}$ という指数函数項を附加して、この式が経験のある卓越した実験家の手で速かに検証されることを希望した。

Rayleigh の論文は、大家の筆に相応<sup>ふ さ</sup>わしく物理的構想が明快で極めて elegant なものではあるが、畢竟彼自身も言った通り一箇<sup>ひつきょう</sup>の suggestion であった。しかし後に、これが Jeans の手で厳密に古典電気学の立場から基礎づけられ、更に Lorentz , Poincaré , Einstein を含む多数の学者の計算で確められるに及んで、この古典物理学そのものと密接不可分な Rayleigh-Jeans の式と、熱輻射分布の実験的事実との余りにも著しい矛盾は、全古典理論の基礎に致命的な打撃を意味するものとなったのである。

しかもまた、この Rayleigh の構想を原子論に転換し、ただ空洞輻射の固有振動のエネルギーを量子化されたものとするのが Debye<sup>2)</sup>による波動論的立場からの Planck 輻射式の導来法である。Bose-Einstein の統計や、現在の量子電気力学に於ける黒体輻射の分布式の導き方<sup>いえど</sup>と雖も根本の物理的構想に於ては、古典的な Rayleigh の方法から暗示<sup>い</sup>されて居るところがある。

これに対し Planck は 1900 年春の論文<sup>3)</sup>でも、当時次第<sup>かまびす</sup>に喧しくなって来た長波長に於ける Lummer-Pringsheim の結果と Wien の式との喰違<sup>くわい</sup>いに対して、可成り苦しい弁解をしなければならなかった。「観測と理論との衝突」は異なる観測者の結果が一致して始めて疑い無く確立されるものであるが、Wien の式に就ては Paschen のようによく合うものもある。自分は計算を変えても再び Wien の式に達したから、その正しさに対する自分の見解は更に一段と確められたと称した。Wien の式が温度が無限に高く ( $T = \infty$ ) になっても、一定の色で輻射密度が有限値<sup>しゅうれん</sup>に収<sup>しま</sup>斂して去うという難点に対しては、ヘルツ波と 自然輻射 との間には、

1) 28 頁に述べたように、この古典理論の当然の帰結たる関係が、年代的には Wien の式よりも後に英国の学者に依って提案されたことは興味深い。Planck がこの式に迫りながら遂に問題にしなかったのは、彼の身近にあまりにも明白な実験的事実があったからで、また彼の現実への感覚を物語るものであろう。

2) P. Debye. Ann. d. Phys. 33, 1427(1910)。

3) M. Planck, Entropie und Temperatur strahlender Wärme, Ann. d. Phys. 1. s. 719(1900), Eing. 22. März 1900.

長波という 量的な 差違ばかりでなく、秩序性と無秩序性という 質的な 差異があるから、同じようには論じられない。一定波長のヘルツ波の強度は、原理的には限度がないが、熱輻射線のそれは一定限界を超えられないのであろうと書いて居る。Es ist der Mensch, so langer strebt と評する外はない<sup>1)</sup>。

ところがこの年 Paris の万国博覧会を機縁とし、フランス物理学会主催で、国際物理学会議が開かれた。これは物理学としては後の Solvay 会議等に先鞭をつけたもので、我国からも長岡半太郎博士が招かれて“magnétostriktion”に就ての優れた実験報告をした。Henri Poincaré はその劈頭を飾る“Relations entre la Physique expérimentale et la Physique mathématique (実験物理学と数理物理学との関係)”という講演の中で、若し Tycho Brahe が 10 倍も精確な器械を持って居たら Kepler も Newton も天文学もなかったであろう。“C’est un malheur pour une science de prendre naissance trop tard, quand les moyens d’observation sont devenus trop parfaits”と述べ、正に今日はこの段階に達したと注意したが、これは我々の主題に就て言えば、Wien の分布式にも当てはまることである。この Wien の式がこの会議でも、Wien 自身や、O. Lummer 等に依って詳細に論ぜられた。

即ち、この会議の報告及び他に発表された諸論文<sup>2)</sup>に於て、Lummer 及び彼の協同研究者たる Pringsheim や Jahnke は、Wien の分布式が理論的にも根拠薄弱なものであることを論じた。Wien は彼の式の導来に Maxwell の速度分布則を用いて居るが、それは多数の気体分子の存在を予想するものである。ところが空洞中に唯一つの分子があっても輻射は黒体輻射に転化するのである。また、固体の輻射を論じるのに気体分子の法則を用いねばならぬことも疑わしい。そればかりか、Wien は事実は Maxwell の分布則を正しく使っては居ないのである。というのは、その係数  $(km)^{3/2}$  を Wien は何の説明もせずに除いて居るが、これは  $T^{-3/2}$  を勝手に捨てたことになる。更に Rayleigh も指摘した通り温度  $T \rightarrow \infty$  のときに長波に於けるエネルギー密度が有限な極限を有する点も明かに実験に合わないし、またこれは実際ありそうもないことである。

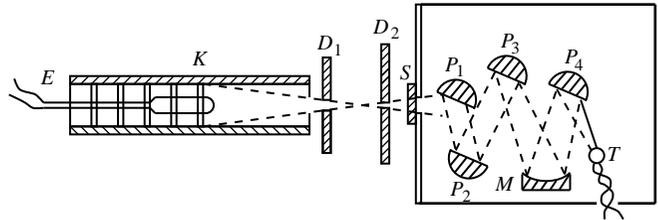
こうした批評に対しては Wien は、第二主則の成立のためには彼の方法も止む

1) Planck 自身 Nobel 講演の冒頭で当時の全体の経過を顧みて、この Faust 中の有名な一句(多少変更して)で述懐している。

2) Lummer-Jahnke, Ann. d. Phys. 3. s. 283(1900); Jahnke-Lummer-Pringsheim, ibid. 6. s. 192-210(1901); 尚 Lummer-Pringsheim, ibid. 6. s. 192-210(1901).

を得ないと答えた<sup>1)</sup>のであるが、彼の分布式が、少なくとも部分的には、勝手な仮定の上に建てられて居ることは明かとなった。

一方、Wien の式に対する Planck の電磁論的熱力学的な論拠も批評を免れなかった。Planck は Wien の式が第二主則と成否を共にするように言ったが、それは Wien 以外のあらゆる式、例えば Thiesen の提出した式が実際にエントロピーの法則に矛盾することを示して初



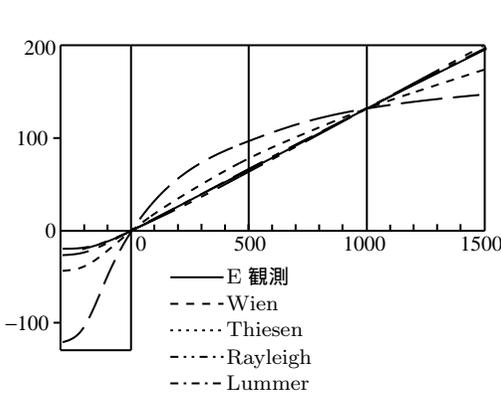
K: 黒体。E: 熱電対。D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>: スリット。P: 反射面。M: 凹面鏡。T: 熱電堆。S: シャッター

第 4 図 赤外線残留線による測定値

めて必然的となる。そのない限り彼の証明を反駁することも不可能ではない。Wien 自身も Planck の 自然輻射 の仮定を批評し、それが不可避的輻射に導く唯一の仮定であるか否かは全く不明であるとし<sup>2)</sup>、また共鳴子相互の影響が考慮されて居ないことも指摘し、Planck の証明が厳密でないと論じた。

また Lummer に依れば、等色線が直線になることを示して Wien の式を裏書きするかに見える Paschen-Wanner の結果は、彼等が反射的な壁を有する輻射源を用うため、実験上の困難と不利があり、信拠し難いものである。

そこで以前に H. Beckmann が残留線を用いて出した常数  $c_1$  の著しい喰い違い



温度 (°C)	E 観測	Wien	Thiesen	Ray-leigh	Lum-mer	Planck (後出)
-273		-121.5	-44.0	-20.0	-27.0	-23.8
-188	-20.6	-107.5	-40.0	-19.0	-24.5	-21.9
-80	-11.8	-48.0	-21.5	-11.5	-13.5	-12.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
250	31.0	63.5	40.5	28.5	31.0	30.4
500	64.5	96.0	77.0	62.5	65.5	63.8
750	98.1	118.0	106.0	97.0	99.0	97.2
1000	132.0	132.0	132.0	132.0	132.0	132.0
1250	164.5	141.0	154.0	167.0	165.5	166.0
1500	196.8	147.5	175.0	202.0	198.0	200.0
∞	∞		194	∞	∞	∞

第 5 図  $\lambda = 51.2\mu$  岩塩残留線による輻射密度測定

1) Lummer-Pringsheim, Verh. d. D. Phys. Ges. 1. s. 225; Lummen, Rapports Paris, p.91.  
 2) 之に対して Planck は論文の脚註で答えている。

(31頁)が漸く<sup>ようや</sup>学者の注目を惹いて来た。Reichsanstalt では客員たる Rubens 教授と Kurlbaum がそれを繰返すことになり、6種の異なる黒体の輻射を螢石 (Fluorit) ( $\lambda = 24.0$  及び  $36.1\mu$ ) 及び岩塩 ( $\lambda = 51.2\mu$ ) の4回乃至6回の反射の残留線について  $-188^\circ\text{C}$  から  $1500^\circ\text{C}$  まで測定したところ、長波高温での喰違いは著しいものがあり、かくて Wien の式は黒体輻射の分光的な分布を正しく表現するものでないことが確定的となった。実験を改良した Hannover の Paschen も手紙によって、 $\lambda T$  の大きいところで Wien の式からの著しい偏れを見出したことを Planck へ報じて来た。もはや事態は論議を許さなくなった。

[注意]  $1000^\circ\text{C}$  で総て<sup>すべ</sup>の公式が同じ値になるようにしてある。(第5図)参考のため Wien と Planck の式から計算した輻射密度の比を波長 (cm) と絶対温度の積  $\lambda T$  の種々の値に就て示せば次表の通りである。 $\lambda T$  が大とならねば比は始ど 1 である。

$\lambda T$	$\frac{E\lambda T(\text{Planck})}{E\lambda T(\text{Wien})}$
0.2	1.0008
0.3	1.008
0.4	1.028
0.5	0.056

## 第4章 量子論の誕生

### 14. 新輻射公式

1900年10月19日ベルリンの物理学協会例会の席上 F. Kurlbaum は H. Rubens と共に行った上述の実験、「黒体による長波の発射に就て Über die Emission langer Wellen durch den schwarzer Körper」を報告したが、当時の記録に依ると<sup>1)</sup>、この講演に続いた活発な討論に際し、プログラムの番外として Max Planck が起<sup>た</sup>って、「Wien の分光分布式の一改良に就<sup>つ</sup>て<sup>2)</sup>」講演した。ここに新世紀の物理学の誕生を先触れする有名な Planck の輻射式が発表されたのであった。

これより先国立研究所の研究者等から実験のデータを供せられて、Wien の分布式が遂に救い難いことを知った彼 Planck は、まず前述のエントロピーの二次函数の逆数  $\frac{1}{d^2 S}$  は、低温波長のエネルギーが小さい場合には、既に彼が Wien の

式<sup>えんえき</sup>の演繹に用いたようにエネルギー  $U$  の一乗に、Rubens-Kurlbaum の実験の如く長波高温でエネルギーが大きい場合には、 $U$  の二乗に、比例すると考えなければならぬことを見出した。そこで一般の場合には、若し「簡単 (Einfachheit)」という点で Wien の式に次ぎ、しかも熱力学及び電磁論のあらゆる要求を満足する全く任意 (ganz willkürlich) な式を作り、それですべての観測結果を表現せようとすれば、上述のエネルギー  $U$  の一乗と二乗の項を加えた式を採用する外はない。これから導かれる輻射式こそ、エントロピーをエネルギーの対数函数として与える (これは確率論から想像される) 式の中でも、最も簡単なものであり、Wien と Rayleigh の両式をも、それぞれ短波 低温、長波 高温での極限として包含する。かようにして今日 Planck の公式として知られる有名な輻射式が半ば実験式としてではあるが導き出されたのであった<sup>3)</sup>。

1) Verhandlungen d. D. Phys. Ges. 2. s. 181. この時やはり輻射の研究家である Emil Warburg が座長であった。

2) Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung(1900)

3) Wien の分布式は一乗に比例するとして  $\frac{1}{d^2 S}$  から積分により  $\frac{dS}{dT} = \frac{1}{T}$  を用い、 $U = ae^{-\frac{b}{T}}$  として導かれ Rayleigh(Jeans)

の式は二乗に比例するとして  $\frac{1}{d^2 S} = \frac{U^2}{c}$  から  $U = cT$  の形に導ける。そこで原の両式を加え合わせ  $\frac{1}{d^2 S} = -bU - \frac{U^2}{c}$

とすれば  $\frac{1}{T} = \frac{dS}{dU} = \frac{1}{b} \log \left( 1 + \frac{bc}{U} \right)$  となり、これから Planck の式  $U = \frac{bc}{e^{\frac{b}{T}-1}}$  の形が出来る。(M. Planck, Nobelvortrag に依る)

これは今日から見れば、不連続的原子論的なアナロジーから導かれた Wien の式と連続的波動論的なアナロジーから導かれた Rayleigh の式とが Planck の式に直接折衷的に加え合わされたわけで、この後 4 半世紀に亘る光の粒子 波動二元性の深刻なる矛盾相剋の論争は、実にここに胚胎したと云うべきである。両者の総合の深い意味は、量子力学に於ける相補性 (Komplementarität) の原理を俟って初めて闡明されたのである。

上述の通り、Planck の有名な輻射公式は主として国立研究所の研究者の実験結果に基いて提出されたのであるが、この点に就て 30 余年も後に E. Gehreke が学界に一つの抗議を提出した<sup>1)</sup>。Gehreke は 1901 年以来国立研究所に在って、Lummer 等の後輩として物理光学を専門とするが相対性理論のような主としてユダヤ系学者が支持した学説を排斥するので知られている。彼は、Ph. Lenard の Deutsche Physik の精神に共鳴し、「黒体輻射のエネルギー分布は実際は如何にして発見されたか」という一文を投じて分布式の呼び方に再考を促したことがあった。

Gehreke に依ると、複雑な抽象や非直観的な形式の競技場のような理論は真にドイツ物理学を培うものではない。輻射の分布式の場合にも国立研究所で Lummer と Pringsheim が非常な努力に依って根本的に基礎づけた物理的発見に比すると、Planck は Lummer 等がグラフで表現するのを常とした曲線に分析的な表現で衣裳をつけただけで 単なる数学的附録 をものしたに過ぎない。Wien の分布式を最初に疑ったのは Lummer であり、当時の Planck の理論的演繹は後に P. Debye が指摘した<sup>2)</sup> ように矛盾した仮定を含んだ極めて不完全なものであった。そこで

Planck の分光分布式 というような「過去った時代の物理学に特徴的な」呼び方はやめて Lummer-Pringsheim のエネルギー分布 と呼ぶべきだと云うのである。Debye はこの Gehreke の意見に抗議して<sup>3)</sup>、Planck が当時のあらゆる障害に打克って、此の式を提出し、遂に量子のイデーに到達したところにこそ真実の理論物理学があり、また大きな勇氣と自然との内面的な共感を有する物理学者としての Planck の面目があるとした。

ところが後に Planck の高弟 M. v. Laue によって「熱輻射法則の 40 年記念に」

1) この一節は「科学」11 巻 p. 306(1941) に発表した。

2) E. Gehreke, Phys. Zeitsehr. 37 s. 439(936)。この中で Gehreke が Reichsanstalt の Lummer の実験室内で内外共に白色の管で出来た装置を見せられて“Das ist schwarzer Körper!”と云われ矛盾を感じたと書いて居るのは面白い。

3) P. Debye, Ann. d. Phys. 33. 1427. (1910)

とのみ表題して Lummer-Pringsheim から Planck の輻射公式発表直後の 1900 年 10 月 24 日の日附で Planck へ宛てた手紙が発表された<sup>1)</sup>。それによると、Lummer 等の  $1\mu \sim 18\mu$  の赤外部の輻射の実験は Planck の公式とは食い違って居り、

$$E = \frac{C\lambda^{-5}}{e^{\frac{c}{\lambda T}} + e^{-\frac{\lambda T}{c}} - 1}$$

とすれば彼等の実験を完全に再現するというのである。従って、この手紙によると、Lummer-Pringsheim は Planck の公式発表後当時には、それを重視せず<sup>2)</sup>、より複雑な分布式を主張したこともあったわけで、この点では Gehreke の提案は不適當である。しかも我々に熱輻射の分布式を語る度毎に科学史の上に恵まれざる実験家の労苦をも想起せざるを得ない。

Planck の輻射公式は、それが実験式の域を脱せぬ限り、彼自身が謙遜して云ったように「幸運にも見つけ出した内挿公式」に過ぎないとも考えられよう。その場合には如何にそれが実験を精密に再現する公式であっても、実験のデータそのものに対しては遂に 数学的附録 以上でないとわれよう。しかし乍ら、Planck が幾つかの数値を示して此の式が従来提出されて居た Thiesen, Lummer-Jahnke, Lummen-Pringshelm の式と「同様に満足に」データを再現すると説明しながら、敢てそれに注目を促した所以は何処にあったか。それは彼自身も言うように、主として公式の簡単な構造、殊に共鳴子の振動エネルギーとエントロピーとが「極めて簡単な対数関係で表わされ、何れにせよそれが、事実によって確められなかった Wien のを度外視すれば、従来提案されたあらゆる他の公式よりも一般的な解釈の可能性を約束するように思われたからであった」。その故にこそ Planck は、「この式を立てたその日から、それに実在的物理的意義を見出そう」と、懸命な努力を開始したのである。若し単なる実験式に満足したならば作用量子の発見は Planck の業績とはならなかったであろう。単なる記述を超えて「現象に権利を与える」ことに！ まことに彼の直観にたがわずこの輻射公式は輝かしい量子の世紀の序曲とはなった。

1) P. Debye, Phys. Zeitschr. 37 s. 440 (1936)

2) これは 1900 年 12 月 12 日受付の E. Jahnke, O. Lummer, E. Pringsheim の Wien 式批判の論文, Ann. d. Phys. 4. s. 225(1901) にも、Planck の式が全然無視されて居ることからも知れるが、却って 11 月 29 日受付の Paschen の論文, Ann. d. Phys. 4. s. 277(1901) が Planck の最近見出した公式は自分の実験と広い範囲でよく合うからそれは偶然とは思われずこの輻射法則こそ真理ではないかと言っている。これは皮肉なことである。

## 15. 輻射式の演繹と Boltzmann , Energieelement の着想

Planck はこの 10 月 19 日の講演で、以前にあれ程まで熱心に支持した Wien の公式を放棄したが、従来それを理論的に導いた彼の演繹の中には何処かに必然性を欠くところがあったに相違ないと考えた。その理由は「益々もって容易に理解し難く、何れにしても証明は難かしいと思われるが」、それは多数の共鳴子の総エントロピーは、総エネルギー及びその変化のみに依存するという仮定は、必ずしも以前に考えたような普遍性を有しないのではないかと疑い、これからエントロピー式の修正を見たのである。

かような暗示から、Planck は一意分布式の物理的基礎づけへと向ったが、問題は自らエントロピーと確率との連関の考察へ、即ち Boltzmann 的 Ideengänge へと彼を導いた。「余の生涯の最も緊張した数週間の研究の後、遂に闇は明け、予感されなかった新たな遠望がほのぼのと見え初めた<sup>1)</sup>」と感激に充ちて回想される時期であった。

エントロピーは無秩序性を規定する。この無秩序性なるものは、(たとえ定常的な輻射場でも) 共鳴子の振動がその振幅と位相を変化交替する不規則さから由来する。従って、共鳴子が定常状態で一定のエネルギーを有すると言っても、それは単に時間的な平均値に就てそうであるに過ぎない。或は多数の共鳴子を同時に考えるならば、或る瞬間に於けるエネルギーの平均値とも考えられる。この見方からすれば、一つの共鳴子の系のエントロピーは、多数の共鳴子へ同時にエネルギーを分配する仕方で決定されることになる。即ちここに Boltzmann が熱力学の第二主則を確率論的に考察した場合の思考法が電磁輻射の理論へも採り入れられることになる。

問題は、一定の基本振動数を有する共鳴子へ総エネルギーを配分する場合に可能な、あらゆる配合の数を求めることに帰着する。この数が共鳴子とその総エネルギーを占める確率、従ってその対数がエントロピーに比例するものと考えられるからである。

しかし、振動数  $\nu$  の  $N$  個の共鳴子にエネルギー  $U_N$  を配分するに当って、 $U_N$  が無限に細かく分割出来るとしては、無限に多くの仕方で配分が出来ることになる

1) M. Planck, Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie (Nobel Vortrag 1921), Physikalische Rundblicke s. 154(1922) 参照

から、計算の手懸りは獲られない。これがためにはエネルギーを「連続的で無制限に分割出来るものではなく、diskretな整数個の有限な等しい部分から合成された量として把握することが必要であり」「これが全計算の本質的な点である」。この有限な小部分を Energieelement (エネルギー要素)  $\varepsilon$  と呼ぶならば、 $P$  を一般には大きな数になる整数とすると

$$U_N = P \cdot \varepsilon$$

とおくべきである。いま自然常数 (Naturkonstante)  $e = 6.55 \times 10^{-27}$  [erg $\times$ sec] を用うれば、この常数と共鳴子の振動数  $\nu$  と掛け合わせて Energieelement  $\varepsilon$  を生じることになる。即ち  $h\nu = \varepsilon$  である。20 世紀に於ける物理学の大飛躍に導火線となった量子はこのようにして誕生したのである！

エネルギー要素のような大胆な思想を、Planck は一体何処から思い付いたものであろうか。これは興味ある問題である。前述の Halle 学会でのエピソードは暫く措くとしても、我々はそこに Ludwig Boltzmann の異常に勇敢な思索が及ぼした影響を無視し得ないのである。まことにエネルギーを不連続 (diskret) なものとするアイデアは、いわば深秘な実在の裂目から幾度となく Boltzmann の頭脳に閃いたようである。1906 年秋自ら生を絶つに至るまで絡始一貫熱烈な原子論の闘士であった彼 Boltzmann は例えば「自然科学に於ける原子論の不可欠性に就て、Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik in der Naturwissenschaft<sup>1)</sup>」(1897) という論文の中でも微分方程式は結局一種の便宜上の極限であると見做し、或は非常に微小な有限な時間部分を考えて時間のアトム (Zeitatom) とし、或は エーテルの Vektoratom を考え、それは従来の原子が有つ不変性を欠くかも知れぬが、「いわゆる輻射エネルギーも物質と似た (即ち光のエーテルが或る Stoff であるというような) 像で表わせることに或程度の蓋然性を認めなければならない」と述べて居る。これは Hertz の実験以来光の波動論が殆んど絶対的とも見られる程確信されて居た時期であるだけに、特に注目に値するのである。

しかしこうしたアイデアは篤実な Planck へ影響するには、恐らく余りに空想的なものと考える人もあろう。もっと直接な関係が予想されるのは、1872 年の気体

1) Ann. d Phys. 60, s.231(1897)

分子間の熱平衡に関する論文<sup>1)</sup>で展開され、77年の熱力学の第二主則と確率論との関係を設立したので有名な研究の際再び取り上げられた、分子の活力( lebendige Kräfte= 運動エネルギー )を不連続的 (diskret) なものとして出発する計算の方法である。

Boltzmann は72年の論文で、偏微分方程式を解くのに出て来る積分を和の形で置き換えるために、古く Lagrange が Miscellanea Taurinensia(1760–61) で弦の振動から出発し、後に  $r$  を大きく、球の質量を小さくして行ったような直観的な方法に倣<sup>なら</sup>った。即ち「二つの空間  $R$  内に非常に多くの気体分子を考え、それら各々はただ次の活力

$$\varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon, 4\varepsilon, \dots, P\varepsilon$$

のみを取り得るとする」。二つの分子が衝突した場合にも「衝突後に各分子の活力は再び  $\varepsilon$  の倍数となるべきである」と<sup>2)</sup>。

もちろん Boltzmann はこの不連続なエネルギーが現実の物理的意味をもつものではなく、計算を容易にするための手段たる 数学的架想 Mathematische Fiktion であることを認めて居るが、その計算の記号法等には後に1917年の Einstein の光量子的輻射論に見られるような構想さえ含んでいる。

この方法は、1877年のエントロピーの確率論的基礎づけの場合にも、再び採用され、その論文の第1章は実に「活力の数は不連続的である。Die Zahl der lebendigen Kräfte ist eine diskrete」と題せられている。この際も計算の困難を避けるためとはして居るが、それが極めて抽象的に見えても、「自然に於けるすべての無限な極限移行以外の何ものでもない……」と論じたのである。

我々は Planck が diskret な Enelgieelement  $\varepsilon$  を導入した最初の両論文でエントロピーと確率との関係という点に就てではあるが、再三この Boltzmann の1877年

1) L. Boltzmann, Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen. Wien. Ber. 66, s. 275–370 (1872) (Wissenschaftliche Abhandlungen Bd. 1. s. 316 f.). Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht. Wien. Ber. 76 s. 373–435.(1877) (Wissensch. Abh. Bd. II. s. 164f.)

2) “Wir müssen daher annehmen, dass unsere Moleküle nicht imstande sind, eine kontinuierliche Reihe lebendiger Kräfte anzunehmen, sondern bloss solche, welche Vielfache einer gewissen Grösse  $\varepsilon$  sind., …… In einem Raume  $R$  haben wir sehr viele Gasmoleküle. Aber jedes derselben soll nur fähig sein, folgende lebendige Kräfte anzunehmen:

$$\varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon, 4\varepsilon, \dots, P\varepsilon$$

Kein Molekül soll eine dazwischen liegende noch grössere lebendige Kraft annehmen. Wenn zwei Moleküle zusammenstossen, so sollen sie ihre lebendige Kraft in der mannigfaltiger Weise verändern. Aber immer soll nach dem Stosse die lebendige Kraft jedes Moleküls wieder ein Vielfaches von  $\varepsilon$  sein”(Wissenschaftliche Abhandlungen Bd. 1, s. 247–348)

の論文を引用し、Boltzmann の思想を輻射を放射吸収する共鳴子に適用することを以て眼目としている以上、不連続なエネルギーの構想もここから示唆されたものと信ずるのである<sup>1)</sup>。

しかしながら、この事実は作用量子発見の Planck の功績を毫も減ずるものではない。彼が Energieelement を Boltzmann の場合のように単に計算の便宜上有限にしたばかりでなく、これを最後まで有限に止ませたこと、これこそ科学の歴史にも比類稀な実り豊かな着想 (Einfall) となった。若し計算の後これを無限小へ極限移行させれば Rayleigh-Jeans の式に帰着する外はないからである。恐らく Planck も最初は極限移行を予想して出発したかも知れないが、 $h$  を自然常数としたときもはや彼の確信は不動であった<sup>2)3)</sup>。

1900 年 12 月 14 日ベルリンのドイツ物理学協会の例会で、Planck は先ず「所謂 Wien のパラドックスに就て」語り<sup>4)</sup>、次いで問題の歴史的報告「正常スペクトラム中のエネルギー分布の法則の理論に、Zur Theorie des Gesetzes der Energievertheilung im Normalspektrum」を講演した。

彼はこの報告では詳細な系統的演繹を省いて、問題解決の本質的な点を明かにすることを主眼としている。即ち 10 月の講演で発表した輻射法則を基礎づけるために一定状態に於ける共鳴子の系のエントロピーはこの状態の確率の対数に等しいこと、各状態の確率は、その状態に相当するエネルギーの配分の仕方の数に比例することを前提として出発する。このエネルギー配分の仕方を有限にするた

1) Planck の輻射式を展開すると、

$$U_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \left( e^{-\frac{h\nu}{kT}} + e^{-\frac{2h\nu}{kT}} + \dots \right)$$

Wien の分布式と同形な各項は  $h\nu$  の整数位を含んで居る。若し右辺から出発すればこれも Energieelement の構想に暗示するものがあろう。(坂井卓三教授の御注意による) 40 頁の Gehreke の文参照。

Planck 自身この展開式を  $h$  の数値計算に利用し、また後に Einstein は熱平衡の場合の平均エネルギーの式として右辺の構想から出発して居る。Solvay 会議 (1911) 及び Verh. d. L. Phys. Ges 16, s. 820(1914)

- 2) Planck の作用量子  $h$  の記号は Boltzmann の  $H$ . Theorem との関係で採用したと自ら人に語ったそうであるが  $H$  は元来 Entropie の頭文字であって Boltzmann 自身  $E$  を用いたこともあるが、エネルギーと混同するのでギリシヤ文字の音便で、 $\eta$  の大文字  $H$  に代えたと聞く。Planck は  $H$  を統計の要素領域の体積に用いている。
- 3) Planck がエネルギー要素を導入した方法はどこまでも形式的であって決してエネルギーの粒子の像などは連想して居ない。彼の論文全体が解析的であってモデルで描こうとしない。これは Planck の理論物理学講義からも受ける印象である。この点に於て Kirchhoff 流の厳密な記述主義が深く影響していることを見逃せない。
- 4) Über das sogenannte Wien'sche Paradoxon. これは Wien がニコルプリズムを二つの黒体の間に置いてパラドックスを生じる思考実験を提出して居たが Wien が未知の現象で補償されるとしたのに対し、Planck はそれに反対し 11 月 2 日の例会で既に真の矛盾でないことを証明した。(Verh. d. D. Phys. Ges. s.206, 1900) がそれを補足したものである。Planck も 10 月から 12 月にかけて必ずしも輻射式にのみ没頭して居たのではないことが分る。誇張した想像を防止する意味で附け加えておく。

めに、エネルギー要素  $\varepsilon$  を想定しそれは自然常数  $h = 6.55 \cdot 10^{-27}$  [エルグ・秒] と共鳴子の振動数  $\nu$  との積であるとした。この大胆な構想の宣言に量子論の世紀は黎明を告げたのであった。

$h$ 、即ち後にいわゆる Planck の常数をこの演繹えんえきの中から普遍的常数として採り上げる勇氣は何処どこから生れたか。エネルギー要素のイデーは「全計算の一番重要な点」ではあるが、なお  $h$  を普遍的常数とする根拠としては 少くとも当時の見透しでは 余りにも不明な点が多くはなかったか。Planck の確信は恐らくこの講演の最後の部分を飾る計画から生じたものであろう<sup>1)</sup>。即ち  $h$  及び Boltzmann の常数  $k$  を媒介として各種の物理的常数を、彼が計算して見ると、その値が当時知っていた実験値いずと何れも実験誤差の範囲で見事に一致したことは、彼にとってどれ程力強いことであったか想像に余るものがある。しかも今日の進歩した実験結果から見ると、各常数に対する Planck の計算値いずは何れもその当時の実験値より真に近く、大きな理論的予言価値をさえ有したのである<sup>2)</sup>。殊にその頃最も興味ある問題の一つであった電子の荷電  $e$  は、Richarz の  $1.29 \cdot 10^{-10}$ 、J. J. Thomson の  $6.5 \cdot 10^{-10}$  に対して Planck の計算は  $4.69 \cdot 10^{-10}$  で今日  $4.80 \cdot 10^{-10}$  とされているのと対照し、大胆な理論的構想が如何いかに高く評価されなければならないかを確認する。

現象を超えてその根拠をなす実在へ迫ったこの態度は、現象論の影響の下にあった嘗てかつの日の Planck から見れば大きな転向であって、エントロピーを原子論的な見地から基礎づけようとする Boltzmann の立場の完全な承認である。彼がこの論文を Boltzmann へ送ったのに対して、返事の手紙で Boltzmann が Planck の開拓した思想の道行に、彼の関心と原則的な賛成を打明けて来たのは、多くの幻滅と失望を経験して来た代償として、特別に価値ある報償であった、と Planck は述懐している<sup>3)</sup>。多年論争して来た兩人が意見一致して融け合った心境は察するに余あまりがある。このようにして単なる思想の架空でない自然常数が熱輻射の実験を通して啓示されて以来 Planck は Realismus の旗幟きし鮮明な擁護者の一人となった<sup>4)</sup>。

1) Planck は既に Ann. d. Phys. 1, 120(1900) でこれより以前、輻射常数、光速度、引力常数を利用している。長さ、質量、時間及び温度の独立な単位を与えることが出来るとした。なお M. Thiesen. Verh. Phys. Ges. Berlin 2.116(1900) 参照

2) Planck はこれらの計算だけを取纏めて「物質及び電気の素量に就て」Über die Elementarquanten der Materie und der Elektrizität. Ann. d. Phys. 4, s. 564, 1901 という論文で発表している。

3) 但し Boltzmann がエネルギー要素に賛成したわけでない。

4) 即ちエントロピーと確率の関係からエネルギー及び物質の全く一定した数値的に与えることの出来る原子化の必然性を洞察するに至り、探究者に依存せず対立して現われる独立な良かれ悪かれその法則を強制する世界の承認に導かれた。M.

物理学の歴史上画期的なこの1900年も暮れて、翌年正月早々、Planckは‘Annalen der Physik’に「正常スペクトラム中のエネルギー分布の法則に就て、Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum<sup>1)</sup>」を送った。ここではエントロピーの構成は上述の通りであるがその計算を詳細にすると共に、電磁輻射の理論の結果とWienの変位則を導入して演繹を厳密にし、黒体輻射の法則を導いている<sup>2)</sup>。

Planckの輻射法則確立後、国立研究所でもその価値を認識し、理論的導き方から見ても、実験的な証明から見ても自然法則の意義を有すること疑いなしとし、この法則の助けを借りて決定された温度はW. Thomsonの熱力学的に定義されたものとあらゆる到達し得る温度で一致するとした<sup>3)</sup>。従ってWienの分布式の限界も明かとなり<sup>4)</sup>、1901年HolbornとKurlbaumは、その等色線を理論の根拠として有名な織條消失型の光高温計を考案試作したが<sup>5)</sup>、それは直ちにSiemensから販売され、今日製鋼冶金の技術に尚盛に利用されて居る。

輻射による温度測定は天体物理学へ応用され、例えばPringsheimは名著Physik der Sonne(1910)を著した。

Planck, Naturwissenschaft und reale Aussenwelt, Naturwiss. 28. s. 779(1940)

1) Ann. d. Phys. 4, s. 553(1901)。なお 4. 564(1901), 6. 818(1901), 9. 629(1902) 参照。

2) H. A. Lorentzはこの理由でこのAnnalenの論文の方が前述の講演より重要であるとする。Naturwiss. 13. s. 1077(1925)

3) ZS. t. Instr. 22, s. 119, 尚 Lummer u. Pringsheim, Temperaturbestimmung hochehitzter Körper u. s. w. Verh. d. Deut. Phys., Ges. 3, s. 36(1901)。E. Machは、パイロメトリーで得られた数を摂氏の目盛へ直すのは、それが空気温度計と共に用いられる範囲に限るとし、「空気温度計の可能な適用範囲を遙かに越した摂氏温度を云々することは全く何の意味もない」と言って居るが(Wärmelehre, s. 64. 3te. Aufl.)、この意見は偏狭で、今日では全く克服されてしまった。

4) 1927年国際度量衡総会で暫定的に採用された国際温度目盛 L'échelle internationale de temperature は摂氏 1063°の金の凝固点以上ではWienの分布式から直ちに導かれる関係を利用し、温度  $t$  にある黒体から発せられた波長  $\lambda$  の単色可視輻射線の強度  $J$  と金の凝固点にある黒体から発せられた単色の輻射線の強度  $J_{Au}$  との比で

$$\log_e \frac{J}{J_{Au}} = \frac{c_2}{\lambda} \left( \frac{1}{1336} - \frac{1}{t + 273^\circ} \right)$$

〔但し  $\lambda(t + 273)$  が 0.3cm 度より大でない範囲に用いる〕

なる式から摂氏温度  $t$  を算出することになつて居る。 $c_2$  は 1.432cm. 度としてある。

5) Holborn u. Kurlbaum, Ueber ein optisches Pyrometer, Berl. Ber. 1901. s.712.

## 第5章 熱輻射論と量子論の生長

### 16. エネルギー量子と学界の反響

Lord Kelvin は、20世紀初頭の物理学の地平線を蔽う暗雲として Michelson-Morley の実験と熱輻射の問題を挙げたと云われる。しかし熱輻射論に於ける Planck の真に開拓的な研究も、発表後数年間というものはその重要性を認識されるに至らなかった。殊に、Planck の功績の核心をなすエネルギー要素の仮説に至っては、学界一般はもちろん、Planck 自身にもその革命的意義が隠されていたかのようである。彼は輻射法則発表後、1906年の著書「熱輻射論」の初版に至るまでは、何等新しい内容ある論文を出さなかった<sup>1)</sup>。

外国の学界は殆んどこれを問題にしなかった。例えば英国では、統計力学の研究者として知名な S. H. Burbury が「Planck の輻射理論は1897年以来ただ細部が修正されただけだ」と1903年に書いている<sup>2)</sup>。今日から見れば奇異の感を禁じ得ない。しかし、物理学の基礎的諸問題を論じた Henri Poincaré の諸著にも、この問題は全く無視されてしまった。それどころではない、1908年に刊行された“Science et Méthode”の中で、Poincaré は Lorentz の電子論の仮説を詳しく紹介しているが、そこには「黒体による光の発射の法則の詳細は、この仮説に依て完全に説明される」とか「この理論は今まで知られていた凡ての事実に説明を与える」とか我々を唾然とさせるような文章が見出される<sup>3)</sup>。Poincaré 程の学者でも量子論を取り上げたのは（後に記述する通り）漸く1911年の Solvay 会議以後である。

エネルギー量子、乃至一般に言って量子仮説が学界から次第に注意されるようになったのは、一方では J. H. Jeans が、古典電気力学の立場から前述の Rayleigh が導いた輻射式  $U = \frac{8\pi\nu^2}{c} kT$  を基礎づけ、古典理論と実験との矛盾を何とか調停しなければならなくなって以来のことである。これから古典物理学をどこまでも固守しようとする学者の絶望的な努力が始まった。

1) Phil. Mag. 3. p. 225(1903)、英国で比較的早く一般講演にこれを取上げたのはユダヤ系でドイツから帰化した実験物理学者 A. Sehuster が1908年に Calcutta 大学で行った講演 The Progress of Physics(1911) 等であろう。

2) 例えば Planck の「物理学的世界像の統一」(1908年)、「力学的自然観に対する新物理学の立場」(1910年)でもエネルギー量子は殆んど取扱って居ない。

3) Science et Méthode ,p. 228 ,254 Flanmarion(1924年版)岩波文庫「科学と方法」, Lorentz の理論が Rayleigh-Jeans の公式しか与えないこと、従って黒体輻射の事実を到底理解せしめないことは周知の通りである。(後出 51 頁)

他方、主として Ph. Lenard に依て確立された光電効果の実験的事実を、スイス Bern の特許局に居た、当時 26 歳の Albert Einstein が、初めて不連続的な光量子の仮説で説明した<sup>1)</sup>のは、正に量子論にとって劃期的な躍進であった。しかしこの Einstein の天才に依て投げられた大胆な一石が、学界に起した波紋の行方を叙述することも、我々は他日の機会に待たねばならない。

ただ我々にとって、最初 Einstein が Planck の輻射論の基礎を Maxwell の理論に見、彼自身の不連続的な光量子の立場とは対立するものと考えたことは注目値する。つまり Einstein は、Planck が輻射法則の演繹中に、Energieelement を導入したことを見落して居たのであって、その意味では Einstein は Planck と独立にエネルギー要素の仮説に達したのである。彼が、Planck の演繹中に、不連続的なエネルギーの仮説が含まれて居ることに気付いたのは、1 年も後のことであった<sup>2)</sup>。それ程 Planck の Energieelement はつつましく沈黙して居たのである。しかし、この Einstein による指摘によって、Planck の演繹は正に両立し得ない連続説と不連続説とを包蔵することが明かとなった。(正確に言えば、明かとなるべきであった)。かくして、Einstein も亦量子論創始の功を分ったのである。

ただ、Planck 自身は、彼の輻射理論が Maxwell の理論に対しこのようなラジカルな対立を含むものとは考えて居なかったようである。1905-6 年のベルリン大学の冬学期の講義といわれる有名な「熱輻射論」の第 1 版<sup>3)</sup>でも、古典家としての彼らしい非常な慎重な態度で書いて居る。即ち、輻射式の演繹では、Energieelement を用いれば「より速かに工合よく、schneller und bequemer」目標に達すると言い、エネルギーと時間との積を次元とする新しい普遍的常数  $h$  を、その次元から、最小作用の原理に倣って作用量子又は作用要素、Wirkungsquantum oder Wirkungselement と呼んだ<sup>4)</sup>。これは相対論的不変量である点でも、Energiequantum より基本的である。Planck は、この常数  $h$  が要素的振動過程に於て、「発射中心で或る役割を演じて居ることは殆んど疑いが無いが、その電氣的方面からの基礎づけには、我々の従来理論は何等詳細な掘りどころを供しない」と述べて居る。しかも進んで古典論との矛盾にまでは言及して居ない。従って、Einstein の相対性理論には直

1) A. Einstein, Über einen die Erzeugung und Veränderung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. Ann. d. Phys. 17. s. 132(1905)

2) A. Einstein, Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption Ann. d. Phys. 20, s. 199(1906) を見よ。

3) M. Planck, Vorlesungen über die Wärmestrahlung, 1. Aufl. §148-9, s. 152-154(1906)

4) この時 Planck が作用量子として  $\frac{h}{2\pi}$  を採用すれば今日の量子力学には尚便利であったろう。

ちに賛意を表して支持し、幾多の論文を発表した Planck ではあったが、却て自身の輻射論と密接な関係ある光量子仮説には、其後も数年間立入った意見を発表して居ない。

ところが、Einstein の光電効果やそれに関聯する現象の理論及び固体の比熱の量子論、後者の Nernst-Lindemann, Born-Kármán, Debye 等に依る発展は、それに有利な実験と共に、少くともドイツでは、相対性理論と並んで量子論を理論物理学の第一線の問題たらしめたのであった。これに対して Planck の輻射法則の演繹は、古典論と量子論の相容れない二つの前提に立つという矛盾を包蔵していることが喧しくなり、また Lorentz<sup>1)</sup>等が光量子に対して提出した迷理は遂に Planck をして彼の輻射法則の演繹を修正させることになった<sup>2)</sup>。しかしその修正は、輻射の吸収が量子的でなく連続的に行われるという、一步後退の方向へ改められたのであって Einstein 等の新鋭な学者には余りに保守的と見られ、一般も credo quia absurdum (不合理なるが故に信ず) で、たとえ迷理はあっても、徹底した光量子論の方に期待したのである。これに対して新しい仮説の健全な成長のためには、行き過ぎた主張は有害であるから経験の事実でどうしても逃げ道が無くなる場合の外は、出来る限り古典力学に密接に関聯させながら量子仮説を構成して行こうという、Planck 一流の態度は「熱輻射論」の第 2 版 (1912) の序文にもよく現われている。

## 17. Solvay 会議と量子論の普及

1911 年秋 (10 月 30 日—11 月 3 日), ベルギーの Bruxelles に第 1 回 Solvay 会議が開催され、独英仏其他から 20 余名の一流学者が招かれて、輻射や量子の理論に就て講演と討議が行われた。Solvay 会議というのは、かの曹達製造のソルヴエイ法の発明者 Ernest Solvay の主催で物理学の尖端的な問題をそれに関する世界一流の学者のみを招待して、非公開で講演、討議せしめ、斯学の発展に寄与しようとして企てられたものであって、この 1911 年を最初とし、大戦の際を除き大体 3 年毎に開かれる新物理学の最も注目されている行事の一つである。

この時の会議は、この後もそうであったように、H. A. Lorentz を議長として進められ、ドイツからは Planck, Einstein, Wien の外 Nernst, Rubens, Sommerfeld,

1) H. A. Lorentz, Phys. Zeitschr. 11, 1250(1919)

2) M. Planck, Ber. d. Deutsch. Physikal. Ges. 13, s. 138(1911), Ann. d. Physik 37, s. 642(1912)

Warburg 等が出席し、英国からは Lord Rayleigh, Jeans, Rutherford が招かれたのである。ところが Lord Rayleigh は一書を寄せて招請を辞して曰く、自分は新しい解決を見出したわけではないが「力学的法則が物体の極微部分に適用されないとする解決策には共鳴することが出来ない。……エネルギー量子の仮説を实在の正しい像と見做すことは困難である」と。黒体放射に就ては Jeans と共に従来実験された空洞放射は真の平衡状態ではない、通常の実験室の研究は究極の裁断を与え得ないとした。

しかるに最初に起った Lorentz は、嘗ては自らも電子論から導いた古典的な Rayleigh-Jeans の放射法則を完膚なきまでに批判したのである。

Rayleigh-Jeans の法則  $E = \frac{2c}{\lambda^4} kT$  は、放射エネルギーの分布に極大値があるという経験でよく知られている事実を全く説明しないのはもちろん、そのエネルギーは温度が格別高くなるとも

$$\int_0^{\infty} \frac{2c}{\lambda^4} kT d\lambda = \infty$$

で無限大になってしまうことは明かである。実験では非平衡状態しか実現されないというような Jeans の逃げ道は、何の積極的な法則も与えない。卑近な例をとれば、一片の鉄が常温で光を発しないという日常茶飯の事実さえ説明出来ないではないか。なぜならば鉄は 1200°C では強く光るが Rayleigh の法則によると、放射エネルギーは絶対温度に正比例するのであるから、室温 15°C では、約 5 分の 1 に相当して光るわけである。放射率を考慮しても、なお暗いところなら明かに光が見えなければならぬ筈である。しかし、こんな事を経験した人は未だ嘗て 1 人もない<sup>1)</sup>。

ところが Lorentz の指摘によれば、Rayleigh-Jeans の法則は古典力学の帰結たるエネルギー等配分則から必然的に導かれる以上、我々は 19 世紀末までの物理学は、上述のような簡単な事実すら説明出来ないと断定する外はない<sup>2)</sup>。

ここに出席した Poincaré は大きな感動を受けて言った。「この会議で論ぜられた新しい研究は、力学の根本概念を疑わしくしたばかりではない。従来、自然法則一般の概念と全く混用されていた一点をも動揺させる。即ち、我々には、その

1) ここに至って前述 48 頁の Science et Méthode 中の Poincaré の言葉が甚だ意外である。

2) たとえ、無機的な現象に限っても我々の身边には如何に多くの未知な、古典物理学では解決の見込のない問題が取捲いて居ることであろう。幼児の質問にすら良心的に答えることは出来ない。これに反して、それらの問題は量子論の応用に依りて大部分理解されるであろう。驚嘆すべき飛躍ではあるまいか。

法則を、なお微分方程式の形で表し得るか否かが問題である」。

Poincaré は、会議終って Paris に帰り、数学的に検討を重ねたが、不連続的なエネルギーの概念を用いずには正しい輻射式は得られない ‘L’hypothèse des quanta est la seule qui conduise à la loi de Planck’ という結論に到達せざるを得なかった。もちろん、実験的に見出された法則は近似式以上のものではないから、従って観測誤差の限界内で Planck の法則と相違し、力学の法則の連続的な組織に導くような法則は見出し得ないであろうか？ この答も亦 non であった。即ち Planck の法則からの小さな、若くは有限な、偏差などは問題でなく Poincaré は決定的、終局的に有限な温度では全輻射が有限であるという単なる事実が、究極的運動が何らかの形で不連続なものであると仮定せしめることを証明したのであった<sup>1)</sup>。

この事実はいたく学界を動かした。Jeans の如き、Solvay 会議の際にはなお古典的立場から、比熱問題を報告したのであるが、ここで遂に転向して量子論の信奉者になった位である。彼自身の言葉に依れば、輻射エネルギーが有限か、無限かということで Newton 力学は所謂 crucial test につけられたのである<sup>2)</sup>。

Planck は Solvay 会議には、一般化された座標  $q$  とそれに応じる運動量  $p$  が確率の要素的領域で

$$\iint dp \cdot dq = h$$

という基本作用量子の仮説で相互に結びつけられていることを根本的なものとして提唱した。しかし、量子的過程は、物質とエネルギーとの相互作用の場合に限り、しかも発射は不連続的であるが吸収は連続的に行われ、空間中は Maxwell の法則に従って伝播するものとして、Einstein 等の極端な光量子説は拒けた。この不徹底に対しては種々な批評も出たが、量子論の応用や種々の実験の報告は、何れも量子論に有利なものばかりで、この Solvay 会議は世界の学者に、賛否如何にかかわらず量子論の重大性を認識させたものであった。

## 18. 其後の状況

しかし其後、N. Bohr の原子構造論 (1913) が電子の不連続的な定常状態間の飛躍の見地から、Kirchhoff 以来輻射論が一指を染めることも出来なかった元来の輝線スペクトラムの謎を解き、後には J. Franck-G. Hertz 等定常状態の存在を証

1) H. Poincaré, Journ. de Phys. Jan. p. 29(1912). この証明は晦渋な原始的なものであり、後に Fowler が更に補訂した。  
2) Jeans, Report on the quantum theory of radiation (1914)

明する実験の成功に依って、量子的な輻射の発射及び吸収は確実な実験の支持を受けることになった。また、Bohr の構想に基いて、Einstein は徹底した光量子論の見地から、Planck の輻射法則を導くことに成功し (1916-17)、更に 1924 年には光量子に統計を適用して、Bose が同じ輻射法則を証明した。これは後に、電磁場の量子化の方法で量子力学の統一的な立場から基礎づけられ、一応理論的に完成して現在に及んで居る<sup>1)</sup>。その間 Planck の輻射法則自身は、何等の変更を加えられず、たまたま修正が示唆されても直ちに実験的に斥けられるという現状であった<sup>2)</sup>。今日と雖も、Maxwell の方程式に変更を生ずる或る種の場の理論<sup>3)</sup>から極めて高温、短波長の領域で Planck の法則に微小な補正を要する結果も出て居ないではないが、それは近い将来には実験で到底検証し得ないような領域に属する問題であり、またその場の理論自身学界一般の支持を受けて居るわけではない。従って我々は、Planck の黒体輻射の法則を以て現代物理学の最も確実な成果の一つとして数えるに何の躊躇も要らないのである。

輻射の問題は黒体輻射の分光分布に関する限り、Planck の法則に依って完全に解決され原理的には疑問の余地がない。しかし、実験家の立場からすると、輻射式の中に含まれる普遍常数  $h$ ,  $k$ ,  $c$  の値は実験技術の進歩、新しい測定方法の考案に依って、絶えず精確になって行く永久の課題である。

もしまだ理想的な黒体から一歩進んで、一般の黒体の熱輻射に眼を転じるとその分光分布を表すに必要な輻射率  $e(\lambda, T)$  に就ては、実験的に求める外はない<sup>4)</sup>。今日の理論は極めて長波の場合の古典理論を除くとまだこれを各物質に就て演繹するところまで進んで居ないのである<sup>5)</sup>。

1) 輻射場の量子論に就ては、Dirac(「量子力学」仁科博士其他訳岩波発行)や Heitler の書物に見られたい。Heisenberg-Pauli の一般的な方法は近年素粒子の場の理論として更に一般化された。これに就ては例えば「物理学」岩波講座中の玉木氏の「量子力学」に紹介されている。

2) W. Nernst-Tn. Wulf は 1919 年 Planck の式を

$$E = c_1 \frac{\lambda^{-5}}{c^2} (1 + a) \left( \frac{e^{\lambda T}}{e^{\lambda T} + 1} \right) \quad (a \text{ は実験的に定めるべき常数})$$

の形に修正した方が従来の実験によく一致するとした。Verh. d. Deutsch. Ges. 21. s. 294(1919) しかし、H. Rubens u. G. Michel の再実験は再び元の Planck の公式を確証した。Berl. Ber. 1921 s. 590

3) 例えば Born-Infeld の理論

4) 例えば白金に就ては、全輻射は絶対温度の 5 乗に比例するとか、 $\lambda_m T = 2630 E_m T^{-6} = \text{一定}$  の外 Lummer-Pringsheim の規則  $T' = 1.11T$  で温度を置き換えれば 1845°K 附近まで Planck の式が適用出来る。他に Aschkinass の分布式なるものもある。

5) 種々の輻射率の物質から成る開孔の空洞(例えば有底円筒)と黒体との比較は、計算に依って求められるが、それは H. Buckley, 山内二郎等が行った。又、Planck の式に基く黒体輻射の計算表は山内二郎、電気試験所報告 No. 395, 402

- 
- ・底本には、『科学史論』(「天野清選集 2, 日本科学社, 1948 年 11 月) を使用した。
  - ・原著は, 今次の敗戦後まもなく出版されたもので紙質が悪く, しかも印刷が不鮮明の上, 校正も充分なされていない虞があるため, 数式, 欧文の書籍・論文のタイトルなどに誤植の可能性がある。
  - ・適宜振り仮名を追加した。
  - ・旧漢字は新漢字に、旧かな使いは新かな使いに変更した。
  - ・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。

科学の古典文献を電子図書館「科学図書館」

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

に収録してあります。

「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。