

熱輻射史

天野 清

§1 前史

熱が途中の物質を順次に温めることなく、光のように輻射としても伝播することは、漠然とは非常に古くから知られていたと思われる。ガラス玉や凹面鏡で太陽の光線を焦点に集めて物を熔したり燃やしたりすることも既に古代から知れていた。例えばアリストプアーネス (Aristophanes 前 450–前 385) は「雲」(前 423) の中で、店で売っている「燃やし玉」(ὑαλος 透明な石) を使って借金の証文を消してしまうという思い付きを書いている (766–772)。ユークリッドは Catoptrika 定理 30 で、太陽に向けた凹面鏡が火を発せしめることを述べている。アルキメデスが凹面鏡を用いてローマの軍船を焼いたという伝説は第 2 世紀のルキアノス (Lukianos) 以前に遡ることが出来ないにしても、この種の知識の普及は窺われる。プリニウスは Historia Naturalis の中で、水を容れた^{ガラス}硝子球や (Lib. 36. Cap. 67) 結晶玉が (Lib. 37. Cap. 10) 物を燃すことを記述している。

近世の初頭にはこれらは学者や好事家が好んで取り上げる問題であった。既にレオナルド・ダ・ヴィンチは熱輻射に触れているが光と分けていない。ポルタ (J. B. Porta) は Magia Naturalis の第 17 卷 De Catoptriciis で凹面鏡の前に^{ろうそく}蠟燭を置くと目は熱を感じるが、雪を置くと冷たさを感じるとし (Cap. 4), 特に Cap. 14 は De speculis comburentibus と題し、その中には放物面鏡が最も強く物を燃やすとして、アルキメデスが用いたのはこれであるとしている。

フランシス・ベーコンは Novum Organum 第 2 卷 Cap. 12 及び De Dignitate et Augmentis Scientiarum, 第 5 卷 Cap. 2 で燃やし玉を用いて月光を集めたら熱を生じるか、また石や金属の発火に至らない見えない熱も同様にして集められるかと問い、その熱が非常に微弱で分らぬときには空気温度計を使ってはどうかと示唆し、熱と反対に冷たさはどうかとも疑問を提出しているがこの最後の問いに正

しい答を予想していたかどうかは疑わしい。

初めて明瞭に冷さの反射を実験で示したのは、Academia del Cimentoであった。500 ポンドの氷を凹面鏡の前に置き焦点に 400 に目盛した感じのよい寒暖計を置いたところ、寒暖計の液は^{たちま}忽ち下った。しかし氷が寒暖計の近くにあったので冷さの直接の線か、反射した線かを試せば更に効果的であるとして、鏡を蔽ったところ寒暖計の液は昇った。しかしなおこれを以て決定的なものとはしていない。(Essays of Natural Experiments, etc, trans. R. Waller, 1684 p.103)。

ボイルはポンプでガラス容器を排気しながらその中に入れた黒い可燃物に燃やしガラス (burning glass) で太陽の光線を当てる実験を試みて失敗したと報告している。それは空気が入ったのと光線がうまく^{しゅうれん}収斂しないためであった。(New Experiments Physico-Mechanical, Experiment 15) 彼は^{もちろん}勿論白紙よりも黒い紙の方がよく燃えることを知っていた。ホブスは太陽とガラス玉との間には火がないことを理由として熱の粒子説を主張するボイルを批評している。(Dialogus Physicus de Natura Aëris p.18) ニュートンは排気したガラス容器中に高温にした寒暖計を入れその冷却が排気しない容器中のと大差ないことを観察して熱は空気よりも遙かに微妙な媒質の振動によって真空中を伝送されるのではないか。この媒質は光のそれと同じではないかとし、(Optiks, Book 3, Part I Queries 18) また光が物体に当たると物体の部分に振動を生ぜしめそれが熱に外ならないのではないか (Qu. 5), すべて固体は一定の度以上に熱せられると光を発して輝き、この輻射は物体の部分の振動で生ずるのではないか (Qu. 8) と記している。

チルンハウゼン (Tschirnhausen) は大きな凹面鏡やレンズ (直径 100 ~130cm) を作って系統的に実験した。太陽の光線を強く集めるために二つのレンズを前後にして置き、濡れた木も燃え、小さい容器中の水は沸き立ち、鉛や鉄は熔け、水の下に置いた木は炭になることを実験した。炭の中に物体を包めば作用は著しく強くなることから黒い物体は熱の吸収が強いことが分った。しかし月光は焦点でも殆んど感知できる程の熱は生じないことが証明された。

§2 熱線の研究

既に 1679 年マリOTTは太陽の熱は透明体を通過するとき光と分けられないが、火から出る熱輻射は分けられるという著しい発見をした。彼は火の前に金属

の凹面鏡を置いたがその焦点に長く手を置くことは熱くて耐えられない。ところが鏡をガラス板で蔽うと焦点の光は殆ど弱らないのに熱は殆んど感じられなくなる。これは火の輻射熱を光から分けた最初の実験である。Traité de la nature des couleurs(1686)では更にこれを正確にすると共に、太陽の線の熱効果はガラスで蔽うともとの4/5に減じるが、この減少は光がガラスの表面で2回反射されるときとの減少と同じ程度であるとしている。フックは同様の事実を確め1682年 Royal Societyに報告した(Birch, History of the Royal Society of London 1756-7, vol. IV p.137)。マリオットはまた前掲の著述の中に氷で作ったレンズで火薬を爆発させた実験を記述している。

マリオットの後この問題に関する劃期的な業績は暫く途絶えたが其の間 burning glass やレンズも著しく改良され、寒暖計の製作や目盛も大いに進歩したので18世紀の後半に入ってから多数の興味ある実験が行なわれた。

ウォルフエ(Wolfe)は拋物面鏡とそれを用いてホフマン(Hoffmann)が行った実験を記している。(Phil. Trans. 1769, vol. 59, p.4)二つの鏡を対立させ一方の焦点にストーヴを置けば他方の焦点にある可燃物に火がつくというのである。ヤングはストーヴの見えない熱線を凹面鏡で集めたのはホフマンが最初であると言った(Lectures on Natural Philosophy, 1807. I p.637)。しかしビュッフオンは更に完全な証明をした。彼はあらゆる光を遮るために火と鏡との間に鉄板を置いて鏡の焦点に熱を集めることが出来た。(Histoire Naturelle, Supplément, 1774. I. p.32. 46)この結果彼は‘光る熱’と‘見えない熱’との二種を認めなければなるまいとした。

シューレは“輻射する熱”という言葉は初めて用いた人らしい。彼はこれを対流による伝達と区別するために系統的な実験をし(「空気と火に就て」Upsala 1777. 英訳 L. Dobbin, 1931, p.120), 当時利用できた実験的事実にあてはまり、しかも支配的だったフロジストン説とも撞着しないような輻射熱の理論を提出した。彼はストーヴから2エルも離れたところで凹面鏡によって硫黄に火をつけそれがストーヴの口の前に強い風を送っても影響されないこと、このとき鏡自身は熱くないこと、しかし煙突をしめて戸口から上へ逃げる熱の中に凹面鏡を置くとこの熱は反射されずに鏡が熱くなることなどを実験して、“対流と輻射”を区別し「後者はその発生したところから直線的に進み磨いた金属によって入射角と等しい角を

なして反射される。それは空気とは一緒にならず、従って空気の流れによっても始め発生したときに受けた以外の方向を得ることはできない」とし「これは光の属性である」と附加えている。しかもシェーレは火の熱がガラスで吸収される事実によりこの熱はまだ光になっていないとして、光はフロジストンの多い合成物であるとし、^{すみれいろ} 董色はプリズムに強く引かれる（屈折が大きい）からフロジストンを少ししか含まない。輻射熱はそれよりもフロジストンが少いからなおよく引かれるであろうと書いている。これでは不可視の熱線は董外部にあることになろうが勿論^{もちろん}彼の想像は誤りである。熱の通過した空気が温まった空気がちがって太陽の光にも^{かげろう} 陽炎を示さないことも記しているが、これは後にプレヴォも書いている(1809)。

ランベルトは火の輻射 (Feuerstrahlen) と太陽の輻射の作用に就て多数の実験をして火の見えない輻射 (die dunkle Wärme) も光と同じように伝播し反射するとし、凹面鏡の作用を光学の原理によって展開した。火の熱はレンズで集めることはできないが鏡を使えば集められるとしている。(Pyrometrie, Berlin, §378) 或人はこれは既に古く 1685 年ウィーンのツアーン (Zahn) が示したというがその証拠をたどることが出来ない。

この頃 (1785 年) ゲルトナー (André Gaertner) は熱したストーヴから出る目に見えない熱を遠く離れた拋物面鏡で反射させたり、氷の冷さを焦点に集めたりした。ドウ・リュック (Jean André Deluc 1727–1817, *Idee sur la Météorology*, 1786–87) は水を容れた金属の器は外側を磨くと^{すす} 煤を付けたままのときよりも沸くのに時間がかかる。それは火の粒子が反射の法則で磨いた面から反射されるためとした。太陽の線はそれ自身が熱ではなく物質と一緒にあって始めて熱となり、光を与える力を奪われるとした。キング (Edward King, *Morsels of Criticism*, I, 99, 1788) は沸き立っている水から出る見えない熱線が凹面鏡で反射され、凸レンズで焦点に屈折される実験を記述しているが、この実験のような微弱な作用から彼がやったように、熱の fluid は光線と同じような反射性と屈折性を備えていると結論する資格があるかどうか疑わしい。ソーシュール (*Voyages dans les Alpes*, vol. 2, p.353, 1786) は、ランベルトの実験は決定的でない。熱源は光ってはいらないと考え、ツアーンの実験を繰返すことを提案しピクテの作った二つの錫の凹面鏡を

用いて彼と一緒に実験した。まず鉄の玉を赤熱しそれが暗闇でも見えないほど冷えてから一方の鏡の焦点に置いた。他の焦点には水銀温度計の球部を置いたところ忽ち上昇し、焦点から外せば殆んど室温になった。これを更に検討して見えない熱の反射に満足した。ソーシュールはこの見えない熱の本性は calorifique な振動で音波と同じように反射されるとし、この速さを測る実験を暗示した。

ピクテ (Essai sur le feu, 1790) は前にソーシュールとした実験を繰返し、小さい蠟燭ろうそくも同じ作用を生ずるがガラス板で熱が 2/3 程吸収されることを示した。また沸き立っている湯を入れたフラスコの熱を前述の凹面鏡で集めて寒暖計の上昇を確認した。寒暖計を黒くすればその上昇が早くて大きいことから純粋な熱も光と同じように黒い物体で吸収されることが分った。これはフランクリンも言っていることであるが、熱は可視光線以外にもあるからあまり正しくない結論である。屈折を見るため三種の凸レンズを用いてフラスコの熱を集める実験では焦点でも他の箇所以上の熱が確められなかったのでこの問題は決着を見なかった。彼はこれらの実験の結果、輻射する (rayonnante) 熱と伝導する (propagée) 熱を区別し後者は分子から分子へと徐々に伝わるが前者は途中は直線的に音や光と同じような速さで伝わる目に見えない放射物であるとし、その本性は、完全に弾力的なあらゆるものに浸透する熱流体とするよりもむしろ簡単のために実在的な放射物とする方を選んだ。しかしピクテはなお輻射と伝導の区別が十分に明晰ではなく、湯の熱がガラスのレンズで集められなかったので金属のレンズなら成功するであろうとした。彼は熱の良導体は熱線をよく透すと考えたのである。彼はまたベルトラン (Bertrand) との会話にヒントを得て寒線の実験もした。雪や寒剤 (雪と硝石) を凹面鏡の焦点に置いたところ寒暖計の指示が急に下ったので驚いたが、ピクテは間もなく寒暖計の方が熱い物体でその熱が冷たい寒剤に取られるためであると正しい解釈を下した。これはプレヴォが熱平衡の新しい見解へ達する前駆であった。

ハットン (James Hutton, Dissertation on the Philosophy of Light, Heat and Fire, Edinburgh 1794. P.42) はシェーレのガラス板による熱線の吸収の実験を繰返し熱は完全に吸収されるのではなくて単に強さが減じるに過ぎないことを見出した。彼は熱が物体なしに運動してゆくという 'Obscure heat' の観念を排し、輻射熱と

称せられるものは光と異なるものではない。熱した物体は熱を光に変じ、光は吸収されて熱になり得るとし、この光は我々の眼に感じるには弱いが熱を与えるには十分なものと論じた。しかし大多数の学者は火から出る熱線と光線とがガラスで異なる吸収を受けることから両者を区別し、不可視の熱線を *obscure heat* とか *radiant heat* とか或は *radiant caloric* とか呼んでいた。このように 18 世紀の終わりには輻射熱の本性については学者の見解も区々であったが、ともかく熱を与える不可視線の存在は一般に承認されていて、それが殆んど瞬間的に伝わり光線と同じ法則で反射されることも知れていた。

1800 年ウィリアム・ハーシェルは初めて太陽のスペクトラム中に“赤外線”を発見した。(Phil. Trans., p.255) 彼は^{すす}煤を塗った寒暖計を順次に太陽スペクトラムの異なる色に当ててその熱が不均等に分布していることを見たがこれは赤より外にも著しいものがあることを発見した。トーマス・ヤングは「これはニュートン以後の発見の中の最大のものの一つである」とした。しかし熱輻射が当時の流行問題であった場合にはハーシェルの発見の意義は十分に理解せられず、例えばレスリーのような才能のある研究家が熱輻射を空気の脈動に帰し、ハーシェルの赤外線の熱効果なるものは可視部分からの空気の流れであろうとした。

ジョン・ハーシェルは赤外部の熱線の分布を研究し (Phil. Trans. 1840, p.1), ドレーパーは $0.8\sim 1.0\mu$ の範囲に三つの帯状の分布を発見したと報告しているが (Phil. Mag. vol. 22. p.120, 1843) 熱電堆を用いて熱線を測定することによりこの方面に大きな貢献をしたのはメロニー (Macedonio Melloni 1798–1854 (一説に 1801–1853)) であった。彼はノビリが考案した熱電堆を改良し、輻射熱にも可視光線のように種類があることを強調し、これを比喩的に *thermochrôse* (熱の色) と呼んだ。彼は光の在るところに必ず熱ありとすれば月光も熱作用を示す筈と考え実験を行い、後に成功した (1846)。彼はまた可視光線の透明度に対応するものとして透熱性を考え、水、氷、ガラス、岩塩等について実験し、岩塩はほとんど完全にあらゆる種類の熱線を透すことを見出した。透熱性は熱輻射源によって異なることも明かにしている。(Pogg. Ann. **35**, 277, 401, 1835; **62**, 18, 1844 及び大著 *La Thermochrôse, ou la coloration calorifique*, 1850) この頃マッテウッチ (Matteucci 1811–1868) は熱線の干渉を証明し (Pogg. Ann. **22**, 462. 1833), フォーブス (Forbes

1809–1869)(Phil. Mag. (3)6. 1835) とクノブラウホ (Knoblauch, 1820–1895) はそれぞれ別の方法で干渉と偏光を示し、ゼーベックは廻折を見出した。(Pogg. Ann. 77, 574, 1849)

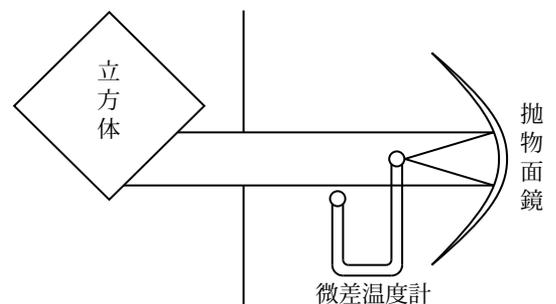
§3 熱の輻射と吸収, キルヒホフの法則

18世紀の末プレヴォは、冷さが反射されるというピクテの実験を説明するために、まずD・ベルヌーイの気体分子説に倣^{なら}って、熱を不連続な粒子としてそれが熱物体の表面からあらゆる方向に非常な速度で射出されるとする。相隣る二物体の単位面積は温度が等しければ同じ時間内に発射したと等しい熱粒子を相手から受け、ここにいわゆる熱交換が行われ平衡状態が保たれる。もし一方の温度が高くなればその物体は他方から受けるよりも余計な熱を出し、今までよりも高い温度で新しい平衡状態ができるまで継続する。即ち熱の動的平衡 (équilibre mobile) が成立つ。この理論は冷さの見掛け上の反射に極めて満足な説明を与える。何故ならば冷い物体は熱い物体より少ししか熱を発射しないので、熱い物体は受ける熱の方が発射した熱より少く従って冷却されるからである。ピクテは直ちにこの説明を受け入れた。

プレヴォはこの理論を Mémoire sur l'équilibre du feu (1781), Observations sur la physique. 38.(1791), Du Calorique rayonnant(1807) 等の諸著で展開し以下記するように各種の実験を説明した。

レスリーは多数の興味ある実験をしたが (An Experimental inquiry into the nature and propagation of heat. 1804), いわゆる立方体は有名である。それは熱湯を入れた立方体の錫の容器で、その三つの面を煤、紙、^{ガラス}硝子で蔽い、一方は錫を光らしておいた。各面から発する熱輻射を抛物面鏡の焦点においた彼の考案に成る空気温度差

計の一方の球に当てた。煤、紙、^{ガラス}硝子、錫から出る輻射の作用は 100:98:90:12 の比に現われた (第1図)。これを冷さについても試みて同じ比を得たのでレスリーは熱の吸収と輻射は同時に増減すると結論した。また、一定の隙間から鏡の

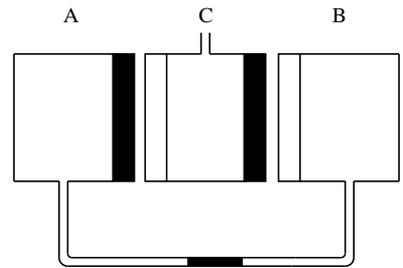


第1図

軸に斜にした立方体の面を出た輻射を当てても温度計の指示が変わらない。輻射を与える面積は大きくなるので斜に面を出る輻射は垂直に出るものより弱くそれとなす角の余弦に比例する。赤熱した球が中央でも周辺でも同じ明るさに見えるのもこれがためである。レスリーはランベルトの‘Photometrie’からもこれを知っていた。彼はまた熱の反射と輻射とは相互に補い、強く反射する面は輻射熱が少いとしている。これはプレヴォも言っている (Du Calorique, p.115)。

ルムフォード伯が記するところ (Über die Wärme, 1805) によると彼もレスリーと同じ頃それと独立に実験をしていたらしい。彼は外面の状態を異にする金属の筒に寒暖計を入れ太陽に曝した。黒くて粗いブリキ板の筒は光ったのよりも強く暖った。それを冷いところへおくとルムフォードが驚いたことには黒い方が早く冷えた。これを条件を変えてやっても同じであった。しかし彼は同じ温度でも輻射の強さは異なる (真鍮の光ったもの、酸化したもの、煤を塗ったもので 1:4:5 とした) こと、温める (振動を速くする) 線ばかりでなく冷たくする (振動をおそくする) 線もあることを結論するに止った。彼は熱は振動であるという見解を採って熱した物体を鐘に比し、熱いものは早く熱くないものはゆっくり振動しているとした。マッハはこれでは温度が振動周期によることになって困ると批評したが、偶然ながらウィーン変位則を思わせて却って面白い。

熱伝導の理論を建設したフーリエはまた熱輻射に関する先行者たちの見出した特殊な実験的事実を理論的にまとめた。Ann. de chim. 3, 363(1816);4, 146(1817) 其他。近接する等温度の二物体の間に輻射平衡が成立つことは確証された事実である。ところが異なる物体の単位面積は非常に異なる強さの輻射を出す。そこでもし輻射の強さ $1/2$



第2図

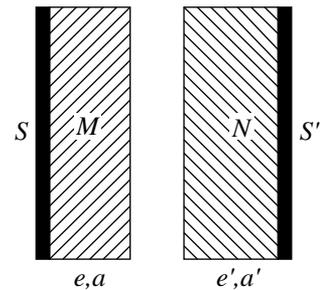
の物体がそれに投射された輻射熱の $1/2$ を同じ時間内に吸収するとしなければ、平行して対立した異なる平面をもつ両物体の間には温度の平衡が成り立つわけにゆかないであろう。そこで輻射と吸収とが正比例することが温度が等しいときの輻射平衡の必要条件である。この関係は後にリッチーの実際 Pogg. Ann. 28(1833) でも明かにされた。一つの空気温度差計の両端の等しい容器 A, B の内側とこれに

向う熱湯を入れた容器Cの面を一方は磨いた金属、他は^{すす}煤をつけておく。すると温度差は現われない(第2図)。Cの金属面から出る輻射の強さを e とし、Cの^{すす}煤を塗った面から出るのは E とする。^{すす}煤の吸収率を1、金属のを a とすると、Aに入るのは $e \cdot 1$ で、Bに入るのは aE である。温度差が出ないから両者は等しく、

$$e = aE, \text{ 即ち } \frac{e}{E} = a$$

で輻射率は吸収率に等しい。これは後にシュワートやキルヒホフによって正確にされた考え方である。

キルヒホフは1859年化学者ブンゼンと協力してスペクトル分析を創始したが、その際ナトリウムのD線の反転の現象から暗示を得て、固体の輻射と吸収の比例性を熱力学的に証明した。彼の最初の証明の骨子は、無限に広い等温度の平面MとNが向き合っていてその背面は完全な反射面S, S'とする(第3図)。Mの単位面積を単位時間に出る全熱量をMの輻射能(Emissionsvermögen)

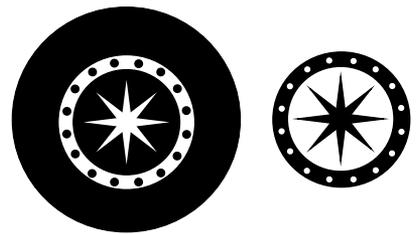


第3図

と呼び e であらわす。Mに投射された輻射を吸収する率〔不幸にもキルヒホフはこれを吸収能(Absorptionsvermögen)と名付けた〕を a とし、Nに就ても同様な e' , a' を考える。Mが e を出すとNは ea' を吸収し、 $e(1-a')$ がMに反射されその中の $e(1-a')a$ がMに吸収され $e(1-a')(1-a)$ が反射される。これをつづけて $(1-a)(1-a')$ を k とすればMは自ら発した輻射の中 $e(1-a')a(1+k+k^2+\dots) = e(1-a')a/(1-k)$ を取り戻す。MがNから受けるのは同様にして $e'a(1+k+k^2+\dots) = e'a/(1-k)$ である。Mの温度が変わらないとすれば、Mの輻射 e は以上のMが受ける二つの輻射の和に等しい。即ち $e = e(1-a')a + e'a/(1-k)$ 、これに k の値を入れて $e'a = ea'$ で $\frac{e}{a} = \frac{e'}{a'}$ 即ち輻射平衡が成り立つためには吸収率は輻射能に比例し、この比は同温度のすべての物体に就て等しく吸収率1なる物体即ち投射されたあらゆる輻射を完全に吸収する黒体(black body, Schwarzkörper)のその温度に於ける輻射能に等しい。 $e/a = E$ である。〔Berl. Ber. (1859) s.783〕キルヒホフはこの輻射と吸収の比例性を各波長と偏光状態に就て成立することを証明し、翌1860年には巧妙極まる思考実験の連鎖で厳密な熱力学的証明を完成した。(Pogg. Ann. 109, 275)キルヒホフの等温度の壁に取囲まれた熱平衡の状

態にある空洞はその壁を構成する物体の輻射能の如何によらずその温度の黒体の輻射に等しい空洞輻射 (Hohlraumstrahlung) に充される。常温で黒く見える物体 (例えばランプの^{すす}煤) も決して完全な黒体ではなく、また高温になれば黒体は輻射が強いので却って^{かえ}白く光る (第4図) ので黒体輻射なる言葉は必ずしも適切ではない (Planck)。以上の輻射と吸収や空洞輻射のことはキルヒホフよりも少し早くスチュワートが論じていた (1856) ので英独の間に優先権の論争が起ったが、証明の厳密な点でキルヒホフが優り、後のドイツ学界に模範となった。

輻射と吸収の比例に関するキルヒホフの法則は後にプリングスハイムが思考実験によらず厳密に証明し、実験的検証も多数あるが、プリューゲル (Pflüger, Ann. d. Phys. 7, 806. 1902) は電気石について常光線と異常光線各々がキルヒホフの法則に従うことを示した。



第4図

クラウジウスは熱輻射が周囲の媒質にかかわること、即ち、輻射能 e , e_1 は媒質中の光速度を v , v_1 とすると $ev^2 = e_1v_1^2$ となることを証明し (Mechanische Wärmetheorie I. 322. 1864), クイントウス・イキリウス (Quintus Icilius) が実験で確めた (Pogg. Ann. 127 1866)。

ここに注意すべきは、キルヒホフの e/a が一定ということは温度輻射に限られることで選択吸収をして相当する輻射のない色のある物体は $e/a = 0$, 輝焰を発生し吸収せぬ^{ガス}瓦斯は $e/a = 0$ で法則があてはまらない。

§4 輻射による冷却の法則と全輻射の4乗法則

ニュートンは熱の散逸に就て初めて理論的見解を公にし、実験に基いて「熱せられた鉄がそれに接触している冷たい物体へ一定時間に伝える熱、即ち鉄が一定時間に失う熱は鉄の全体の熱に比例する。故に冷却時間を等しくとれば熱は等比関係になり、従て対数表から容易に求められる」と言った。(Scala graduum caloris et frigoris, Phil. Trans. 1701)。ここでは熱と温度、輻射と伝導が区別されていないが、彼は等しい時間内の温度の低下は熱物体と周囲との温度差に比例するとしたものと解せられる。プレヴォは熱交換の理論 (前節) によってこれを明言し、ランベルトはニュートンの考えを数式化して種々の問題に適用した。(Pyrometrie

s. 141, 1799) 物体の温度を θ とし周囲の温度を T , 時間を t とすれば

$$d\theta = -a(\theta - T)dt$$

となる。積分して

$$\theta = (\theta_0 - T)e^{-at}$$

ここに θ_0 は物体の初めの ($t = 0$ の) 温度である。この式は実験によると θ_0 と T との差が 5°C 以下ならよいが, 差が大きくなるにつけ誤差が甚だしい。デュロン (Dulong) とプチ (Petit) は実験により,

$$\frac{d\theta}{dt} = F(\theta) - F(T)$$

で,

$$F(\theta) = ma^\theta$$

とし従て冷却の法則 (lois du refroidissement) は

$$\frac{d\theta}{dt} = ma^T(a^{\theta T} - 1)$$

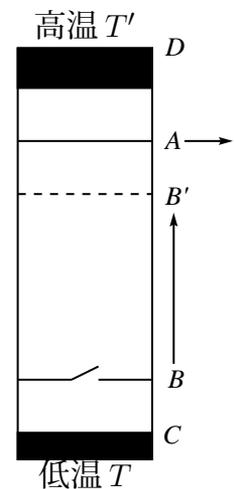
であるとした。これは長く学界に行われた式であった。

キルヒホフは 1860 年の論文 (Pogg. Ann. **109**, 292) で, 黒体の輻射が波長と温度の簡単な函数であろうと示唆した。この関数を見出そうとして多数の学者が熱輻射の実験を行ったが, その中で幸運にも比較的早く全輻射について正しい法則を見出したのはウィーン大学の教授ステファンであった。ステファンは理論家であったが, ティンダルが白金線の熱輻射を研究して 525°C と 1200°C に於ける輻射の比を 11.7 としている (Phil. Mag. (4), **28**, 329, 1864) のに対し, 絶対温度を採ると $(1200 + 273)^4 / (525 + 273)^4$ が 11.6 になることに気付いた。そこで彼はデュロン - プチや他の学者の実験結果を検討し, その誤差を考慮すれば全輻射は絶対温度の 4 乗に比例して増加すると考えてよいという結論に達した (Wien Ber. **79**, 391. (1879))。ステファンは自分の実験ではなく他の (外国の) 学者の結果を利用して見事な成功をしたわけである。

しかし彼は $S = \sigma T^4$ という自分の公式がすべての固体に対して成立つものと思っていた。ところが当時ステファンの公式を覆すような実験結果が続々発表されて混乱を呈した。このように各研究者の結果が喰違ったのは, これらの実験

は何れも黒体という条件に考慮を払わず、勝手な固体について行われたからである。ただ一人広い範囲で例外的に4乗公式を承認したシュネープリ (H. Schneebli, 1884) は自覚せずに比較的黒体に近い炉の中の物体について実験したためであった。ステファンの成功は先行者の実験が適当に不正確なことにも幸いされたわけである。一方に黒体という理想上の概念が実験にも大切な役割を演ずることがわかる。

ステファンの公式を初めて黒体輻射の式として把握し、それを理論的に証明したのはボルツマンであった。彼は若い頃ウィーン大学でステファンに学びその助手をしていたこともあった。1883年ボルツマンは熱輻射と熱力学の第二主則との外見上の矛盾を解明しようとしていた際、バルトリ (A. Bartoli) が輻射が気体と同じように物体へ圧力を及ぼすとすれば矛盾が起らぬとしている (1876) のを見、その思考実験に依って熱力学的に輻射と温度との関係式を求めた。第5図に於て A , B は完全反射面とし、 C , D は完全黒体とする。弁 B をあけて低温 T の輻射を AB 間に充たし、 B を閉じて B' まで圧縮すると AB' 間の輻射密度を AD 間の密度よりも高くできる。そこで A を引き抜けば AD 間の輻射密度は前より高くなり従て T' へ熱を与える。これは低温から高温へ熱を移すことになるから $B \rightarrow B'$ の仕事がなければ第二法則に矛盾する。仕事は輻射に圧があってそれに抗して行われると考えればよい。全エネルギーを U , 全体積を V , T は絶対温度, p を圧力とすれば, 熱力学により



第5図

$$\frac{\partial U}{\partial V} = T \frac{\partial p}{\partial T} - p$$

輻射密度を u とすれば,

$$\frac{\partial U}{\partial V} = u$$

と, マックスウェルの電磁論から $p = \frac{u}{3}$ であるから

$$u = \frac{T}{3} \frac{\partial u}{\partial T} - \frac{u}{3}$$

故に

$$\frac{du}{u} = 4 \frac{dT}{T}$$

積分して

$$u = aT^4$$

単位面積の孔から単位時間に出るエネルギーは

$$S = \sigma T^4 \quad (\sigma = 5.75 \times 10^{-5} \text{erg} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{deg}^{-4})$$

である。ボルツマンの証明は熱輻射を気体のように取扱い、当時まだ確証されていなかった光の輻射熱を利用した大胆なもので、ローレンツはこの証明を理論物理学の真珠と讃えた。 σ の値は $\sigma = \frac{2}{15} \frac{\pi^5 k^4}{c^2 h^3}$ となることが後プランクにより明かにされたが実験値は現在までに5.32から 6.15×10^{-5} まで分散し比較的不正確である。(Handb. d. Physik. 423–455 参照)

§5 黒体輻射の変位則

固体を熱して次第に温度を高くするとまず暗赤色となり、赤熱し遂には白く輝くにいたることは、高温作業をするものには古くから知られていた。ボイルは英語で red-hot (赤熱) といえば火熱の最上級をあらわすが鍛冶屋の工場や他の職人の炉では白熱はもっと熱が高いとされていることを書いている (The Experimental History of Colours, Part 2, Chap. 1)。19世紀に入ってアンペアはこの高温度に於ける色の変化を理論的に考察し (Ann. chim. et Phys. **58**, 732(1835)), ドレーパーははじめて赤外線写真を撮影した(1842)が、また熱輻射が暗中で初めて識別できる温度はあらゆる物体に就て^{ついで}525°Cであるとした (Amer. Jour. **4**. 388(1847), Phil. Mag. **30**. 345(1847))。彼は銃身の中に固体を置いて熱したので知らず知らず黒体条件で実験したことになり物質の特性があらわれなくなったわけで、最低可視温度は厳密に定まるものではないが、数十年も学界では認められていた。この間に熱輻射の測定手段も次第に精巧となって来た。スワンベリー (A. F. Svanbery) は熱輻射による温度上昇で電気抵抗の増加することを原理とするボロメーター (Bolometer) を1849年に考案していたが十分実用化されなかった。これを徹底的に改良し赤外線研究を開拓したのはラングレイであった。(Amer. Jour. Sci. (3)**21**. p.187.(1881) 最も改良されたものは(4)**5**, 241(1898)) 彼のボロメーターは0.0000001°Cの変化を示すといわれた。(事実は疑問である)。彼は岩塩プリズムを用い太陽のスペクトラム其他を測定し、従来とは格段の差ある優れた結果を

出したが、それまでハーシェル以来太陽のエネルギー分布の極大が赤外部にあると思われていたのが誤りで、実は橙色であるとした。(現在は更に短い 0.47μ 附近とされている)。またヴェリイ (F. W. Very) と共に月の放射を測定し (Amer. Jour. Sci. **38**. 421(1889)) 蛍の光は赤外線のだんだない極めて経済的なものであることも見出した (**40**, 97, (1890))。ラングレイの測定は波長の測定が不十分であったが当時は学界から典拠とされた。

この頃電灯の発明などに促されてアブネー (W. de W. Abney) とフェスティンゲ (C. Festing) の白熱電灯繊維のスペクトラム研究 (1884), ステッセル (J. Stössel) の電熱した白金線の種々の温度での分光分布の測定など続出したが、H. F. ウェーベル (Weber) は白熱電灯の理論を提出するとして、エネルギーの最大密度に相当する波長 λ_m は絶対温度 T に逆比例して変位する ($\lambda_m T = \text{const.}$) ことを導いた。

ウイリー・ウィーンは従来の黒体放射の 4 乗法則が全放射に関するものであるから各波長に就ての理論を見出すために、黒体放射そのものに温度を考え第二法則を適用した。彼は放射の充ちた空洞が圧縮されると放射の温度が上昇するが、その際各波長の放射は壁の運動によってドップラー効果を受けて波長が短くなるということを思考実験で証明し、それから圧縮前の或波長と温度を λ_0, T_0 とするとこれが λ, T に移る

$$\lambda_0 T_0 = \lambda T$$

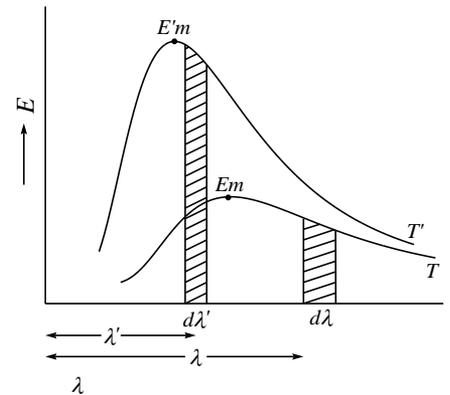
なる ウィーンの変位則 (Verschiebungsgesetz) を見出した。 ($\lambda_m T = \text{const.}$ はこれの特別の場合である。) (Berl. Ber. **55**(1893)) エネルギー密度は $E\lambda/E\lambda' = (T/T')^5$ で両式を図示すれば第 6 図のようになる。後にこれは

$$u_\lambda = \frac{A}{\lambda} f(\lambda T)$$

又は

$$u_\lambda = B_\nu \phi\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

の形にまとめられた。



第 6 図

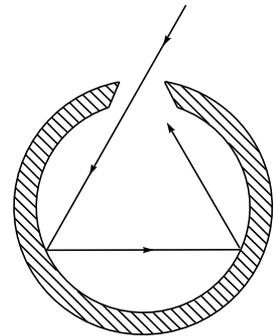
この関係はルンマー等の実験で確められ、平均して

$$\begin{aligned}\lambda_m T &= \frac{ch}{k} \frac{1}{4.9651} = \frac{c_2}{4.9651} = \frac{14320}{4.9651} \\ &= 2884\mu.c.\end{aligned}$$

の程度である。この式を利用して太陽のスペクトラムの最大からその見掛け上の温度を計算すると $\lambda_m \cong 0.47\mu$, $T \cong 6100^\circ\text{K}$ 程度となる。

§6 黒体輻射の実験と分布法則

ベルリンの国立物理工学研究所 (Physikalisch-Technische Reichsanstalt) は 19 世紀の末当時急速に発展しつつあったドイツ工業界の要求に促されて光度単位や高温測定の実験的研究を開始したが、これは学界の注目をひいていた熱輻射論と関連して来た。この研究を担当していたルンマーは個々特殊な輻射体を研究しても効果の少いことを認め黒体の輻射をまず測定しようとした。ルンマーの協力者たるウィーンは黒体輻射を安定な熱平衡の状態の輻射と考えた。(Wied. Ann. 52, 132.(1894)) そこで両人は温度一様な壁に取囲まれた空洞に小さな孔をあけてここから輻射を取り出して黒体輻射を十分な近似で実現しようとした (Wied. Ann. 56. 451. (1895))。古くニュートンは黒色物体は投射した光が物体の内部でたびたび反射屈折されて吸収されるのではないかと疑った。(Optiks. 3, Qu. 6) キルヒホフ、スチュワートは明かに空洞輻射の黒体輻射に等しいことを記したが、ボルツマンはこれを実験装置として述べた。しかし学界はこれを十分理解しなかったので、ウィーン - ルンマーに至って初めてこの思想が実現された。(第7図) 後ルンマー - クールバウム (Ferdinand Kurlbaum 1857-1927) はこれを改良して電気炉とし (Vgrh. D. Phys. Ges. 17. 106(1898)), ルンマー - プリングスハイムはこれを用いて、優れたボロメーターにより輻射測定を行った。まず全輻射の4乗法則が確認された。



第7図

これと独立にパーシェンは綿密な実験を行い、^{すす} 煤炭素棒、酸化鉄、白金等の輻射の測定結果から推論して $E_\lambda = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$ という黒体輻射の分光分布式を帰納した。(Wied. Ann. 58. 455(1896)) 同じ頃ウィーンは少し前にミヘルゾン (Wladimir

Alexándrovitsch Michelson) という人が空洞輻射を考察しマックスウエルの気体分子の速度分布則を利用したのに暗示されやはりそれを利用して大胆な仮定と4乗法則とから、いわゆる ウィーンの公式、

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

を理論的に導いてパーシェンのと一致するので相当確からしいとされた。(Wied. Ann. 58. 662(1896)) この式は可視範囲では非常によく実験と一致する。しかし長波長では温度が増してもエネルギー密度 E_{λ} が殆んど増さないという理論的難点をレイリー (Lord Rayleigh) が指摘し自ら長波では $E_{\lambda} = \frac{2c}{\lambda^4} kT$ の形のいわゆる レイリーの式 を音響学の固有振動の類推と エネルギー等配分則 とから導いた。但しこのままでは短波長で無限大になるので $e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$ という項をつけて一般化した (Phil. Mag. 49. 589(1900))。

既に1898年ベックマン (H. Beckmann, Inaug. Dissert. Tübingen) はルーベンスの考案した残留線の方法によって 24μ の赤外線の実験し測定値はウィーンの式よりも温度と共に高くなることを見出していた。ルンマー - プリングスハイムはシルヴィン (加里岩塩) のプリズムで 18μ まで分布を追跡し、温度も 1600° 近くまで高めて測定したところ長波高温では確にウィーンの式よりもエネルギーが大きいことを見出した。(Verh. D. phys. Ges. 1. 230(1900))

マックス・プランクは電磁論の方向から黒体輻射の分布式を演繹しようとした。彼はヘルツの振動体が電磁波を放射し吸収し空洞内に平衡をつくることによって黒体輻射ができると考えた。しかし純粹の電磁論では可逆的でエントロピーを考えることが出来ず熱平衡の問題は解けないというボルツマンの批評をうけ、プランクは輻射のエネルギーが個々の部分振動へ完全に無秩序に分布するという自然輻射の概念を導入した。これにエントロピーのエネルギーによる二階導関数の逆数 $1/\frac{d^2 S}{dU^2}$ がエネルギー U に比例する ($U = bT$) として積分により $dS/dT = 1/T$ を利用してウィーンの式の形 $U = ae^{-b/T}$ が導かれる事を示してこの式を理論的に正しいものと主張した。しかしルーベンス - クールバウムの 51μ に達する岩塩表面の反射の残留線による実験 (Berl. Ber, 929(1900)) は決定的にウィーンの式を否定し、パーシェンはまたウィーン式の喰い違いを報じた。長波ではレイリーの kT に比例する式が実験に合うのである。

そこでプランクは $1 / \frac{d^2 S}{dU^2} = \frac{U^2}{c}$ とすればレイリーの形 $U = cT$ が導かれるので前のと折衷し両者を加え合せてそれから積分で、

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

を得、これが実験とよく合うこと報告した。Verh. D. Phys. Ges. **2**. 202. (1900)

プランクはこれからこの式の理論的基礎づけを企てエントロピーと確率との関連即ちボルツマンの考え方を採用し、振動体にエネルギーを配分するに当り、それを無限に細かく分割できるとしては配分の仕方が無限になって計算の手懸りが得られないので、エネルギーは不連続 (diskret) で有限な部分から合成されたとして計算し前記の形の式、詳しくは

$$E_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

$$c_1 = hc^2 = 1.176 \cdot 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm} / \text{sec}$$

$$c_2 = \frac{hc}{k} = 1.43 \text{ cm} \cdot \text{degree}$$

なるプランクの法則を演繹することが出来た。このときエネルギーの最小部分 ε をエネルギー要素 (Energieelement) と呼んだが、これは

$$\varepsilon = h\nu$$

なる式で振動数に比例する。プランクの常数 (後に作用量子とよばれる) $h = 6.55 \times 10^{-27}$ [erg sec] はここに生れ量子論は芽生えた。

黒体輻射はプランクの法則で完全に解決されたと言ってよい。現在ではプランクの当時不十分だった理論的基礎づけも完全となり、実験的にもたとえばルーベンスとミヘル (G. Michel) によって疑いの余地がなくなった。(Berl. Ber. 590(1921))。しかし黒体でないそれぞれ特殊の物体の輻射は白金やタングステンのような技術的に重要な物質に関する実験を除いてはまだ確実な理論はない。10 μ 以上の長波長に於ける金属の輻射は古典電気力学でも取扱えるので近似的な式が得られている。(これらに就いては *Ergeb. d. exakt. Naturwiss.* Bd. 7. S.342. の H. Schmidt の報告参照)

一般参考文献 Kirchhoff, Wien, Planck の論文は Ostwald Klassiker. Nr. 100. 228. 206 にあり, 実験的事項は, Handb. d. Exp. Physik. Bd. 9(1928) Wärmestrahlung; Müller-Pouillet's Handb. d. Physik u. Meteorologie, Bd. 2.3 Buch(1909) 中の Lumimer, Die Lehre von der strahlenden Energie (Optik); 理論の教科書としては Plank, Wärmestrahlung, 1. Aufl.(1906) 5. Aufl.(1923) が古典である。坂井卓三, 熱輻射 (岩波講座。物理学 VI. B. 昭和 14) も歴史的順序に記述している。この他 Kayser, Handbuch d. Spectroscopie I, II(1902) は文献を見るによく, Saha と Srivastara, Text Book of Heat の Radiation の部の記述は極めて優れている。§1-3 に就ては Mach, Prinzipien d. Wärmehre 3. Aufl. (1916) も興味があるが, 誤謬も少くない。天野清, ウィーンプランク論文集, 熱輻射論と量子論の起原 (科学古典叢書 1) には歴史的解説 (本選集の本巻に収録) を付けてある。なお Wolf, Cajori の一般的な科学史書にも, 特に初期の知識に就て記述がある。Wolf のは 16-19 世紀初頭にかけてのこの問題に関しては Dannemann のよりよほど詳細になっている。

-
- 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。
 - 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。