T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	アインシュタインによる古典論の限界の発見：量子論黎明期において固体比熱理論が量子論受容に果たした役割について
Title(English)	Einstein's Discovery of the Critical Point of Classical Theory : How the Theory on the Specific Heats of Solids Played a Role in the Acceptance of Quantum Theory During its Dawn
著者(和文)	古谷紳太郎
Author(English)	Shintaro Furuya
出典(和文)	学位:博士(学術), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10581号, 授与年月日:2017年5月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中島 秀人,伊藤 謙治,飯島 淳一,札野 順,調 麻佐志,細谷 暁夫
Citation(English)	Degree:Doctor (Academic), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10581号, Conferred date:2017/5/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

平成 29 年度　学位請求論文

アインシュタインによる古典論の限界の発見：量子論黎明期において固体比熱理論が量子論受容に果たした役割について

Einstein's Discovery of the Critical Point of Classical Theory:How the Theory on the Specific Heats of Solids Played a Role in the Acceptance of Quantum Theory During its Dawn

指導教員　中島秀人　教授

古谷紳太郎

FURUYA SHINTARO

東京工業大学大学院　社会理工学研究科

平成 29 年 4 月 18 日

目次

Abstract 2
第 1 章：序論 4
1.1. 先行研究の分析と通説の確認 6
1.2. 本論文の目的と構成 14
第 2 章：ケルヴィン卿の「第二の雲」とエネルギー等分配則 16
2.1. ケルヴィン卿の「第二の雲」 17
2.2. 1900 年までのエネルギー等分配則 22
2.3. 小括 26
第 3 章：実験，理論，物質観 27
3.1. 熱輻射研究のはじまり 28
3.2. ヴィーンの輻射理論における物質観 36
3.3. レイリー卿の輻射理論における物質観 43
3.4. プランクの輻射理論における物質観 46
3.5. 小括 56
第 4 章：古典論の限界の発見と量子論の必要性の証明 57
4.1. アインシュタインの光量子仮説における物質観 59
4.2. 光量子仮説から古典論の限界の発見へ 67
4.3. 固体比熱の量子論 73
4.4. 第一回ソルヴェイ会議 79
4.5. 小括 89
第 5 章：結論 91
5.1. 通説の考察と本論文の意義 93
5.2 本論文の最終結論 99
文献表 101

Abstract

This study elucidates the transition process from classical to quantum physics. It shows the persuasion towards the necessity of quantum theory during its dawn from the viewpoint of acceptance of quantum theory, which until this point has been largely overlooked in previous historical studies.

This thesis especially argues how Einstein's theory on specific heats of solids, which had until now only been glossed over in the previous studies of the history of quantum theory, actually played a pivotal role in its acceptance. This thesis also describes the actual process of discovery for the critical point of classical theory in detail, and furthermore, revises the history of the transition process from classical to quantum theory. The structure goes as follows.

The first chapter looks back on how the previous studies of quantum theory described its dawn and review the commonly accepted historiography. In addition, using Pais's points on the significance of Einstein's theory on the specific heats of solids as a reference, the objective of this paper is set as follows. This paper shows how the energy equipartition theory and radiation theories were viewed during the dawn of quantum theory. Also, this paper shows the development and reasoning of Einstein's theory on the specific heats of solids.

The second chapter examines the testament of Lord Kelvin who, similarly to the debates of the First Solvay Conference, argued the necessity of abandoning the energy equipartition theory based on the problem of specific heats. Next, there is an examination of the situation of the energy equipartition theory at the time, and how Lord Kelvin's argument was received.

The third chapter looks back on the history of studies of heat radiation; experiments, theories, views on matter and the importance of their interaction. There is also an analysis of the thoughts of Wien, Lord Rayleigh, and Planck from the perspective of the views on matter, through which it translates the history of the studies on heat radiation into a history of views on matter. It is on this which a basis for discussing Einstein's theory on specific heats of solids is created.

The fourth chapter examines Einstein's series of papers which show the progression from light quantum hypothesis to the theory of specific heats of solids. While elucidating his views on matter, it shows the thought process and meaning behind his arguments. Also, the contents of the first Solvay Conference (which is regarded as the turning point of when quantum theory was internationally accepted) is examined, and reviewed how it approached the problem of the specific heats.

The fifth chapter uses the views on matter as the axis by which to reorganize the otherwise separately viewed topics of studies of heat radiation, light quantum hypothesis, and theory of specific heats of solids, in order to create a new historiography to replace the previously accepted history of quantum development, which set radiation theory as its axis until now.

第 1 章：序論

本研究の目的は，古典論から量子論への転換過程を解明することである．従来の量子論史では，輻射理論を軸に量子論の発展が描かれてきた．対して本論文では，量子論を展開した科学者たちの物質観の変遷を軸に量子論の受容の歴史を描く．そうすることで，本論文は，アインシュタイン（Albert Einstein, 1879-1955）の固体比熱理論が，従来の量子論史で言われているのとは異なる仕方で，古典論から量子論への転換に際して重要な役割を果たしたという主張を行う．

本章では先行研究を概観して通説を確認した上で本論文の具体的な目的および構成を述べるが，それに先立って，まず本論文がすでに表題に導入している「量子論黎明期」という語を定義しておこう．

科学史では，量子論の歴史にはいくつかの画期があったと考えられている．たとえば，量子化学は 1927 年のハイトラー（Walter Heitler, 1904-1981）とロンドン（Fritz London, 1900-1954）による水素分子の共有結合の理論から始まるとされる[1]．その理由は明白で，ハイトラーとロンドン以前には，量子力学を用いて化学結合を説明する理論が存在しなかったためである．したがって，「量子化学」という用語については，その始まりの時期に関する議論の余地はない．それは，「量子論」という用語について，その始まりをプランク（Max Planck, 1858-1947）の輻射理論に最初の量子概念が導入された 1900 年とすることに異論がないのと同じである[2]．

他方，「量子力学」の場合は，それがどの時点で現れたのかについて，議論の余地がある．そのため，量子力学が現れた時点ではなく形成時期に着目し，その画期を捉えようとする表現がある．「前期量子論」という用語がそれである．前期量子論とは，一般に以下のように理解されている．

> 量子力学形成以前の量子論，とくにボーアの原子構造論から量子力学誕生までの量子論をいうこともある．量子論の発端は 1900 年プランクが黒体輻射のエネルギースペク

---

1 「量子化学」（川野辺渉），『〔縮刷版〕科学技史術史辞典』，1994，p. 1111.

2 ただし，精確にはプランクの輻射理論に現れた当初の量子概念を現在の意味でのエネルギー量子と同一視することはできない．プランク自身，彼の輻射理論に導入した量子概念について，当初は「エネルギー要素」と呼んでおり後に「作用量子」として定義し直している．プランクの量子概念から現在の意味でのエネルギー量子を論じたのは，アインシュタインだった．そのことは第 4 章で詳しく論じる．プランク自身の量子概念の呼び方の変遷については，クーンが簡単にまとめている．Kuhn, 1978, pp. 200-201.

トル分布式を理論的に導出する際にエネルギー量子仮説を導入したことにある．（中略）1913 年にボーアがラザフォードの有核原子に量子論を適用し，定常状態をきめる量子条件と光の放出吸収をきめる振動数条件とを仮定して，水素スペクトルをみごとに説明したことによって，量子論はスペクトルによる原子構造の解明という新たな局面をむかえた[3].

つまり，量子力学の形成期をいわゆるコペンハーゲン解釈が現れた時期と見なし，その核となったボーア（Niels Bohr, 1885-1962）の相補性原理が提出された 1927 年以前と以後で量子論の時期を分けようというのである．

こうして，前期量子論という用語を導入することにより，量子条件や定常状態に基づく原子構造論に重心が置かれていた時期と不確定原理と相補性原理の解釈に重心が移った 1927 年以降との対比が容易になる．前期量子論という用語は，単に量子論史上の画期を表すだけでなく，その用語が示す時期の特徴を強調する概念装置としても機能しているのである．

だが，概念装置としての前期量子論という用語は，その語が示す時期において原子構造論に重心が置かれていたという特徴を強調する反面，その時期における原子構造論以外の論点を見えにくくさせる副作用を持っているのではないか．たとえば，ボーアが原子構造論を提出した 1913 年以前の量子論の問題意識の重心はどこにあり，それはどのように移り変わっていったのだろうか．あるいは，量子論の受容過程はどのようなものであったのだろうか．量子論の受容を前提とした「前期量子論」という用語は，こうした問いを抱かせなくする効果を持っていると考えられる．

そこで，本研究では新たに「量子論黎明期」という語を導入する．それは，前期量子論期の中でも，とくにボーアの原子構造論以前の時期を強調するだけでなく，その時期は量子論の必要性がまだ一般に認識されていなかったという点にも注意を喚起するためである[4]. その具体的な時期は，プランクが史上初めて量子概念を提案した 1900 年から，量子概念の必要性が認識された契機とされる 1911 年の第一回ソルヴェイ会議までの，約 10 年間を指す．すなわち，量子論黎明期とは，古典論から量子論への転換期として定義される．

---

[3] 「前期量子論」（西尾成子），『〔縮刷版〕科学技史術史辞典』，1994，p. 570.

[4] 本研究が量子論黎明期と呼ぶのと同時期を示す用語として，「Old quantum theory」がある．しかし，この用語は漠然としていて，前期量子論や量子論黎明期あるいは科学革命といった科学史における概念装置として作られた用語ではない．Leidler, 1993; Pauling, 1985.

1.1. 先行研究の分析と通説の確認

従来の量子論史は，量子論黎明期の歴史をどのように記述してきたのだろうか．本論文の主役であるアインシュタインが論じた二つの理論，すなわち光量子仮説と固体比熱理論に着目すると，先行研究は大きく三つに分類できる．

その第一は，光量子仮説に言及するが固体比熱理論には言及しないもの．第二は，光量子仮説に加えて固体比熱理論も言及するが，歴史的意味づけが不十分なもの．第三は，光量子仮説に代わって固体比熱理論が言及され，それなりの歴史的意味づけが試みられているものである．そのうち，専門的な量子論史にとって先行研究と呼べるのは，第二と第三のタイプである．だが，科学史全般において古典論から量子論への転換がどのように理解されているかを掴むために，まず専門的でない第一のタイプの記述から見ていこう．

第一のタイプは，非専門家向けの科学史記述と軌を一にしており，量子論史を専門としない科学史家や科学史に明るくない科学者の著作に見られる[5]．このタイプに典型的な記述は，相対論と量子論の登場によって古典物理学から現代物理学への転換がなされたとするものである．たとえば，熱力学史で著名な科学史家ハーマンの『物理学の誕生』では，量子論黎明期の歴史は以下のように記述されている．

> プランクによるエネルギー量子の導入は，彼の熱力学的な研究の過程で生じたことであった．そして，エントロピーに純粋に熱力学的な解釈を与えようとしたその熱力学的な研究は，彼自身も重要な役割を演じた 1890 年代の論争の中で誕生したのだった．（中略）アインシュタインは，ローレンツの電子論における離散的な電子とエーテルという二元論をしりぞけ，光は粒子であると仮定することによって，電磁気学的世界像と力学的世界像という二つのものの間に橋を架けようとしたのであった．（中略）20 世紀初めの物理学における著しい理論的革新，すなわちアインシュタインとプランクの研究における相対論と量子論の発展は，そうした発展が生じた知的な文脈，すなわち世界像をめぐる 1890 年代の論争から切り離しては適切に理解することができない[6]．

ハーマンは，いわゆるパラダイム論が古典論と量子論との断絶を強調したことに対して，19 世紀物理学史を力学的世界像と電磁気学的世界像の対立を軸として描き，古典物理学から現代物理学への転換の連続性を強調している．彼の研究は，19 世紀物理学の問題意識と

---

[5] たとえば，バナール，鎮目訳，1966.
[6] ハーマン，杉山訳，1991，pp. 169-170.

その変遷の詳細を明らかにしたものであり，本論文にとってもその意義は大きい．しかし，彼は素朴にも，古典物理学から現代物理学への転換を光量子仮説と相対論が現れたことに求めており，現れた新しい理論がどのように受容されたのかについては一切論じていない．

専門的な量子論史においては，アインシュタインの光量子仮説が学界に受け入れられるまでに少なくとも 10 年以上を要したことが知られている．『科学史技術史辞典』の記述を見てみよう．

> 光については当時，電磁波説が広く承認されており，光量子仮説は容易に認められなかった．1916 年にはミリカンが光量子の実験的確証を与え，1923 年にコンプトンによるコンプトン効果の実験が行われ，ここでは 1917 年にアインシュタインが述べた，光量子は $h\nu/c$（c は光速度）の運動量をもつという説も確証され，ようやく光量子説も公認されることになった[7]．

このように，1905 年に提案されたアインシュタインの光量子仮説は，少なくとも 1916 年のミリカン（Robert Andrews Millikan, 1868-1953）の光電効果の実験による検証まで，ほとんどまったく受け入れられていなかった．このことは，以下で述べる第三のタイプの量子論史が明らかにした科学計量学データによっても裏付けられており，量子論史の専門家には周知の事実となっている[8]．

たしかに，ハーマンの主題は 19 世紀物理学であり 20 世紀物理学ではない．そのため，20 世紀初頭の物理学についての記述が手薄になるのは否めない．また，相対論と量子論ともにアインシュタインが同じ年に発表したため，非専門家向けには，それらはしばしば現代物理学の象徴としてまとめて扱われる[9]．だが，以下で論じていくように，彼の量子論黎明期の歴史記述の中に「比熱」あるいは「固体比熱理論」の語がまったく見当たらないこ

---

7 「光量子説」（辻哲夫），『〔縮刷版〕科学史技術史辞典』，1994，p.357.

8 ただし，ミリカンとコンプトンによって検証される以前に，先駆的に光量子仮説を受け入れていた科学者はいた．我が国では，石原純がそうである．そうした科学者たちについては，次の論稿が詳しい．Brush, 2007；西尾，2011.

9 アインシュタインが，特殊相対性理論，光量子仮説が論じられた光電効果の理論，ブラウン運動の理論を出した 1905 年は，「奇跡の年」とも言われる．現代物理学を象徴する相対論と量子論の重要な業績が，同じ人物によって同じ年に出版されたからである．1905 年から 100 周年にあたる 2005 年は，IUPAP（国際純粋・応用物理学連合）によって「世界物理年」に制定された．世界物理年は，国連決議でも採択され，「国際物理年」として世界中でアインシュタインの偉業を記念する催しが開かれた．当時は自分がアインシュタインについて博士論文を書くことになるとは思いもよらなかったが，筆者は修士課程を一年間休学し，世界物理年日本委員会事務局に勤めた．リグデン，並木訳，2005.

とは，科学史家による科学史としては不適切であると言わざるを得ない．ハーマンも認めるように，比熱の問題は，電磁気学や熱力学とともに 19 世紀物理学の重大な関心事の一つだった．それにもかかわらず，古典物理学から現代物理学への転換を記述する際，彼は比熱について一切言及していないのである．

第二のタイプの歴史記述は，量子力学の教科書におけるそれと軌を一にしている．その特徴は，量子論黎明期に発表された主要な論文すなわち原典に基づいていることだ．そのため，当時の物理学者たちが光量子仮説に対して無反応であったことや，反対に固体比熱理論が注目されたことが踏まえられているものもある．ただし，第二のタイプの記述は，理論の発展に重きが置かれるため，光量子仮説は場の量子論の先駆けとして強調される傾向があり，固体比熱理論は理論内容の説明はなされても歴史的な位置付けが不明確である．例として，朝永の『物理の歴史』を引用しよう．

> アインシュタインの光量子説以後，量子は徐々にいろいろの問題（固体や気体の比熱の問題など）に適用されて従来の古典論の困難を解決し出した．一九一一年ブラッセルで開かれた第一回ソルヴェー会議における討論を契機として空洞輻射の問題が量子の仮説を採ることによってしか解決しえないことが，ようやく学界の一般的承認をうるにいたった[10]．

たしかに，量子力学を学ぶとき，熱力学と電磁気学の合成問題としての輻射，そこから現れた量子の概念，場の量子論の先駆けとしての光量子，量子が解決したその他の問題としての比熱と続く説明は，簡潔で理解しやすい．加えて，上記の説明は，それぞれの理論が提唱された順序に誤りはなく，第一回ソルヴェイ会議でようやく量子論が承認されたと述べているため，歴史的にも問題はなさそうに見える．

しかし，上記引用では，第一回ソルヴェイ会議で必要性が承認される以前の量子論の位置付けがまったくなされていない．すでに確認したように，光量子仮説は即座に受け入れられたわけではなかった．光量子仮説を，量子概念が「いろいろの問題」に適用される際の説明に用いることはできないのである．では，当初量子概念は，一体どのようにして受け入れられていったのだろうか．第二のタイプは，このような問いに答えることはできない[11]．

---

10 朝永編，1953，p. 177.

11 物理学教科書における歴史記述と科学史の歴史記述の違いについては，本論文第 3 章冒頭でも論じる．

ところで，朝永らの量子論史は，彼ら自身の量子論理解だけでなく，天野の『量子力学史』からも影響を受けていたことが知られている[12]．では，その天野は量子論黎明期の歴史をどのように記述していたのだろうか.

天野も，ハーマンや朝永同様，光量子仮説の先見性について触れてはいた．しかし，量子論は，アインシュタイン，カルマン（Theodore von Karman, 1881-1963），ボルン（Max Born, 1882-1970），デバイ（Peter Joseph William Debye, 1884-1966）に加え，ネルンスト（Walther Hermann Nernst, 1864-1941）や「低温研究」に携わった「少数のオランダの学者」によって行われた研究によって展開したと述べていた．また，第一回ソルヴェイ会議について，朝永らは「空洞輻射の問題」を主語にしていたが，天野は前述の多様な研究群の相互作用の帰結として「量子論を国際的にした記念すべき会議」と述べていた[13]．天野による量子論黎明期の歴史記述は，後の専門的な量子論史のような手稿等の一次史料や科学計量学的データを用いた実証的な研究ではなかったが，現在から見ても驚くほど広い射程と正確さを備えた，例外的な量子論史だったと言える[14].

さて，朝永ら物理学者による量子論黎明期の歴史記述は，理論の内容や提出された時期については正しかったが量子論の展開の背景についてはまったく不十分だった．量子論黎明期における固体比熱研究についての彼らの記述は，彼らに影響を与えた天野の記述よりも希薄になってしまっていた．他方，同じ天野の影響で，我が国では世界的に見ても早い時期から本格的な科学史研究が展開されていた．その主なものは，広重らによる現代物理学史研究である．天野の著作に親しんでいた広重は[15]，すでに 60 年代初頭から実証的な歴史記述の必要性を感じ，発展だけでなく受容にも着目した物理学史を描こうとしていた[16]. 1968 年の広重の『物理学史Ⅱ』は，天野と同様に幅広い研究群を射程に入れた物理学史だったと言える．その中で広重は，「光量子と比熱」という節で，以下のような踏み込んだ議

---

12 天野の研究が日本の量子論史家や物理学者に与えた影響については，後藤によって論じられている．Goto, 2000.

13 天野，高田校訂，1973 年，pp. 56-58.

14 天野の理解は，第三グループによる本格的な量子論史研究とも一致していた．ただし，天野にも誤りはあった．たとえば，本論文の第 2 章で論じる，ケルヴィン卿の二つの雲はエーテル風と輻射のスペクトルであるという誤解が，その一例である．我が国におけるこの誤解の源泉が天野であったということが，西尾と高田によって指摘されている．西尾・高田，2001.

15 西尾編，1980.

16 彼は、あるべき科学史とは「科学の発展のある歴史的状況のなかで、どういう契機から、他のもろもろの学説、研究とどのような関連においてある研究がなされ、その結果がどういうふうに受けとられ、それがつぎにどう発展していったかを史実にもとづいて分析」するものだと明確に述べている．広重，1959，pp. 217-229.

論を行った.

> Einstein は，熱の分子運動論も改変されねばならないと考えるにいたった．ではどのように改変すべきか？この問題を考察して，その結果を個体の比熱という具体的な問題に適用してみせたのが，1906 年末に完成され，1907 年に公刊された Einstein の論文「Planck の輻射理論と比熱の理論」であった[17].

量子論黎明期において，なぜアインシュタインは固体比熱理論を論じたのか．本論文の主題でもあるこの問題について，副次的にふれる以上に説明を与えた量子論史はほとんど皆無と言って良い．だが，不十分ながらアインシュタインの固体比熱理論の背景に踏み込むほどに，我が国の量子論史は発展していた[18].

海外においても，およそ 1960 年代後半までに，量子論史研究は本格的なものになっていた．それまでの量子論史は，物理学者から科学史家に転じたローゼンフェルトやヤンマーらが担っていた．これが，60 年代後半には，科学史家としてのトレーニングを受けた者による量子論史へ，とくにアメリカにおける科学史の制度化とともに大きく変化していた．こうした流れの中で，1965 年のクラインの論文が現れ，量子論黎明期の歴史における固体比熱理論の役割が注目されるようになっていった[19].

光量子仮説と固体比熱理論に着目した場合の量子論史のタイプ分けに戻ろう．最後の第三のタイプは，広重，クライン，クーンら，専門の科学史家による量子論史研究である．これらの研究の特徴は，科学論文の内容や発表年だけでなく，史料や科学計量学的データを駆使して歴史が記述される点にある．なかでも，量子論黎明期の歴史を黒体輻射の歴史として描いたクーンの *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*（以下，*Black-Body Theory*）は，クラインが強調した固体比熱理論の役割を組み込み，科学史家による量子論史記述の通説を与えた.

クーンは，当時としては非常に先駆的だった科学計量学的手法やオーラル・ヒストリー

---

[17] 広重，1968，p.160.

[18] すでに何回か引用している西尾や高田を含む本格的な量子論史研究グループが我が国に形成されたのは，天野の影響が大きいと考える．このことは，グループの一員でもある後藤や西尾によっても指摘されている．ただし，ここで引用した「熱の分子運動論も改変されねばならないと考えるに至った」という広重の文章は，アインシュタインが論文中で述べた文章をそのまま借用しているだけで，まったく分析的な説明ではなく，固体比熱理論の量子論黎明期における位置づけは不十分である．Goto, 2000 ; 西尾編，1980．広重の他，そのグループの一員による代表的な量子論史に，以下のものがある．高林，1977.

[19] Klein, 1965, pp. 173-180.

も加えて，輻射理論から現れた量子論がどのような展開を経て科学者集団に受け入れられるに至ったかを論じた．彼が量子論黎明期の歴史をどのように記述していたかを確認するため，彼の考えがまとめられた文章を引用しよう．

> 比熱，したがって，より一般的には物質の運動論は，黒体理論とちがって，物理学および物理化学の標準的問題であったから，それらが量子的な話題の仲間入りをしたことは，量子にふれる科学者層を大幅に拡げることになった．同時に，低温での比熱の振舞いに関する明確な実験的証拠は，プランクのエネルギー分布式（あるいはそれに類するもの）が古典的等分配定理にとって代わらねばならないという信念に，新たな，いっそう強力な基礎を提供することになった．そのような分布が不連続性を要求することの証明は，黒体問題をめぐって展開されたものであるが，そのまま比熱の問題にも適用される．こうして一九一一年以後，アインシュタイン理論は必然的に，発展しつつある不連続物理学に対する認識だけでなく，それが正しいという信念をひろめることになった[20]．

第二のタイプと比較すると，この量子論黎明期の歴史記述には，光量子仮説に替わって固体比熱理論が位置づけられていることがわかる．後の展開から見れば先駆的だったとしても，光量子仮説は当時の量子論の展開には寄与しなかったということが踏まえられているのである．また，第二のタイプでは漠然としていた「古典論の困難」については，「古典的等分配定理」であったと述べられている．この指摘の重要性については，本章末尾で論じる．

Black-Body Theory では，上記の見解に科学計量学的データが加えられている．クーンはそれによって，ネルンストがアインシュタインの固体比熱の量子論論文を初めて引用した 1910 年から第一回ソルヴェイ会議が開かれた 1911 年の間に，量子論についての論文の主要トピックが輻射に関するものから比熱に関するものに急激に変化したことを示した[21]．クラインの主張が，クーンのデータによって裏付けられたわけである．こうして，固体比熱理

---

[20] この文章は，1974 年に日本で開催された第 14 回国際科学史学会でのクーンの発表原稿である．このとき，クーンは 1978 年に出版されることになる *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912* の内容を発表した．だが，その内容が前述のクラインの 1965 年論文と実質的に同等であることが，発表の前にクーンに知らされた．クーンは相当に落胆したのか，*Black-Body Theory* の中では比熱の扱いをここまで詳細に論じずクラインの研究を引用している．西尾編，1977，p.262.

[21] Kuhn, 1978, pp. 206-220.

論に着目したクラインの研究は，クーンによって量子論黎明期の歴史の枠内に組み込まれ，現在まで続く量子論黎明期の歴史記述の通説ができあがった．

こうして与えられた量子論黎明期の通説は，以下のようにまとめられるだろう．すなわち，1900 年にプランクが輻射理論としてエネルギー量子仮説を提出して以来，量子論は輻射理論を軸に展開した．1905 年のアインシュタインの光量子仮説は，先駆的ではあったが量子論の発展に直接寄与しなかった．量子論の発展に寄与したのは 1907 年の固体比熱の量子論の方だった．輻射理論から出たプランクのエネルギー量子仮説の適用範囲を広げるのに役立ったからである．固体比熱理論が 1910 年にネルンストによって引用されることで量子論の関心は高まり，「輻射と量子」と題された 1911 年の第一回ソルヴェイ会議において量子論は国際的に承認されるに至った．

かくして，光量子仮説と固体比熱理論についての記述に着目することで，量子論黎明期の歴史を三つのタイプに分けることができた．第一のタイプは光量子仮説には言及するが固体比熱理論には言及しておらず，第二のタイプは固体比熱理論に言及していても光量子仮説の位置付けを誤るなど，歴史学的には不正確である．第一と第二のタイプでは光量子仮説が量子論の展開に寄与したかのような記述がみられるが，第三のタイプではそうした記述はされていない．第三のタイプでは，光量子仮説に替わって固体比熱理論が量子論黎明期の歴史の中に位置づけられている．光量子仮説と固体比熱理論の取り扱い方は，量子論黎明期の歴史記述を評価する際の，一つの試金石であると言って良いだろう．

クーンによる通説の後，第三のタイプの量子論史は，科学史の専門化と相まって実証研究の度合いを深めてきた．そうした研究の集大成としては，1982 年のメーラとレッヘンベルクによる *The Historical Development of Quantum Theory* が挙げられる．ソルヴェイ会議の正史も著したことでも知られるメーラは，その中で Specific Heats, New Quantum Hypothesis and the First Solvay Conference という一節を割いている．そこでは，固体比熱理論から第一回ソルヴェイ会議への量子論の展開について，これまでの量子論史のうちで最も詳細な記述が与えられており，第 4 章（4.4.）で論じるように，そうした記述の中には通説を修正し得る要素さえ存在する．だが，彼らは彼らが明らかにしたことをもとに，新たな通説を与えることはなかった．実際，最近の総合的な量子論史であるカーオの『20 世紀物理学史』では，クーンが与えた量子論黎明期の通説が踏襲されている．カーオの記述を見てみよう．

> アインシュタインの量子論は，量子論への興味を引き寄せたと言う点において重要である．（中略）量子論が伝統的な物理学の領域に入り込むようになり，黒体輻射の理論

の細かい事柄に興味を持っていないか，あるいは理解していないような多くの物理学者に量子論が知られるようになるのにも，比熱の理論は役立った．この点で，比熱の理論は光量子の理論よりもはるかに重要であった．しかし，その衝撃は即座に伝わったわけではなかった．実際，1910 年から 11 年までは，アインシュタインの比熱の理論は光量子の理論と同様，科学文献の中で言及されずにいた．このときになってはじめて，物理学者はこの理論に注意を向けはじめ，いくらか唐突に，比熱の量子論は重要な研究トピックであると認識されたのである．1913 年には，このトピックに関する出版点数が，黒体の理論に関するものよりも多くなった．当時，量子論は未だ相当に難解な分野であったが，いまやますます多くの物理学者がそれを真剣に取り上げるようになったのだ[22].

このように，量子論黎明期の歴史記述の通説は，*Black-Body Theory* でクーンが与えたものからまったく変化していない．すなわち，固体比熱理論に与えられた役割は輻射の量子論の応用であり，量子論に興味のある科学者の数を増加させたに過ぎないとされているのである．

ただし，まれではあるものの，従来の量子論史の中には，本節で分類したいずれのタイプにも属さないものが存在する[23]．それら例外のなかで，最も詳細な記述が与えられた量子論史は，パイスの『神は老獪にして…アインシュタインの人と学問』である．同書はアインシュタインの伝記として書かれたが，自身も物理学者でアインシュタインの同僚でもあったパイスの記述は，個人の伝記に留まらない重厚な量子論史にもなっている．そのパイ

---

22 カーオ，岡本監訳，有賀・稲葉他訳，2015，p. 94.

23 クラインやクーンも物理学者としての教育を受けたが，例外的な量子論史家たちはクラインやクーンよりも一世代前に，物理学者としての教育を受けていた．たしかに，彼らが生まれたのはクラインやクーンと同様量子力学成立以後で，量子論黎明期の歴史を直接知っているわけではなかった．また，制度化に併せて専門の科学史家になったクラインやクーンと比べると，物理学者としてのキャリアが長い分，一世代前の科学史家たちの記述には素朴な部分もあった．しかし，彼らと後の科学史家たちとの決定的な違いは，量子論黎明期を知るアインシュタインやボーアらに直接師事したことである．そのため，たとえ素朴であっても，彼らの記述には後の科学史家が見過ごしている要素が含まれる可能性がある．本論文では，パイスの他にヤンマーの記述を検討するが，その他の例外的な記述に，不対電子ができる理由を説明した「フントの規則」で知られるフントの『思想としての物理学の歩み』がある．そこには，「1900 年頃に理論物理学が当面していた重要な課題は，比熱が小さいということの理解と化学的性質ならびにスペクトルを原子内の電子の振舞いによって説明することであった」という記述があるが，これは，量子論が輻射理論を軸に展開したとする通説とは明らかに食い違っている．ヤンマー，小出訳，1974；フント，井上・山崎訳，1986，p. 196.

スは，アインシュタインの固体比熱理論について，以下のように述べている．

> 1906 年のアインシュタインの論文以前には, ダイヤモンドの[比熱の]異常性は古典的な等分配の定理の失敗（むしろ適用不能性）から理解すべきだということが全くわかっていなかった．この事実を明白に述べた最初の人物がアインシュタインであった．（中略）1906 年まで，プランク量子は黒体輻射というかなり孤立した問題でのみ有用であった．比熱についてのアインシュタインの仕事はとりわけ重要である．それは，量子の概念がもっとかなり一般的に適用されるべきものであることを明確にした最初の事例だからである[24].

ここでパイスは，アインシュタインが固体比熱を例にエネルギー等分配則が放棄されるべきものであると示したことで初めて量子論の一般性が明らかになった，と述べている．これは，アインシュタインの固体比熱理論を輻射の量子論の応用例と位置付けている通説とは異なる見解であると同時に，次に述べるように，通説が修正される可能性を示している．

クーンは，「プランクのエネルギー分布式（あるいはそれに類するもの）が古典的等分配定理にとって代わらねばならないという信念」が認められることによって古典論が量子論に転換したと述べていた．これにパイスの指摘を組み合わせれば，プランクのエネルギー分布式がエネルギー等分配則にとって代わらねばならないことは，アインシュタインの固体比熱理論によって初めて示された，と考えることができるのである．だとすれば，固体比熱理論は，クーンが考えていた以上に重要であった可能性が出てくるだろう．それはつまり，固体比熱理論が量子論の受容に決定的な役割を果たしたという可能性である．

1.2. 本論文の目的と構成

量子論の受容に際して，固体比熱理論はどのような役割を果たしたのか．この問いに答えるためには，次の三点を検証する必要があるだろう．第一に，物理学者たちは，量子論が代替した古典論の困難であったとされるエネルギー等分配則をどのように見ていたのか．第二に，量子論が古典論に替わる際に中心的な役割を果たしたとされる輻射理論はどのようについてはどうだったのか．第三に，アインシュタインはなぜ輻射理論ではなく固体比熱理論に向かって量子論を展開したのか．第一と第二は，輻射理論を中心に記述する従来

[24] [ ] 内筆者注．パイス，西島監訳，1987，pp. 521-523.

の量子論史も論じてきたため，その検証作業は反証が主なものになる．第三は，従来の量子論史がほとんど論じていないため，独自に検証する必要がある[25].

本論文では，上記三点を明らかにすることを，具体的な目的に設定する．その際，輻射理論と固体比熱理論という二つの異なるトピックを論じるために，本論文では，とくにそれぞれの理論の背後にある物質観に着目し，物質観とその変遷という枠組みを与えることによって，量子論に関わる諸理論を分析する．

量子論黎明期における固体比熱の量子論は，通説が言うように輻射の量子論の応用に過ぎなかったのだろうか，それともパイスが示唆したように量子論そのものの受容に決定的な役割を果たしたのだろうか．この問いを念頭に置きながら，本論文では，量子論に関わる諸理論および科学者たちの物質観の変遷を軸として，輻射の量子論と固体比熱の量子論を量子論黎明期の歴史の中に位置づけ直し，アインシュタインが固体比熱理論を論じた背景と理由を明らかにする．それによって，古典論から量子論への転換の具体的なメカニズムも解明されるであろう．

本論文の構成は，以下のようである．第 2 章では，まず，アインシュタイン同様比熱を例にエネルギー等分配則の放棄を主張していたケルヴィン卿（William Thomson, 1st Baron Kelvin, 1824-1907）の講演内容を分析する，また，当時エネルギー等分配則がどのように見なされていたかを検証し，ケルヴィン卿の講演の評価を行う．

第 3 章では，熱輻射研究の歴史を振り返り，実験，理論，物質観の相互作用の重要性を指摘する．また，物質観の観点からヴィーン，レイリー卿，プランクの輻射理論を分析し，熱輻射研究の歴史を物質観の歴史として捉え直し，アインシュタインの固体比熱理論を論じる土台を作る．

第 4 章では，光量子仮説から固体比熱理論に至るアインシュタインの一連の論文を分析し，彼の物質観を明らかにしながら，彼が固体比熱理論を論じた経緯と理由を解明する．また，量子論が国際的に認められた契機とみなされている第一回ソルヴェイ会議の内容を分析し，固体比熱理論がどのように扱われていたかを確認する．

第 5 章では，熱輻射研究，光量子仮説，固体比熱理論という異なるトピックを，物質観を軸として位置付け直し，輻射理論を軸として描かれる従来の量子論史に替わる新しい歴史記述を与える．

---

[25] 第三点目について，前述の広重やパイス以上の言及は見当たらない．パイスでさえ，アインシュタインが固体比熱の量子論を論じた背景や理由を論じていない．広重，1968；パイス，西島監訳，1987.

前章で引用したように，パイスによれば，アインシュタインが固体比熱を例にエネルギー等分配則が放棄されるべきものであると示したことで，量子論の一般性が初めて明らかにされた．だが，比熱を例にエネルギー等分配則の放棄を主張したのは，アインシュタインが初めてではなかった．

プランクが最初に量子仮説を導入したのと同じ年，1900 年の 4 月に，ケルヴィン卿は「熱と光の動力学理論に架かる 19 世紀の雲」というタイトルの講演を英国王立科学研究所で行った．そこで彼は，古典物理学の完成を阻む重大な問題を二つの雲に例えた．

広重によれば，「エーテルと運動の問題がケルヴィン卿のいう雲の一つであった．もう一つは輻射の理論であった」[26]．周知の通り，エーテルと運動の問題は，1905 年のアインシュタインの特殊相対性理論によって解決された．他方，輻射の問題は，1900 年 12 月にプランクが輻射理論に導入したエネルギー量子仮説によって解決の手段が与えられ，前述の朝永らの量子力学史によれば，1911 年の第一回ソルヴェイ会議によって，「空洞輻射の問題が量子の仮説を採ることによってしか解決しえないこと」が一般に認められるようになった[27]．

だが，広重の理解が誤りであることは，すでに 1985 年に西尾によって指摘されていた[28]．本章でも確認するように，ケルヴィン卿は，比熱の問題を例に挙げて，エネルギー等分配則を問題視していたのだった．

たしかに，相対論と量子論は古典物理学と現代物理学を分ける二大要素であるため，タイトルだけを見れば，ケルヴィン卿の二つの雲がそれらに対応しているはずだと考えてしまうのも無理はない[29]．しかし，西尾が指摘した通り，広重の理解が誤りであることは，原典に確認すれば一目瞭然である．

広重と同様の誤解は，朝永らにも生じていると考えられる．たしかに，輻射理論から現れた量子仮説が，「輻射と量子」と題された第一回ソルヴェイ会議で最終的に認められたというのは，一見すると首尾一貫している．しかし，ケルヴィン卿の雲と同様，実際に内容を見てみれば，そうした理解が誤りであることがわかる[30]．詳細な確認は本稿第 4（4.4.）章に先送りするが，第一回ソルヴェイ会議の表題と内容は一致していなかった．会議の表題

---

26 広重，1968，p. 152.
27 朝永編，1953，pp. 135-41.
28 西尾，1985.
29 実際，西尾による指摘の後も同様の指摘が相次いでいる．山根，1997；富田，2003.
30 それでも，内容をどうみるかが重要であることは，本論文各章で確認されるだろう．第 5 章でも論じる．

は「輻射と量子」だったが，会議の主題はエネルギー等分配則の是非であり，その是非を論じる際の具体例として俎上に載せられていたのは，輻射の問題というよりは比熱の問題だったのである．

つまり，ケルヴィン卿が批判した古典論の問題も第一回ソルヴェイ会議で議論された古典論の問題もエネルギー等分配則だったのであり．いずれも問題の核心は輻射ではなく比熱の問題として現れていたということになる．これは，輻射理論を軸とした量子論史の常識が与える予想とは大きく異なる事実である．

ケルヴィン卿が指摘してから第一回ソルヴェイ会議で再び議論されるまでのおよそ 10 年間に，エネルギー等分配則はどのように見られていたのだろうか．また，ケルヴィン卿が指摘した比熱の問題と第一回ソルヴェイ会議で議題に挙がった比熱の問題の相違点は，一体どこにあったのか．あるいは，パイスの指摘が正しいとすれば，量子論黎明期において，アインシュタインの固体比熱理論は具体的にはどのような役割を果たしたのか．以下の各章でこれらの問題に取り組むために，本章では，まずケルヴィン卿の主張と当時のエネルギー等分配則の状況を確認し，量子論黎明期の歴史の中に位置付け直そう．

2.1. ケルヴィン卿の「第二の雲」

「熱と光の動力学理論に架かる 19 世紀の雲」と題されたケルヴィン卿の講演は，「熱と光を運動論として捉える動力学の美しさと明晰性は，現在二つの雲に覆われてしまっている」という文章で始まっている[31]．彼はその冒頭で，エーテル風の問題を一つ目の雲，そして「二つ目の雲は，エネルギー分配に関するマクスウェル - ボルツマン学説である」と明確に述べている[32]．

彼はまた，「マクスウェルが発見したこの法則について，私は今まで一度も実験的証拠を見たことはないし，実験的な証明は非常に難しいと考える」と述べ，理論が予測する理想気体の比熱と実在気体の比熱の齟齬などを例に挙げる．そうして彼は，「もし理論を熱力学と捉えるなら（中略）それは雲としか見えない」として，エネルギー等分配則を批判したのだった[33]．以上のことは西尾と高田の研究も確認する[34]．

ケルヴィン卿は，「彼 [マクスウェル] らの理論は（中略）どの論文をとっても，彼らは

---

[31] Lord Kelvin, 1900, p. 1.
[32] Lord Kelvin, 1900, p. 2. 西尾と高田も述べたように，これは原論文を読めば一目瞭然である．西尾・高田，2001.
[33] Lord Kelvin, 1900 p. 11.
[34] 西尾・高田，2001.

エネルギーの等分配の（中略）根拠について言及していない」と述べていた[35]．この指摘は，1886 年のテイト（Peter Tait, 1831-1901）による批判と同様だった．多原子分子であれば単原子分子より自由度は多くなるはずで，エネルギー等分配則が予測する比熱はますます実験事実から解離する．テイトはこのようにエネルギー等分配則を批判していた[36]．ケルヴィン卿は，「ボルツマンとマクスウェルともに，気体分子運動論における理論と実験の矛盾について認識しており，さらなる説明の必要性を感じていた」[37]として実験事実の側に立ち，理論の側に不備があると論じていたのである．

さらに，ケルヴィン卿は，エネルギー等分配則を擁護するレイリー卿（John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh, 1842-1919）を名指ししして批判した上で[38]，「 [エネルギー等分配則の理論の] 困難を取り除くためのもっとも簡単な方法は，その学説を放棄することである．そうすれば第二の雲は消えてなくなる」とまで述べていた[39]．

しかし，次節で確認するように，エネルギー等分配則は，マクスウェル（James Clerk Maxwell, 1831-1879）とボルツマン（Ludwig Boltzmann, 1844-1906）が理論を提出してから約 40 年が経過し，当時は古典論の一角を成す理論と見なされていた．それにもかかわらず，ケルヴィン卿はエネルギー等分配則を放棄すべきであると主張していた．その主張の妥当性はともかくとして，彼は古典論自体を見直す必要があると考えていたと言えよう．

少々脇道にそれるが，ここで，エネルギー等分配則を古典論の限界と喝破したケルヴィン卿の講演に，輻射の問題がまったく含まれていなかったことを指摘しておきたい．エネルギー等分配則を輻射の問題に適用したのは，ケルヴィン卿の論敵であったレイリー卿だった[40]．本節直下で述べるように，レイリー卿にとっては，エネルギー等分配則は古典論の一角以上の意味があった．彼は，エネルギー等分配則の有効性を示すために，エネルギー等分配則が解くべきパズルとして輻射の問題を導入したのである．言い換えれば，彼は輻射の問題を古典論の枠組みの中で解ける問題だと見なしていた．したがって，レイリー卿は輻射の問題を古典論の限界だとは見なしていなかった．また，ケルヴィン卿は輻射の問題を扱ってもいなかった．輻射の問題については，ケルヴィン卿もレイリー卿も，そこから古典論の限界を見出してはいなかったと言うことができる．

---

35 [ ] 内筆者注．Lord Kelvin, 1900, p. 9.
36 Tait, 1886.
37 Lord Kelvin, 1900, p. 39.
38 ここでケルヴィン卿が引用しながら批判しているのは，この論文の三か月前，1900 年 1 月にレイリー卿が発表した以下の論文である．この論文については，第三章（3.3.）でもふれる．Lord Rayleigh, 1900b.
39 [ ] 内筆者注．Lord Kelvin, 1900, p. 40.
40 Lord Rayleigh, 1900a.　このことは，西尾・高田，2001.によっても確認される．

レイリー卿の議論は，輻射現象をエネルギー等分配則によって説明しようとする初めての試みでもあった．彼が輻射理論にエネルギー等分配則を適用したのは，ケルヴィン卿の講演から二か月後，プランクがエネルギー量子仮説を発表する六ヶ月前，1900 年 6 月のことだった．レイリー卿のアプローチが熱輻射現象をうまく説明できないことは明らかだったが，次章（3.3.）で論じるように，当時は実験が進展したことによって，実験結果と最も合うと考えられていたヴィーン分布式の信頼が揺るぎつつあった．そのため，レイリー卿のアプローチが現象を部分的にしか説明できないことは，当時はそれほど深刻な問題とはならなかったのだと考えられる[41]．その証拠に，レイリー卿の式は，その後いわゆるレイリー・ジーンズ式にまで発展されられた．このことは，すぐ下で述べる．

レイリー卿は，輻射の理論は「エネルギーの分配に関する Boltzmann-Maxwell の学説にともなう困難によって苦しめられている．この学説によれば，振動のすべてのモードはいずれもえこひいきなしに扱われねばならない．そしてまだ説明されていないある理由からこの学説は一般にはなりたたない」と述べてから，「低い方のモードに適用するだけなら可能であるとも思われる」として，音響理論との類推でエネルギー等分配則を輻射理論に適用していた[42]．

レイリー卿が述べた前置き部分に関して，従来の量子論史には，ケルヴィン卿だけでなくレイリー卿も当初からエネルギー等分配則を疑問視していた，あるいは古典論の限界を認識していたという主張がある[43]．しかし，もし彼がエネルギー等分配則を疑問視していたとすれば，そもそもエネルギー等分配則で輻射の問題を説明しようとするこの論文の主張はなりたたない．また，彼にはエネルギー等分配則を擁護する動機があった．エネルギー等分配則は，クラウジウス，マクスウェル，ボルツマンらが気体分子運動論から議論をする以前，すでに 1845 年にウォーターストン（John James Waterston, 1811-1883）によって提出されていた．だが，ウォーターストンの論文は，当時の王立協会に無視され埋もれてし

---

41 このことは，カーオによっても確認される．ただし彼は，当時はエネルギー等分配則が古典論の一角として認められていなかったと述べている．彼は，ドイツの輻射研究者たちがエネルギー等分配則を用いなかったことを以て，当時エネルギー等分配則が認められていなかったと安易に結論付けている．当時のエネルギー等分配則の状況は本章と次章で論じる．それによって，カーオの認識が誤っていることは説得的に示されるはずだが，ここでは，カーオがドイツの輻射研究者たちのうちで，エネルギー等分配則を批判あるいは否定した例を一つも挙げていないことを批判しておく．カーオ，岡本監訳，有賀・稲葉他訳，2015， pp. 87-89.

42 長波長領域のこと．Lord Rayleigh, 1900a, p. 540.

43 『20 世紀物理学』の中のレッヘンベルクの記述が典型的である．レッヘンベルク，並木編・訳，1999.

まった．そのことに気づき，同論文を掘り起こしたのがレイリー卿だったのである[44]．レイリー卿は，王立協会がウォーターストンの先見性を理解できなかったことを恥じていた[45]．さらに，彼は，1904 年にラムゼー（William Ramsay, 1852-1916）とともにノーベル賞を受賞することになるアルゴンの発見についての論文で，アルゴンが単原子気体であることを説明するためにエネルギー等分配則を根拠の一つに用いていた[46]．

したがって，前述の前置き部分だけを切り取ってレイリー卿がエネルギー等分配則を疑問視していたとするのは，部分的描写の誤謬と言うほかない．彼がエネルギー等分配則を古典論の限界だと考えていたという主張については，論外である．では，彼はどのようなつもりで前置きを述べたのだろうか，という疑問が残るが，それは次章（3.3.）で明らかにすることにしよう．

レイリー卿が導入した式が彼自身とジーンズ（James Hopwood Jeans, 1877-1946）によって修正され続けたことからもわかるように，彼らは古典物理学の範囲内でアドホックな修正を行うことによって，エネルギー等分配則を維持したまま現象を救うことができると考えていた．実際，彼らは理論を修正・発展させ続けた．現在我々がレイリー・ジーンズ式として習う式を彼らが得たのは，1905 年のことだったのである[47]．第 4 章（4.4.）でも確認するように，ジーンズは，1911 年の第一回ソルヴェイ会議の段階に至ってもエネルギー等分配則を擁護していた．通説を含む従来の量子論史はしばしば，量子論黎明期においてエネルギー等分配則がすでに古典論の限界だと見なされており，それゆえ量子論は輻射研究者の中では認められていたという前提に立っている[48]．しかし，以上で確認したことから，少なくともレイリー卿とジーンズについてはそうではなかったことは明らかである．彼らは，輻射の問題をむしろ古典論の枠内で解かれるべき問題だと認識していた．

さて，こうした状況を考慮すると，ケルヴィン卿のエネルギー等分配則批判は，非常に前衛的な主張だったことがわかる．ケルヴィン卿の主張は，その理論的根拠もやはり前衛的だった．そのことは，同じ問題に対するギブズの反応との対比によって浮き彫りにできる．ケルヴィン卿の批判の根拠が，理想気体で予測される比熱と実在気体で測定される比熱の違いや自由度の問題だったことはすでに見た．エネルギー等分配則と気体比熱の不一

---

44 Brush, 1974.
45 Waterston and Lord Rayleigh, 1892.
46 ラムゼーはノーベル化学賞，レイリー卿はノーベル物理学賞をそれぞれ受賞した．Lord Rayleigh and Ramsay, 1895.
47 Jeans, 1905.
48 この問題については，第 4 章以下でも取り上げる．レッヘンベルク，並木編・訳，1999, pp. 151-152；カーオ，岡本監訳，有賀・稲葉他訳，2015，p. 86，p. 94.

致は広く知られており，ギブズ（Josiah Willard Gibbs, 1839-1903）もケルヴィン卿と同様の指摘をしていた．だが，ケルヴィン卿がエネルギー等分配則の放棄を主張したのに対し，ギブズの意見はケルヴィン卿とはずいぶん異なっていた．

> 純粋に熱力学的な現象だけに限っても，二原子分子気体の自由度の数などという単純な問題で，もう逃れられない難問にぶつかる．よく知られているように，理論的には一分子あたり 6 個の自由度が割り振られるはずであるが，比熱の実験では 5 個の自由度しか数えられないのである．したがって，物質の構造についてのいろいろな仮定をしたうえで仕事を進めるのでは，不確かな土台の上に建物を建てることになることは明らかである．
> このようなたぐいの難点を考えた挙句，著者は，自然の謎を説明しようという企てはひとまず諦めて，より控え目な目標で満足する他ないと思うようになった．それは力学の統計的な一部門について，もっとはっきりとした命題を追求しようということである．この場合には，仮定が自然の事実と矛盾しているというような誤りは起こりえない．もともとこの点について何の仮定もしていないからである[49]．

このように，ケルヴィン卿と同様，ギブズも自由度の問題として現れるエネルギー等分配則の問題を認めていた．しかしながら，そこからエネルギー等分配則の放棄まで主張したケルヴィン卿と異なり，ギブズはエネルギー等分配則の理論的不備を棚上げして済ませていたのである．

ギブズがなぜエネルギー等分配則の理論的不備を棚上げすることができたかは次章（3.1.）で詳しく論じるとして，ここでは，彼がどのように棚上げしているかに注目しよう．彼は「物質の構造についてのいろいろな仮定をしたうえで仕事を進めるのでは，不確かな土台の上に建物を建てることになる」と述べている．この記述は，当時の物理学者たちが原子や気体分子のモデルについて，どのように考えていたかを考えるための好例である．

クラウジウス（Rudolf Clausius, 1822-1888）の議論に典型的だが，エネルギーを状態量のみで表す熱力学が成立する以前，初期の熱力学理論では気体分子の運動が仮定されていた[50]．だが，当時の「物理学者たちは，物質についての粒子論的な理論を一般的に仮定することと，分子的な構造についてもっと具体的なモデルを採用することとを，慎重に区別」し

---

[49] Gibbs, 1980, p. VII.
[50] カードウェル，金子訳，1989；山本，2009.

ていた[51]．上で引用したギブズの記述も，「分子的な構造についてもっと具体的なモデルを採用すること」に対する留保の表明であると考えられる．

次節で論じるように，粒子論的モデルを仮定する物理学者にとって，粒子あるいは原子や分子はもっぱら単純な剛体球か質点を意味していた．当時は原子の実在性が確認できていなかったため，彼らにとっても原子や分子はあくまで仮想的なモデルである．だが，そのようなモデルは，ケルヴィン卿やテイトの主張の根拠となった多原子分子の多自由度とは異なり，モデルの上に構造を要求するようなモデルではなかった[52]．ケルヴィン卿の主張の理論的根拠は単に前衛的だったのではなく，ギブズの言葉を借りれば「不確かな土台の上」に建てられた「建物」だと見なされたのだと考えられる．ケルヴィン卿には実験事実という根拠があったが，実験事実だけでは根拠とは見なされなかったのである[53]．次節で見るように，エネルギー等分配則はむしろ各方面で確証され，着実に古典論の一角を形成していた．

2.2. 1900 年までのエネルギー等分配則

本節では，ケルヴィン卿がエネルギー等分配則の放棄を主張した 1900 年までに，エネルギー等分配則がどのような状況に置かれていたのかを確認する．

エネルギー等分配則とは，マクスウェルとボルツマンによって定式化された，分子の一自由度あたりの平均エネルギー $(1/2)kT$ がすべての自由度に対して等しく分配されるとい

---

51 ハーマン，杉山訳，1982，p.133.

52 モデルの中にではない点に注意．ここでの自由度に関する議論は，原子構造論ではなく，分子構造論についてのものである．

53 ケルヴィン卿の主張が受け入れられなかったことは，科学史と科学哲学（英米系の科学哲学というよりはフランスのエピステモロジー）の観点から見て大変興味深い事象である．このような事象は，当時の科学に限定的だったのか，それともどの時代でも起こり得ることなのだろうか．たとえば，ミリカンとコンプトンによる実験事実よって受け入れられた光量子仮説の場合は，実験事実が理論の受容にとって決定的だったように見える．だが，光量子仮説は，そもそもモデルの上に構造あるいはアドホックな別の説明原理を要求していない．すると，理論の受容にとって重要なのは，実験事実というよりはむしろ実験事実が説明しようとする新理論が別の説明原理を要求しないことや，新理論が既存の理論体系やその理論体系で受け入れられているモデルの中だけで説明できることなのではないか．「決定実験」や「パラダイム」あるいは「イノベーション」という言葉を用いて片づけるのは簡単だが，そのような用語によって，ここで挙げたような事象の具体的なメカニズムの解明がおざなりになっている可能性がある．この可能性は，第 3 章以下でも論じていくが，本論文の核心にも関わるので第 5 章で改めて論じることにしよう．

う，気体分子運動論上の理論である[54]．マクスウェルは 1960 年の論文「気体の動力学的理論の例示」において，クラウジウスの平均自由行路を用いて完全弾性球としての気体分子の衝突過程を考え，平衡状態にある理想気体の単原子分子一つの運動エネルギーが $(3/2)kT$ であることを示した[55]．このとき，彼は気体分子の速度分布関数，いわゆるマクスウェル分布をはじめて導いた．

マクスウェルは，粘性，熱伝導，拡散などの気体の諸性質を説明する理論の構築も試みたが，後の彼自身による実験で，理論に反して気体の粘性が温度に比例して変化することがわかった[56]．また，熱伝導の理論も，クラウジウスによって批判を受けた[57]．そのため，マクスウェルは 1866 年の論文「気体の動力学的理論について」では，分子の想定を完全弾性球から質点に置きかえた[58]．彼は以下のように述べている．

> 本論文において，私は気体の分子を一定の半径を持った弾性球ではなく，その方向が常に分子の重心のごく近くを通過し，その大きさは重心の距離の或る関数によってごく精密に表される力によって互に反発しあっている小さな物体もしくはより小さな分子の集団として考えることを提案する．私はさまざまな温度での空気の粘性に関する私の実験結果からこの理論修正を行った[59]．

だが，気体分子を質点と考えると，平衡状態への移行を気体分子の振る舞いによって説明できなくなる等，分子を大きさのある剛体ととらえるか大きさのない質点と捉えるかで，一長一短が生じることになった．この問題に対して，ボルツマンは，統計平均を用いることで，分子の大きさや衝突過程の詳細に立ち入ることなく気体分子運動論を論じることができた．マクスウェルは，ボルツマンの一連の論文に呼応し，最終的に以下のように理論を一般化させた．

> 質点はあらゆる距離において互いに作用してよく，エネルギー保存則に合致するなら，いかなる外力の作用を受けても良い．直接証明に必要な唯一の仮定は，実際の運動状

---

54 ただし，原論文では彼らは二人とも k は使っていない．いわゆるボルツマン定数は，1868 年の論文に初めて登場したが，初めて k と表現したのはプランクで，1900 年 12 月論文においてだった．
55 Maxwell，1860.
56 Maxwell, 1846; 1849.
57 Clausius, 1862.
58 Maxwell，1866.
59 Maxwell，1866, p. 29.

態のままに放っておかれると，系は遅かれ早かれエネルギー方程式に合致するあらゆる位相を通過するであろうということである[60].

1866 年から始まり 1877 に完結するボルツマンの一連の議論は特筆すべきものばかりだが，ボルツマン方程式と H 定理が初めて論じられた 1872 年論文はとくに有名である．しかし, なかでも気体分子運動論と比熱に関して重要なのは, 1868 年論文と 1876 年論文である．彼は, 1868 年論文で粒子が内部自由度を持つ場合でも理論が成り立ち得ることを示し, 1876 年論文では，炭素，ホウ素[61]，ケイ素を除くほとんどすべての単純な固体でデュロン・プティの法則を説明できることを示したのである.

デュロン・プティの法則とは，1820 年にフランスのデュロン（Pierre Louis Dulong, 1785-1838）とプティ（Alexis Thérèse Petit, 1791-1820）によって発見された法則で，単純な固体元素の原子量と比熱の積が一定になるというものである[62]．この法則があらゆる元素に適用できるわけではないことはすぐにわかったが，当時の化学にとって重要な問題であった原子量の決定に役立っていた[63]．そのため，デュロン・プティの法則は 19 世紀を通じて実用性を保ち続けていた.

マクスウェルとボルツマンによって定式化されたエネルギー等分配則は，単原子分子気体の比熱比と，デュロン・プティの法則が予測する固体比熱を説明することができた．ただし，エネルギー等分配則は，単原子分子気体の比熱比とデュロン・プティの法則について，完全な説明を与えた訳ではなかった．上述のようにボルツマンの固体比熱理論には炭素，ホウ素，ケイ素という例外があった．ケルヴィン卿も指摘していたように，マクスウェル自身，気体分子の自由度の説明についてエネルギー等分配則が不完全であることは率直に認めていた.

分光学によると，いくつかの分子が非常に多くの異なる種類の振動を行うことができます．それらは 6 変数（剛体の自由度）よりずっと多い，大変数多くの複雑な系に違いありません．分子理論がかつて直面したことのない最大の困難を，あなた方の前に示します[64].

---

60 Maxwell, 1879, p.714.
61 ボルツマンは臭素と書いたが，それは単純な誤りで，正しくはホウ素である.
62 Petit and Dulong, 1819.
63 Fox, 1968; Laidler, 1993, pp. 322-323.
64 パイス，西島監訳，1987，pp. 521；Maxwell, Niven, ed., 2011, p. 418.

しかし，エネルギー等分配則は，単原子分子気体については，水銀蒸気の比熱の測定によって確証されていた．また，デュロン・プティの法則の例外については，ヴェーバー（Heinrich Friedrich Weber, 1843-1912）の測定によって理論的不備も補われていた[65]．1875年のヴェーバーの研究は，単なる実験的補足ではなかった．ダイヤモンドの比熱がデュロン・プティの法則に沿わないことはすでに1840年代から知られていたが，ヴェーバーはこれが温度依存性による系統的誤差であると論じたのである．

彼は，－100℃から＋1000℃の領域で，ダイヤモンドの他，ホウ素，ケイ素，亜鉛について測定を行い，彼の説を実証した．これで，ボルツマンが例外としていた元素についても，理論的説明が可能になったわけである．ヴェーバーは「固体元素の比熱についてのデュロン・プティの法則は例外のない厳密な法則になった」と述べた[66]．

以上確認してきたように，19世紀半ば以後，エネルギー等分配則は，着実に古典論の一角を形成しつつあった．エネルギー等分配則には問題もあったが，それらはむしろ古典論の枠組みの中で解かれるべく，各方面で研究が進められていたのである．本章で確認したことから，1900年前後のエネルギー等分配則は，レイリー卿とジーンズだけでなく，マクスウェル，ボルツマン，ヴェーバーによっても，古典論の限界とはみなされていなかったと言える．

ただし，「不確かな土台」，すなわち粒子モデルを巡る状況は，エネルギー等分配則とは異なり，必ずしも確立されていったわけではなかった．気体分子運動論においては，とくにボルツマンの統計力学において，粒子モデルはその必要性を増していった．他方，上で引用したマクスウェルの文章にも表れているように，分光学によって得られたデータによって粒子モデルに基づいて分子構造を想定することが困難になってきていた．さらに，熱力学においては，とくに化学熱力学の発展によって，粒子モデルを不要とする立場が現れていた．

粒子モデルを巡る状況は次章で詳しく論じるが，いずれにせよ，ケルヴィン卿の講演はこのような状況下で行われたものだった．その状況とはつまり，エネルギー等分配則が確証されたのに対して，それが仮定していた粒子モデルは不要とされている状況である．彼の主張は，実験データという具体的な反証例があったものの，分子の実在性が確認されていない段階で，粒子モデルに基づく分子構造およびその自由度の問題を理論的根拠に，エネルギー等分配則を放棄すべしというものであった．つまり，彼は，当時は不必要とされている仮定に基づいて確証された理論を放棄すべしと主張していたのである．

---

65 ヴェーバーの理論が誤っていたことを示したのは，ほかならぬアインシュタインだった．
66 Weber, 1875.

2.3. 小括

本章で確認したことをまとめよう．量子論が承認される契機だったとされる 1911 年第一回ソルヴェイ会議の主題，すなわちエネルギー等分配則と比熱の問題は，1900 年の時点でケルヴィン卿によって指摘されていた．ケルヴィン卿は，理想気体と実在気体の比熱のずれと分子構造の自由度の問題から，エネルギー等分配則を批判していた．

しかし，その頃のエネルギー等分配則は，ボルツマンによる固体比熱理論やヴェーバーによる測定によって確証されたと見なされており，古典論の一角を形成するに至っていた．また，エネルギー等分配則が仮定していた粒子モデルは，分光学や化学熱力学によって不必要な仮定だと見なされるようになっていた．

そのため，分子構造を理論的根拠としてエネルギー等分配則を批判したケルヴィン卿の主張は，実験事実という証拠があったものの，不必要な仮定に基づいて確証された理論の放棄を主張することだと受け止められた．つまり，そこで重要だったのは，実験事実そのものではなく，むしろ科学者たちが共有する仮定と合致しているかあるいは合致させることができるか否かだったと言える．ケルヴィン卿の主張は先駆的ではあったものの，科学者たちが共有する仮定に基づかなかったために受け入れられなかったのである．

ケルヴィン卿が主張したエネルギー等分配則放棄の必要性は，10 年後の第一回ソルヴェイ会議でようやく認められた．たしかに，その時はケルヴィン卿が主張した時とは異なり，エネルギー等分配則に替わる理論として量子論があった．だが，本章で確認したように，実験事実でさえ，科学者たちが共有する仮定との関係性が厳しく問われるのである．だとすれば，量子論も，科学者が共有する仮定との折り合いが付けられなくては，その受容はなされなかったのではないか．では一体，エネルギー等分配則の放棄と量子論の承認は，どのような議論を経てなされたのだろうか．その際，実験と理論，そして科学者たちが共有する仮定は，どのような関係性にあったのだろうか．また，その際の議論の焦点は一体どこにあったのだろうか．続く第 3 章と第 4 章で，従来の量子論史が扱いきれていないこれらの疑問を解き明かしていこう．

第 3 章：実験，理論，物質観

本章では，通説では量子論誕生の直接のきっかけとされる，熱輻射研究の歴史を振り返る．本章では，前章の終わりで述べた科学者たちが共有する仮定，中でも熱力学における粒子モデルの経緯を確認し，それが熱輻射研究の歴史の中でどのような役割を担ったのかを明らかにしよう．

ふつう物理学教科書では，主な輻射理論として，ヴィーン分布式，レイリー・ジーンズ式，プランク分布式の三つが扱われる．そこでの典型的な説明は，以下のようなものになるだろう．長波長領域でヴィーン分布式が実験と合わないことがわかり，長波長領域の実験結果と合致するレイリー・ジーンズ式が提出された．だが，レイリー・ジーンズ式は，逆に短波長領域と合致せず，いわゆる紫外発散と呼ばれる結果を導くことになってしまう．そこで考え出されたのがエネルギー量子仮説に立ったプランク分布式だった．一般向けの物理学教科書の説明は，現在の視点から当時の理論や実験結果が整頓されているため，わかりやすい．だが，それは，当時の文脈が抜け落ちているためである．

物理学教科書から抜け落ちた文脈が一体何だったのかについて，科学史家たちは様々な角度から論じてきた．たとえば，クラインや辻は，プランクを化学熱力学の文脈に位置づけ，輻射理論を粒子モデルに依らない熱力学に還元することがプランク分布式の目的だったと論じた．他方クーンは，プランクが熱力学と電磁気学を調和させようとしていたことを強調した[67]．プランク分布式を導くにあたり，なぜ彼がエネルギー等分配則を適用しなかったのかについては，とくに科学史家の議論が白熱した．クラインはヴィーン分布則からの逆算であると述べたのに対して，クーンはプランクの物理学が連続体を前提としたものだったとして，プランク分布式は不連続性を前提としたボルツマンの物理学が導入された結果得られたものだと述べた[68]．

科学史家たちがしてきたことは，彼らが対象とする科学者たちの考え方を明らかにすることだったと言い換えることができるだろう．ここで言う科学者の考え方とは，科学哲学で言われる「発見の文脈」に対応するものである．だが，発見の文脈は，物理的な制約によって生じるようなものから科学者の思いつきまで多岐に渡る[69]．このため，論理実証主義の科学哲学者ライヘンバッハは，「発見の文脈」は非論理的なものであるため論理学の対象

---

[67] 辻監修，1966，p. 39.

[68] この問題は，クラインによって提起された．その後多くの量子論史家が議論に参加しているが，諸説紛々として定まっていない．論争のまとめを小長谷が行っている．Klein, 1962; 小長谷，2013，pp. 267-273.

[69] Reichenbach, 1951, p. 231.

ではなく，論理学者が分析する科学的発見は「正当化の文脈」すなわち「与えられた事実とそれらの事実を説明する理論」だけであると述べ，科学哲学の対象から科学における「発見の文脈」を切り捨てたのだった．たしかに，後にファイヤアーベントが述べたように，宗教観や世界観あるいは「探求の心理」を含んだ議論は「なんでもあり」なものに発散してしまう可能性がある[70].

そこで本論文は，議論の発散を防ぐために，発見の文脈の中でもとくに理論と実験事実の相互作用に焦点を絞ることにする．また，世界観や宗教観との違いを強調するために，理論と実験事実の相互作用の結果として科学者たちが得る考え方，すなわち科学者たちが共有する仮定の土台となるものを，本論文では「物質観」と呼ぶことにする．以下では，量子論に関わる諸理論における物質観を明らかにし，そうして明らかにした物質観を軸に量子論黎明期の歴史を見直していく．そうすることで，輻射理論と固体比熱理論という異なるトピックを量子論史の中に位置づけ直そうというわけである[71]．本章では，まず熱輻射研究における物質観を明らかにし，その変遷を確認しよう．

3.1. 熱輻射研究のはじまり

本節では，ヴィーン，レイリー卿，プランクそれぞれの熱輻射理論が出揃うまでの，熱輻射研究の歴史を振り返る．上で述べたように，ここで明らかにしたいのは，先行研究では十分に扱われてこなかった熱輻射研究の背後にある物質観である．

まずは前章（2.2.）の続きから，すなわち粒子モデルに基づく物質観のその後を確認することから見ていこう．エントロピー概念は，クラウジウスによって熱力学に導入され，ボルツマンによって統計的な解釈が与えられて確立したと言われる[72]．クラウジウス，ボルツ

---

70 ファイヤアーベント，村上・渡辺共訳，1981.

71 本研究における「発見の文脈」の位置付けは，ギャリソンの研究におけるそれと近い．本研究が物質観と呼ぶものを，ギャリソンは研究伝統と呼んでいる．彼は高エネルギー物理学の歴史をイメージ派とロジック派という二つの研究伝統に分解し，実験と理論にまたがる研究伝統の交易として歴史を描いた．ただし，本論文とギャリソンともにクーンを批判しているが，クーンが晩年に述べた「歴史的科学哲学」やクーンがモデルにしたコイレを生んだフランスのエピステモロジーには，ギャリソンや本論文のアプローチを先取りしている部分があることは指摘しておくべきだろう．本研究やギャリソンと同様のアプローチを取っている研究として，「ブラッグの泡モデル」についての山口の研究が挙げられる．Galison, 1997 ; クーン，安孫子・佐野訳，1998 ; バシュラール，金森訳，1991 ; 山口，2014.

72 熱力学は蒸気機関の作業効率の研究に端を発している．エントロピー概念が確立され化学熱力学が交流するまでの熱力学では，作業媒体として気体分子が想定されていた．Brush, 1974 ; カードウェル，金子訳，1989 ; 山本，2009.

マンともに，粒子モデルに立脚していたが，逆説的なことに，ボルツマンがエントロピー概念を確立しようとする頃，粒子モデルに立脚せずに同概念の有効性を示す理論が現れた．それは，化学熱力学理論である．

1875 年から 1878 年にかけて，ギブズは大学紀要に“On the Equilibrium of Heterogeneous Substances”と題された一連の論文を投稿した．そのとき彼が導入した自由エネルギー（ギブズ自由エネルギー）と化学ポテンシャルは，粒子モデルを仮定しなくともエントロピー概念が有効であることが示すものだった[73]．その後，1882 年にヘルムホルツ（Hermann von Helmholtz, 1821-1894）が *Thermodynamik chemischer Vorgänge* を著してヘルムホルツ自由エネルギーを論じ，大学紀要に掲載されていたため埋もれていたギブズの論文は 1888 年に物理化学者オストヴァルトによって翻訳されヨーロッパに普及した[74]．オストヴァルトはさらに進んで，粒子モデルを含むあらゆる仮想的物質観の排除を主張した．最終的に彼は，エントロピーをエネルギーの散逸を表す量と捉え，物理学を状態量の勘定だけに還元すべしと主張するに至った[75]．

化学熱力学の興隆に伴い，多くの物理学者が熱力学に粒子モデルは不要であると考えるようになっていった[76]．輻射理論以前に化学熱力学理論を研究していたプランクの考え方も，オストヴァルトほど論争的ではなかったものの，やはり物理学から極力仮説を排除しようというものであった[77]．分子の実在性が確認できていない当時は，熱力学を状態量のみで記述することができる「化学熱力学の発展は，化学反応にエントロピー概念を適用することについてのヘルムホルツやプランク自身の研究も含めて，ボルツマンによるエントロピー解釈に替わるような，熱力学の基礎を与えるもの」と見なされたのである[78]．このことが，前章（2.1.）で論じた，ギブズが「不確かな土台」の上に建てられた「建物」についての議論を棚上げできた理由であったと考えられる．

しかし，周知のように，オストヴァルトのエネルギー論にはボルツマンの原子論が対抗した．化学熱力学に加えて，プランクにも影響を与えたマッハ（Ernst Mach, 1838-1916）の哲学も，原子論者には逆風だった．だが，物理学のすべてにおいてモデルの役割が不要になったわけではなかった．以下で確認していくように，粒子モデルは，気体分子運動論か

---

73 ハーマン，杉山訳，1982.
74 Servos, 1990; Leidler, 1993.
75 稲葉，2010.
76 他にも，化学分光学の結果によって，分子の構造についてのモデルを作ることが難しいことが判明していた．ハーマン，杉山訳，1982.
77 第 3 章（3.4.）で詳しく論じる．プランク，芝訳，1938.
78 ハーマン，杉山訳，1982.

ら輻射理論に引き継がれていったのである．

さっそく熱輻射研究の歴史を振り返り，粒子モデルがどのように引き継がれていったのかを確認していきたいところだが，ここでその際の注意点を喚起しておこう．ボルツマン，ギブズ，オストヴァルトの三者を簡単に比較してみてもわかるように，エントロピー概念を採用しているという点では同じでも，それぞれが考えるモデルや理論におけるモデルの位置付けは異なっていた．同様に，ある熱輻射理論が他の理論と似たモデルを採っていたとしても，そのモデルが何のどのような物理現象についてのものかという点まで同じとは限らない．したがって，物理学理論を論じる際には，具体的な物質とモデルとの関係性についての科学者の考え，すなわち物質観に注意する必要がある．

では，物質観を意識しながら，熱輻射研究の歴史を振り返っていこう．周知のように，プランクのエネルギー量子仮説は，黒体輻射のエネルギー分布を説明する際に現れた．その黒体輻射研究は，もともとはキルヒホッフ（Gustav Kirchhoff, 1824-1887）とブンゼン（Robert Bunsen, 1811-1899）による分光学研究に端を発している．分光学研究は，ニュートン（Isaac Newton, 1643-1727）がプリズムを用いて太陽光のスペクトルを分解して以来，主に数理物理学的アプローチによって発展してきたが，1802 年のウォラストン（William Hyde Wollaston, 1766-1828）による暗線の発見および 1815 年のフラウンホーファー（Joseph von Fraunhofer, 1787-1826）による再発見以来，化学的アプローチによっても進められることになった．フラウンホーファーの研究によって，物質が固有の線スペクトルを持つ可能性が示唆されたため，分光学が元素の同定や発見に用いられ始めたのである．その最たるものが，キルヒホッフとブンゼンの共同研究だった．

フラウンホーファー線の研究をしていたキルヒホッフと炎色反応の研究をしていたブンゼンは分光分析法を確立し，輝線スペクトルとフラウンホーファー線が同じ原因で生じることを証明した．その結果，ブンゼンはセシウムとルビジウムを発見した．他方，キルヒホッフは「同一温度における同一波長の輻射線に対して，輻射能と吸収能の比はあらゆる物体において同一である」というキルヒホッフの法則を発見した．彼は続けて，その比が 1 になる仮想的な物質として黒体概念を導入した．その際彼は，「ある 1 つの空間が等温物体で囲まれており，輻射線はまったくこの物体を通りぬけることができないとすれば，空間内部の輻射線束はその特性・強さによって，ちょうど，あたかも輻射線束が同一温度の完全黒体から発したかのような性質を帯び」るとして，黒体輻射と空洞輻射が理論上同等であると述べていた[79]．こうして，キルヒホッフの研究によって輻射理論の研究が始まったの

[79] Kirchhoff，前川訳，1970，p. 3.

だが，次節で詳しく論じるように，黒体輻射と空洞輻射の違いは物質観にとっては非常に重要なポイントである．そこで，ここからは黒体輻射と空洞輻射の違いにも注意しながら，熱輻射研究の歴史を振り返っていこう．

輻射理論における次の展開は，今日シュテファン・ボルツマンの法則と呼ばれる法則の発見と定式化だった．すなわち，1879 年にシュテファン（Josef Stefan, 1835-1893）が白金線の全輻射エネルギーは絶対温度の 4 乗に比例することを実験結果から導き，1884 年にボルツマンがマクスウェルの電磁場の理論を使って証明した．シュテファンは，輻射のエネルギー流を調べることで，経験的に熱力学的な法則を導いた[80]．

ボルツマンは，電磁的な光の圧力を熱輻射の圧力として扱い，黒体と輻射場の間の熱の移動を電磁気学理論で説明した[81]．このときボルツマンが仮定していたのは，空洞輻射ではなく黒体輻射である[82]．また，彼が電気的な光の圧力を論じる際に仮定しているのは，「Krönig が気体論で用いた考察法」すなわち気体分子運動論的な圧力と，同じく気体分子を仮定していた「Bartoli によって発見された輻射熱と熱力学の第二主則の関係」に見られる動く鏡の思考実験だった[83]．ボルツマンの理論以後，熱輻射研究は熱力学的であると同時に電磁気学的なものになったが，彼が輻射理論に適用した電磁気学の背後には粒子モデルが存在していたことを強調しておく．

上述のボルツマンの理論を含む 1880 年代の輻射理論の研究は，物理学史においては「ヘルムホルツ学派」あるいは「ベルリン学派」（以下，ヘルムホルツ学派で統一する）として位置付けられている[84]．ヘルムホルツと彼の弟子筋の科学者たちの研究を，マクスウェル電磁気学を検証し，熱力学と電磁気学を調和させようとする試みだとまとめることができるからである．しかしながら，以下で論じるように，学派のメンバーの物質観はけっしてひとまとめにできるようなものではなかった．

ボルツマンの次にこのヘルムホルツ学派の研究を展開したのは，ヘルツ（Heinrich Hertz, 1857-1894）だった．周知の通り，1888 年にヘルツは，マクスウェル電磁気学が理論的に予測していた電磁波の存在を実験によって証明した．ここから，輻射線とは電磁波に他ならないことが明らかになり，熱輻射研究がヘルムホルツ学派の主なテーマになった．だがここで，同じヘルムホルツ学派の熱輻射研究でも，ボルツマンとヘルツとでは物質観がまったく異なっていた点に注意しなければならない．

---

80 Stefan, 1879.
81 Boltzmann，前川訳，1884，p. 33.
82 同上.
83 同上.
84 天野訳・編，1943，pp. 7-10; Baird eds., 1998, pp. 1-8; 小長谷，2012，pp. 38-42.

彼らの理論の対象は，ともに輻射線である．しかし，上で強調しておいたように，ボルツマンの輻射圧の仮定は気体分子で，彼の理論では，エネルギーの授受は分子の衝突によって説明される．そのため，彼の理論では，エネルギーの授受のための媒質を必要としない．それとは逆に，ヘルツの電磁波では，エネルギーの授受は波動モデルで理解されるため，媒質を必要とするが気体分子のようなものは必要としないのである．このように，当時の科学者の発見の文脈を明らかにするためには，彼らが重視したのは電磁気学か熱力学か，あるいはある研究伝統に連なるか否かといった分析では不十分である．そのためには，彼らが実験をどのように受け止め，理論をどのように構築していったのか，すなわち物質観を明らかにしなくてはならない．

さらに言えば，物質観は，理論の形成だけでなく受容にもかかわっていると考えられる．たとえば，相対論の形成という文脈で一連の議論を展開していた広重は，ヘルツの実験は「エーテルの実在をいっそう確実にするものとして受け止められた」と指摘していた[85]．この指摘をボルツマンの理論に向ければ，ボルツマンの理論はエーテルの実在をいっそう不要にするものだったと言うことができるだろう．これまでの物理学史では，エーテルの問題は相対論の文脈でしか議論されてこなかったが，こうして物質観から歴史記述をし直すことによって，エーテルの問題が輻射理論の問題とも関係していた可能性を指摘することもできるのである．だが，量子論と相対論の関係についての議論は今後の課題とすることにして，本論文では輻射理論と固体比熱理論の関係性に集中しよう．

さて，熱輻射研究の歴史に戻ろう．取り上げておかねばならないのは，ボルツマンとヘルツと同じヘルムホルツ学派に数えられる，二人の科学者である．一人目はロシア出身のミヘルゾン（Vladimir Alexandrovich Michelson, 1860-1927）で，二人目は前章にも登場したドイツのヴェーバーである．二人ともアメリカのアレゲニー天文台のラングレー（Samuel Pierpont Langley, 1834-1906）が得た太陽スペクトルのデータに基づいて輻射エネルギーの分布式を導いたが，やはり彼らの物質観もそれぞれ異なっていた．

1879 年，ミヘルゾンは，「固体によって放出されたスペクトルの絶対的な連続性は，その原子の振動の完全な不規則性によってのみ説明することができる．異なる周期をもつ単振動の輻射エネルギーの分布に関する議論は，それゆえに，確率の計算として理解すべきである」と考えた[86]．彼は，マクスウェル分布が固体に対しても成り立つとして，またボルツマンが定式化したエネルギー等分配則にもふれながら，ラングレーのデータを説明するための分布式を導いた．彼は輻射源としての黒体が原子によって構成されていると考え，そ

[85] 西尾編，1980，p. 197.
[86] Michelson, 1887, p. 425.

の原子のランダムな運動によって輻射のエネルギーを説明しようとしたのだった[87]．だが，ミヘルゾンが依拠したラングレーのデータは不正確であったため，ミヘルゾン分布式は他の実験結果と合わなかった．そのため，ヴェーバーはラングレーだけでなく他の多くの実験結果に依拠した．ヴェーバーはミヘルゾン同様経験的に輻射法則を導いたが，その際彼は，上述のミヘルゾンの黒体についての仮定を不必要として批判していた[88]．

このように，ヘルムホルツ学派の輻射理論は，熱力学と電磁気学の調和を目指すという点は共通していても，それぞれの理論が説明しようとするもの，その際のモデルとモデルの位置付けによって，物質観がまったく異なっていたのである．ボルツマンとヘルツでは，輻射線の性質についての理論という点では共通していても，それぞれモデルが異なっていた．ミヘルゾンとヴェーバーでは，輻射源についての性質を含めるか輻射線の性質だけに着目するかで相違があった．ミヘルゾン理論は，モデルを超えて実在的な原子を仮定していた．

上述のような分析はなされていなかったものの，天野もこうした理論の背景とその奥行きについて説明を試みていた．少々長くなるが，発見の文脈にかかわる当時の認識論上の対立項が網羅的に取り上げられているため，彼の文章を引用しておこう．

> 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，従来の力学に依って解決されなかった現象の推移する向きを支持した．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 の発生の因となり，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

[87] Michelson, 1887.
[88] Weber, 1887.

確率論を応用して，気体分子の速度分布式を導くに及んで学界の注目を惹いた気体の運動学的理論がその現われの一つである．

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 の論争は愈々熾烈となった．しかも Boltzmann の輝かしい業績にも拘らず，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用を否定し論難する攻撃が絶えなかった．この理論の一般化であるエネルギー等分配則が，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 の直感的な力線が 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者 Lord Kelvin の嘆声を外に，漸く直感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．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な信頼を齎らし，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[89]．

この天野のまとめは，実質的に本論文第 1 章でふれたハーマンの歴史記述の先取りである．しかし，ハーマンも天野も，発見の文脈を網羅的に扱いすぎており，その分析が不十分なものになってしまっている．そのため，彼らは，彼らが指摘した発見の文脈の各要素の関係性を混同してしまっている．

たとえば，ハーマンは 19 世紀物理学から 20 世紀物理学の変化を「力学的世界像の衰退」として描いているが，そのとき彼は「力学的世界像」という言葉に気体分子運動論の物質観を含めている[90]．しかし，以下で見ていくように，気体分子運動論的物質観は，むしろその後盛り返していくのである．その片鱗が，すでにミヘルゾンの理論に現れていたことは，上で確認した通りである．だが，ハーマンは，19 世紀のイギリスにおける機械論哲学の伝

[89] 天野訳・編，1943，pp. 11-13.
[90] ハーマン，杉山訳，1982，p.164.

統に着目する余り，イギリスと大陸の科学者の物質観の相違を混同し，機械論哲学の衰退を力学的世界像の衰退として描いてしまっている．つまり，彼は，世界像レベルと物質観レベルの発見の文脈を混同してしまっているのである．

天野は,「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」と述べているが，彼はボルツマン原理をプランク分布式における「原子論の立場」として指摘するのみで，量子論黎明期を通じて「原子論の立場」がどのような役割を担ったかを論じていなかった．天野も，発見の文脈に関わる世界観や認識論を指摘するのみで，それらの分類と分析が不十分だった．そのため，量子論黎明期においてどのレベルの文脈がどのように機能していたのかは，まったく不明なままである．

そこで, 次節以下では, 代表的な輻射理論を提出したヴィーン（Wilhelm Wien, 1864-1928），レイリー卿，プランクそれぞれの物質観を明らかにし，かつそうして明らかにした物質観を軸に彼らの理論を量子論黎明期の歴史の中に位置づけ直していこう．

だが，その前に，ここで一旦熱輻射研究の歴史を締めくっておこう．ヴィーンとプランクの研究は，帝国物理工学研究所（Physikalisch-Technische Reichsanstalt，以下 PTR）を中心に展開した．PTR は，ボルツマンがシュテファンの法則を証明したちょうどその頃，ベルリンに設立された．PTR は，1887 年に，ジーメンス（Werner von Siemens, 1816-1892）がヘルムホルツを所長とするという条件で 1884 年に寄贈した 50 万マルクの建設費をもとにベルリンに設立された研究所で，標準や度量衡の研究および検定が行われた．この頃には，物体から放出される光が物体の性質に依らず温度のみに依存する熱輻射現象は，温度測定と光度標準にとって重要な研究テーマになっていた．ただし，PTR は決して工業規格のためだけの研究所ではなかった．PTR の設立の背景には，物理学研究を職務とする科学者を確保するというジーメンスの明確な目的があった[91].

PTR には，ルンマー（Otto Lummer, 1860-1925）やクールバウム（Ferdinand Kurlbaum, 1867-1927）ら実験家が集った．彼らは，ベルリン大学にいたルーベンス（Heinrich Rubens,

---

91 この背景は，天野が先駆的に論じていた．彼は，PTR 設立の背景にドイツの冶金学を中心とした工業化があったこと，ドイツ・ガス水道連盟（Der deutsche Verein von Gas- und Wasserfachmännern）が PTR に標準ロウソクとヘフネル灯の精密な比較を依頼したことで「光度標準と高温測定の研究が互に連携して，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」と述べている．（pp. 7-10; 21-25.）また，そうした状況下で，大学生数が増加し，「教育負担の増大による研究活動の阻害」が生じていた．さらに，基礎研究を重視するジーメンスとヘルムホルツの理念は，「技術開発競争を伴った国家間経済競争が激化」していた時期における，国を挙げての競争力強化という具体的な目標とも合致していた．田中，1990.

1865-1922）やプリングスハイム（Ernst Pringsheim, 1859-1917），ハノーファーにいたパッシェン（Friedrich Paschen, 1865-1947）らと切磋琢磨しながら実験を重ねた．ルンマーとプリングスハイムは，ヘルムホルツの弟子だった．ルーベンスとクールバウムも，ヘルムホルツの影響下にあったベルリン大学で学んでいた．かくして，19 世紀末のドイツとくにベルリンは，ヘルムホルツ学派によって，輻射研究の一大拠点となった．ここから，ヴィーンとプランクの輻射理論が現れたのである．

3.2. ヴィーンの輻射理論における物質観

以下では，物理学教科書でも扱われるヴィーン，レイリー卿，プランクの輻射理論を，それぞれ物質観の観点から分析していく．

だが，その前に，輻射理論の物質観を検討する際の注意点を喚起しておきたい．前節で見たように，黒体輻射と空洞輻射は，すでにキルヒホッフが黒体を定義した時点から同等だと見なされていた．そのためか，従来の量子論史で，黒体輻射と空洞輻射の違いに注目したものはほとんど皆無である．たとえば，前期量子論に詳しい朝永の『量子力学 I』は以下のように量子力学史を始めている．

> 物理学の中に量子力学という部門ができたのは比較的に新しいことである．それは Planck（プランク）が今世紀の初め（1900 年）に，いわゆる「エネルギー量子」というものを発見したときに始まると考えてよい．（中略）一群の理論物理学者は「空洞輻射の問題」というものに，この問いに答える一つの手がかりを認めて，この問題を解くのに努力していた[92]．

このように，朝永は，空洞輻射を前提に量子論史を描き始めており，黒体輻射と空洞輻射の違いを意識していない．それに対して，クーンの場合は，*Black-Body Theory* という著書のタイトルが示すように，一見すると前節で論じた輻射理論の歴史が踏まえられているように見える．しかしながら，クーンの歴史記述においても，黒体輻射と空洞輻射はまったく区別されていない．それは，メーラ，レッヘンベルク，カーオら他の量子論史家の歴史記述でも変わらない．

黒体輻射と空洞輻射の区別をしていない量子論史の特徴と問題点は，その違いを意識し

---

[92] 朝永，1969，p. 1.

ている量子論史との対比によって明らかにできる．両者の相違を意識している量子論史は，理論だけでなく実験にも着目したもので，その代表格はドイツのカングローによる研究である．また，我が国には，小長谷による優れた実験機器の先行研究がある．カングローは，パッシェンが始めた気体輻射の研究から，ヴィーン分布式の仮定およびヴィーンとルンマーによる空洞輻射実験の開始に至る経緯を論じ，黒体輻射と空洞輻射の違いに注意を向けていた[93]．カングローや小長谷の研究と比較すると，量子論史の通説は，いずれも理論の発展を中心に描かかれすぎていることがわかる．また，理論の発展に着目した歴史においては，理論の仮定や物質観についての記述が欠落していることを指摘できる．物理学教科書の記述は，その最たるものだと言えよう．

物質観を検討するためには，理論が仮定する具体的な物質や実験がどのようなものだったのかを踏まえる必要がある．幸い，熱輻射研究における理論と実験および機器構成の変遷は，小長谷によって詳しく論じられている[94]．そこで，以下では小長谷の研究を下敷きにして，主要な熱輻射理論の物質観を明らかにしていこう．

まず，とくに黒体輻射と空洞輻射の違いが物質観にどのような影響を与えたかを明らかにするために，最初に空洞輻射実験を提案したヴィーンとルンマーを取り上げたい．1895年，ヴィーンとルンマーは，それまでの固体輻射源に替えて，空洞輻射源を採用する提案を行った[95]．彼らが空洞輻射源を提案した実験的な背景には，高温度における輻射の測定の困難があった．それまでの固体輻射源は酸化鉄等で表面を黒く覆った白金線や板だったが，それらは高温度では表面が劣化してしまうため，黒体のように扱えないという問題があった．彼らは，高温でも黒体のように振る舞う実験機器を必要としていた．そこで考え出されたのが，空洞輻射源だった．これ以後，輻射実験の標準的な機器構成が固体輻射源から空洞輻射源へ徐々に移行していった[96]．

上で述べたように，空洞輻射が黒体輻射と理論的に同等であることはキルヒホッフが当初から指摘していた．だが，熱輻射研究において，実際に実験装置として採用されるようになるのはこのとき以後だったのである．したがって，ヴィーンとルンマーが空洞輻射を採用するまでの輻射研究における物質観は，輻射線自体の性質を論じたボルツマンやヘルツの理論を例外として，黒体輻射実験に基づくものだったと言える．

しかし，黒体輻射と空洞輻射は，実験的には全く異なるとしても，キルヒホッフが指摘

---

93 Kangro, 1970.
94 小長谷，2012.
95 Wien und Lummer, 1895.
96 小長谷，2012，pp. 125-201.

していたように，やはり理論的には同等ではないのか．そう考えると，これまでの量子論史同様に，ある重要な点を見過ごすことになってしまう．その重要な点とは，輻射線のエネルギーや波長，輻射線自体の性質，輻射源など，理論が仮定する対象によってそれぞれの物質観が異なるということである．たしかに，エネルギーや波長だけに着目すれば，平衡状態に達した黒体輻射と空洞輻射は同等だと見なすことができる．しかし，輻射線自体あるいは輻射源に着目した場合はそうではない．その場合は，輻射の担い手は何なのか，それはどのように輻射を放出・吸収するのかといった説明と，その説明に伴う物質観の提示とが求められるからである．このように，黒体輻射と空洞輻射の違いは，実験的なものであると同時に理論的なものでもあり，物質観に関わる重要な論点を含んでいる．さらに，上で示唆したように，物質観は理論の受容にも関わっていると考えられる．

では，ヴィーンの物質観がどのようなものだったのかを見てみよう．カングローが指摘したように，1895 年にヴィーンがルンマーとともに空洞輻射実験を提案したのには，実験家パッシェンによる気体輻射論が背景にあったと考えられる[97]．だが，ヴィーンは，彼が空洞輻射実験を提案するより前，パッシェンが気体輻射論を述べたのと同じ 1893 年に，すでに気体分子運動論的物質観を取り入れていた．彼がヴィーン変位則を導いたその論文で想定していた実験は未だ黒体輻射だったが，輻射線自体についての彼の仮定はボルツマンの気体分子運動論的仮定であった．そのことは，論文の内容はもとより冒頭の文章から現れている．冒頭で，彼は以下のように述べている．

> Boltzmann は Bartoli の案出した過程を基礎にして，輻射の照射表面におよぼす圧力の存在が熱力学の第二主則から結論できることを証明した．このような圧力は，他方では光の電磁理論の帰結であり，Boltzmann はこの点を考慮して黒体に対する Stefan の輻射法則を導きえた．
>
> この結論は，全輻射を考慮するだけでなく，輻射をそれぞれの波長ごとに分けて考えるならばもっと完全にすることができる．

彼は輻射線を電磁波だと受け止めつつも，ボルツマンの考え方を徹底しようとして，輻射線に対して粒子モデルを仮定していた．彼はここから議論を進め，ボルツマンがバルトーリ（Adolfo Bartoli, 1851-1896）から借りて導入した動く鏡とよく似た，完全白体でできた円筒と弁のついた可動ピストンの思考実験により，断熱膨張やドップラー効果をたくみに

[97] Paschen, 1893.

用いてヴィーン変位則を導いた．彼の言葉を借りれば，「黒体の正常な放出スペクトルにおいては変化する温度とともに各々の波長は，温度と波長の積が一定のままとどまるように変化する」のであり，この結果は「H.F. Weber がかれの輻射法則から導いたエネルギーの最大値の変化と一致する」のだった．ここでヴィーンが述べているのは，前節でふれた，1879 年にヴェーバーが経験的に導いた輻射法則のことである．ヴィーン変位則は，ヴェーバーが経験的に導いた輻射法則の理論的導出だった．

だが，上で確認したように，ヴィーン変位則の導出におけるヴィーンの物質観は，ヴェーバーが批判したミヘルゾンのそれと同じ，気体分子運動論的描像だった．ミヘルゾンもヴィーンも黒体輻射実験を想定していたが，このときのヴィーンの物質観は，ミヘルゾンが黒体に仮定した実在的な粒子モデルではなく，ボルツマンが輻射線を説明したときと同様の仮想的な粒子モデルに基づくものだった．しかし，空洞輻射を提案した後の 1896 年，彼がヴィーン分布式を導出する際には，彼の物質観はミヘルゾン同様の実在的な粒子モデルに基づくものに変わっていた．かなり長くなるが，ヴィーンの独特な物質観を詳細に把握するために重要だと考えられるので，フォントを小さくして彼の議論をまるごと引用しよう．

完全な輻射法則をある仮定によって基礎づけようとする研究は E. v. Lommel と W. Michelson によってなされた．後者はその場合つぎのような前提をとった：

1. 多数子の分子がある場合の Maxwell の速度分布式は固体に対してもなりたつ．
2. 1 個の分子によって励起される振動の周期 τ は，分子の進行速度 υ と式

$$\tau = \frac{4\rho}{\upsilon}$$

によって関係する．ここで ρ は定数をあらわす．（この仮定は輻射の励起の種類に関する一定の前提から導かれる．）

3. 1 個の分子から放出される輻射の強度は，おなじ振動周期の分子の数，さらに温度の不定関数や，また運動エネルギー（lebendigen Kraft）の未知関数に比例する．この場合運動エネルギーにはさらにもう一つの仮定によって，υ^2 の冪乗に制限されている．

Michelson がこれらの仮定から得た法則は，エネルギー極大のときの波長 λ_m に対して

$$\lambda_m = \frac{\text{定数}}{\sqrt{\vartheta}}$$

となる． ϑ は絶対温度をあらわす．このほかにはこの法則は全放射（Gesament-emission）を温度の関数として未定のままにしてある．

さてわたしは，Maxwell の速度分布式を輻射法則の基礎づけに使った Michelson の巧妙な考えをやはり利用することにして，しかしこの領域では輻射の励起についてわれわれが全く無知なのでことさら不確かな仮説の数を, Boltzmann と私が純粋に熱力学的な手順で得た結果と関連づけて減らそうと努めた．

それでもなお残っている仮説は，依然として理論的な基礎の不確かさをとどめたままになるが，しかし得られた結果を直接にまたひじょうに広範に経験と比較しうるという利点も提供する．

経験によって確認されるか否認されるかは，したがって逆に仮説が正しいか正しくないかをも決定することになり，その限りでは分子論を一層整備することにも役立つ．

等温の壁に囲まれた真空空間に黒体の輻射が存在するという命題は，空洞からは透明な壁で，外からは反射壁で閉じこめられている気体から輻射ができる場合にも成り立つ．ここで気体はすべての波長に対し有限の吸収能をもっていなければならない．温度上昇だけにより熱輻射を放出する炭酸ガスや水蒸気のような気体が存在することには疑問の余地がない．強く過熱した蒸気は気体として扱いうるし，種々の物質の適度な混合によりすべての波長に対して有限の吸収能をもつような混合気体はいつでも作れると考えてよい．しかしこのさい気体が電気的，あるいは化学的過程の影響で放出するような輻射を考えてはならない．

したがって輻射体として気体を考えれば，運動学的気体論を基礎にして，Maxwell の速度分布式が成りたつであろう．絶対温度は気体分子の平均運動エネルギーに比例するであろう．この仮定は Clausius と Boltzmann の研究により高度の確実さをもつとみられるようになり，また Helmholtz の単循環系についての研究により運動エネルギーにも絶対温度もともに与えられたエネルギーの積分因子になることがわかり，なお一層支持されるようになった．

混合気体の種々の成分の導入で生じる繁雑さをさけるために，考えられている一様な輻射がとくに混合気体のなかの一つの成分から放出されるような混合を考えることにする．

速度 v と $v + dv$ の間にある分子の数は，大きさ

$$v^2 e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}} dv$$

に比例する．ここで α は定数をあらわし，これは平均速度 $\bar{v}$ によれば式

$$\upsilon^2 = \frac{3}{2}\alpha^2$$

によってあらわしうる．したがって絶対温度は α^2 に比例する．

速度 υ の分子が発する振動は，その分子の状態とどんな関係にあるのかまったく知られていない．

一般には分子の電荷は電磁波を励起するという見解が現在ではよく採られる．

各々の分子は，運動する分子の速度のみに依存し，その強さが速度の関数であるような振動を発するという仮説を立てよう．

輻射の過程についてさまざまの特殊な仮定をおいてこの結論に達することはできるだろうが，しかしこのような前提はここではさしあたり全く勝手なものであるから，ぜひ必要な仮説をできるだけ簡単で一般的なものにすることこそ，まず一番確実なことのようにわたしには思える．

一つの分子から放出される輻射の波長 λ は υ の関数であるから， υ はまた λ の関数である．

波長が λ と $\lambda + d\lambda$ の間にある輻射の強さ φ_λ は，したがってつぎのものに比例する，

1. この周期の振動を発する分子の数
2. 速度 υ の関数，したがってまた λ の関数．

このようにして

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

ここで λ と $\lambda + d\lambda$ は 2 つの未知関数を， ϑ は絶対温度をあらわす．

以上，ここまで引用してきた議論を踏まえ，彼はヴィーン分布式

$$\varphi_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5}e^{-\frac{C_2}{\lambda\vartheta}}$$

を導いたのだった（C_1，C_2は定数[98]）．

このように，ヴィーンは，ヴィーン分布式導出の段階ではミヘルゾンの立場に立つことを明言し，クラウジウスやボルツマンが仮定していたモデルとしての粒子を超えて，具体的な物質としての原子を仮定していた．彼が「しかしこのさい気体が電気的，あるいは化

[98] Wien，辻訳，1970，pp. 87-90.

学的過程の影響で放出するような輻射を考えてはならない．したがって輻射体として気体を考えれば，運動学的気体論を基礎にして，Maxwell の速度分布式が成りたつであろう」と述べていることは，強調してもしすぎることはない．彼は，輻射線が電磁波であることは認めるものの，そこから輻射現象の電磁気学あるいは化学的な性質の説明には進まず，輻射源の粒子的な性質の説明に向かったのである．こうして彼は，「各々の分子は，運動する分子の速度のみに依存し，その強さが速度の関数であるような振動を発するという仮説を立てよう」と述べて，輻射源の粒子性と輻射線の波動性を関連付けた．

つまり，ヴィーンの理論が空洞の中に散らばる気体分子を輻射源として想定するようになったことで，彼の理論は輻射線の性質だけでなく輻射源の性質を含むものになり，そこで仮定される粒子モデルは以前よりも実在的なものになったのである．ここで，物質観について着目すべき点は三つある．第一は，理論が想定する実験が黒体輻射から空洞輻射に替わったこと．第二は，第一の点に伴い，粒子モデルが以前よりも実在的なものに変わったこと．第三は，第一と第二の点の結果として，ヴィーン分布則が粒子性と波動性の両方を備えた物質観を持つに至ったことである．このように，従来の量子論史が見落としていた黒体輻射と空洞輻射の違いや輻射線と輻射源の違いは，物質観とその変化に大きな影響を与えていたのである．

ヴィーン変位則を導出する際のヴィーンの仮定は，ボルツマンの輻射圧と同様に，輻射線を説明するモデルに過ぎなかった．しかし，ヴィーン分布式を導出する際には，ミヘルゾン同様，輻射の担い手として原子あるいは分子がより実在的なモデルとして仮定されていた．ただし，ミヘルゾンが黒体の固体原子を想定したのに対し，ヴィーンは空洞中の輻射源として気体分子を想定している．カングローが指摘していた，パッシェンの影響はここに見てとれる．

だが，本節がとくに強調したいのは，ヴィーンがパッシェンから受けた影響というよりは，ボルツマンからミヘルゾンを経てヴィーンに至る物質観の変遷と，上で述べたヴィーンの独特な物質観，そしてヴィーンの物質観の変化が想定される実験の変化に伴って生じていたということである．輻射線の性質，輻射源の作用，固体と気体などの違いはあるものの，彼らは共通して気体分子運動論的物質観をもっており，その物質観は当初のモデル的なものから実在的なものに確実に変化していた．分子の実在性が確認されておらず仮想的なモデルを必要としない化学熱力学やマッハ哲学が影響力を持っている当時の状況の中では目立たないが，ここにはっきりと気体分子運動論的物質観の盛り返しを確認できるのである．ヴィーン理論で仮定された粒子モデルは，明らかに単なるモデルの域を超えて，

実在の域に達しており，彼の物質観は輻射現象に対して粒子性と波動性を見出すものになっていた．このことは，アインシュタインが光量子仮説を論じたときに，プランク理論ではなくヴィーン理論に基づいたことと無関係ではあるまい．次章（4.3.）で詳しく論じるように，プランク理論における共鳴子からは波動性しか取り出すことができないからである．

3.3. レイリー卿の輻射理論における物質観

ヴィーンの物質観は，ボルツマンやミヘルゾンと同様に，分子の実在性が確認されていない当時にあっては大胆なものだったが，ヴィーン分布式は当時もっとも実験結果を満足する理論だったため，しばらくの間は信頼されていた．だが，実験精度の高まりとともに，その信頼が揺らぐことになった．それは，一つには上で述べたヴィーンとルンマーが導入した空洞輻射装置の改良，もう一つはルーベンスとニコルス（Ernest Fox Nichols, 1869-1924）によるいわゆる残留線を用いた実験装置の工夫の結果だった[99]．ルーベンスとニコルスは機器構成を工夫することで，短波長の光を弱め長波長の光だけを分離する方法を開発していたのである[100]．高温度でも耐えられる実験装置と，残留線を用いた測定によって，高温度・長波長領域の高精度なデータが蓄積されてきたのである．

ヴィーン分布式に対する信頼は，1900 年の一年間に急激に失われた．その初めは，1900 年 2 月の，ルンマーらによるドイツ物理学会での報告だった[101]．ルンマーらの「実験結果は，ヴィーン法則のままでは定数 C_2 を「自然定数」とできないこと，波長が長くなると，ヴィーン法則から系統的にずれることを鮮明に表していた．したがって，1899 年 11 月時の結果も含めて考えると，ヴィーン法則を表す分布式は，温度が高く，波長が長い輻射の場合に適用できないことが明らかになったのである．[102]」ヴィーン分布式が信頼できないことは，1900 年 10 月のルーベンスとクールバウムの測定によって決定的になったが，そこに至るまでのレイリー卿のヴィーン分布式評は，レイリー卿の物質観を知るための材料を提供している．

前章でもふれたように，レイリー卿は，1900 年の 6 月に，エネルギー等分配則を輻射理論に適用した．彼の理論は，すぐ上で述べたルンマーらによる高温度・長波長領域の実験によって，ヴィーン分布式に対する信頼が揺らいでいたなかで提出された．

---

99 小長谷，2012.
100 Rubens und Nichols, 1897.
101 Lummer und Pringsheim, 1900.
102 小長谷，2012，p. 175.

その論文でレイリー卿は，ヴィーン変位則については「（わたしの意見では）かなり重要な論証が Boltzmann と Wien によって提起され」たと肯定的に述べていたが，反面，ヴィーン分布式については「理論的な側面からみると，この結論はたんなる推測以上のものではないようにわたしには思える」と批判していた[103]．このヴィーン変位則とヴィーン分布式に対するレイリー卿の態度の違いから，レイリー卿が，前節で述べたヴィーンの物質観の変化を認識しており，かつそれを不必要だと見なしていたことがうかがえる．前節で論じたように，ヴィーン変位則とヴィーン分布式ともに気体分子運動論的物質観に基づいていたが，その違いはモデル的か実在的かの違いにあった．ここでレイリー卿は，分子モデルを実在的なものと考える立場を退けているのである．

実際，このときのレイリー卿の議論には，気体分子運動論的描像はまったく見当たらない．すでに見たように，彼は，ウォータートンの先駆的論文を掘り起し，アルゴンが単原子分子であることを説明する際にエネルギー等分配則を用いたときには，気体分子運動論的物質観を許容していた．だが，このときの彼は，気体分子の衝突ではなく，振動のモードを考えることによって，エネルギー等分配則を輻射理論に適用していたのである．彼は以下のように述べている．

> ここで例として張られた弦が横振動している場合を考えよう．Boltzmann-Maxwell の法則により，エネルギーはその振動数が 1，2，3，…であるようなすべてのモードに平等に分配されねばならない．そこでもし k を λ の逆数とし，振動数を表すものとすれば，(k が十分大きいとき) k と $k+dk$ との間のエネルギーは単に dk で表される．一次元から三次元にすすみ，例として立方体の空気の振動を考えると， k^2 に対する方程式として（『音響理論』，§267）次式をうる．
>
> $$k^2 = p^2 + q^2 + r^2$$
>
> ここで p ， q ， r は三方向への再分の数を表す整数である． p ， q ， r を三次元の配列を形づくる各点の座標とみなせば， k は原点からある点への距離になる．したがって， k が k と $k+dk$ との間に存在することに対応する点の数は，これに相応する球殻の体積に比例し k^2dk によって表されうる．またこれは，波長あるいは振動数に関するかぎり，Boltzmann-Maxwell の法則によりエネルギーの配分を表す．この

[103] Lord Rayleigh，辻哲夫訳，1970，p. 97.

結果を輻射に適用すれば各モードのエネルギーは θ に比例する…[104].

この後，彼はアドホックに指数因子を加え，最初の「レイリー・ジーンズ」式

$$C_1\theta\lambda^{-1}e^{-\frac{C_2}{\lambda\theta}}d\lambda$$

を得た.

こうしてレイリー卿の物質観が浮かび上がると，前章で先送りにしていた，同論文におけるエネルギー等分配則導入の前置きを検討することができるようになる．彼が「エネルギーの分配に関する Boltzmann-Maxwell の学説にともなう困難によって苦しめられている…そしてまだ説明されていないある理由からこの学説は一般にはなりたたない」と述べるとき，それが意味するのは，エネルギー等分配則自体に対する疑義ではなく，ボルツマンとマクスウェルが仮定しヴィーンにおいてはより実在的な仮定にもなっていた，粒子モデルに対する批判だったのである[105]．実際，レイリー卿の物質観の変化は，上で引用した彼の論文が出版される直前，1900 年 1 月に出版された彼の論文“The Law of Partition of Energy”に詳しく論じられている．そこで彼は，ケルヴィン卿，ボルツマン，マクスウェルが仮定していた粒子モデルを批判し，マクスウェルの理論を維持するためには，その仮定，すなわち粒子モデルを拒否しなければならないと明確に述べていた[106].

レイリー卿は，一貫してエネルギー等分配則を擁護していた．しかし，彼の物質観は以前とは異なっていた．以前の彼は，気体分子運動論的描像を許容していたが，このときの彼はそれを退け，代わりに音響理論的描像に依っていた．エネルギー等分配則を支持するという点では同じでも，輻射理論を論じたときのレイリー卿の物質観は，マクスウェルやボルツマンはもとより，以前の彼自身とも異なっていたのである．レイリー卿の物質観の変化については論じていないが，当時の状況についてハーマンも以下のように述べている.

---

104 Lord Rayleigh，辻哲夫訳，1970，p. 98.

105 すでに見たように，ボルツマンは粒子モデルで輻射圧を説明していたが，輻射線が電磁波であることは，ヘルツによって確認されていた．また，第 2 章のケルヴィン卿の主張のように，粒子モデルは，分子の存在が確認できていないにも関わらず，分子の構造を要求しかねなかった．したがって，輻射線の説明には，明らかに衝突する粒子のモデルよりも，振動する弦のモデルの方が適切だった.

106 これは，第 2 章（2.1.）でふれた，ケルヴィン卿がレイリー卿を名指しして批判した論文である．ただし，このときは，彼はエネルギー等分配則を音響理論で捉える物質観は提示していない．Lord Rayleigh, 1900b, pp. 117-118.

分子の行う力学的運動を気体の示す性質と一致するものにしようとしてさまざまな分子モデルが提案され，そうした理論はそれなりの成功を収めた．（中略）とはいっても，実験結果と一致する十全な分子構造のモデルをつくるのは困難であることを，物理学者たちは悟った[107]．

前述の 1900 年 1 月の論文および上で引用した 6 月の論文でのヴィーンの物質観に対する反応から，レイリー卿も上記引用における物理学者たちの一人だったと考えられる．とくに，第 2 章（2.1.）で確認したように，レイリー卿は，粒子モデルの構造を例にエネルギー等分配則の放棄を主張したケルヴィン卿と対立していた．エネルギー等分配則を擁護するレイリー卿にとって，その正しさを粒子モデルに依らずに説明しようとする動機は十分だった．このような理由から，彼はエネルギー等分配則に粒子とは異なるモデルを充てたのだと考えられる[108]．

以上，当時のレイリー卿の熱輻射現象に対する物質観が，振動する弦のモデルに基づくものだったことが確認できた．ヴィーンの物質観との違いは，レイリー卿の物質観には粒子性がないことである．ここで輻射線と輻射源の違いに着目すると，ヴィーン分布式では分子という輻射源が仮定されているのに対し，レイリー卿の議論には輻射源に対する言及がなく，輻射線としての光の性質だけが論じられていることがわかる．ただし，「空気の振動を考える」というレイリー卿の言からわかるように，そのときの彼の説明にはヘルツが明らかにした電磁的性質は含まれていないことに注意しよう．直接述べられてはいないが，このときレイリー卿は，振動が伝わる媒質として，暗黙に非電磁的なエーテルを仮定していたと考えられる[109]．

3.4. プランクの輻射理論における物質観

レイリー卿は，ヴィーンの物質観に含まれる粒子性を批判して，振動する弦という物質

---

107 ハーマン，杉山訳，1982，p. 147.

108 粒子モデルとは異なるモデルをエネルギー等分配則に充てたのは，このときのレイリー卿が史上初だと思われる．

109 ここにイギリス独特の機械論哲学の影響が見て取れるが，議論を哲学的な世界観に還元してしまうと議論の分析が不十分になることは，上で述べたハーマンの例から明らかである．発見の文脈を明らかにするためには，非還元主義的なアプローチと，それぞれのアプローチの協働が必要不可欠だと思われる．本論文は物質観に絞ったアプローチを取るが，世界観や地域性など，今後はその他のアプローチとの協働研究が必要になるだろう．

観のもと，エネルギー等分配則を輻射理論に適用した．しかし，彼はヴィーン理論自体を否定したわけではなかった．実験事実は徐々にヴィーン分布式の信頼を揺るがしていたが，ルーベンスの実験結果によってヴィーン分布式の実験からのずれが決定的であることが明らかにされるのは，レイリー卿の論文が出版された四ヶ月後の 1900 年 10 月のことだった．同年 6 月の段階のレイリー卿は，ヴィーン分布式が短波長領域にしか合致しない可能性を受けて，いわば試験的に，高温度・長波長領域に合致する式を導出しようとしたと考えられる．

事実，論文中で彼は，ヴィーン分布式が，理論的には「Planck により一般的な熱力学的論拠にもとづき支持されている」こと，実験的には「Wien の法則（2）は有力な確証に出会った」としてパッシェンの実験によって支持されていることを認めている[110]．さらに，彼は結論部分で「[レイリーが導いた式が]観測の事実を表しているかどうか，わたしがいうべき立場にはいない．この題目を研究してきたすぐれた実験家たちの手で，問題の解答が間もなく得られることこそ望まれるところである」とも述べていた．

したがって，ヴィーン分布式は，それが仮定する物質観と，高温度・長波長領域でうまくいかないことが問題視されていたものの，当時はもっとも実験結果を満足する輻射理論として認められていたと言うことができる．事実，レイリー卿だけがヴィーン分布式を認めていたのではなかったことは，すぐ上で引用した彼の言の中にも述べられている．ヴィーン分布式が信頼できないことがルーベンスによって決定的になる以前，プランクはヴィーン分布式を「熱力学的論拠」に基づいて導出しようとしていたのである[111]．

本章冒頭で述べたように，プランクはもともと化学熱力学を研究していた．しかし，彼にとっての熱力学は，ボルツマンのそれでなかったのは言うまでもないが，ヘルムホルツのそれでもなかった．そのことは，プランクが著した熱力学の教科書『熱力学講義』に明確に述べられている．そこで彼は，熱力学の考え方を三つに分類している．その第一は，「熱が，不連続な物質と考えられている化学的分子および原子のある種の運動に起因している」とする考え方．第二は，「熱は運動に基づくという力学的熱理論のもっとも重要な仮定だけに限定するのに対して，その運動の本性に関する表象を特定することをさしあたって原則的に放棄する」考え方．第三は，「熱の本質に関する特定の諸仮定を全くやめて，その代わ

---

110 Lord Rayleigh，辻哲夫訳，1970，p. 97.

111 ルンマーの実験結果を知った後でもなお，プランクはヴィーン分布式を導出しようとしていた．このことからも，ヴィーン分布式に対する信頼が相当に大きいものであったことがうかがえる．ただし，それはヴィーンの物質観についての信頼ではなく，レイリー卿のヴィーン分布式に対する評価と同様に，あくまで実験事実を説明する式としての信頼であったことを付言しなくてはならない．そのことは，本節で論じられる．

りに，非常に一般的ないくつかの経験事実から，とりわけ熱学のいわゆる二つの主則から直接出発する」考え方である．彼は，第一と第二の考え方をボルツマン，ヘルムホルツの考え方だと述べ，第三の考え方が「もっとも実り豊か」で「科学の現状に最も良く適応している」と述べていた[112].

ここから，プランクの物質観が，仮説的なモデルを極力排除しようとするものだったことがわかる．だが，だからと言って，彼を化学熱力学の伝統に位置づけるだけでは不十分である．というのも，まず，彼が「もっとも実り豊か」だとした考え方はヘルムホルツの考え方と異なっている．また，上の引用からは，プランクがオストヴァルトと同様の考え方を支持していたようにも見えるが，同書で彼は，粒子モデルについて「それが正確に貫徹できるならば，ともかく最も完全な方法とみなすことができよう」とも述べていたことから，オストヴァルトの考え方とも異なっていることがわかる．したがって，プランクの考え方を，単純に化学熱力学の伝統の上に位置づけることはできない[113]．彼の物質観も，上で論じてきたヴィーンやレイリー卿と同じように，より詳細に論じる必要がある．

では，熱輻射理論研究に転じてからのプランクの物質観を，実際に確認していこう．熱輻射に関するプランクの最初の発表が行われたのは，1895 年だった．その発表「共鳴による電気的波の吸収と放出」では，彼はヘルツ振動子のような電気的振動子が真空の中に存在すると仮定し，その振動子による電磁波の吸収と放出の過程をマクスウェルの電磁理論に基づいて議論していた[114]．ここで，プランクは振動子を電磁波の吸収と放出の担い手として仮定しているが，それがどのような物質なのかは明確にせず，振動子の働きが空洞内の平衡状態を作ると述べていた．

次の 1896 年の「共鳴によって励起され，輻射によって減衰される電気的振動について」では，輻射と電気的振動子が相互作用をして減衰する過程が論じられたが，そこで彼はそのような振動子を共鳴子と呼んだ[115]．このときも，彼はそれが黒体なのか空洞における気体分子なのかを明確に述べていない．以下でも確認されるように，プランク理論における物質や実験的仮定の不在は，彼の物質観の大きな特徴である．

翌 1897 年から 1899 年まで，プランクは「不可逆的な輻射現象について」というタイトルの一連の発表と論文を続けた．論文のタイトルが示しているように，プランクの狙いは

---

112 プランク，芝訳，1938.

113 あくまで化学熱力学を強調したい場合は，プランクの考え方は化学熱力学的伝統の上に位置づけられると表現するのではなく，化学熱力学におけるプランクの物質観は輻射理論に引き継がれた，と言い換えるべきだろう．

114 Placnk, 1896.

115 Planck, 1897.

輻射現象の不可逆性を説明することだった．彼はそこで，ボルツマンが定式化した熱力学第二法則から統計力学的仮定すなわち気体分子運動論的描像を排除しようとして，電磁気学的描像だけによる説明を試みていた．しかし，彼の議論はボルツマンによる痛烈な批判にさらされた．ボルツマンは，プランクが不可逆仮定を説明しようとして仮定した共鳴子による輻射の散乱が，実際は可逆的になることを証明したのである．この結果，プランクは気体分子運動論的描像を排除し電磁気学的描像のみによって輻射現象を説明する試みに，一部変更を加えることになった．そうして導入されたのが，自然輻射と電磁的エントロピーだった．

プランクが導入した自然輻射は，「輻射のフーリエ成分の間には相互関係がないという無秩序性の仮定であって，Boltzmann が気体分子運動論で行った“分子的無秩序”の仮定の類似物であった．[116]」だが，ここから先の彼の議論は，あくまでボルツマンの気体分子運動論的描像を拒否しようとする，彼の物質観の特徴を示している．彼はそうして得られた自然輻射に，電磁振動のモードと位相が生む乱雑さをかけあわせ，電磁的エントロピー S を導入した．そのうえで，電磁的エントロピーが系全体のエントロピーを増大させることを示し，それが熱力学的エントロピーと同等であると述べたのである．

このときのプランクにとっての熱力学的エントロピーは，ボルツマンのそれでもヘルムホルツのそれでもなく，彼自身が「もっとも実り豊か」だと見なした考え方，すなわち「熱学のいわゆる二つの主則から直接出発する」考え方と対応している．こうして彼は，輻射の不可逆性を確保し，さらに気体分子運動論的描像に依らずにヴィーン分布式を導いた．レイリー卿が論文中で述べていたプランクの「熱力学的論拠」とは，このプランクによるヴィーン分布式の導出を指していたのである[117]．

ところで，本章冒頭で述べたように，量子論史ではしばしば，プランクが 1899 年 5 月の論文で，なぜ幸いにもレイリー・ジーンズ式に辿りつかなかったのかが議論になる．しかし，プランクが自然輻射の式に対して，すでに古典論の一角を形成していたはずのエネルギー等分配則を組み合わせず，電磁的エントロピーを編み出して組み合わせた理由は，今のところ諸説紛々として定まっていない．だが，この理由について，物質観の観点からは，以下のように言うことができる．

第一に，プランクは化学熱力学を研究していたときから，一貫して不要なモデルを排除しようとしていた．彼がボルツマンやヴィーンが採用していた粒子モデルを排除しようと

---

116 プランク，西尾訳，1975，pp. 211-212.

117 彼はこの発表内容に序文を書き加え，1900 年に出版した．引用文中でレイリー卿が依拠しているのは，1900 年に改めて出版された論文である．Planck, 1899; Planck, 1900a.

していたことは，プランクが苦心しながらもヴィーン分布式を非物質的描像によって導こうとしていたことから明らかである．したがって，ようやく粒子モデルなしに説明することができるようになった理論に対して，粒子モデルに基づくエネルギー等分配則を適用すれば，自らこれまでの努力を否定することになってしまう．

第二に，プランクは輻射線だけでなく，まったく物質的でないものの，輻射源も仮定していた．前節で確認したように，レイリー卿はエネルギー等分配則を弦の振動モードとして解釈していた．だが，彼のようにエネルギー等分配則を解釈した物理学者は，彼の他には見当たらない．エネルギー等分配則に向けられたレイリー卿の物質観は，それを擁護するために考え出された，かなり特殊なものだったと言えよう．プランクも輻射線を振動によって説明しようとしたが，彼の考え方は輻射線を非電磁的なエーテルの振動だと仮定したレイリー卿とは異なっていた．プランクは輻射線の性質だけを考えていたわけではなく，輻射源として電磁的な振動子についても考えていたのである．加えて，彼は，その電磁的な振動子が，どのように不可逆性を生むかを説明しなければならなかった．つまり，プランクにとっての輻射は，そもそもレイリー卿のように単純にエーテルの振動だけに帰すことができるようなものではなかったと考えられる[118]．

物質観の観点に立てば，以上の二つの理由から，仮にプランクがレイリー卿の論文を読んでいたとしても，彼がレイリー卿の理論を採用することはなかっただろうと言うことができるのである[119]．

さて，プランクの物質観の確認に戻ろう．逆説的な表現であるが，物質の不在という点が輻射理論を論じ始めた当初のプランクの物質観の特徴であったこと．そのことは上で指摘した通りであるが，その特徴は量子概念が初めて現れたときも変わらなかったのだろうか．順を追って確認していこう．

輻射の不可逆性についての議論がまとめられた 1900 年の論文の冒頭で，プランクは輻射理論における彼の物質観を明確に述べている．すなわち，彼は，「熱輻射の電磁的な性質の

---

118 前節で論じたように，物質観はエーテルの要不要とも関わっているが，イギリスの場合は，機械論哲学という大陸とは異なる考え方を考慮しなくてはならない．たとえば，ケルヴィン卿の渦原子が典型的だが，イギリスにおいては磁力線などだけでなく原子や分子でさえ「エーテル充満体」の機械的作用として説明しようとする独特な考え方があった．一方，大陸においてはエーテルと物体は区別されていた．ハーマンが論じている．ハーマン，杉山訳，1982.

119 前節で見たように，レイリー卿自身，試験的にエネルギー等分配則を輻射理論に適用した可能性がある．これについて，クラインも同様の指摘をしていた．PTR を中心に熱輻射実験が盛んだったドイツにおいては，レイリー・ジーンズ式は，そもそもありえないとして真剣に取り合われなかったということもあり得る．そのことは，第 4 章で見るアインシュタインの反応も示唆している．Klein,1962.

認識が進むにつれ，熱理論の第二主則を熱輻射に適用して純粋に電磁的に把握し，おそらくはまた証明することが，緊急の課題となってきた」と述べている[120]．続けて，彼は以下のように彼の理論の仮定を具体的に述べている．

> この場合の第一の前提は当然つぎのようなものである．すなわち，まず輻射熱の放出と吸収の現象は電磁的な成り行きとして理解すること，したがって熱輻射線の放出は，輻射を発する物体の質量をもった原子となんらかの相互作用にあると考えてよいような，ある要素的な振動子によって送り出される電磁波により条件づけられたものとみなすこと，さらにはまた，輻射熱の吸収をあるいは定常電流の抵抗とか，なにかそれに類するあつれきの結果とみるのではなく，ただ共鳴現象，つまり上述の振動子は波を送りだすのみでなく，それに当たる波によって振動も引き起こされるようなものと理解することである．ここにはさらに，振動子が実現する電気振動の減衰はもっぱら電磁的なエネルギーの輻射放出によってひきおこされるということも，あわせて考えられている[121]．

ここから，プランクが一貫して仮説的なモデルを排除し，化学熱力学的な意味での熱力学第二法則と電磁気学によって輻射理論を基礎づけようとしていたことがわかる．したがって，クーンが指摘していたように，彼の輻射現象の理解は，熱力学的かつ電磁気学的なものであったと言うことはできる[122]．だが，すでに何度も注意を喚起してきたように，彼の考え方は，物質観の観点から詳細に見なくてはならない．物質観の観点に立つと，上の引用にはこれまでのプランクの議論にはなかった「原子」が登場していることに気が付く．しかも，彼はその原子を「輻射を発する物体の質量をもった」ものだと述べている．これは，彼の物質観に関わる重要な記述である．

これまで見てきたように，プランクの物質観の特徴は，物質が不在であることだった．したがって，ここで「原子」が登場し，それまでは概念的な存在だった共鳴子が「原子となんらかの相互作用」をするとされているのは，たしかに大きな変化である．しかし，原子と相互作用するということは，プランクが考える共鳴子あるいは輻射源は原子そのものではないということでもある．実際，彼の議論を注意深く追うと，彼が輻射線を「ある要素的な振動子によって送り出される電磁波により条件づけられたもの」だと述べているこ

---

120 Planck，辻訳，1970，p. 139.
121 同上
122 Kuhn, 1987.

とがわかる．彼は，原子が「輻射を発する」と述べる一方で，原子そのものには輻射を放出したり吸収したりする役割を与えていないのである．

そのことは，輻射源として気体分子を仮定していたヴィーンの物質観についてのプランクの言からも裏付けられる．彼は電磁的エントロピーに基づいてヴィーン分布式を導出した後で，以下のように述べていた．

> Wien 氏は，かれの法則を，単位体積中に存在する輻射中心（Stralungscentren）の数と，それらの運動の速度に関するある仮定にもとづいて導いた．ここで展開した理論では，これらの量はなんの役割もはたしておらず，むしろこの法則は§17 で提起した電磁的エントロピーの定義からの必然的な結果であるように思われる[123]．

このように，プランクは，ヴィーン分布式が仮定している実在的な分子が輻射に何の役割もはたしていないことを強調していた．

すると，「輻射を発する」原子という言葉の意味として残る可能性は，黒体だけである．だが，彼はキルヒホッフが考えた黒体がそもそも概念的なものだったことを論じてから，彼が考える黒体について「黒い“物体”ではなく，黒い“表面”を問題にすることが必要である．むろんその表面は，そこで全然反射を起こさないようなものである」と述べていた．驚くべきことに，プランクは，黒体を原子として扱っていないだけでなく，物質としてすら扱っていないのである．プランクの議論において，物質としての原子は，輻射に無関係なだけでなく，物理的にも無意味な存在だったのである．

ヴィーン分布式を非物質的かつ電磁気学的に導くことに苦心してきたプランクは，ルンマーの実験結果を受けてもまだヴィーン分布式の導出を諦めなかった．そのときの論文「輻射のエントロピーと温度」では，プランクは以前と変わらず以下のように述べていた．

> 気体論からは，まずひじょうに多数子の分子によってこそ不可逆性の定義や，エントロピーの定義が可能になるということに考えなじんでいるにもかかわらず，われわれの理論は，個々の，いやたった 1 個の共鳴子を考えることにより，輻射過程の不可逆性や輻射エントロピーの概念を導く（中略）というのは，各種の不可逆性のもとになっていると思える無秩序さの原理が，気体論では，熱輻射の場合とはまったくちがった理由で存在しているからである．気体には無数の有質量分子があり，その位置と速

[123] Planck，辻訳，1970a，p. 184.

度の不規則性が無秩序さのもとになっている．ところが輻射を含んでいる真空中には，無数の輻射線束があってそれらが不規則に振動数と強さを交換することにより，そのエントロピーを考える動機を与えている．ただ 1 個の共鳴子の振動においても，この不規則性は，物質のない空間の輻射の場合と同じ表現になる[124].

このように，この時点での彼は，それまで同様ヴィーン分布式の仮定を退けて，電磁的エントロピーに基づくことでヴィーン分布式を導こうとしていた．さらに，彼は上記引用の注で，「彼らの［ヴィーンとファンデルワールスの］理論では，輻射法則の成立のために輻射中心が非常に多数個あることは，はじめから本質的なものとして考えられているが，ここでは，定常的な輻射の状態にとって，共鳴子の数などどうでもいいことなのである」と述べていた[125].

だが，同年 10 月，ルーベンスらの実験結果を受けて，プランクはついにヴィーン分布式の導出を諦めた．ルーベンスから知らせを聞いた彼は，「たとえ Wien の表式よりは複雑になっても，これと同じように熱力学と電磁気学の理論のあらゆる要請を完全に満たすと思われるものを見出すべきだという結論に達した」と述べて実験結果を満足するようにヴィーン分布式に変更を加え，1900 年の 12 月にプランク分布式を発表した[126]．彼はその二か月後にプランク分布式を理論的に導出したが，そのときに現れた概念が，後にエネルギー量子仮説と呼ばれるようになるものだった．プランク分布式の導出が，現在 $S = k \log W$ の形で知られるボルツマンの原理の導入によって達成されたことは周知の通りである．では，そのときの彼の物質観はどのようなものだったのだろうか.

彼は，プランク分布式を発表した講演「正常スペクトルにおけるエネルギー分布の法則の理論」で，以下のように述べていた.

エントロピーは無秩序さを前提としており，またこの無秩序さは，われわれが振動の時間よりは大きいが測定時間よりは小さい時間間隔を考えるかぎり，完全な輻射場でもなお共鳴子の振動がその振幅と位相を交換していることからくる不規則さの中に認めねばならないと，私は信じている．したがって定常的な振動をする共鳴子の一定のエネルギーは，ただ時間的な平均値と考えるべき，あるいは結局同じことになるが，同じ性質をもった多数個の共鳴子が，同じ定常的な輻射場のなかにあって相手に直接

[124] Planck，辻訳，1970b，p. 197.
[125] 同上，［］内筆者注.
[126] Planck，辻訳，1970c.

影響を与えないほど十分に離れている場合の，そのエネルギーの瞬間的な平均値だと考えるべきである．したがって 1 個の共鳴子のエントロピーは多数の共鳴子に同時にエネルギーを配分する配分の仕方によってきめられるから，L. Boltzmann 氏が熱力学第二主則についてその意義を明らかにした確率論的考察を，輻射の電磁理論に導入してこの量が計算されねばならないと，私は推定した[127].

ここで述べられているのは現在で言う場の量子化に他ならないが，物質観の観点からは，共鳴子の実在性が高まっていることを指摘できる．上で見たように，彼が不可逆性を説明するために仮定した共鳴子は，以前は一つだけで事足りるとされていた．すなわち，彼自身注で述べていたように，「共鳴子の数などどうでもいい」のである．つまり，以前の彼の理論では，共鳴子はまったく概念的な存在だった．だが，ここでは共鳴子が多数個あることが重要になっている．それはつまり，「輻射中心が非常に多数個あること」が「本質的」であるということである．ここから，プランクの物質観が，彼が批判していた実在的な分子を仮定するヴィーンの物質観に近づいていることがわかる．ボルツマン原理の導入は，このような物質観の修正を伴うものだったのである．

だが，プランクはあくまで非物質的な物質観に固執した．彼はこの講演の内容をまとめて後に出版した論文「正常スペクトル中のエネルギー分布の法則について」で，以下のように述べた．

いま系のエントロピー s_N を，N個の共鳴子が全体としてエネルギー U_N をもつことに対する確率Wの対数に比例すると置いて，任意のままにとどめておく附加定数まで含めれば，つぎのようになる．

$$S_N = k\log W + \text{const.}$$

この確定はわたしの意見では，上述の確率Wの定義から出てくるものである．というのは，輻射の電磁理論に論拠をおくような前提のなかには，このような確率について一定の意味で言及できるような拠りどころはまったく存在しないからである．このようにして得た確定が目的にかなっているという点については，もとからの簡単さと，

[127] Planck，辻訳，1970d，p. 219.

運動学的気体論の一つの命題に近い類縁性とを挙げることができる[128].

このように，プランクは，ボルツマン原理から気体分子運動論的描像を排除し，エントロピーの確率解釈のみを電磁的エントロピーに適用していた．彼の議論はかなり強引である．彼共鳴子を複数個想定したことによって共鳴子の実在性が高まったにも関わらず，彼は「輻射の電磁理論に論拠をおくような前提のなかには，このような確率について一定の意味で言及できるような拠りどころはまったく存在しない」と述べている．ここで彼が想定している「拠りどころ」とは，ボルツマンがエントロピーの確率解釈の拠りどころとしていた分子とそれが生み出す乱雑さであることは明らかである．したがって，彼は，プランク分布式を導出した後になっても，やはり自分の理論から実在的な存在を消そうと試みていたのである．つまり，共鳴子の仮定は数と実在性に関して大きく変化したが，共鳴子に対して原子や分子などの具体的な物質を想定しない彼の仮定は，ボルツマン原理に依拠し量子概念を導いた後でも，まったく変更がなかったと言える．

以上見てきたように，プランクの物質観は，そこで仮定される物質の実在性が希薄であることによって特徴づけることができる．プランクにとって輻射現象は，気体分子運動論的描像だけでなくその根拠となっている物質そのものを排除し，あくまで非物質的な電磁気学的描像によって理解されるものであった．彼の理論は，気体分子はもとより，黒体に対しても，輻射の担い手である共鳴子に対しても，実在性を認めないようなものだったのである[129].

---

128 Planck，辻訳，1970e，p. 234.

129 安孫子はプランクの共鳴子は気体分子がもつ輻射の放出・吸収を高度にモデル化したものだったと述べているが，本節で見てきたように，プランクにとって共鳴子と原子はまったくの別物であったと言うべきである．彼の理論にとって原子はまったく本質的ではなく，むしろその存在は排除されていた．したがって，安孫子の主張は，「プランクの共鳴子が，ボルツマン原理導入の際に，『輻射中心が非常に多数個あること』が『本質的』であるヴィーン分布則の仮定に近づいたこと」として理解されるべきだろう．安孫子，2013.

3.5. 小括

本章では，粒子モデルの経緯に着目しながら，まず熱輻射研究の歴史を振り返り，次にヴィーン，レイリー卿，プランクそれぞれの輻射理論を分析することで，量子論黎明期の初期において，物理学者たちがエネルギー等分配則や輻射理論をどのように見ていたかを明らかにした．

熱輻射研究は，熱力学と電磁気学の調和を目指すヘルムホルツ学派によって主導されたが，ボルツマンとヘルツ，ミヘルゾンとヴェーバーでは，それぞれモデルやモデルの位置付けが異なっており，ミヘルゾンは当時の考え方に反して実在的な原子を仮定していた．

ヴィーンも，ミヘルゾン同様，実在的な粒子を仮定していた．化学熱力学では不要とされた粒子モデルは，ボルツマンからヴィーンにかけて引き継がれただけでなく，着実に実在的な仮定に近づいていた．彼の考え方は想定する実験が黒体輻射から空洞輻射へ替わったことと対応しており，輻射線ではなく輻射源の性質として粒子モデルが採用された結果，彼の物質観は粒子性と波動性を備えるものになっていた．

レイリー卿は，主に輻射線の性質だけに着目し，自身が擁護するエネルギー等分配則を試験的に適用していた．その際の彼のエネルギー等分配則に対する考え方は，当初彼が仮定していた粒子モデルから振動する弦モデルに替わっており，粒子モデルには批判的になっていた．

プランクは，実在的な粒子モデルを批判するだけでなく，その理論からあらゆる実在的な物質的仮定を取り除こうとしていた．彼の理論では，原子だけでなく黒体ですら物質として扱われていなかった．ボルツマン原理を導入する際に，彼が仮定した共鳴子の実在性が高まったが，彼はそれでもそうして高まった実在性を取り除くために苦心していた．

以上見てきたように，当時の科学者たちの考え方を理解するためには，化学熱力学的か電磁気学的か，エネルギー等分配則を支持しているか否かなどの従来の分析枠組みだけでは不十分である．理論の発展は，物質観に深く関わっている．科学者たちの考え方は，一見同じように見えても，実験と理論の相互作用によって彼らが抱く物質観のレベルでは異なっており，彼らはそうした違いをはっきりと意識して理論を構築していたのだ．

第 4 章：古典論の限界の発見と量子論の必要性の証明

本章では，アインシュタインの物質観を明らかにすることで，彼が固体比熱の量子論を論じた理由を解明する．前章では理論の発展に物質観が深く関わっていたことを明らかにしたが，本章では理論の受容における物質観の関わりについても明らかにしよう．

アインシュタインの物質観が，量子論の発展と受容にどのように関わっていたのかの論証に入る前に，本論文がこれまで論じてきたことを簡単に振り返り，アインシュタインの物質観についての議論を載せる土台を確認しておこう．

第 2 章では，1900 年のケルヴィン卿によるエネルギー等分配則批判がどのように受け止められたかを論じた．ケルヴィン卿は，理論に沿わない実験事実と粒子モデルに基づいた理論的根拠から，エネルギー等分配則を古典論の限界だとして，その放棄を主張した．しかし，エネルギー等分配則は，マクスウェルとボルツマンによる理論化，ヴェーバーの固体比熱測定および理論，レイリー卿によるアルゴンの説明等によって，エネルギー等分配則は古典論の一角だと見なされるようになっていた．その一方で，エネルギー等分配則が仮定していた粒子モデルは，不必要だと見なされるようになっていた．ケルヴィン卿の主張はこのような状況下で行われた．そのため，彼のエネルギー等分配則批判は，不必要だと見なされた仮定に基づいて確証された理論の放棄を主張するものだと受け止められた．

第 3 章では，熱輻射研究を行った科学者たちの考え方を分析して物質観を明らかにすることで，エネルギー等分配則と粒子モデルがどのように扱われてきたかを論じた．1800 年代後半には，ヘルムホルツやギブズに始まる化学熱力学によって，粒子モデルに依らない熱力学が登場していた．また，分光学の知見が積み重なることによって，粒子モデルに基づいた分子構造を考えることが困難になっていた．レイリー卿はエネルギー等分配則を擁護していたが，そのときの彼は粒子モデルを批判し弦の振動モデルに基づいていた．粒子モデルを不要とする考え方は，ヴェーバーやプランクの議論からも確認された．こうして，ケルヴィン卿のエネルギー等分配則批判が受け入れられなかった理由が裏付けられたと言える．ただし，粒子モデルを不必要とする考え方が全くなくなってしまったわけではなかった．粒子モデルは，ボルツマン，ミヘルゾン，ヴィーンと引き継がれただけでなく，実験と理論の相互作用によって，より実在的に扱われるようにもなっていた．レイリー卿は，弦の振動モデルに基づくことでエネルギー等分配則を擁護し，輻射理論に適用していた．

さて，第 2 章と第 3 章で確認したことから，ケルヴィン卿の批判があったにもかかわらず，1900 年の時点ではエネルギー等分配則は古典論の限界だと見なされていなかったと結

論することができる．その結論は，第 2 章（2.1.）でふれたように，レイリー卿がエネルギー等分配則を適用した輻射理論は，その後ジーンズ（James Jeans）によって修正され，1905 年にはいわゆるレイリー・ジーンズ式にまで発展させられたことによっても補強される[130]．したがって，少なくとも 1905 年あたりまでは，エネルギー等分配則が古典論の限界であるいう考えが一般に共有されてはいなかったと断言しても良いだろう．ところが，本章（4.4.）でも確認するように，1911 年のソルヴェイ会議においては，エネルギー等分配則はすっかり古典論の限界と見なされるようになっていた．では，量子論黎明期において，古典論の限界は一体いつどのようにして認識されたのだろうか.

量子論黎明期における古典論の限界について，これまでの量子論史の認識は非常に曖昧である．たとえば，クーンは *Black-Body Theory* の中で，ネルンストがアインシュタインの論文を引用する 1910 年以前までに「空洞輻射の分野に限って量子論はすでに認められていた」と述べているが，そのときに古典論の限界が認識されていたのかどうかは判然としない[131]．湯川は，「Planck の仮説は当初もっぱら黒体輻射の問題を含む熱現象における古典論の破綻を収拾するために発想された」と述べているが，その根拠はまったく示されていない[132].

しかし，第 1 章で引用したように，パイスの認識は明確だった．彼は，「1906 年のアインシュタインの論文」によって，「古典的な等分配の定理の失敗」が初めて示されたと述べていた．パイスは，この認識に基づいて，1906 年のアインシュタインが置かれた状況としてそれまでのエネルギー等分配則の取り扱われ方をまとめ，アインシュタインの固体比熱理論についての詳細な分析を行った．だが，パイスは，アインシュタインがエネルギー等分配則を古典論の限界として認識するに至った過程と，彼が輻射理論ではなく固体比熱理論に向かった理由については論じていなかった.

そこで，本章では，アインシュタインの論文を分析し，彼の物質観を明らかにすることで思考の歩みをたどり，彼が固体比熱理論を論じた背景と意図を明らかにしよう．そのために取り上げる論文は，1905 年 3 月に受理された論文「光の発生と変換に関する一つの発

---

130 Jeans，江渕訳，1970.

131 彼は他の箇所でも古典論の限界の認識について述べていない．それは，メーラとレッヘンベルクも同様である．メーラとレッヘンベルクが，本論文が扱うのと同じアインシュタインの論文およびエネルギー等分配則を扱っているのは, 1.3 節と 1.4 節である. そこでは，クーンやクライン同様エーレンフェストが取り上げられ，また，レイリー卿やジーンズの反応も分析されているが，そこでの記述は，驚くほど古典論の限界の認識について無頓着である．その結果，本論文が明らかにすることはまったく書かれていない．本稿結論部も参照されたい．Mehra and Rechenberg, 1982, p. 230; Kuhn, 1978, pp. 59-98.

132 湯川監修，1972，p. 7.

見法的な見地について」（以後，論文①）[133]，1906 年 3 月に受理された「光の発生と光の吸収の理論について」（以後，論文②）と[134]，1906 年 11 月に受理され翌 1907 年に出版された論文「輻射に関するプランクの理論と比熱の理論」（以後，論文③）の三つである[135]

4.1. アインシュタインの光量子仮説における物質観

本節では，アインシュタインがプランク分布式を批判し光量子仮説を論じた論文①を分析することで彼の物質観を明らかにし，彼がエネルギー等分配則をどのように扱っていたかを確認しよう．論文①の冒頭で，彼は彼の問題意識を以下のように述べていた．

> 気体その他の秤量できる物体について物理学者がまとめ上げてきた理論的描像と，いわゆる空虚な空間での電磁的過程に関する Maxwell の理論との間には，根本的な形式上の差異が存在する．つまり，物体の状態は，きわめて多数だがやはり有限な個数の原子と電子の位置と速度で完全に定まるとわれわれは見なすのであるが，いっぽう空間の電磁的状態を完全に規定するにあたって有限個の量をもってしたのでは十分と認めえないのである．（中略）
> 連続的な空間関数で取り扱ってゆく光の波動論は，純粋に光学的な諸現象の表現についてはみごとにその正当さを立証しており，それが他の理論でおきかえられるということには決してならないであろう．しかし，光学的観測が瞬時値ではなく時間的平均値に結びついていることに着目する必要があり，またこの論理が回折，屈折，分散などを完全に裏書きするにもかかわらず，連続的な空間関数で取り扱ってゆくこの光の理論を光の発生や変脱の諸現象に適用すると経験に反することになるという事実が，実験を通じてたしかに考えられるのである．
> 「黒体輻射」，光ルミネセンス，紫外光による陰極線発生，そのほか光の発生や変脱に関連する一連の現象についての所見は，光のエネルギーが不連続的に空間へ配分されているという仮定によってこそ，より正しく解釈されるように見える――これは筆者にとって今や実感である[136]．

---

133 Einstein, 1905.
134 Einstein，1906.
135 Einstein，1907.
136 Einstein，高田訳，1969，p. 3.

上記引用からは，アインシュタインの光量子仮説とプランクのエネルギー量子仮説では，同じ「量子」という言葉を使っていても，その同じ言葉に向けられた物質観がまったく異なっていたことがうかがえる．前章（3.4.）で確認したように，プランクは，粒子モデルや実在的な仮定を徹底的に排除し，輻射という限定された物理現象を非物質的な熱力学と電磁気学で説明しようとしていた[137]．他方，上の引用からは，アインシュタインが，気体分子運動論的描像すなわち粒子モデルを排除しようとしていなかったことがわかる．たしかに彼は，電磁気学的描像と気体分子運動論的描像が相反しており，一長一短があることを認めていた．だが，彼はそこから気体分子運動論的描像の排除には向かわず，粒子性と波動性という古典論の二つの側面が対立しない道を選ぶことで，その二つを隔てる「根本的な形式的差異」を解消しようとしていたのである．さらに，彼が，光の波動論は「回折，屈折，分散などを完全に裏書きするにもかかわらず，連続的な空間関数で取り扱ってゆくこの光の理論を光の発生や変脱の諸現象に適用すると経験に反することになるという事実が，実験を通じてたしかに考えられる」と述べていることも注目に値する．彼は，実験事実と理論を天秤に載せるときに，実験事実の方を重視していると言えるからである．

論文①で，彼はまずセクション 1 と 2 でプランク理論を批判してから，セクション 3 以後でヴィーン分布式に基づいて，古典的理想気体のゆらぎとの類推で光量子仮説を論じていた[138]．冒頭で示されたアインシュタインの物質観は，論文中にさまざまな形を取って現れるが，中でも彼の物質観が端的に現れているのは，セクション 2 から 3 への転換部である．彼はそこで，「つぎに『黒体輻射』を，経験に結び付けて，ただし輻射の発生と伝ぱに関する，ある描像を基礎とはせずに，考察しよう」と述べていた[139]．この文章には，二つの古典論的描像の長短に拘泥せず，実験に即して最適な仮定を選んでいこうという彼独特の考え方が現れている．このような考え方は，プランクが彼の理論から実在性を排除しよ

---

137 プランク理論は，あくまでもマクスウェル電磁気学の連続性的描像に基づきながら，エネルギー授受の作用をアドホックに付け加えるものだった．これは，実験をうまく説明できても，（とくに古典論的）物理的意味のないものと見なされかねなかった．そのことはヤンマーが指摘していたが，詳しくは第 5 章（5.1.）で論じる．ヤンマー，小出訳，1974，p. 24.

138 論文①は，導入部とセクション 1 から 9 で構成されていた．各セクションはそれぞれ，1「『黒体輻射』の理論に関連するひとつの難点について」，2「Planck 氏が行った素量子の決定について」，3「輻射のエントロピーについて」，4「輻射密度が小さい場合の単色輻射のエントロピーに関する極限法則」，5「気体および稀薄溶液のエントロピーの体積依存性に関する分子論的研究」，6「単色輻射のエントロピーの体積依存性の表式を Boltzmann の原理にしたがって解釈すること」，7「Stokes の規則について」，8「固体照射による陰極線の発生について」，9「紫外光による気体の電離について」だった．

139 Einstein，高田訳，1969，p. 7.

うとしていたのとは対照的である．

転換部の文章からは，セクション 1 と 2 では，プランク理論が古典論的描像の長短に拘泥してしまう点が批判されていたと想像される．果たしてその通りであったが，そのときアインシュタインがどのようにプランク理論を批判したのかをめぐって，先行研究には意見の相違が見られる．論文①の論理を掴むことは，後で見る論文②の論理と論文③への接続を掴むためにもきわめて重要であるので，アインシュタインがプランク理論の批判を扱っている部分を注意深く確認していこう．

セクション 1 で，彼は，まず以下のように議論の前提を述べた．

> ひとまず Maxwell の理論と電子論の立場をとることとして，次のような場合を考察する．完全に反射する壁で囲まれた空間にいくつかの気体分子と電子があるとし，それらは自由に運動でき，たがいにいちじるしく接近するたびに保存力を及ぼし合う，すなわち運動論的気体論で扱われる気体分子のように互いに衝突しうるものとする．さらに，いくつかの電子がたがいにずっと離れた点で束縛されていて，束縛力はその点の方を向き，変位に比例するものとする．これらの電子も，自由な分子や電子がそれらにいちじるしく接近した時には，これらの自由な分子や電子と保存力的な相互作用をもつはずである．空間点に束縛されたこの主の電子をわれわれは「共鳴子」と呼ぶ．それらは一定周期の電磁波を発射しまた吸収する[140]．

ここで，「Maxwell の理論と電子論の立場」とは，論文冒頭で述べられた電磁気学だけを意味するのではなく，それとドルーデ（Paul Drude, 1863-1906）の電子論の両方を意味している．そのことは，上記引用文につけられた注でも確認できるが，アインシュタインが「電子論の立場」と述べているのは，ドルーデによって金属電子論に持ち込まれた気体分子運動論的仮定のことである．すなわち，電子論の立場の「仮定は，温度平衡にある気体分子と電子の平均運動エネルギーがたがいに等しいという前提と同等の意味をもっている．」

上記引用からは，アインシュタインが共鳴子として電子を仮定していたことがわかる．ここで重要なのは，第一に，アインシュタインが仮定する電子が，分子とぶつかり合うことができる物質として仮定されている点だ．これは，プランクの共鳴子が非物質的な仮定であったのと決定的に異なっている．アインシュタインの物質観は，前章（3.2.）で示唆した通り，輻射源に気体分子を仮定したヴィーンのそれに非常に近い．ただし，ヴィーンが

---

[140] Einstein，高田訳，1969，p 4.

輻射源にもっぱら粒子性だけを求めたのに対して，アインシュタインは同時に波動性も求めている．これが第二に重要な点である．アインシュタインにとっての輻射源は，それ自体が粒子的な性質と波動的な性質を備える物質として仮定されていたのである．実際，論文中で彼は，彼の仮定した共鳴子を「共鳴電子」と呼んでいた．

さて，アインシュタインはこのような仮定における平衡状態を「黒体輻射」と同等であると見なした上で，彼はまず「共鳴子によって放出あるいは吸収される輻射はさしあたって度外視し，分子や電子の相互作用（衝突）に対する動力学的平衡条件を問うことにする」と述べた．こうして彼は，電磁気学的描像を脇に置いて，先に注で述べた電子と気体分子の平均エネルギーが等しいという条件から，以下のように共鳴電子についてエネルギー等分配則を導いた．

> 共鳴電子の運動を 3 つのたがいに直交する振動に分解すると，このようなひとつの直線振動のエネルギーの平均値 $\bar{E}$ に対して
>
> $$\bar{E} = \frac{R}{N}T$$
>
> を得る．ここで R は絶対気体定数，N は 1 グラム当量中の「実効的分子」の数，T は絶対温度を意味する．（中略）このエネルギー$\bar{E}$ はつまりひとつの自由な 1 原子気体分子の活力の 2/3 の大きさをもつ．

このように，共鳴電子についてエネルギー等分配則が成り立つことを示してから，アインシュタインは「共鳴子と空間内の輻射との相互作用について同様な考察をしよう」と述べて，今度は電磁気学の仮定に戻った．ここから，彼は，プランクが自然輻射を導入することによって得た式（以後，プランクの式）

$$\bar{E}_\nu = \frac{L^3}{8\pi\nu^2}\rho_\nu$$

（$\bar{E}_\nu$は固有振動数νの一つの共鳴子の平均エネルギー，Lは光速度，νは振動数，ρ_νは輻射のエネルギー密度）を取り上げて，次のように批判した．

すなわち，彼は上のプランクの式にエネルギー等分配則を適用していわゆるレイリー・

ジーンズ式（以下，レイリー・ジーンズ式）を導いたのち，レイリー・ジーンズ式を全振動数で積分すると無限大になることを示して，「動力学的平衡の条件として見出されたこの関係は，経験との合致を欠いている」と述べた[141].

言うまでもなく，「経験との合致を欠いている」というのは，レイリー・ジーンズ式が紫外発散することの指摘である．ただし，ここでのアインシュタインの議論の仕方をめぐっては，先行研究において意見の相違が見られる．というのも，クーンとクラインが，このときアインシュタインがすでにエネルギー等分配則を見直すべきだと考えていたと受け止めたのに対して，ベルジアとナヴァロは以下のように反論していた．

> エネルギー等分配則を共鳴子に適用すると，それは輻射理論の普通の考え方であるが，いわゆる RJ 則[レイリー・ジーンズ式のこと]を導く．アインシュタインの帰結はその法則が古典論の枠組みの中では理解できないことを暗示しているため，このことは，これまでの量子論史では重要な転換点であると強調されてきた（クライン，1962；クーン，1978）[142]．しかしながら，この論文の中のどこにも彼がエネルギー等分配則，すなわち古典論を見直すべきだと書かれてはいないことは，指摘しておくべきだろう[143]．（ [ ] 内筆者注）

ここで，すでに物質観の観点からアインシュタインの議論に分析を加えている本論文にとっては，通説の方が誤っていることは明らかである．アインシュタインは古典論の描像に一長一短があることを認めていたが，彼はそのどちらも排除しようとはしていなかったのである．さらに，ここでの彼の議論の仕方は，プランクの式とエネルギー等分配則がレイリー・ジーンズ式に導かれた場合に，その帰結が「経験との合致を欠いている」というものだが，もしアインシュタインがエネルギー等分配則を見直すべきだと考えていたとすれば，経験と合致しないとして批判しているのがプランクの式なのかエネルギー等分配則なのかが不明確になり，論理が崩壊してしまう．

したがって，ベルジアとナヴァロの指摘は正当である．クーンとクラインは，アインシュタインがレイリー・ジーンズ式の問題に気づいていたことをもって，彼がエネルギー等

---

141 パイスが指摘していたように，この式のアインシュタインの導出はジーンズがレイリー卿の式の修正を完成させる以前のことである．レイリー・ジーンズ式は「レイリー・アインシュタイン・ジーンズ式」と呼ばれるべきものだとパイスは述べている．パイス，西島監訳，1987，pp. 495-498.

142 Klein, 1962, p. 355; Kuhn, 1978, p. 152, p. 180.

143 Bergia and Navarro, 1997, p.197.

分配則を古典論の限界として認識していたと誤解してしまっていたのである．通説における古典論の限界についての理解の不十分さが，ここにも現れていると言えるだろう．

そこで，以下では議論の見通しをよくするために，古典論の問題を古典論の限界として認識するに至る過程を，三段階に分けておこう．第一段階は，マクスウェル電磁気学的描像と気体分子運動論的描像という二つの古典的物質観の対立に気づくことである（以下，段階 A）．レイリー・ジーンズ式の帰結が実験と合わないと認識することは，これに含まれる．第二段階は，エネルギー等分配則が合致しない事例を見出すことである（以下，段階 B）．第三段階は，エネルギー等分配則が合致しない原因を見出し，エネルギー等分配則の放棄の必要性に気づくことである（以下，段階 C）．この段階分けに従えば，セクション 1 でのアインシュタインは，段階 A である．このとき彼は，エネルギー等分配則の側に立って，非物質的な電磁気学的仮定だけによって輻射を説明しようとするプランクの式を批判していたのである．

セクション 2 では，アインシュタインは「Planck 氏が報告した素量子の決定のしかた」，つまり，プランク分布式の批判を行っている．彼は「従来のすべての経験を満足する Planck の公式」（以下，プランク分布式）

$$\rho_\nu = \frac{\alpha\nu^3}{e^{\frac{\beta\nu}{T}} - 1}$$

（α，βは定数．ここでアインシュタインは$\alpha = 6.10 \times 10^{-56}$，$\beta = 4.866 \times 10^{-11}$としている）は，「かれが確立した『黒体輻射』の理論とある程度まで無関係であることを示す」と述べて，議論を展開した[144]．ここで，「かれが確立した『黒体輻射』の理論」とは，セクション 1 で批判した古典的なプランクの式のことだと考えられる．

アインシュタインは，プランク分布式が「波長と輻射密度が大きいとき」すなわちレイリー・ジーンズ式が妥当な範囲において「この公式は極限で次式に移行する」と述べ，式

$$\rho_\nu = \frac{\alpha}{\beta}\nu^2 T$$

を示した．彼は，この式が「§1 で Maxwell 理論と電子論から導き出されたもの」すなわちエネルギー等分配則および共鳴電子の物質観と「合致している」と述べ，上の二つの式を

144 Einstein，高田訳，1969，pp. 6-7.

すなわちエネルギー等分配則および気体分子運動論的描像と合致するとして，次のように論をすすめた．

$$\frac{R}{N}\frac{8\pi}{L^3}=\frac{\alpha}{\beta}$$

あるいは

$$N=\frac{\beta}{\alpha}\frac{8\pi R}{L^3}=6.17\times 10^{23}$$

ここまでの議論は，プランク分布式が長波長の極限をとった場合にエネルギー等分配則と合致し，アボガドロ数まで導けるというものである[145]．一見すると，この議論は批判とは読めない．だが，この文章が置かれたセクション 2 が，プランク分布式が「かれが確立した『黒体輻射』理論」すなわち電磁気学的なプランクの式と「無関係であることを示す」として書かれていることを思い出そう．つまり，ここでのアインシュタインの論理は以下のようである．

プランク分布式は，長波長の極限ではレイリー・ジーンズ式に近づき，エネルギー等分配則と合致する．しかし，セクション 1 で指摘したように，プランク分布式の前提として電磁気学的に「かれが確立」していたプランクの式は，エネルギー等分配則とは対立していた．ということは，エネルギー等分配則に着目した場合，プランク理論は前提であるプランクの式と帰結であるプランク分布式とで一貫性がない．アインシュタインは，この一貫性のなさを以て，プランクの式とプランク分布式が無関係であると論じているのである．したがって，セクション 2 でのプランク分布式批判は，やはりエネルギー等分配則を根拠になされていたと言うことができる．

ただし，論文①においてアインシュタインが求める一貫性が，プランクのように電磁気学だけに還元しようとするものでも，反対に気体分子運動論だけに還元しようとするものでもないという点は強調しておかなくてはならない．実際，二つの異なる古典的描像を両方とも受けとめる彼の物質観を把握しなければ，以下の文章は理解できない．彼は次のように述べてセクション 2 をまとめていた．

それゆえわれわれは次の結論に達する——輻射のエネルギー密度と波長が大きくなる

145 実際，アインシュタインがプランク分布式の有効性とくにアボガドロ数の決定を評価していたことは，パイスによっても指摘されている．パイス，西島監訳，1987，p. 681.

と，われわれが用いた理論上の根拠はそれだけますます有効性を示すが，短い波長と小さい輻射密度に対してはこの論拠はまったく力を失う[146].

上で見たように，「輻射のエネルギー密度と波長が大きくなる」場合とは，プランク分布式がエネルギー等分配則と合致して成立する範囲のことである．他方，「短い波長と小さい輻射密度」は，プランク分布式が極限でヴィーン分布式に移行する範囲である．また，「われわれが用いた理論上の根拠」とはエネルギー等分配則のことを意味している．つまり，エネルギー等分配則はプランク理論の批判のために根拠として用いられていたが，ここでは，ヴィーン分布式が妥当な範囲においてエネルギー等分配則は「まったく力を失う」と書かれているのである．クーンやクラインの誤解はすでに解いたが，このような表現を見ると，彼らがアインシュタインは論文①の段階でエネルギー等分配則を見直すべきと考えていたと受け止めてしまったのも無理はないように思える．

だが，アインシュタインの物質観が端的に現れている箇所としてすでに指摘しておいたように，ここから彼は「つぎに『黒体輻射』を，経験に結び付けて，ただし輻射の発生と伝ぱに関する，ある描像を基礎とはせずに，考察しよう」と述べて，光量子仮説を展開した．たしかに，セクション 1 では段階 A だったアインシュタインだが，ここで彼はエネルギー等分配則が破綻する箇所をはっきりと指摘している．そのため，段階 A から段階 B 移ったとは言えるだろう．しかし，「この論拠はまったく力を失う」と述べても，彼はその論拠すなわちエネルギー等分配則の否定あるいは放棄には進まなかったのである．つまり，論文①におけるアインシュタインは，段階 B から段階 C には進まなかった．彼は対立する二つの古典的描像を維持したまま，その描像が対立しない方向に進んだのである．それが，光量子仮説が仮定する，統計力学的描像だった．彼はセクション 6 で光量子仮説を以下のように論じたが，そこに至るまでの間もそこに至った後でも，エネルギー等分配則の放棄を主張したりはしなかった．かくして彼は，以下のように述べた．

密度の小さい（Wien の輻射公式があてはまる範囲内の）単色輻射は，熱理論的な関係から見ると，あたかもそれらがたがいに独立で大きさ $R\beta\nu/N$ のエネルギー量子から成り立っているようにふるまう[147].

彼はこのように述べ，光電効果等の具体例を挙げて，光量子仮説がそれらの実験をうまく

146 Einstein，高田訳，1969)，p. 7.
147 同上.

説明できると主張したのだった．

以上確認してきたように，論文①においてアインシュタインが批判していたのは，電磁気学的描像と気体分子運動論的描像のどちらかを排他的に選択するような考え方であった．彼は，いずれの描像についても，古典論として信頼を置いていた．つまり，アインシュタインは，古典論の立場からプランクの物質観を批判した結果，光量子仮説を導くことになったのである．

4.2. 光量子仮説から古典論の限界の発見へ

前節では，論文①のアインシュタインが，エネルギー等分配則を見直すべきだとは考えていなかったことを確認した．そこではむしろ，エネルギー等分配則は，プランク理論が古典論として一貫していないことを批判するための根拠として使われていた．また，彼の光量子仮説は，古典論の描像が対立しないような描像，すなわち古典統計力学的描像を仮定した結果であった．したがって，光量子仮説の非古典論的性格とは裏腹に，論文①における彼の議論の仕方は，完全に古典論に基づいていたと言える．

ところが，一年後の論文②では，アインシュタインは一転，次のように述べていた．

> 当時私にはPlanckの輻射理論はある点で私の研究に対立的であるかのように思われた．しかし，本論文の§1 に述べてあるように，最近よく考えてみたところによると，Planck 氏の輻射理論がもとづいている基礎は，Maxwell の理論や電子論から出てくるものとは違っている．しかもまさしく，Planck の理論はまさに今述べた光量子仮説を用いているという点で違っているのである[148]．

この引用から，アインシュタインの論文①でのプランク理論に対する考え方が，文字通り 180 度転換していたことがわかる．ここでは，その考え方の変化が，「Planck 氏の輻射理論がもとづいている基礎」が「Maxwell の理論や電子論から出てくるもの」とは違うと考えることで起こったと述べている．ここで，「Maxwell の理論や電子論から出てくるもの」とは，論文①同様，電磁気学だけでなくドルーデの電子に適用されるエネルギー等分配則を含んだものである．そのことは，この冒頭に続くセクション 1 で，アインシュタインがこれを「Maxwell の電気理論および電子論と熱の分子論とを結びつける」と述べてレイリー・

[148] Einstein，広重訳，1969，p. 23.

ジーンズ式を示していることや，それを「Maxwell-Boltzmann の分布式」と言い換えて論じていることからも裏付けられる．したがって，上の引用でアインシュタインは，プランク理論は古典論の二つの描像から出てくるものではなく光量子仮説に基づいているものだ，と述べているのである．

だが，前節で確認したように，アインシュタインは，論文①ではエネルギー等分配則を根拠に用いて，古典論として一貫していないとプランク理論を批判していたではないか．彼はどのように「よく考えてみた」のだろうか．また，そのとき，彼の中でどのような変化があったのだろうか．セクション 1 を詳しく見てみよう．

彼は，セクション 1「Planck の輻射理論と光量子」で，プランクが古典的エネルギー等分配則に基づく輻射理論の帰結としてレイリー・ジーンズ式に導かれず，プランク分布式を得たのはなぜかと問い，以下のように述べていた．

> われわれは$\bar{E}_\nu$の温度の関数として Maxwell-Boltzmann の分布式から求めることができる．しかし，この場合は無効な輻射公式（1）［ レイリー・ジーンズ式 ］が得られる．Planck 氏が進んだ道へは，次のようにして導かれる．（中略）次の原則が Planck の輻射理論の基礎になっていると考えなければならない．すなわち，1 つの要素共鳴子は$(R/N)\beta_\nu$の整数倍という値だけをとることができる．1 つの共鳴子のエネルギーは吸収や放出によって飛躍的に変化する．しかもそれは$(R/N)\beta_\nu$の整数倍だけ変化するのである[149]．

論文①でアインシュタインは，エネルギー等分配則を考慮すれば「経験と合致しない」レイリー・ジーンズ式に導かれるようなものであるとして，プランクの式を批判していた．そのアインシュタインだが，ここではそうした批判をまったくしていない．彼はむしろ，プランクの式の後の展開すなわちプランク分布式を肯定的に捉え，プランク分布式の解釈を行っている．それは，上の引用で述べられている通り，光量子仮説が「Planck の輻射理論の基礎になっている」という解釈であった．広重も指摘していた通り，アインシュタインによって与えられたこの解釈によって，プランクの輻射理論に含まれるエネルギー量子仮説の意味が初めて明瞭に取り出されたのである[150]．したがって，この引用文は量子論史に

---

149 ［］内筆者注．Einstein，広重訳，1969，pp. 25-26.

150 このことは，広重が指摘し，その後西尾が広重を踏襲する形で若干詳しく述べていた．だが，二人とも，量子論黎明期におけるこの発見の位置づけと古典論に対する理論体系としての量子論における意味を論じていない．広重，1968，pp. 158-160．西尾，1975，p. 221.

とって非常に重要である．

だが，本論文が注目するのは，彼がそう考えた理由である．アインシュタインは，上記引用に続けて以下のように述べていた．

> この仮説は，式（3）を導くための理論的基礎と矛盾するので，さらに第 2 の仮説をよび起す．1 つの共振子のエネルギーが飛躍的にのみ変化するものとすれば，輻射空間にある 1 つの共振子のエネルギーを求めるのに普通の電気理論を適用することはできない．なぜなら普通の電気理論は，共振子の特別なエネルギー値を区別するようなことはないからである．だから，Planck の理論の根底にはつぎの仮定がある：
> Maxwell の理論は要素共振子に適用できないにもかかわらず，輻射空間の中にある 1 つの要素共振子の平均エネルギーは，Maxwell の電気理論から計算されるものと同じである[151]．

ここで，「この仮説」とは直前で述べられたエネルギー量子仮説あるいは光量子仮説のことを，「式（3）」とは論文①でのプランクの式のことを意味している．つまり，ここでは，エネルギー量子仮説がプランクの式の前提と矛盾するため，プランクはプランク分布式を導く際に「第 2 の仮説」を導入したと述べられているのである．

アインシュタイン曰く，その「第 2 の仮説」とは，「Maxwell の理論は要素共振子に適用できないにもかかわらず，輻射空間の中にある 1 つの要素共振子の平均エネルギーは，Maxwell の電気理論から計算されるものと同じである」ということである．この第 2 の仮説についての言及は，量子論黎明期において最も重要なもののひとつだと考えられる．というのも，この仮説は，波動性と粒子性が一致するという指摘であるからだ．上で見たように，論文①でのアインシュタインの物質観は，波動性と粒子性という古典論の二つの描像が対立することを認めつつも，そのどちらかを排他的に選択することはせず，かわりに統計力学的描像を選ぶというものだった．つまり，論文①の彼は，対立する二つの古典的描像を一致させようとはしていなかった．そこでの彼は，プランクの物質観を批判した結果として，光を粒子として捉える考え方を提示していたに過ぎない．だが，ここでの彼は，エネルギー量子仮説には波動性と粒子性が一致するという仮定が置かれていると述べている．彼が本格的に光の波動性と粒子性を論じるのは 1909 年のことだが[152]，ここで第 2 の仮説を着想したことは，アインシュタインの物質観にとって非常に大きな転換点であり，以

---

151 Einstein，広重訳，1969，pp. 26-27.
152 Einstein, 1909.

下で見て行くように，その後の現代物理学への展開を決定づける瞬間だったと言える．

アインシュタインは，この「第 2 の仮説」について，「もし観測にとって問題になるスペクトルのあらゆる部分で $\varepsilon = (R/N)\beta\nu$ が 1 つの共振子の平均エネルギー $\bar{E}_\nu$ にくらべて小さいならば，そのまま容認できる．しかし事情は全く違う」と述べるものの，次のように論じた．

> Planck の輻射理論によれば Wien の輻射公式の成り立つ範囲内で， $\bar{E}_\nu/\varepsilon$ は $e^{-\beta\nu/T}$ という値を持つということが容易に証明される．だから， $\bar{E}_\nu$ は ε よりもずっと小さい．したがって，要するに少数の共振子だけが零ではないエネルギー値を持つことになる．

これは，ヴィーン分布式が成り立つ波長域において，エネルギー等分配則が破綻する仕組みについての説明に他ならない．このように，アインシュタインは，第 2 の仮説を検討することで，輻射における量子効果，すなわちエネルギー等分配則の破綻の仕組みとその条件を発見したのである．かくして，ここにおいて初めて，彼は段階 B から段階 C へ進んだのである．

つまり，アインシュタインは，論文①では古典論の二つの描像が対立するプランクの物質観を批判していたが，上記の「第 2 の仮説」を着想することで，プランクの物質観を見直すことになったのである．それはアインシュタイン自身の物質観の見直しでもあった．論文①の彼は，古典論の二つの描像を一致させようとはしていなかったからである．彼は，論文②において，古典論の二つの描像が一致する点にエネルギー量子仮説と光量子仮説の共通点が見いだせることに気づいた結果，「Planck 氏がその輻射理論の中に物理学上の新しい仮説——光量子仮説——を導入したということを示していると私には思われる」と述べるに至ったのだ．

このアインシュタインの物質観の見直しの重要性は強調してもしすぎることはない．というのも，この見直しが，史上初めて量子論という代替案を伴って古典的エネルギー等分配則は放棄されるべきものであるという認識をもたらしたからである．それは，「古典論の限界の発見」とでもいうべきものであった．

以上の論証によって，古典論の限界が発見したのはアインシュタインであり，それは論文①と論文②の間，すなわち 1905 年から 1906 年の間になされたことが明らかになった．そのときのアインシュタインにとって，古典的エネルギー等分配則の代替案としての量子論は，輻射の量子論あるいはエネルギー量子仮説というよりは光量子仮説だったことも指

摘しておくべきだろう．すぐ下で論じるように，この時点のアインシュタインはまだプランク分布式には難点があると考えていたのである．このことは，光量子仮説は先駆的であったが量子論の展開については何の役割も果たさなかったとしている通説に，修正を迫る事実である．

エネルギー量子仮説が解釈されたことの意味は，単にエネルギーが連続的ではなく離散的であり得るということが気づかれたことだけにあるのではない．論文①の段階から光量子仮説を主張していたアインシュタインにとって，それはむしろ当然のことだった．それゆえ，エネルギー量子仮説が解釈されたことの意味の核心は，エネルギーが連続的か離散的かということにあったというよりは，エネルギー量子仮説および光量子仮説が古典的エネルギー等分配則の放棄に通じることに対する気づきにあったと言うべきだろう．

ところで，この論文②の中で，アインシュタインは，エネルギー量子仮説と矛盾するプランクの式の前提，すなわち「式（3）を導くための理論的基礎」が何かを具体的に述べていなかった．だが，文脈および第二の仮説を着想するにあたって述べられた「1 つの共振子のエネルギーが飛躍的にのみ変化するものとすれば，輻射空間にある 1 つの共振子のエネルギーを求めるのに普通の電気理論を適用することはできない．なぜなら普通の電気理論は，共振子の特別なエネルギー値を区別するようなことはないからである」という文章から，それはプランクの電磁的な共鳴子のことを意味していることがわかる．プランクの式は，輻射を調和振動子のあつまりとして扱い，単位時間当たりに放出される輻射のエネルギーと吸収されるエネルギーの関係から導かれている．プランクの式が，マクスウェル電磁気学と熱力学に基づいていることは前章で確認した通りであるが，輻射を電磁気学に還元しようとするプランクの共鳴子の仮定はヘルツ振動子であり，そこからはまったく連続的な描像しか得られないのである．このことは，アインシュタインが固体比熱理論を論じた理由を考える際に非常に重要な点なので，ここで注意を喚起しておきたい．

さて，エネルギー量子仮説が解釈されたことの意味の核心が，エネルギー量子仮説および光量子仮説が古典的エネルギー等分配則の放棄に通じることに対する気づきだったとすれば，アインシュタインにとっての次の目標は，その気づきを説得的に示すことであったはずだ．事実，論文②から 8 か月後の論文③「輻射に関する Planck の理論と比熱の理論」の導入部には，次のように書かれていた．

> 本論文では輻射の理論——とりわけ Planck の理論——が分子運動論的熱理論の変革に通じるという点を，そして輻射理論の展開をこれまでさまたげていたいくつかの困難

がこの変革によって取りのぞかれるという点を，示そうとするのである．なお，固体の熱的なふるまいと光学的なふるまいとの間の，ある種の関連性も，明らかにされるであろう[153].

この引用の最初の文章は，これまでの論証を裏付けている．論文③で彼が固体比熱理論を展開した背景には，「Planck の理論」が「分子運動論的熱理論の変革に通じるという点」を，すなわち，エネルギー量子仮説が粒子モデルに基づくエネルギー等分配則の放棄に通じるということを示すという明確な目的があったのである．

また，彼は，「輻射理論の展開をこれまでさまたげていたいくつかの困難がこの変革によって取りのぞかれる点を示す」とも述べている．この文章は，輻射理論が展開する際の困難を古典的エネルギー等分配則の放棄によって示す，と述べていると解釈できる．だが，輻射理論が展開するとは一体どのような事態を指しているのだろうか.

これまでの議論を踏まえると，輻射理論が展開することとは，プランク分布式が輻射理論として承認されることを意味すると考えられる．アインシュタイン自身，論文①において古典論として一貫していないとプランク分布式を批判していたように，当時のプランク分布式は，「何度も実験的にテストされていたにもかかわらず…深い物理的意味を持たない便宜的な方法論的手段とみなされていた」可能性が高いのである[154]．いずれにしても，上記アインシュタインの引用からは，彼がプランク分布式が認められるためには取りのぞかれるべき困難があると考えていたことがわかる．また，その困難は古典的エネルギー等分配則の放棄によって取りのぞかれると考えていたことがうかがえる．彼は，プランクのエネルギー量子仮説が受け入れられない困難が何かということと，その何かが古典的エネルギー等分配則の放棄によって取り除かれるものであると考えていたのである．

このように，論文③は，古典的エネルギー等分配則が放棄されるべきものであることを示し，その結果として，エネルギー量子仮説が受け入れられるべきものであることを示すために書かれていた．つまり，アインシュタインは，輻射の量子論には困難があると考えており，その困難が古典的エネルギー等分配則の放棄によって取りのぞけることを，固体比熱の量子論で示そうとしたのだ．以上論証してきたことは，アインシュタインの固体比熱の量子論をプランクの輻射の量子論の応用と位置付けている通説に，根本的な修正を迫る．

---

153 Einstein，高田訳，1969，p. 33.

154 ヤンマー，小出訳，1974，p. 24．このことは，メーラとレッヘンベルクによっても科学計量学的に裏付けされている．Mehra and Rechenberg, 1982.

前節および本節で論じてきたアインシュタインの思考の歩みを確認しよう．彼は，光量子仮説を主張した論文①の段階では，古典論の二つの描像を信頼しており，エネルギー等分配則を根拠にプランク理論を批判していた．彼はそこで，古典論の二つの描像が対立しない道として，統計力学に進み，光量子仮説を論じた．しかし，論文②では，彼は古典論の二つの描像の対立が解消する点に気づき，エネルギー量子仮説は光量子仮説と同等であると肯定してプランク理論批判を撤回した．アインシュタインがエネルギー量子仮説の解釈したことの重要性は，それが古典的エネルギー等分配則の放棄に通じることへの気づきにあった．彼は論文②において，エネルギー等分配則こそ古典論の限界であるということと，量子論が古典的エネルギー等分配則の破綻を解決し得ることに気づいたのである．こうして，古典論の限界が量子論という代替案を伴って認識された．その過程は彼が光量子仮説を追求することで展開していたが，そこで彼が得た認識は，言わば「古典論の限界の発見」であった．

以上が，アインシュタインが論文③で固体比熱理論を論じるに至った経緯である．論文③での彼の目的は，古典的エネルギー等分配則が放棄されるべきものであると示すことと，固体比熱を例にエネルギー量子仮説の困難を取りのぞくことであった．したがって，彼の固体比熱の量子論を，単にプランクの輻射の量子論の応用と呼ぶことはできない．アインシュタインの固体比熱理論は，彼が発見した古典論の限界とその代替案としてのエネルギー量子仮説の可能性，すなわち量子論の必要性を示そうとして書かれた初の論文だったのである．かくして，パイスの指摘は立証されたが，本節で指摘したアインシュタインの明確な目的意識を考慮すれば，論文③にはパイスの指摘以上の意味があったと言える．

4.3. 固体比熱の量子論

前節では，アインシュタインが固体比熱の量子論を論じるに至った経緯を明らかにした．だが，彼がなぜ輻射の量子論ではなく固体比熱の量子論を論じたのかについては，未だ明らかではない．そこで，本節では，アインシュタインが固体比熱の量子論を論じた理由を解明しよう．

前節で確認したように，アインシュタインは輻射の量子論には難点があると考えていた．彼は，その難点が取りのぞかれれば，輻射の量子論すなわちエネルギー量子仮説の必要性が認められると考え，固体比熱の量子論を論じたのだった．ここで重要なのは，彼が輻射の量子論の難点を直接解決しようとしていないことだ．すなわち，彼は輻射の量子論を解

決することでエネルギー量子仮説を説得的に示すというやり方をせず，固体比熱理論でエネルギー等分配則の放棄の必要性を示すことでエネルギー量子仮説の必要性を説得的に示そうとしているのである．ということは，輻射の量子論の難点は，彼が輻射ではなく固体比熱でもって量子論の必要性を示そうとした理由に関係している可能性がある．

アインシュタインは一体何を輻射の量子論の難点だと考えていたのだろうか．論文③では，彼はその難点が何なのかを具体的に述べていない．だが，前節で注意を喚起しておいたように，彼は論文②において，プランクが共鳴子に仮定したヘルツ振動子について，「輻射空間にある 1 つの共振子のエネルギーを求めるのに普通の電気理論を適用することはできない．なぜなら普通の電気理論は，共振子の特別なエネルギー値を区別するようなことはない」と述べて問題視していた．だとすれば，アインシュタインが考えた輻射の量子論の難点とは，プランクが考えた共鳴子が，マクスウェル電磁気学に則り連続的にしかならざるを得ないヘルツ振動子を仮定していたことだったのではないか．

しかし，アインシュタインは，論文①で光に波動性を要求する光量子仮説を提出し，論文②ではヴィーン分布式が成り立つ範囲でのエネルギー量子化も論じていた．たしかに，一見すると，光量子仮説やエネルギー量子化の議論は，気体分子運動論的描像と同様に電磁気学的描像の修正や放棄にも通じそうである．だが，これまでに確認してきた彼の物質観を思い出そう．彼は電磁気学的描像については論文①でも論文②でも修正や放棄の必要性を論じていなかった．彼は論文①では，彼は古典論の二つの描像を受け入れており，「連続的な空間関数で取り扱ってゆく光の波動論は，純粋に光学的な諸現象の表現についてはみごとにその正当さを立証しており，それが他の理論でおきかえられるということには決してならないであろう」と述べていた．また，論文②でも，「Maxwell の理論は要素共振子に適用できない」と述べていた．彼は続けて，「にもかかわらず」と述べて，ヴィーン分布式が成り立つ範囲でエネルギー等分配則が破綻する仕組みを論じたのだったが，その時も彼は電磁気学の連続的な描像についてはまったく否定していなかったのである．

だとすれば，アインシュタインが考えた輻射の難点とは，プランク理論では輻射を電磁気学に基づいて考えざるを得ないこと，あるいは電磁気学からはどうしても不連続性を取り出せないことだったのではないだろうか．

前述のように，彼は論文③で輻射の量子論の難点が何かを具体的に述べていなかった．しかし，彼が考えた難点が電磁気学の連続性であったことは，同論文での彼の議論から浮き彫りにすることができる．論文③でのアインシュタインの議論の特徴については，クーンが「比熱の議論では輻射も電子も中心的ではなく，原子熱の説明が原子・分子の間の交

換，振動，回転の力学に帰せられていたこと」と指摘していた[155]．ただし，彼は単に輻射理論よりも固体比熱理論の方が量子論に興味を持つ科学者を獲得することが容易だった理由として，このように指摘していたに過ぎない．しかし，以下で見て行くように，論文③でのアインシュタインの議論は，クーンが指摘した以上に，徹底的に電磁的描像が排除されていた．そのことは，これまで強調してきた物質観の観点から，明らかにすることができる．

アインシュタインの議論は，まず非物質的かつ電磁的であることが特徴だったプランク分布式を，物質的かつ非電磁的に導くところから始まる．彼は「Planck 共鳴子の平均エネルギーのひとつの導きかた，すなわちこの共鳴子が分子力学に対してどんな関係をもつかをはっきり認識させるような導きかたを，示したい」と述べて，プランクが頑なに拒んでいた粒子モデルに基づいた統計力学的物質観に立ち，次の二つの式を導いた[156]．

$$dW = C_e{}^{-\frac{N}{RT}E} dp_1 \cdots\cdots dp_m$$

$$dW = C_e{}^{-\frac{N}{RT}E} \omega(E) dE$$

（ dW は任意の時刻において p_ν がある無限小領域（$dp_1 \cdots\cdots dp_m$）の中にある確率，Cは絶対温度（T）の関数，N はアボガドロ数，R は気体定数）アインシュタインは，次に論文①での議論と同様にエネルギー等分配則を導いてから，それをプランクの式に適用するとレイリー・ジーンズ式を導くことを示し，以下のように述べた．

> この式が T/ν の大きい値に対する極限法則という意味においてのみ正当視されることは，よく知られているとおりである．Planck の黒体輻射理論に到達するためには，次のような手順をとることができる．方程式（5）[プランクの式]を認めておき，すなわち輻射密度と $\bar{E}$ の間の関係はMaxwellの電気理論から正しく求められると仮定しておいて，いっぽう方程式（4）[エネルギー等分配則]は放棄する，すなわち分子運動論の適用は経験との矛盾をもたらすと見なす．その反面，熱の一般分子論の公式（2）[前述

155 Kuhn, 1978 p. 201; p. 218.
156 Einstein，高田訳，1969，p.34.

の上式]と（3）[前述の下式]はそのままいかしておく[157].

ここで述べられているのは，論文②でプランク分布式を肯定した際と同様の議論である．だが，彼は論文③では次のようにさらに歩を進めた．

そのさい，分子運動論の定石通りの

$$\omega = 一定$$

という置き方をするかわりに，0，ε，2ε，3εなどと極端に近くはない E のすべての値に対し， $\omega = 0$ と置くのである[158].

パイスが指摘しているように，上述の「新しい定式化は，問題の統計的側面と力学的側面を明確に分離した最初の仕事として，重要である[159].」だが，本論文にとってさらに重要なのは，ここでアインシュタインが電磁的説明にまったく依存していないことである．この直後に，彼は「（量子仮説にしたがって） $\varepsilon = \left({}^{R}/_{N}\right)\beta\nu$ と置く」と述べ，プランク分布式を導出しているが，このように，論文③でのアインシュタインは，プランク分布式の導出の段階からプランクが固執していた電磁気的な導出の仕方を拒否しているのである．そして，彼は以下のように問題の核心を述べた．

分子運動論的な熱理論は，それが黒体輻射の分布法則と調和するようになるためにはどのような意味で変革されるべきなのか――その答は，上述のことから明快に引き出される．つまり，これまでは，われわれの感覚の世界での物体の運動に対してあてはまる法則性とまったく同じ法則性が分子運動を支配すると考えていた（本質的には，完全な逆行可能性の要請だけを付け加えていた）のであるが，物質と輻射とのエネルギー交換のなかだちとなりうるような，一定振動数で振動できるイオンに対しては，イオンがとりうる状態の多様性はわれわれの経験上の物体の状態の多様性よりは数少ないという仮定を設けることが今や必要なのである．われわれはまさに，エネルギー輸送の機構として，要素的実体のエネルギーが排他的に，0， $\left({}^{R}/_{N}\right)\beta\nu$ ， $2\left({}^{R}/_{N}\right)\beta\nu$ な

157 Einstein，高田訳，1969，p. 35.
158 同上.
159 パイス，西島監訳，1987，p.524.

どの値だけをとりうるような機構を考えなければならなかったのである[160].

ここで述べられているのは，一見すると，論文②で彼が論じた，ヴィーン分布則が成立する範囲でエネルギー等分配則が破綻する仕組みについての説明と同様である．しかし，論文②での彼の議論は第一に光量子仮説に基づいており，彼が共鳴子として仮定していた電子には電磁的性質が付与されていた．そのため，エネルギーが不連続な値をとる可能性については消極的で，ヴィーン分布式が成り立つ範囲外では「事情は全く違う」と述べられていた．他方，ここでは，彼は非電磁的な前提に立っており，エネルギー等分配則の放棄がより積極的に主張されている．さらに，論文②では電子を仮定していた共鳴子が，ここではイオンに替わっていることも注目される．このように，論文③で述べられていることは，論文②で述べられたこととは，物質観がまったく異なっているのである．かくして，彼は以下のように課題設定を行った．

> 輻射と物質の間のエネルギー交換の理論で想定される要素的実体が現今の分子運動論の見地での理解を許さないのであれば，熱の分子論を受け入れるような，ほかの周期的振動体に対しては理論のほうを変革する必要があるのではないか？私見によれば，答にはなんの疑点もない．Planck の輻射理論が問題の核心をなしているとすれば，いま採用している方針のもとで対処できるような，現今の分子運動論と経験の矛盾の例が，熱理論の他の領域においても見出されると予想しなければならない[161].

アインシュタインは，「輻射と物質の間のエネルギー交換の理論で想定される要素的実体」すなわちエネルギー量子仮説が認められるためには，「理論のほうを変革」つまりエネルギー等分配則の放棄の必要があると論じ，エネルギー等分配則の放棄の必要性を示す「熱理論の他の領域」の例を見出すことを論文の課題に設定した．ここで注目すべきは，プランク理論において「輻射と物質の間のエネルギー交換」は電磁的な理解がなされていたのに対し，上のアインシュタインの文章には，電磁的な説明が一切ないことである．彼の課題は，電磁的な説明なしにエネルギー等分配則の放棄の必要性を示す例を見出すことで，「Planck の輻射理論が問題の核心をなしている」ことを主張することだったのである．言うまでもなく，プランクの輻射理論の核心はエネルギー量子仮説のことであり，彼が見出した熱理論の他の領域の例は固体比熱のことである．

---

[160] Einstein，高田訳，1969，pp. 36-37.
[161] Einstein，高田訳，1969，p. 37.

かくして，アインシュタインは論文③で固体比熱の量子論を展開していった．彼はまず，固体の原子が互いに独立かつ等方向に三次元の立体格子を形作り，調和振動しているものと仮定し，デュロン・プティの法則を確認する．しかし，同法則のずれがアノマリーとなっていることを指摘し，その解決は以下のように与えられると述べた．

> 固体内の熱の担い手が，周期的振動を行っているような実体であると考えて，その振動数が振動エネルギーに無関係だとすれば，プランクの輻射理論に従って比熱の値が常に 5.94n になると考える必要はない[162]．

こうして，彼は，現在アインシュタインの比熱式と呼ばれる式を導出し，エネルギー量子仮説の有効性とエネルギー等分配則の放棄の必要性を，低温における固体比熱の減少を例に論じた．ここで，彼が，エネルギー量子仮説が解決するべきアノマリーの例として，彼の師だったヴェーバーがエネルギー等分配則を確証したと考えたところの，ダイヤモンドの比熱を用いていたことは大変興味深いが，本論文にとってはさらに興味深い点がある[163]．それは，アインシュタインによる電子の取り扱いである．

1897 年に電子を発見したトムソン（Joseph John Thomson）は 1906 年に「気体の電気伝導に関する理論および実験的研究」でノーベル物理学賞を受賞しており，ローレンツ（Hendrik A. Lorentz）と前述のドルーデによって金属電子論が確立されていた．そのため，エネルギー輸送の担い手として，電子は有力視されていた．実際，論文①でアインシュタインが具体例として挙げた光電効果は，物質の構成要素として電子が含まれることを示唆していた．また，同論文と論文②では，アインシュタインは共鳴子として電子を仮定していた．それは，電子の存在が粒子的な描像だけでなく電磁気学的な描像にも通じるからだった．

だが，電磁気学的な描像に通じることは，論文③では非常に都合が悪い．アインシュタインによる電子の取り扱いは，彼がそのように考えたことを示している．彼は光学応答についてのドルーデモデルを用いて，比熱に対する電子と電磁気学の寄与がないことを論じているのである．すなわち，彼は「紫外固有振動数を説明するために仮定された振動する電子は，常温（T＝300）では，比熱にほとんど寄与し得ない」と述べて，非電磁的な三次元格子を形成する原子の振動のみによって，エネルギー量子仮説の有効性とエネルギー等分配則の放棄を説得的に示したのである．

このように，論文③のアインシュタインは，電磁気学的描像を徹底的に排除した上で，

---

[162] Einstein，高田訳，1969，p. 38.
[163] アインシュタインとヴェーバーはお互い反目していた．ゼーリッヒ，広重訳，1974 年．

エネルギー量子仮説の有効性とエネルギー等分配則の放棄の必要性を主張していた．論文①と②では共鳴子として扱われていた電子も，③ではその存在を排除するかのような扱いをされていた．これらの理由から，彼が考えた輻射の量子論の難点は，やはり輻射の電磁気学的描像だったと考えられる．だとすれば，それこそが，アインシュタインが輻射ではなく固体比熱で量子論を論じた理由だったのであろう．彼は，エネルギー量子仮説が連続的にならざるを得ない電磁気学的描像に基づいていたことを問題視し，その有効性を電磁気学的描像に基づかずに示そうとして，固体比熱理論を展開したのだ．彼はこのようにして，先に固体比熱によってエネルギー量子仮説の有効性とエネルギー等分配則の放棄の必要性を示すことで，間接的に輻射の量子論の難点すなわち電磁気学的描像とその連続性を取り除こうとしたのである．

また，アインシュタインが気体ではなく固体の比熱について論じたことにも，彼なりの考えがあった可能性がある．というのも，次節で見るように，彼が気体比熱を論じ始めるのは，第一回ソルヴェイ会議以後だったからである．彼は，先に電磁気学的な仮定や分子構造の仮定などを必要としない固体原子で議論をしつくしてから，次により複雑な場合に向かっていたのだと想像できるのである．これについて本論文では論証しきれないが，少なくとも第 2 章で論じたケルヴィン卿の議論と比較してアインシュタインの論文③で提案されているモデルが非常にシンプルであることが，理論の受容に重要な意味を持っただろうことは想像に難くない．

4.4. 第一回ソルヴェイ会議

前節までの論証によって，アインシュタインが固体比熱の量子論を論じた経緯と理由が明らかになった．本章の最後に，アインシュタインの固体比熱の量子論が，量子論黎明期においてどのような役割を担ったかを，量子論が国際的に承認された契機とされる第一回ソルヴェイ会議の内容を見て確認しよう．

第一回ソルヴェイ会議は，1911 年の 10 月 29 日から 11 月 4 日にかけてベルギーのブリュッセルで開催された，物理学者による国際会議である．1911 年に「輻射と量子」という表題で開催されたソルヴェイ会議は，1913 年の「物質の構造」，1921 年の「原子と電子」，1924 年の「金属の電気伝導率と関連諸問題」，1927 年の「電子と光子」，1933 年の「原子核の構造と性質」，1948 年の「素粒子」と続いた．ソルヴェイ会議が一般的な学会と異なるのは，表題の問題について集中的に議論し，科学者共同体における一定のコンセンサスを得るこ

とを目的として開催される点だ．そのため，会議はしばしば白熱した．アインシュタインとボーアの論争の舞台となった第五回ソルヴェイ会議は，とくに有名である．本節で扱う第一回ソルヴェイ会議は，「量子論の重要性が一般に認められるようになった」契機だったとして周知されている[164].

第 1 章（1.1.）で示唆したように，第一回ソルヴェイ会議についてのメーラらの先行研究には通説を修正し得る要素が含まれている．しかし，それらの要素は量子論黎明期の歴史にフィードバックされてこなかった．次章でも論じるように，その理由は，輻射理論の展開を中心に描く通説からは，それらの要素をフィードバックする余地が確認できなかったためだと考えられる．だが，本論文は，物質観を軸にプランクやアインシュタインの理論を位置づけ直しながら，通説には未整地が多く残されていることを示してきた．今やメーラらの研究を量子論黎明期の歴史にフィードバックするための余地があることは明らかである．そこで，本節では，本論文がこれまでに議論してきたことを踏まえ，第一回ソルヴェイ会議についてメーラらが明らかにした事実を，改めて量子論黎明期の歴史の中に位置付けよう．

第 2 章でもふれたように，従来の量子論史は，第一回ソルヴェイ会議の焦点が輻射の問題にあったと見なしていた．朝永らの量子論史は，第一回ソルヴェイ会議を「空洞輻射の問題が量子の仮説を採ることによってしか解決されえないことが，ようやく学界の一般的承認をうるにいたった」契機だったと述べていた[165]．若干の濃淡はあるものの，輻射理論の展開を中心に量子論黎明期の歴史を記述する通説においても，それは同様である．クーンは第一回ソルヴェイ会議を，「以後，多くの主要な物理学分野で，物理学者たちは量子に対する無視や軽蔑をしなくなった．（中略）そこに集まった物理学者たちだけの間だが，物理学が本質的な再構築を迫られていること，とくに離散的な物理学が必要とされることを認識」するに至った会議だったと述べていた[166]．また，カーオは「提出された多くの問題に対して，ブリュッセルでの議論からはっきりした回答が与えられることは一つもなかったが，輻射の問題と量子論により鋭く焦点を合わせるのには役立った」と述べている[167].

広重とクーンは，ポアンカレやローレンツのような大家が古典論の行き詰まりを認識し，直後に量子論転向したことを以て，第一回ソルヴェイ会議は量子論が認められる契機であったと論じている．だが，彼らは，そうした大家たちがどのように古典論の限界を認識す

---

164 「ソルヴェー会議」（佐野正博），『科学史技術史辞典』，1994，p. 596.
165 朝永編，1953 年，pp. 135-41.
166 Kuhn, 1978, p. 231.
167 カーオ，岡本監訳，有賀・稲葉他訳，2015，p. 95.

るに至ったかについては具体的に論じていない．彼らは，指導的な科学者たちが第一回ソルヴェイ会議前後で考え方を変えたことを，量子論受容の指標としているに過ぎないのである．たとえば，クーンは，「ポアンカレの論文がドイツの国境を超えて量子論を広めるのに特に大きな意味を持った」と述べるにとどまっている[168]．はたして，第一回ソルヴェイ会議では，具体的にどのような議論がなされたのだろうか．また，どのような議論によって，当時の大家たちは量子論の重要性を理解したのだろうか．

まずは，第一回ソルヴェイ会議の講演者とそれぞれの演題を概観しよう．

H. A. ローレンツ：「エネルギー当分配の定理の輻射への適用について」
J. H. ジーンズ：「マクスウェルとボルツマンによる比熱の運動論」
E. ヴァールブルク：「黒体輻射に関するプランクの公式の実験的証明」
H. ルーベンス：「長波長領域におけるプランク輻射公式の検証」
M. プランク：「黒体輻射の法則と作用素量の仮説」
M. クヌーセン：「完全気体の運動論と実験的諸性質」
J. ペラン：「分子の実在性の証明」
W. ネルンスト：「種々の物理化学的問題への量子理論の適用について」
H. カマリング・オネス：「電気抵抗について」
A. ゾンマーフェルト：「非周期的分子現象への作用素量の理論の適用」
P. ランジュヴァン：「磁気の運動論とマグネトン」
A. アインシュタイン：「比熱の問題の現状」

こうして演題を並べてみると，第一回ソルヴェイ会議では，「輻射と量子」という表題にはおさまりきらない，幅広い問題が論じられていたことがわかる．クラインとクーン以後，輻射理論の応用としての固体比熱理論が量子論黎明期の歴史記述に組み込まれたことはすでに見たが，分子の実在性，電気抵抗，磁気など，ここに挙がっている研究群は通説がほとんど手を付けていないトピックである．

次に，第一回ソルヴェイ会議の内容を概観しよう．会議は，ローレンツの「エネルギー等分配の定理の輻射への適用について」という講演によって幕あけられた．そこで彼は，エネルギー等分配則を要約したうえで，それを輻射に適用するとレイリー・ジーンズ式が得られることだけでなく，個体比熱に適用するとデュロン・プティの法則が得られること

168 広重，1968，p. 163；Kuhn, 1978, p. 210.

を示した．続いて彼は，レイリー・ジーンズ式とデュロン・プティの法則それぞれが，いわゆる紫外発散と低温における比熱のずれという問題に直面していることを示した．

次のジーンズの講演は，古典統計力学が前提にしていた平衡状態に至るまでにかかる時間の問題を認めるものの，「マクスウェル - ボルツマンの理論は気体の比熱の実験値によって驚くべき仕方で実証された」と述べる[169]．彼はエネルギー等分配則を固持したまま，会議冒頭でローレンツが示した問題を説明しようと試みた．そのために，彼はエネルギー等分配則の問題を棚上げし，低温になるにしたがって自由電子が減少するという仮説によって個体比熱の減少を説明しようとした．しかし，これは明らかにアドホックな説明で，討論でポアンカレに「理論は説明すべき現象の数だけ任意の定数を導入すべきものではありません．理論は実験事実の間の関係をうちたてるべきもので，とくに予測を可能にするものでなければなりません」と批判されてしまう[170]．

ヴァールブルク，ルーベンス，プランクの講演は，演題通り輻射に関するものだった．ヴァールブルクとルーベンスは実験家らしく輻射スペクトルの測定結果と理論を比較し，プランクはいわゆるプランクの第二理論についての講演を行った[171]．これについては詳しい研究があるため説明を省くが，プランク自身，輻射だけでなくアインシュタインの比熱理論に言及していることは指摘しておこう．

これに続くクヌーセンは「状態方程式，アボガドロの法則，ドルトンの法則，マクスウェルの分布法則により，気体運動論の基本的な諸量，とくに分子の相対的質量と速度の精密な決定が導かれるが，理論の正しさの検証は気体の他の特性中に求めなければならない」と述べ[172]，当時知られていた気体分子運動論を網羅する講演を行った．ペランは，よく知られた分子の実在の実験的証明についての講演を行った．彼はアインシュタインのブラウン運動の理論を検証する際に，エネルギー等分配則が成立するように見える部分があることについて，「等分配の問題に対して最近提出されている諸困難の存在もこの検証の意義を増大させている」と述べている[173]．クヌーセンとペランの議論は，原子や分子の実在性についての最新の総合報告だったと言える．

ネルンストの講演は，彼の研究グループが測定した最新の低温における個体比熱のデー

---

169 Langevin，de Broglie，小川訳・解説，1983，p. 61.
170 Langevin，de Broglie，小川訳・解説，1983 年，p. 74.
171 「振動子のエネルギーは連続的に増大し，それが $n\varepsilon$ になった瞬間にのみ，ある一定の確率で全エネルギー $n\varepsilon$ を放出する」（プランク，西尾訳，1975，pp. 222-223.）という仮定を加えた理論である．西尾の他，多くの量子論史家が，プランクが第二理論を論じた経緯を含めて詳しく論じている．Kuhn, 1978, pp. 235-252; Mehra and Rechenberg, 1999.
172 Langevin，de Broglie，小川訳・解説，1983，p. 128.
173 Langevin，de Broglie，小川訳・解説，1983，p. 198.

タとアインシュタインの固体比熱の量子論を比較したものである．彼は量子仮説を積極的に用い，比熱以外の低温の固体の諸性質にも言及した．「金属の電気抵抗の温度係数は比熱の温度変化に類似してはいるが異なる変化をする．原子熱が一定で 6 に等しい温度範囲では，抵抗ははっきりと絶対温度に比例して変化する」とネルンストは述べている[174]．彼は，比熱の他にも様々な物性を説明する可能性がある理論として，量子仮説を用いていた．

ネルンストの講演に対応するかの如く，カマリング・オネス，ゾンマーフェルト，ランジュヴァンの講演は，それぞれ異なる物性と量子論の関係を論じる内容だった．カマリング・オネスは超電導について，ゾンマーフェルトは放射線による制動放射やイオン化，ランジュヴァンは磁性ついて講演を行った．

最後の講演は，「比熱の問題の現状」と題されたアインシュタインのものだった．彼の講演は，比熱と輻射公式の関係にはじまり，量子仮説の理論的考察を経て量子仮説の全般的事実への適用を議論し，最後に気体分子の回転量子化について論じるものだった．アインシュタインは，デュロン・プティの法則が予測する低温における比熱のずれを例示し，エネルギー等分配則を問題視した．そのうえで，この問題の解決法として量子論の有効性を論じ，比熱に加えて光電効果にも簡単に言及した[175]．

以上が第一回ソルヴェイ会議の各講演内容の概要である．量子論が受け入れられる契機となったと言われる第一回ソルヴェイ会議の表題は，確かに「輻射と量子」だった．しかし，講演者の演題に加えて，講演内容を概観してみても，そこではやはり輻射だけでなく物性に関する幅広い議題が俎上に載せられていた．また，講演内容からは，物性の中でも最も集中的に議論されていたのは比熱についてであって，そこでの中心的なテーマはエネルギー等分配則と量子論の是非だったことがわかる．さらに，第一回ソルヴェイ会議の講演中，輻射の議論は全体の四分の一に過ぎず，プランクの講演以後の講演内容が物性の議論に終始していた．このことは，「輻射と量子」という会議の表題とは必ずしも一貫しない事実である．なかでも，とくに注目すべきは，最後のアインシュタインの講演である．後で確認するように，そこで行われたのは，本章で確認したアインシュタインの「古典論の限界の発見」の過程そのものだった．だとすれば，古典論の限界を確認し，それに代わる

---

174 Langevin，de Broglie，小川訳・解説，1983，p. 274.

175 パイスによれば，アインシュタインは発表以来一度も光量子仮説を撤回したことはない．パイスは，「光量子の考えに対しては抵抗が非常に強かったので，アインシュタインの注意深さが，ほとんど勝手に動揺と誤解されたというのが私の印象である」と述べている．（パイス，西島監訳，1987，p. 509.また， アインシュタインのベッソー宛の手紙からは，1918 年の段階になっても光量子仮説が受け入れられていなかったことを示している．アインシュタインは「まだそれを確信しているのは私だけだが，光量子の実在性はもはや疑いようがない」と書いている．（*Collected papers of Albert Einstein*, Vol. 8, doc. 59.）

理論としての量子論の有効性を議論することが，第一回ソルヴェイ会議の目的だったと考えられる．

この仮説を裏付ける事実が，クラインやメーラが研究に用いた第一回ソルヴェイ会議の草稿に含まれている．それによれば，第一回ソルヴェイ会議のもともとの表題は，「輻射と量子」ではなく「最近の動力学理論の問題を明らかにするための国際会議」だった．そのことは，メーラが詳細な研究を行う前に，固体比熱理論の役割を強調したクラインによって指摘されていた．一方，メーラによる研究は，ソルヴェイ財団に残された手稿を含む文献資料に基づく実証性の高いもので，1911 年の第一回から 1973 年の第十六回までの各会議についてまとめたソルヴェイ会議の正史でもあった．そこで，以下では，メーラが明らかにした第一回ソルヴェイ会議開催の経緯を要約しよう．

> ソルヴェイ会議開催のきっかけは，1910 年の春に，ネルンストがブリュッセルのゴルトシュミットの家でソルヴェイの知遇を得たことだった．ソルヴェイは，自身の科学理論をネルンストのような高名な科学者たちに提案したいと考えており，また相対論や量子論の登場による古典論の危機に関心を抱いていた[176]．これを良い機会と見て取ったネルンストは，即座に物理学者の国際会議の開催をソルヴェイに提案した．
> ソルヴェイに会議の企画を任されたネルンストは，プランク，ローレンツ，クヌーセンと個別にコンタクトを取り，短期間に会議の企画をまとめ上げてソルヴェイに提出した．ネルンストは同国際会議開催の可能性についてプランクに相談をしたが，プランクは量子論に慎重な立場で，実験事実が積み重なるまでは会議を延期すべきと考えていた．しかし，ソルヴェイからの支援を絶好の契機と捉えたネルンストは，ソルヴェイにはプランクの賛同を得ていると伝え，企画を推し進めた[177]．

ここまでの要約でわかることは，ネルンストが，相対論と量子論による古典論の危機というソルヴェイの関心をきっかけにして会議開催を企画したということである．しかし，その後の展開は，ネルンストがソルヴェイの関心だけでなくプランクの助言をも無視して会議を計画したことを示している．メーラの研究の要約を続けよう．

> ネルンストがソルヴェイに示した招待状の草案では，会議の名称は，「最近の動力学理論の問題を明らかにするための国際会議」だった．草案は「私たちはこれまでの物質

[176] Mehra, 1975, p. 4.
[177] Mehra, 1975, p. 5.

の運動論の包括的な再構築を迫られています」という書き出しで[178]，プランクとアインシュタインが示した量子論の可能性を示唆し，量子論の是非を問う会議への参加を促していた[179]．そこで議題に挙がっていたテーマは以下の通りだった．

1. レイリー卿の輻射法則の導出について
2. 理想気体の分子運動論はどの程度まで実験と対応するか
3. クラウジウス，マクスウェル，ボルツマンによる比熱の運動論について
4. プランクの輻射法則について
5. エネルギー量子理論について
6. 比熱と量子理論について
7. 量子論が物理化学と化学にもたらす帰結について

その後，ネルンストとソルヴェイの間でやりとりがあり，会議開催の時期と最終的な人選がなされた．このときソルヴェイ側はプランクを議長に推したが，最終的に議長は多言語に堪能なローレンツが担うことになった．その際，ネルンストはソルヴェイに「招待状には，私が会議の発案者だということは絶対に伏せて頂きたく存じます」と書き送っている．講演者へは 1911 年 6 月 9 日，講演をしない参加者へは同 15 日付けで，ソルヴェイの署名入りの招待状が出された．ネルンストが企画した各テーマは，あらかじめ講演者に与えられ，講演者の予稿は参加者の間で事前に回覧された．

以上が，メーラが明らかにした事実の要約である．これから，相対論と量子論というソルヴェイの関心をきっかけとしながらも，ネルンストが独自に「最近の動力学理論」と量子論についての会議を開催しようとしていたことがわかる．まず注目すべきは，ネルンストがソルヴェイに示した草案における会議の表題が「最近の動力学理論の問題を明らかにするための国際会議」だったことである．これは，実際の表題「輻射と量子」とは大きく食い違っている．次に注目すべきは，草案における会議の内容である．これは，実際の内容とほとんど食い違いがない．つまり，第一回ソルヴェイ会議は，草稿段階と開催段階で，言わば「暖簾」だけが掛けかえられていたのである．

表題が変更された理由を論じるためにはさらなる研究が必要だが，最終的な人選の段階

178 Mehra, 1975, p. 6.
179 ここでネルンストが示唆しているアインシュタインの量子論は，個体比熱の量子論のことであって，光量子論ではない．

でソルヴェイ側がプランクを議長に推薦したことが影響した可能性が考えられる．ソルヴェイ側からの要望に対して，ネルンストは，プランクの意向を無視して会議の準備を推し進めていたことを知らせなかっただけでなく，プランクが会議開催に好意的だと虚偽の報告までしていた．こうしたネルンストの行動は，会議の暖簾がかけかえられた理由に関係があるように見える．だが，いずれにしても，本論文の議論にとって重要なのは，会議の暖簾がかけかわっても，その内容は変わらなかったということだ．草稿段階では，各講演テーマに番号が付けられており，実際の講演もほとんど同じ順番で行われたことから，会議の構成にもネルンストの意図があったことがうかがえる．ネルンストの構想は，ほとんどそのまま実際の会議の内容に反映されていた．

すなわち，ネルンストは，草稿段階から，輻射というよりは比熱などの物性を幅広く例にとって量子論の必要性と有効性を議論することで「物質の運動論の包括的な再構築」を目指していたのである．

しかし，この事実をもとに従来の量子論黎明期の通説が書き換えられることはなかった．ただし，中には量子論黎明期の通説に疑問を持つ量子論史家がいないわけではなかった．たとえば，第一回ソルヴェイ会議の議事録を和訳した小川は，クラインとメーラの研究を踏まえて，「第 1 回 Solvay 会議の全般的な議題は『熱輻射と量子』となっており，熱輻射論が討議の中心であったような印象を与えるが，報告の題目を眺めると，たしかにはじめに熱輻射論が論じられているものの，むしろ重心は物質の量子論にあったように思われる．このことは会議の実質上の提案者であった Nernst の意図を考えてみれば良く理解される」と述べていた[180]．彼は，ネルンストの構想と実際の会議内容を照らし合わせ，以下のように，本論文が第 2 章で行ったのと同様の分析をしていた．

> まず古典統計力学の帰結がエネルギー等分配則の法則となることを確認し，熱輻射論において古典論と量子論を対決させる．つぎに物質の運動論に移り，完全気体の理論と実験を整理し分子の実在性を確認した上で物質の量子論に入る．赤外線スペクトルと比熱の関係など，光学的，熱学的，化学的，電気的諸側面の関係にふれた後，超伝導，磁性，レントゲン線，光電効果など多くの現象が論じられ，最後のアインシュタインの比熱の問題で終結となる[181]．

だがそれでも，小川がそれ以上議論を進めることはなかった．さらに，近年出版されたバ

[180] Langevin，de Broglie，小川訳・解説，1983，p. 442.
[181] Langevin，de Broglie，小川訳・解説，1983，p. 443.

ルカンによるネルンストの伝記においても，ネルンストの意図は，量子論黎明期の歴史の中に位置付け直されていない[182]．彼女はクーンとギャリソンに依拠し，「1910 年まで，輻射の問題としての量子論は，プランク，ローレンツ，ルーベンスと，彼らに続いたアインシュタインとエーレンフェストなど，ごく少数の科学者の間のトピックに過ぎなかった」が「ネルンストは意識的に協働を推進し，動力学理論の再構築の必要性に関する『信念の集団』の拡大に努めた」として，通説とくに次章で論じるクーンのパラダイム論的理解を完全に踏襲している．また，会議の内容についての分析も小川以上のものではなく，「会議の中心的議題は，確実に現れてきた量子仮説の妥当性に関する当時のネルンストの興味の組み合わせ，すなわちそれまでに利用可能なデータ，彼自身が測定した新しいデータ，そして 1907 年のアインシュタインの固体比熱理論に基づいていた」とまとめるにとどまっている[183]．

だが，本論文でのこれまでの議論によって，「物質の運動論の包括的な再構築」が必要であるというネルンストの意図が，エネルギー等分配則の見直しを意味することは明らかであろう．当時のネルンストが置かれた状況は，メンデルスゾーンが詳しく論じている．メンデルスゾーンの記述をまとめよう．

> 1906 年以後，ネルンストは熱力学第三法則の物理的基礎を実験的に証明しようとしていた．そのためには，極低温における比熱の測定が必要だったが，当時はまだ極低温に到達するための装置がなかった．メンデルスゾーンによれば，当初のネルンストは量子論に懐疑的だったが，1907 年に出版されたアインシュタインの論文③を読んで，固体比熱の量子論がネルンストの熱力学第三法則の基礎理論だと直感したという．しかし，彼はまだアインシュタインを引用しなかった．

通説でも受け入れられている通り，ネルンストがアインシュタインの論文を引用するのは 1910 年のことで，それ以来量子論に関する論文が増加したことが科学計量学によって裏付けられている．では，1907 年から 1910 年まで，ネルンストは一体何をしていたのか．

転機は 1908 に訪れた．カマリング・オネスがヘリウムの液化とその装置の開発に成功

---

182 Barkan, 1999, pp. 164-207.

183 残念ながら，バルカンの議論からは，ネルンストの弟子筋であるメンデルスゾーンが述べた以上のことはほとんど何も見出すことができない．メンデルスゾーンの歴史は，パイス同様例外的な量子論史に属する．メンデルスゾーン，藤井・藤井訳，1976 年；メンデルスゾーン，大島訳，1971.

したのである．ネルンストは即座にカマリング・オネスを訪ね，そのヘリウムの液化装置クライオスタットの仕組みと操作を学んだ．ネルンストは 1908 年から 1910 年の間に，液化ヘリウムを使った極低温における比熱の測定を重ねていた．かくして，満足できる実験データをそろえた彼は，1910 年にアインシュタインの理論を引用して，自身の実験データを発表した．

ただし，ネルンストがいつエネルギー等分配則の見直しの必要性に気づいたのか，すなわち，アインシュタインの論文③の意味に気づいたのかは，メンデルスゾーンもバルカンも明らかにしていない[184]．

しかし，すでにメーラの研究から明らかなように，ネルンストが第一回ソルヴェイ会議の準備を進めていた 1910 年の段階で，彼がそのことに気がついていたことは明白である．会議におけるネルンストの発表は彼が 1910 年に発表した実験データに基づくものだったが，こうしてソルヴェイ会議に至る彼の研究の背景を踏まえると，アインシュタインの講演の役割の重要性はますます際立つ．メーラの研究が明らかにしたように，アインシュタイン講演「比熱の問題の現状」は，ネルンストによって与えられたものだったからである．

アインシュタインの講演は，エネルギー等分配則に基づくと単原子分子の平均エネルギーから導かれる定積比熱が気体比熱の測定結果と一致する部分を認めるところから始まっていた．次に彼は，同様にエネルギー等分配則に基づいて得られる固体比熱が，デュロン・プティの法則の予測と一致することを認めた．しかし，彼はダイヤモンドの実際の比熱がデュロン・プティの法則の予測よりも非常に小さいことを例に挙げて，エネルギー等分配則が破綻することを示した．彼は，この問題に「突然の光明を投じた」プランクの輻射式はそもそもエネルギー等分配則を放棄していたと述べた後，「Planck の研究における思想の歩みを簡略に振り返ってみたい」と述べ，本章（4.1.，4.2.）で論じてきた彼の論文①から論文③への議論を繰り返していた．アインシュタインは「Planck の研究における思想の歩み」と述べているが，そこで述べられているのは彼自身による思想の歩みに他ならなかった．第一回ソルヴェイ会議における「総合講演」は，その講演者による「古典論の限界の発見」

184 ネルンストにとっても，アインシュタインにとっても，彼らの理論が物理的意味を持つためには，原子の実在性の確認が必要不可欠だった．第一回ソルヴェイ会議の講演者の中にペランが入っているのは，そのためだと思われる．本論文で取り扱うことはできなかったが，ボルツマンからヴィーンを経てアインシュタインやネルンストに至る，粒子モデルあるいは原子・分子の実在性の行く末は，非常に重要な研究テーマである．それは，1911 年にラザフォードが有核原子模型を，1913 年にボーアが半古典的原子構造論を論じる道に通じている．メンデルスゾーン，藤井・藤井訳，1976 ; メンデルスゾーン，大島訳，1971.

についてのものだったのである[185].

したがって，第一回ソルヴェイ会議の目的は，「空洞輻射の問題が量子の仮説を採ることによってしか解決しえないこと」の承認にあったのではなく，輻射の問題に現れるエネルギー等分配則の問題が比熱を含む物理学全般における深刻な問題であることを承認することにあったと言うべきである．それは，アインシュタインによって発見された古典論の限界を認めることであり，それによって初めて量子論の必要性が明らかにされたのである．

4.5. 小括

本章で明らかにしたことをまとめよう．本章では，光量子仮説から固体比熱理論に至るアインシュタインの一連の論文を分析した．とくに，アインシュタインの物質観を明らかにし，彼の物質観を前章で論じたプランクらの物質観と対比することで，アインシュタインが固体比熱理論を論じるに至った背景と理由を解明した．

まず，アインシュタインが光量子仮説を論じた論文①を扱った．そこでは，アインシュタインが電磁気学的描像と気体分子運動論的描像のどちらも排除しておらず，むしろいずれの描像についても古典論として信頼を置いていたことを明らかにし，彼の論理を確認した．そこで彼は，古典論の立場からプランクの物質観を批判していた．アインシュタインは，プランク理論がエネルギー等分配則と矛盾することを問題視して退け，彼はあくまで古典論の立場を維持しつつ，あくまで古典論二つの描像が対立しない道として統計力学に進んだ．すなわち，光量子仮説は，アインシュタインの独特な物質観の産物だった．

論文②は，アインシュタインにとっても，現代物理学にとっても大きな転換点だった．彼は論文①では古典論の二つの描像の対立を解消しようとは考えておらず，一方を採ることで理論に矛盾が生じるプランク理論を批判していた．だが，ヴィーン分布則が成り立つ範囲で古典論の二つの描像が一致し得ること，すなわちエネルギー等分配則が破綻する条件とその仕組みに気づいたアインシュタインは，自身の物質観だけでなくプランク理論も見直した．こうして，彼は光量子仮説とエネルギー量子仮説を同等だと考えるようになり，プランク理論を肯定することになった．これは，量子論という代替案を伴ってエネルギー等分配則の放棄の必要性が認識されたということであり，「古典論の限界の発見」とでもい

---

185 パイスは，アインシュタインの講演を第一回ソルヴェイ会議の「総合講演」だと述べた．だが，彼は上述の科学史家たちのように草稿と内容を照らし合わせて会議全体の筋書きを推定したり具体的な根拠を示したりはしなかった．また，量子論黎明期の通説の中に位置づけてもいない．パイス，西島監訳，1987，p. 529.

うべき出来事であった．

論文③は，論文②での古典論の限界の発見を説得的に示すために書かれていた．アインシュタインの目的は，エネルギー等分配則が放棄されるべきものであることを示すことと，固体比熱を例にそれを論じることで輻射の量子論の困難を取り除くということだった．したがって，通説で言われているのとは異なり，固体比熱の量子論は輻射の量子論の応用などではなかった．アインシュタインは輻射の量子論の電磁気学的描像からではエネルギー等分配則の放棄を主張することは難しいと考え，電磁気学的描像に依らずにエネルギー等分配則の放棄を主張するために，固体比熱理論を論じた．実際，彼は周到に電磁気学的描像を排除して論じていた．彼は先にエネルギー等分配則の放棄を説得的に示しエネルギー量子仮説の必要性を論じることで，間接的に輻射の量子論の承認を目指したのである．

最後に，量子論が承認される契機だったと見なされている第一回ソルヴェイ会議において，固体比熱理論がどのように扱われていたかを確認した．第一回ソルヴェイ会議の内容は，比熱を中心とした物性を例にエネルギー等分配則と量子論の是非が議論されており，「輻射と量子」という表題とは必ずしも一致していなかった．そのことは，メーラによる会議の草稿についての研究からも裏打ちされた．メーラの研究によれば，会議はネルンストによって「物質の運動論の包括的な再構築」の是非を論じるために入念に計画されたもので，会議の表題だけがかけかわっていたものの，内容はネルンストの計画通りだった．会議ではアインシュタインが「比熱の問題の現状」という講演を行っていたが，それは彼が論文①から③へ至る経緯そのものだった．ネルンストの計画通りに運んだ会議の内容とアインシュタインの講演の位置付けから，第一回ソルヴェイ会議の目的が明らかにされた．すなわち，第一回ソルヴェイ会議の目的は古典論の限界を議論し量子論の必要性を承認することだった．

第 5 章：結論

本論文が論じてきたことをまとめよう．第 1 章では，先行研究が量子論黎明期をどのように描いているかを，光量子仮説と固体比熱理論に着目して分類し，量子論黎明期の歴史の通説を確認した．また，通説とは異なるパイスの指摘を手掛かりに，アインシュタインの固体比熱理論とエネルギー等分配則の関係が量子論受容にとって重要な意味を持っていた可能性を指摘し，その可能性を明らかにすることを本論文の具体的な目的として設定した．それは，次の三点だった．第一は，量子論が代替した古典論の困難であったとされるエネルギー等分配則を物理学者たちがどのように見ていたのかを明らかにすること．第二は，量子論が古典論に替わる際に中心的な役割を果たしたとされる輻射理論についての物理学者たちの考えを明らかにすること．第三は，アインシュタインが輻射理論ではなく固体比熱理論に向かって量子論を展開した理由を明らかにすることである．

第 2 章では，先行研究において古典論の限界だと見なされているエネルギー等分配則について，ケルヴィン卿がエネルギー等分配則を古典論の限界だと述べた 1900 年時点の状況を確認し，彼の指摘がどのように受け止められたかを明らかにした．ケルヴィン卿の指摘は，量子論が承認される契機とされる 1911 年の第一回ソルヴェイ会議と同様，比熱を例にエネルギー等分配則の放棄を主張するものだったが，彼の主張は受け入れられなかった．その頃までのエネルギー等分配則は，それが仮定していた粒子モデルの必要性は疑われていたが，理論自体は実験的にも確証されたと見なされ古典論の一角を形成するに至っていた．実験事実という証拠があったケルヴィン卿だが，彼の主張は粒子モデルに基づいていたために受け入れられなかった．

第 3 章では，熱輻射研究の歴史を振り返り，とくに実験と理論が相互作用するなかで物質観も変化していたことを明らかにし，科学者たちの考え方を明らかにするためには，化学熱力学的か電磁気学的か，エネルギー等分配則を支持しているか否かなどの従来の分析枠組みでは不十分であることを示した．また，物質観の観点からヴィーン，レイリー卿，プランクの輻射理論を分析し，それぞれの考え方の特徴を明らかにすることで，次章で固体比熱理論を論じるための土台を作った．粒子モデルに逆風が吹く中にあって，ボルツマン，ミヘルゾン，ヴィーンと，粒子モデルは引き継がれただけでなく実在性を増していた．ヴィーンの輻射理論は，彼が仮定する実験が黒体輻射から空洞輻射へ替わったことにより，輻射線ではなく輻射源の性質として粒子モデルが採用された結果，粒子性と波動性を備えるものになっていた．レイリー卿は，主に輻射線の性質だけに着目していたが，彼が輻射

理論に適用したエネルギー等分配則についての考え方は，粒子モデルから振動する弦モデルに替わっていた．プランクは，彼の理論からあらゆる実在的な物質的仮定を取り除こうとしていた．彼の理論では原子だけでなく黒体ですら物質として扱われておらず，量子概念が登場した際も，彼はボルツマン原理の導入に高まった共鳴子の実在性を取り除こうとしていた．

第 4 章では，まず，アインシュタインの一連の論文を分析し，物質観を明らかにしながら，彼がエネルギー等分配則の破綻を古典論の限界として発見するに至った経緯を明らかにした．次に，彼の固体比熱理論における物質観を第 3 章で明らかにしたプランクの輻射理論の物質観と比較することで，彼が固体比熱理論を論じた理由を論証した．最後に，第一回ソルヴェイ会議の内容を，メーラによる研究と照らし合わせて確認し，アインシュタインの固体比熱理論がどのように扱われていたかを確認した．アインシュタインはプランクともヴィーンとも異なる独特の物質観をもった光量子を追求した結果，エネルギー等分配則の破れおよびプランクのエネルギー量子仮説がエネルギー等分配則を代替し得ることに気づいた．こうしてプランクのエネルギー量子仮説の意義を認識したアインシュタインだったが，彼はプランクの輻射理論をそのまま展開することは難しいと考えていた．そのために，彼は，電磁的な説明を一切排除してエネルギー量子仮説の有効性とエネルギー等分配則の放棄の必要性を主張できる固体比熱理論を論じたのだった．第一回ソルヴェイ会議が，アインシュタインが発見した古典論の限界を承認することで物理学全般に対する量子論の必要性を検討する場だったことは，メーラによる研究によっても裏付けることができた．

以上，まず第 2 章で本論文の第一の目的が，第 3 章で第二の目的が，第 4 章で第三の目的が達成された．ケルヴィン卿は例外だったが，他の物理学者たちはみな古典論の限界を認識しておらず，それぞれの物質観のもと，古典論の枠組みの中で問題解決を試みていた．また，アインシュタインは，光量子仮説を追求する中で，エネルギー量子仮説の有効性とエネルギー等分配則の放棄の必要性に気づき，その気づきを説得的に示すために，固体比熱理論を論じていた．かくして，本論文が設定した具体的な目的が達成されたことによって，次のように結論することができる．すなわち，量子論の受容は，プランクの輻射の量子論ではなく，アインシュタインの固体比熱の量子論が古典論の限界を具体的に示すことによってなされたのである．

5.1. 通説の考察と本論文の意義

本節では，改めて通説の考察を行う．先行研究や通説の考察は，これまでの各章で折に触れて行ってきた．だが，それらはあくまで部分的な考察であり，本論文の問題意識もやはり部分的にしか述べてこなかった．そこで，本論文を終える前に，本論文が批判してきた従来の量子論史の問題の構造を議論し，本論文が明らかにしたことの意義を論じることにしよう．

第 1 章で述べたように，科学史の制度化と相まって，専門的な量子論史は実証研究の度合いを深めてきた．そうした研究の集大成は，やはりメーラとレッヘンベルクによる *The Historical Development of Quantum Theory* だろう．とくにメーラによる研究は，固体比熱理論から第一回ソルヴェイ会議への量子論の展開について，これまでの量子論史のうちで最も詳細な記述を与えていた．第 4 章で具体的に示したように，彼の研究には量子論黎明期についての通説に沿わない要素も含まれていたが，彼は彼が明らかにしたことと通説を照らし合わせていなかった．

量子論史研究に限らず，すべての研究という研究は，個別のトピックの詳細を明らかにすればするほど，そうして明らかにした詳細を全体の中に位置づけ直す必要が生じる．そのような必要性を，近年量子論史家のダリゴルも論じている．彼は，個別のトピックについての実証研究が重要であることを認める一方で，概念同士の関係性を明確にすること，量子論の始まりについての正しい記述を物理学者と哲学者に伝えること，量子論の始まりにとって不可避的な要素を捉えることが量子論史研究に必要になってきていると述べている．彼は，量子論史を整頓し，基本的な問題に対しての歴史的なアプローチを容易にすることを意識した，「シンプルな量子論史」を描き直す必要があると主張し，自身もそのような歴史を描くことを試みた[186]．しかし，量子論黎明期に関するダリゴルの歴史記述は，残念ながらクーンのそれと基本的には変わっていなかった．

メーラの詳細な記述とダリゴルのシンプルな記述がそれぞれ対極の立場にあるとすれば，1999 年のカーオの『20 世紀物理学史』の記述は，その中間に位置づけられる．先行研究を踏まえ量子論史を適度に単純化して描き直したカーオの研究は，総合的な量子論史の最新

[186] ダリゴルが「シンプルな量子論史」と表現しているものと，セコードは「巨大な構図」として表現するものは，実質的に同等である．中島秀人も指摘しているように，分析的な研究と総合的な研究との乖離は，量子論史に限った話ではない．Darrigol, 2009; Secord, 1993, p. 378; 中島秀人，2006, pp.135-146； pp. 175-192.

のものである[187]．しかし，第 1 章から何度か触れてきたように，量子論黎明期についての彼の記述は，クーンが与えた通説と変わっていなかった．そこでは，輻射理論を中心とした歴史が繰り返し語られているのである[188].

それにしても，なぜ量子論黎明期の歴史は輻射理論を中心に記述され続けるのか．第 1 章で述べたように，それには物理学教科書における輻射理論の位置付けも影響していると考えられる．だが，より直接的な理由は，第 2 章冒頭で述べたように，量子論の発見と承認の契機に輻射というキーワードが現れているためだと考えられる．はじめプランクの輻射理論に現れた量子論が，まさしく「輻射と量子」と題された第一回ソルヴェイ会議において承認されたのだろうと考えるのは，まったく自然である．したがって，その間に挟まれた期間, すなわち 1900 年にプランクがエネルギー量子を提唱してから 1911 年の第一回ソルヴェイ会議で量子論が認められるまでの間に，量子論は輻射を中心に展開したのだろうと考えるのも，常識的である．

そして，この常識的な考えに沿えば，途中に現れるアインシュタインの固体比熱の量子論はプランクの輻射の量子論の応用として位置づけられる．実際，アインシュタインが固体比熱理論を論じた論文には「輻射に関するプランクの理論と比熱の理論」というタイトルが冠せられており，彼がプランクの輻射の量子論を応用したかのような印象を与えている．また，多少注意深い科学史家が，タイトルだけに満足せず内容を見たとしても，論文②を経て論文③すなわち固体比熱の量子論を論じたときのアインシュタインは，あたかもプランクの輻射の量子論に立脚していたように見える．もちろん，アインシュタインが，エネルギー量子仮説については肯定しても，輻射の量子論についてはそうではなかったことは，本論文が明らかにした通りである．

上記の常識的な理解は，まさに常識に由来する問題を孕んでいると考えられる．というのも，これまでのどの量子論史も，アインシュタインが固体比熱理論を論じた経緯や理由を説明していないからである．たしかに，クライン以来，固体比熱理論は強調されるようになり，通説においても量子論黎明期における役割は与えられていた．だが，その役割はあくまで量子論についての関心を高めたというものに過ぎず，アインシュタインがなぜ，どのように考えて，輻射ではなく固体比熱を用いて量子論を論じたのかは，輻射理論を軸に展開した量子論史があまりに常識的であったため，疑問すら抱かれなかったのだ．

---

187 Merha and Rechenberg, 1982, pp.113-136.

188 ただし，ここで述べているのは，あくまで量子論黎明期における量子論の展開についての歴史記述に限った話である．プランクによる電磁的エントロピーの導入が，ヴィーン分布式の逆算だったのか，ボルツマンの H 関数に着想を得たものだったのかなど，議論が分かれる記述もある．この論争を小長谷がまとめている．小長谷，2012，pp. 267-296.

また，量子論黎明期の歴史の通説には，上述の常識的な考え方に由来する問題とは別の考え方に由来する問題が存在していると考えられる．そのことは，以下のように当時の輻射理論と量子論の局所性を指摘することによって浮き彫りにできる．

まず，輻射理論は，現在の物理学教科書における位置づけとは異なり，当時の物理学の中では，あくまで一分野に過ぎなかった可能性が考えられる．たとえば，西尾は，「一般的な背景として，熱輻射の問題は物理学全体の中でそれほど関心をもたれていなかった」と述べている[189]．彼女は，続けてその理由を以下のように述べている．「X 線，放射能，電子，ラジウム，の発見……これだけあげれば明らかなように，多くの物理学者達はこれらの驚くべき諸発見に目を向けていたのである．」

また，量子論の局所性について，ヤンマーは以下のように述べていた．

> 当面少なくとも 1905 年までは，プランクの仕事が“たぶんニュートンの発見くらいしか匹敵するもののないような発見”であることを認識した人は誰もいなかったようである．（中略）要するに，プランクの輻射法則が何度も実験的にテストされていたにもかかわらず，彼による h の導入は，深い物理的意味をもたない便宜的な方法論的手段とみなされていたようである[190]．

西尾やヤンマーが指摘している科学全体における輻射理論と量子論の局所性は，実のところ，クーン自身による科学計量学データによっても示されていた．彼はまた，「黒体輻射は限られた人々の秘教的な専門分野だった」とも述べていた[191]．それにもかかわらず，彼は，ネルンストがアインシュタインの論文を引用する 1910 年までに「空洞輻射の分野に限って量子論はすでに認められた」と述べていた[192]．1910 年にネルンストがアインシュタインの論文を引用するまで，プランクの輻射の量子論について論じた人間がほとんどアイン

---

189 これは，クラインが最初に指摘していた．セグレも当時の物理学にとってはこの四つが主な関心であったと述べている．Klein, 1962: pp. 459-479 ; プランク，西尾訳，1975，p. 218; セグレ，久保・矢崎訳，1982，p. 16 ; Seth, 2004, pp 67-93.

190 ヤンマー，小出訳，1974，p.24.

191 Kuhn, 1978, p. 228.

192 彼は他の箇所でも古典論の限界の認識について述べていない．それは，メーラとレッヘンバーグも同様である．メーラとレッヘンバーグが，本論文が扱うのと同じアインシュタインの論文およびエネルギー等分配則を扱っているのは，1.3 節と 1.4 節である．そこでは，クーンやクライン同様エーレンフェストが取り上げられ，また，レイリー卿やジーンズの反応も分析されているが，そこでの記述は，驚くほど古典論の限界の認識について無頓着である．その結果，本論文が明らかにしてきたことはまったく書かれていない．Mehra and Rechenberg, 1982.

シュタインだけだったことが判明していたにもかかわらず，彼は自身が示したデータとは矛盾する結論を述べていたのである．

このようなクーンの解釈には，彼が『科学革命の構造』で論じたパラダイム論が影響していた可能性がある．実際，彼が *Black-body Theory* の新版に付け加えたあとがきには，同書がパラダイム論の具体例を示す歴史として書かれたと述べられているのである．

クーンのパラダイム論を要約すれば，次のようである．通常，科学はパラダイムと呼ばれるある時代ある科学者集団に固有の考え方に基づいており，パズル解きに例えられるような問題解決が累積的になされている（通常科学）．しかし，所与のパラダイムに解くことのできない変則事例が積み重なると，科学は異常をきたし（異常科学），それが極まるとパラダイムは危機に陥る．そのとき初めて新たなパラダイム候補が模索されるようになるが，それが蓄積した変則事例を首尾よく説明すると，古いパラダイムから新しいパラダイムへの転換（パラダイム・シフトあるいは科学革命）が起こる．かくして，新しいパラダイムのもと，通常科学の営みが再び始まる．パラダイム論では，科学の進歩は，特定のパラダイムを背負った（理論負荷性）科学者集団の交代によって説明されるため，パラダイム間には断絶（通訳不可能性）が存在する．そのため，パラダイムに優劣をつけることは難しいとされ，パラダイムの転換は改宗にも例えられる[193]．

ここで，改めて *Black-body Theory* の記述を振り返ってみると，彼の記述が，パラダイム論に対応していることがわかる．量子論黎明期の記述は，危機的状態から始まっている．彼の記述では，1900 年の段階ですでに古典論の限界は認識されており，古典論を代替することになる量子論も与えられているのである．そこでは，はじめから輻射の問題は量子論が解くべき変則事例あるいは古典論の限界として見なされている．パラダイム・シフトのために残された主なステップは，量子論が科学者集団に広まることだけであり，固体比熱理論は規模の小さい科学者集団だけの問題だった量子論が物理学全体に広まるための，解くべき古典論の限界の例として位置付けられる．つまり，量子論黎明期を輻射理論の展開を軸に描く通説とっては，固体比熱理論は，規模の小さい科学者集団によって研究されていたプランクの輻射の量子論がその集団を越えて広まる機会でありさえすればよいのである．

クーンのパラダイムは，ポパーらとの論争を巻き起こした当初から，何通りもの定義が可能であることが指摘されていた[194]．たしかに，パラダイムの定義の中には，本論文が論じた物質観に相当するものも含まれていた．しかし，パラダイムには，発見の心理や集団

193 クーン，中山訳，1971.
194 ラカトシュ・マスグレーブ，村上訳，1990.

の信念のような定義も含まれており，本論文第 3 章で論じた天野やハーマン以上に「なんでもあり」になってしまう可能性があった．さらに，パラダイム論は科学者集団の社会学的分析に重心が置かれていた．そこでは，科学者たちがどのように考え方を変えるかよりも，科学者たちが実際に考え方を変えたという事実と，それが集団的かつ心理的なものだったということが強調されていたのである．ゲシュタルト変換に例えられたパラダイム論では，地と図が変わることは強調されても，それが具体的にどのようなプロセスを経て変わるのかについては，ほとんど何も論じられていなかった．このパラダイム論の特徴は，クーン自身が認めるように，彼が与えた通説の記述の仕方と対応している．

だが，問題はクーンの記述だけに留まらない．すでに見てきたように，クーンが与えた量子論黎明期の通説はその後の量子論史にも引き継がれた．その際に，クーンが念頭に置いていたパラダイム論も，暗黙に引き継がれたのだと考えられるのである．そのことは，以下のカーオの記述に表れている．

> 20 世紀の最初の 10 年が終わる頃，量子論は未だよく理解されず，ごく少数の理論物理学者によって研究されていただけだった．その中にはローレンツ，エーレンフェスト，ジーンズ，アインシュタイン，ラーモア，そしてもちろんプランクがいた．1906 年までは，プランク理論の根源的で非古典的な性格を認識していたのはアインシュタインだけであったが，4 年後には，ほとんどの専門家が，エネルギーの量子化は現実であり，何らかの形での古典物理学との断絶は必然的であることを認識していた[195]．

カーオは，古典論の問題とその限界の認識の違いがどのように生れたのか，その際にどのような議論がなされたのかといった問題に全く関心を向けていない．そこでは量子論はすでに与えられており，クーン同様，科学者集団について古典論と量子論との断絶が強調されている．このように，通説は量子論の受容に関して社会学的な理解に終始しており，古典論から量子論への転換の具体的なメカニズムは，これまでまったく明らかにされてこなかったのである．

本論文が明らかにしてきたのは，古典論から量子論への転換の具体的なメカニズムである．そこで明らかになったのは，パラダイム論が強調した通訳不可能性ではなく，逆に通訳可能性が重要だったということである．少なくともアインシュタインにとって，プランクの輻射の量子論はそのまま展開できるようなものではなかった．アインシュタインは光

195 カーオ，岡本監訳，有賀・稲葉他訳，2015，p. 89.

量子仮説を追求した結果，エネルギー等分配則こそが古典論の限界であると気づき，プランクのエネルギー量子仮説については考え方を改めた．しかし，アインシュタインが意義を認めたのはプランクのエネルギー量子仮説であって輻射の量子論ではなかった．アインシュタインには，エネルギー量子仮説を科学者たちが共有する物質観と折り合わせる必要が，すなわちそのままでは通訳不可能なエネルギー量子仮説および輻射の量子論が既存の物理学理論と通訳可能なものであることを説得的に示す必要があった．固体比熱理論は，このような理由で論じられたのだった．

以上のことは，実験と理論双方から科学者たちの物質観を浮き彫りにし，またそれらを詳細に分析することで明らかになった．物質観は，徹頭徹尾物理的な仮定であり，世界観や宗教観とは異なっているだけでなく，哲学的な認識論とも異なるものである．それによって見えてきたのは，それぞれの科学者の独創的な物質観と，科学者たちが共有する物質観との緊張関係，そしてその緊張が解かれる具体的な過程であった．以上，本論文は，物理学教科書や科学哲学から抜け落ちた発見の文脈のなかでも，とくに物理的なものに焦点を絞ることによって，古典論から量子論への転換が「なんでもあり」ではなかったことを示した．

5.2 本論文の最終結論

本論文の最終結論として，熱輻射研究，光量子仮説，固体比熱理論を，量子論黎明期の歴史の中に位置付け直した，新しい記述を与える．

輻射理論の展開と量子論の受容は同時に起こったのではなかった．量子論が受容されるためには，古典論の限界が具体的に示される必要があったからである．

熱輻射研究の文脈からプランクの輻射の量子論が現れたのは 1900 年だったが，その意義が認められたのは，アインシュタインによる 1905 年の光量子仮説の論文によってではなかった．彼は，プランクとは異なる物質観に基づいて独自に光量子仮説を追求していた．アインシュタインがその意義を認めたのは，独自に光量子仮説を追求した結果として，エネルギー等分配則の破れに気が付いた 1906 年のことだった．エネルギー等分配則の問題はすでに 1900 年の段階でケルヴィン卿が指摘していたが，その代替案は存在せず，これまではそれが古典論の深刻な問題だとみなされることはなかった．古典的エネルギー等分配則は，このときはじめてエネルギー量子仮説という代替案を伴って，棄て去られるべきものであると気づかれたのである．つまり，古典論の限界は，このときにはじめて発見された．

ただし，その発見はアインシュタイン個人の範囲にとどまっていた．また，彼が認めたのはエネルギー量子仮説の意義であって，プランクの輻射の量子論そのものではなかった．アインシュタインは，彼の発見とその一般性を具体的に示す必要があった．それがなされたのは，1907 年の固体比熱の量子論においてだった．

アインシュタインは，エネルギー等分配則の破れを具体的に示しエネルギー量子仮説の意義を説明する必要があったが，プランクの輻射の量子論は彼独特の物質観が反映されたものであったため，エネルギー量子仮説の必要性を輻射の量子論を展開することによって説得することは難しいと考えた．プランクの輻射の量子論は電磁気学的であり，そこからは連続的な描像しか取り出すことができなかったのである．そのため彼は，電磁気学に関わる要素を敢えて排除して，エネルギー等分配則の破れとエネルギー量子仮説の必要性を主張した．それが固体比熱の量子論だった．固体比熱の量子論は，したがって，輻射の量子論の応用ではなかった．それはむしろ連続的な描像しか与えないプランクの輻射の量子論の問題を，先にエネルギー等分配則の破れとエネルギー量子仮説の必要性を示すことで，間接的に解決するために論じられたのである．固体比熱の量子論こそ，古典論の限界とエネルギー量子仮説の一般性を初めて世に問うた理論だった．

アインシュタインの固体比熱の量子論は，低温における固体比熱を研究していたネルン

ストの目に留まった．アインシュタインの固体比熱理論によってエネルギー等分配則の破れが古典論の限界だと認識したネルンストは，1910 年にアインシュタインの固体比熱論文を引用した．ネルンストは，即座にソルヴェイ会議を企画した．ネルンストによる第一回ソルヴェイ会議の草稿には，彼の認識が現れていた．彼は，「物質の運動論の包括的な再構築」が必要であると述べ，草稿段階から幅広い物性を例にエネルギー等分配則と量子論の是非を問うことを計画していた．会議の表題は「輻射と量子」となったが，ネルンストの計画はそのまま実現された．会議ではアインシュタインの固体比熱理論が総合講演に位置づけられた．アインシュタインはそこで，彼が古典論の限界を発見した過程を論じた．

かくして 1911 年の第一回ソルヴェイ会議によって，量子論が物理学全般の再構築のために必要であることが学界に理解されるに至った．したがって，古典論から量子論への転換は，通説で言われているのとは異なり，輻射理論ではなく固体比熱理論を中心にして起こったのである．アインシュタインが固体比熱理論を論じるまでは，古典論の限界と量子論の必要性は説得的に示されていなかった．量子論は輻射理論だけでは受け入れられず，固体比熱理論を通じて論じられることで，初めて受け入れられたのである．

文献表

一次文献（論文）

- Boltzmann, L., 1866, „Über die Mechanische Bedeutung des Zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie, “ *Wiener Berichte*, 53, pp. 195–220. （Boltzmann, L.，恒藤敏彦訳，1970,「熱理論の第 2 法則の力学的意味」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 6 統計力学』，東海大学出版会，pp. 1-26.）
- Boltzmann, L., 1868, „Studien über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft zwischen bewegten materiellen Punkten, “ *Wiener Berichte*, 58, pp. 517–560.
- Boltzmann L., 1872, „Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen,“ *Wiener Berichte*, 66, pp. 275–370.（Boltzmann, L.，恒藤敏彦訳，1970,「気体分子間の熱平衡についてのさらに進んだ研究」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 6 統計力学』，東海大学出版会，pp. 27-110.）
- Boltzmann, L., 1877a, „Bemerkungen über einige Probleme der mechanischen Wärmetheorie, “ *Wiener Berichte*, 75, pp. 112–148. （Boltzmann, L.，長浜惲訳，1971,「力学的熱理論の若干の問題についての注意」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 5 気体分子運動論』，東海大学出版会，pp. 159-196.）
- Boltzmann, L., 1877b, „Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht, “ *Wiener Berichte*, 76, pp. 473–435. （Boltzmann, L., 恒藤敏彦訳，1970,「熱理論の第 2 法則と熱平衡についての諸定理に関する確率論の計算とのあいだの関係について」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 6 統計力学』，東海大学出版会，pp. 111-168.）
- Boltzmann, L., 1884, „Ableitung des Stefanschen Gesetzes betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie, “ *Wiedemann Annalen*, 22, pp. 291–294. （Boltzmann, L.，前川太市訳，1970,「電磁的な光の理論から熱輻射の温度依存性に関する Stefan の法則を導出すること」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』，東海大学出版会，pp. 33-38.）
- Clausius, R., *Poggendorff Annalen*, Jan. 1862; *Philosophical Magazine*, June, 1862.
- Einstein, A., 1905, „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lightes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt,“ *Ann. der Physik* 17, pp. 132-148.（Einstein, A.，高田誠二訳,

1969,「光の発生と変脱とに関するひとつの発見法的観点について」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 2 光量子論』，東海大学出版会，pp. 1-20.）

- Einstein, A., 1906, „M.Planck, Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung,“ *Annalen der Physik*, 30, no. 15, pp. 764-766.
- Einstein, A., 1906, „Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption,“ *Ann. der Physik* 20, pp. 199-206.（Einstein, A.，広重徹訳，1969,「光の発生と光の吸収の理論について」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 2 光量子論』, 東海大学出版会, pp. 21-29.）
- Einstein, A., 1907, *Collected Papers of Albert Einstein*, Vol. 5: The Swiss Years: Correspondence, 1902-1914, Einstein Papers Project eds., From M. Planck to A. Einstein, July 6, 1907, p. 50.
- Einstein, A.,1907, „Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Teorie der spezifischen Warme,“ *Ann. der Physik* 22, “ pp. 180-190.（Einstein, A.，高田誠二訳，1969,「輻射に関する Planck の理論と比熱の理論」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 2 光量子論』，東海大学出版会，pp. 31-43.）
- Einstein, A.,1909, „ Über die Entwichlung unserer Anschaungen über das Wesen und die Konstitition der Strahlung,“ *Physikalische Zeitschrift*, 10, pp. 817-825.（Einstein, A.，上川友好訳，1969,「輻射の本質と構造に関するわれわれの見解の発展について」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 2 光量子論』，東海大学出版会，pp. 73-90.）
- Jeans, J. H., “On the Partition of Energy between Matter and Aether,” *Philosophical Magazine*, 10, 1905, pp. 91-98.（Jeans, J. H.，江渕文昭訳，1970,「物質とエーテルのあいだのエネルギーの配分について」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』，東海大学出版会，pp. 125-136.）
- Kirchhoff, G. R., 1859, „Ueber den Zusammenhang zwischen Emission und Adsorption von Licht unt Wärme, “ *Monatsbericht der Akad. D. Wiss. Zu Berlin, Gesammelte Abhandlungen*, 1882, pp. 566–571. （Kirchhoff, G. R.，前川太市訳，1970,「光と熱の放出と吸収の関係について」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』，東海大学出版会，pp. 1-6.）
- Kirchhoff, G. R., 1860, „Ueber das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Adsorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht, “ *Poggendorf Annalen, 109, 257, Gesammelte Abhandlungen*, 1882, pp. 571–584. （Kirchhoff, G. R.，前川太市訳，1970,「熱および光に対する物体の放射能と吸収能の関係について」，物理学史研究刊行会編,『物

理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』，東海大学出版会，pp. 7-32.）

- Langevin et Broglie M. De, eds., 1912, *Les Rapports et Discussions de 1er Congres de Physique Solvay de 1911, La theorie de rayonnement et les quanta*.（小川和成訳・解説，『輻射の理論と量子：第一回ソルベイ会議報告』物理科学の古典 8，東海大学出版会，1983 年）
- Lord Kelvin, 1900, "Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light," *Philosophical Magazine*, S. 6, Vol.2, No. 7, (July), p. 1. (Lecture delivered at the Royal Institution of Great Britain, on Friday, April 27, 1900.)
- Lord Rayleigh and William Ramsay, "Argon, A new Constituent of the Atmosphere, *Philosophical Transactions*," Vol. 186A, pp. 187-241.
- Lord Rayleigh, "Remarks upon the Law of Complete Radiation, 1900, " *Philosophical Magazine*, S. 5, Vol. 49, No. 301, (June), pp. 539-540. （Lord Rayleigh，辻哲夫訳，1970,「完全輻射の法則についての注意」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』，東海大学出版会，pp. 95-100.）
- Lord Rayleigh, 1900, "The Law of Partition of Energy," *Philosophical Magazine*, S 5, Vol. 49, No. 296, (January), pp. 98-118.
- Lord Rayleigh, 1905, "The Dynamical Theory of Gases and Radiation," *Nature* 72, 54.
- Lummer, O. und Pringsheim, E., 1900, „Über die Strahlung des schwarzen Körper fürlange Wellen," *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 2 (Februar), pp. 163-180.
- Maxwell, J. C., 1860, "Illustrations of the Dynamical Theory of Gases," *Philosophical Magazine*, pp. 378-409. （Maxwell, J. C.，佐藤興亜訳，1971,「気体の動力学的理論の例示」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 5 気体分子運動論』，東海大学出版会，pp. 1-36.）
- Maxwell, J. C., 1879, "On Boltzmann's Theorem on the average distribution of energy in a system of material points," *Cambridge Philosophical Society's Transaction*, Vol. XII, pp. 714-741. （Maxwell, J. C.，松村博之訳，1971,「質点系におけるエネルギーの平均ぶんぷに関する Boltzmann の理論について」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 5 気体分子運動論』，東海大学出版会，pp. 95-126.）
- Michelson, W. A., 1887, "Theoretical essay on the distribution of energy in spectra of solids," *Philosophical Magazine*, Series5, pp. 425-435.
- Paschen, Friedrich, 1893, „Über die Emission erhitzer Gase, " *Annalen der Physik*, 51, 286, pp. 409-443.

- Petit, A.T. Petit and Dulong, P. L., 1819, “Sur quelques points importants de la théorie de la chaleur”, *Annales de Chimie et de Physique*, x, pp. 395-413.
- Planck, M., 1896, “Adsorption und Emission elektrischer Wellen durch Rasonanz,“ *Annalen der Physik*, 57, pp. 1-14.
- Planck, M., 1897, „Über elektrische Schwingungen, welche durch Reyonanz erregt und drch Strahlung gedämpft werden, “ Annalen der Physik, 60, pp. 577-599.
- Planck, M., 1899, „Über irreversible Strahlungsvorgäne,“ 5. Mitteilung, *Sitzb. Preuss. Akad. Wiss*., pp. 440-480.
- Planck, M., 1900a, „Ueber irreversible Strahlunsvorgang,“ *Annalen der Physik*,“ (4), **1**, pp.69 – 122. （Planck, M.，辻哲夫訳，1970a,「非可逆的な輻射現象について」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』，東海大学出版会，pp. 137-190.）
- Planck, M., 1900b, „Entropie und Temperatur Strahlender Wärme, *Annalen der Physik*,“ (4), **1**, pp. 237-245. （Planck, M.，辻哲夫訳，1970b,「輻射のエントロピーと温度」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』, 東海大学出版会, pp. 191-210.）
- Planck, M., 1900c, „Ueber eine Verbesserung der Wien’schen Spectralgleichung,“ *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, 2, pp. 202-204. （Planck, M.，辻哲夫訳，1970c,「Wien のスペクトル式の一つの改良について」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』，東海大学出版会，pp. 211-216.）
- Planck, M., 1900d, „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum,“ *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellshaft*, **2**, pp. 237-245. （Planck, M.，辻哲夫訳，1970d,「正常スペクトルにおけるエネルギー分布の法則の理論」, 物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』, 東海大学出版会, pp. 217-228.）
- Planck, M., 1901, „Ueber das Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum,“ *Annalen der Physik*, 4, **4**, pp. 553-563. （Planck, M.，辻哲夫訳，1970e,「正常スペクトル中のエネルギー分布の法則について」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』，東海大学出版会，pp. 229-242.）
- Rubens, H. und Nichols, E. F., „Über Wärmestrahlen von großer Wellenlänge, 1896, “ *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 11, pp. 545-549.
- Rubens, H. und Nichols, E. F., 1897, „Versuche mit Wärmestrahlen von grosser

Wellenlänge,“ *Annalen der Physik*, 60, 418, pp. 418-462.

- Stefan, Josef, 1879, „Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur,“ *Sitzungsberichte der Kaiselichen Akademie der Wissenschaften, Mathematische-Naturewissenschaftliche Klasse*, 79, pp. 391-428.
- Tait, P. G., 1886, “On the foundations of the kinetic theory of gases,” *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 33, pp. 65-95.
- Thomson, Joseph John, 1910, “On the Theory of Radiation,” *Philosophical Magazine*, 20, p. 238.
- Waterston, J.J. and Lord Rayleigh, 1892, On the Physics of Media that are Composed of Free and Perfectly Elastic Molecules in a State of Motion [Introduction to Waterston’s Memoir], *Philosophical Transactions*, Vol. 183A, pp. 1-5.
- Weber, H. F., 1875, „Die specifischen Wärmen der Elemente Kohlenstoff, Bor und Silicium,“ *Annalen der Physik*, Vol. 230, 4, pp. 553-582.
- Weber, H. F., 1887, „Die Entwicklung der Lightemission glühender fester Körper, “ *Annalen der Physik*, Vol. 268, Issue 10, pp. 256-270.
- Wien, Wilhelm, 1893, „Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptzatz der Wärmetheorie, “ *Sitzungsberichte der Berliner Akademic*, pp. 55-62.（Wien, Wilhelm，辻哲夫訳，1970,「黒体輻射と熱理論の第二主則との新しい関係」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』，東海大学出版会，pp. 39-48.）
- Wien, Wilhelm, 1894, „Temperatur und Entropie der Strahlung, “ *Wiedemann Annalen*, 52, pp. 132-165.（Wien, Wilhelm，辻哲夫訳，1970,「輻射の温度とエントロピー」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』，東海大学出版会，pp. 49-84.）
- Wien, Wilhelm und Lummer, Otto, 1895, „Methode zur Prüfung des Strahlungsgezes absolut schwaryer Körper, “ *Annalen der Physik*, 56, 292, pp. 451-456.
- Wien, Wilhelm, 1896, „Ueber die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körper, “ *Wiedemann Annalen*, 58, pp. 662-669.（Wien, Wilhelm，辻哲夫訳，1970,「黒体の放出スペクトルにおけるエネルギー分布について」，物理学史研究刊行会編,『物理学古典論文叢書 1 熱輻射と量子』，東海大学出版会，pp. 85-94.）

一次文献（著作）

- Gibbs, Josiah Willard, 1902, *Elementary principle in statistical mechanics*, Scribner’s sons.

- Planck, M. 1897, *Vorlesungen über die Thermodynamik*.“（プランク，M.，芝亀吉訳，1938,『プランク 熱力学』，岩波書店.）
- Planck, M. 1906, , *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*.“（プランク，マックス，西尾成子訳，1975,『物理科学の古典 プランク 熱輻射論』，東海大学出版会.）

二次文献（欧文論文）

- Abiko, Seiya, 2000, “Einstein’s Theories of the Fluctuation and the Thermal Radiation: The First Quntum Theory through Statistical Thermodynamics,” *Historia Scientiarum*, 10, pp. 130-147.
- Bergia, Silvio and Navarro, Luis, 1988, “Recurrences and Continuity in Einstein’s Research on Radiation between 1905 and 1916,” *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 38 (March), pp. 79-99.
- Bergia,Silvio and Navarro, Luis, 1997, “Early Quantum Concepts and The Theorem of Equipartition of Energy in Einstein’s Work (1905-1925),” *Physis-Firenze*, pp. 183-223.
- Brush, Stephen G., 1968, “A History of Random Processes: I. Brownian Movement from Brown to Perrin,” *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 5 (January), pp. 1-36.
- Brush, Stephen G., 1973, “The Development of the Kinetic Theory of Gases,” *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 11 (March), pp. 38-96.
- Brush, Stephen G., 1974, “The Development of the Kinetic Theory of Gases”, *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 12 (March), pp. 1-88.
- Brush, Stephen G., 2007, “How Ideas Became Knowledge: The light-quantum hypothesis 1905-1935,” *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, Vol. 37, No. 2, pp. 205-246.
- Cahan, David, 1985, “The Instrumental Revolution in German Physics, 1865-1914,” *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 15, pp. 1-65.
- Darrigol, Oliver, 2009, “A simplified genesis of quantum mechanics,” *Studies of History and Philosophy of Modern Physics*, 40, pp151-166.
- Fox, R., 1968, “The Background of the Discovery of Dulong & Petit’s Law,” *The British Journal for the History of Science*, Vol. 4, pp. 1-22.
- Gavroglu, Kostas and Goudaroulis, George, 1985, “From the History of Low Temperature Physics: Prejudicial Attitude that Hindered the Initial Development of Superconductive Theory,”

Archive for History of Exact Sciences, Vol. 32 (September), pp. 377-383.

- Goto, Kunio, 2000, "Discovery of Energy Quanta and Development of Early Quantum Theory," *Historia Scientiarum*, Vol. 10-2.
- Kangro, Hans, 1970, "Ultrarotstrahlung bis zur Grenze elektrische erzeugter Wellen, das Lebenswerk von Heinrich Rubens, " *Annals of Science*, vol. 26, pp. 235-259.
- King, M. Christine and Laidler, Keith J., 1984, "Chemical Kinetics and The Radiation Hypothesis," *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 30 (March), pp. 45-86.
- Klein, M J., 1962, "Max 'Planck and the Beginning of the Quantum theory'", *Archive for History of Exact Sciences*, vol.1, pp. 459-479.
- Klein, M. J., 1965, "Einstein, Specific Heats, and the Early Quantum Theory," *Science*, 148, pp. 173-180.
- Kragh, Helge and Carazza, Bruno, 2000, "Classical Behavior of Macroscopic Bodies from Quantum Principles: Early Discussions," *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 55 (August), pp. 43-56.
- Laidle,r Keith J., 1985, "Chemical Kinetics and The Origins of Physical Chemistry," *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 32 (March), pp. 43-75.
- Mehra, Jagdish and Rechenberg, Helmut, 1999, "Planck's Half-Quanta: A History of the Concept of Zero-Point Energy," *Foundations of Physics*, Vol. 29, No.1, pp. 29-91.
- Navarro, Luis, 1998, "Gibbs, Einstein and the Foundations of Statistical Mechanics," *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 53 (June), pp. 147-180.
- Nishio, Shigeko, 1973, "The Formation of the Sommerfeld Quantum Theory", Japanese Studies in the History of Science, 12, pp. 39-78.
- Norton, John D., 1993, "The Determination of Theory by Evidence: The Case for Quantum Discontinuity, 1900-1915," *Synthese* Vol. 97, pp. 1-31.
- Nye, Mary Jo, 2012, "Thomas Kuhn, Case Histories, and Revolutions," *Historical Studies in the Natural Sciences*, Vol. 42, No. 5 (November), pp. 557-561.
- Secord, Jim, 1993, 'Introduction', part, A Special Issue—Big Picture, *British Journal for the History of Science*, 26 , p. 378.
- Seth, Suman, 2004, "Quantum theory and the electromagnetic world-view," *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, Vol. 35, No. 1 (September), pp. 67-93.
- Seth, Suman, 2007, "Crisis and the Constructions of Modern Theoretical Physics," *The British*

Journal for the History of Science, Vol. 40, No. 1 (March), pp. 25-51.

二次文献（和文論文）

- 安孫子誠也，2013,「プランク共鳴子は原子・分子による光吸収・放出機能のモデル化である」『科学史研究』265，pp. 5-9.
- 稲葉肇，2010,「オストヴァルトのエネルゲティーク：熱力学の物理化学への導入との関係において」,『科学哲学科学史研究』，Vol. 4，pp. 85-103.
- 稲葉肇，2016,「1870 年代から 1920 年代における化学と気体運動論・統計力学」,『化学史研究』，Vol. 43，pp. 62-71.
- 田中浩明，1990,「帝国技術研究所創立期におけるドイツ物理学の制度的問題」,『科学史・科学哲学』，Vol. 9.
- 辻哲夫，1970,「量子論の発展における Einstein の役割」,『日本物理学会誌』，第 25 号，第 2 号，pp. 122-128.
- 西尾成子・高田誠二，2001,「Kelvin 卿の暗雲：その第二は等分配か熱輻射か」,『物理学史ノート』，第 7 号，物理学史通信刊行会，pp. 4-8.
- 広重徹，1959,「古典電磁気学における場と電荷」,『物理学史研究』，Vol.1, No.3, pp. 217-229.
- 山口まり，2014,「ブラッグの泡モデル実験：転移研究における役割」,『哲学・科学史論叢』，Vol. 16，pp. 27-56.

二次文献（欧文著作）

- Aichelburg, Peter C., and Roman U. Sexl Roman U eds., 1979, *Albert Einstein: His Influence on Physics, Philosophy and Politics*, Springer.
- Arbib, Michael A. and Hesse, Mary B.,1986, *The Construction of Reality*, Cambridge University Press,.
- Baird,D., eds., 1998, *Heinrich Hertz and the Berlin School of Physics, Heinrich Hertz: Classical Physicist, Modern Philosppher*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- Barkan, Diana Kormos, 1999, *Walther Nernst and The Transition to Modern Physical Science*, Cambridge Univ. Press.

  Bernal, J. D., 1954, *Science in History*.（鎮目恭夫訳,『歴史における科学』，1966 年）
- Brock, William H., 1992, *The Fontana History of Chemistry*, Roy Porter ed. Fontana History of

Science, Fontana Press.（ブロック，W.H.，著，大野誠・梅田淳・菊池好行訳，2003 年（Ⅰ）・2006 年（Ⅱ），『科学史ライブラリー 化学の歴史Ⅰ・Ⅱ』，朝倉書店.）

- Brush, Stephen G., 1976, *The Kind of Motion We Call Heat: A history of the Kinetic Theory of Gases in the 19th Century Book 1 &2*, E.W. Montroll and j. L. Lebowitz ed., Studies in Statistical Mechanics Vol. VI, North-Holland Publishing Company.
- Buchwald, Jed Z., ed., 1995, *Scientific Practice, Theories and Stories of Doing Physics*, The University of Chicago Press.
- Darrigol, Oliver, 1992, *From c-Numbers to q-Numbers: The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*, University of California Press.
- Feyerabend Paul, 1975, Against Method: Outline of an anarchistic theory of knowledge, NLB.（ファイヤアーベント，P. K.，著，村上陽一郎・渡辺博共役，1981，『方法への挑戦 科学的創造と知のアナーキズム』，新曜社.）
- Galison, Peter, 1987, *How Experiments End*, The University of Chicago Press.
- Galison, Peter, 1997, *Image & Logic*, The University of Chicago Press.
- Garber, Elizabeth, Brush, Stephen G., and Everett C. W. F. eds., 1986, *Maxwell on Molecules and Gases*, The MIT Press.
- Gavroglu, Kostas and Simões, Ana, 2012, *Neither Physics nor Chemistry: A History of Quantum Chemistry*, The MIT Press.
- Gooding, David, Pinch, Trevor, Schaffer, Simon, eds., 1989, *The Uses of Experiment, Studies in the Natural Sciences*, Cambridge University Press.
- Hacking, Ian, 1983, *Representing and Intervening, Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge University Press.
- Hacking, Ian, 2000, *The Social Construction of What?*, Harvard University Press.

Herman, P. M., 1982, *Energy, Force, and Matter, The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*, Cambridge Univ. Press.（ハーマン，P. M.，杉山滋郎訳，1991，『物理学の誕生―エネルギー・力・物質の概念の発達史―』，朝倉書店）

- Hoffmann, Banesh, Dukas, Helen, 1973, *Albert Einstein Creator and Rebel*, New American Livrary.
- Holmes, Frederic L. and Levere, Trevor H., eds., 2000, *Instruments and Experimentation in the History of Chemistry*, The MIT Press.
- Hund, Friedrich, 1978, *Geschichte der physikalischen Begriffe, Teil 2: Die Wege zum heutigen*

Naturbild, Bibliographisches Institute AG.（フント，フリードリッヒ，井上健・山崎和夫訳，1986,『思想としての物理学の歩み』，吉岡書店）

- Jammer, Max, 1966, *The conceptual development of quantum mechanics*, McGraw-Hill.（ヤンマー，マックス，小出昭一郎訳，1974,『量子力学史 1』，東京図書.）
- Johnson, Jeffrey Allan, 1990, *The Kaiser's Chemists: Science and Modernization in Imperial Germany*, The University of North Carolina Press.
- Kargon, Robert and Achinstein, Peter, eds., 1987, *Kelvin's Baltimore Lectures and Modern Theoretical Physics, Historical and Philosophical Perspectives*, The MIT Press.
- Kragh, Helge, 1999, *Quantum Generarions: a history of physics in the twentieth century*, Princeton Univ. Press.（カーオ，ヘリガ，岡本拓司監訳，有賀暢迪・稲葉肇他訳，2015,『20 世紀物理学史（上）』，名古屋大学出版会.）
- Kuhn, Thomas S., 1962, *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press (Second Edition 1970).（クーン，トーマス，中山茂訳，1971,『科学革命の構造』，みすず書房.）
- Kuhn, Thomas S., 1977, "*The Essential Tension; Selected Studies in Scientific Tradition and Change,"* The University of Chicago Press.（クーン，トーマス，安孫子誠也・佐野正博訳，1998,『科学革命における本質的緊張 トーマス・クーン論文集』，みすず書房.）
- Kuhn, Thomas S., 1987, *Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912*, with a new afterward, University of Chicago Press.
- Lakatos, I. & Musgrave, A., eds., 1970, *Criticism and the Growth of Knowledge*, Cambridge University Press. （ラカトシュ，I.・マスグレーヴ，A. 編，森博監訳，1990,『批判と知識の成長』，木鐸社.）
- Lakatos, Imre, Worrall, John, and Curie, Gregory, ed., 1978, *The Methodology of Scientific Research Programmes, Philosophical Papers Volume 1* ,Cambridge University Press.（ラカトシュ，イムレ，村上陽一郎訳，1986,『方法の擁護—科学的研究プログラムの方法論』，新曜社.）
- Leidler, Keith J., 1993, *The World of Phisical Chemistry*, Oxford Univ. Press.
- Losee, John, 1972, *A Historical Introduction to the Philosophy of Science*, Oxford University Press.
- Losee, John, 2004, *Theories of Scientific Progress, An Introduction*, Routledge.
- J.C. Maxwell, W. P. Niven, ed., 2011, *The Scientific Papers of J. C. Maxwell*, Vol. 2,

Cambridge University Press.

- Mehra, Jagdish, 1975, *The Solvay Conferences on Physics, Aspects of the Development of Physics since 1911*, D. Reidel Publishing Co.
- Mehra, Jagdish, 2001, *The Golden Age of Theoretical Physics*, Vol. 1, World Scientific.
- Merha, Jagdish and Rechenberg, Helmut, 1982, *The Historical Development of Quantum Theory, Vol. 1, Part 1, The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundation and the Rise of Its Difficulties 1900-1925*, Springer-Verlag.
- Nye, Mary Jo, 1984, *The Question of the atom, From the Karlsruhe Congress to the First Solvay Conference, 1860-1911*, Tomash Publishers.
- Nye, Mary Jo, 1993, *From Chemical Philosophy to Theoretical Chemistry, Dynamics of Matter and Dynamics of Disciplines, 1800-1950*, Univ. of California Press.
- Nye, Mary Jo, ed., 2003, The Modern Physical and Mathematical Sciences, The Cambridge History of Science, Vol. 5, Cambridge University Press.
- Pais, Abraham, 1982, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford Univ. Press.（パイス，アブラハム，西島和彦監訳，1987,『神は老獪にして…アインシュタインの人と学問』，産業図書.）
- Pauling, Linus, 1985, *Introduction to Quantum Mechanics: With Cations to Chemistry*, Dover Publications.
- Popper, Karl, 1959, *The Logic of Scientific Discovery*, Routledge (Original 1934 in German).（ポパー，カール・ライムント，大内義一・森博訳，1971,『科学的発見の論理（上）・（下）』，恒星社厚生閣.）
- Reichenbach, Hans, 1951, *The Rise of Dcientific Philosophy*, University of California Press.
- Schonland, Basil, 1968, *The Atomists (1805-1933)*, Oxford University Press.（スコーンランド，広重徹・常石敬一訳，1971,『みすず科学ライブラリー23 原子の歴史 ドルトンから量子力学まで』，みすず書房.）
- Seelig, Carl, 1954, *Albert Einstein. Eine dokumentarische Biographe*, Verlag.（C. ゼーリッヒ著，広重徹訳，1974,『アインシュタインの生涯』，東京図書株式会社.）
- Segre, Emilio, 1976, *Personaggi e Scoperte Nella Fisica Contemporanea*, Arnoldo Mondadori Rditore.（セグレ，エミリオ，久保亮五・矢崎裕二訳，1982,『X 線からクォークまで』，みすず書房.）
- Servos, John W., 1990, *Physical Chemistry from Ostwalt to Pauling, The Making of Science in*

America, Princeton Univ. Press.

二次文献（和文著作）

- 天野清著，高田誠二校正，1973,『量子力学史』，中央公論社（原著 1948 年）.
- 天野清訳・編，1943,『ウィーン，プランク論文集 熱輻射論と量子論の起源』，大日本出版株式会社.
- 有山兼孝・三宅静雄・茅誠司・武藤俊之助・小谷正雄・永宮健夫編，1957,『物性物理の基礎Ⅰ』（物性物理学講座 1），共立出版.
- 金森修監訳，カンギレム，ジョルジュ著，1991,『科学史・科学哲学研究』（叢書ウニベルシタス 340），法政大学出版会.
- 小長谷大介，2012,『熱輻射実験と量子概念の誕生』，北海道大学出版会.
- 高林武彦，1999,『熱学史 ＜第 2 版＞』，海鳴社.
- 高林武彦，1977,『量子論の発展史』，中央公論社.
- 武谷三男，1948,『量子力学の形成と論理 1 原子模型の形成』，銀座出版社.
- 田崎晴明，2008,『新物理学シリーズ 37 統計力学Ⅰ』，培風館.
- 辻哲夫監修，1966,『現代物理学の形成』，東海大学出版会.
- 朝永振一郎，1969,『量子力学Ⅰ（第二版）』，みすず書房（初版 1951）.
- 朝永振一郎編，1953,『物理の歴史』，毎日ライブラリー.
- 中山茂編・著，1984,『パラダイム再考』，ミネルヴァ書房.
- 中島秀人，2006,『フォーラム共通知をひらく　日本の科学／技術はどこへいくのか』，岩波書店.
- 西尾成子編，1977,『アインシュタイン研究』，中央公論社.
- 西尾成子編，1980,『広重徹科学史論文集 1 相対論の形成』，みすず書房.
- 西尾成子編，1981,『広重徹科学史論文集 2 原子構造論史』，みすず書房.
- 西尾成子，2011,『科学ジャーナリズムの先駆者――評伝石原純』，岩波書店.
- 広重徹，1968,『物理学史Ⅰ・Ⅱ』，培風館.
- 古川安，2000,『科学の社会史 ルネサンスから 20 世紀まで [増訂版] 』，南窓社（初版 1989 年）.
- 宮下晋吉，2008,『模倣から「科学大国」へ　19 世紀ドイツにおける科学と技術の社会史』，世界思想社.
- 山本義隆，2009,『熱学思想の史的展開 熱とエントロピー 1・2・3』，筑摩書房.

- 横山輝雄・井山弘幸・橋本毅彦編著，1989,『科学見直し叢書 3 科学における論争・発見 科学革命の諸相』，木鐸社.
- バナール，J. D.，鎮目恭夫訳，1966,『歴史における科学』，みすず書房.
- プランク，M，田中加夫・浜田貞時・河井徳治他訳，1971,『現代物理学の思想（上）・（下）』，法律文化社.
- メンデルスゾーン，K.，大島恵一訳，1971（原著 1966），『絶対零度への挑戦 低温の世界を求めた科学のドラマ』（ブルーバックス），講談社.
- メンデルスゾーン，K.，1976（原著 1973），藤井かよ・藤井昭彦訳,『ネルンストの世界—ドイツ科学の興亡—』，岩波書店.
- リグデン，J. S.，並木雅俊訳，2005,『アインシュタイン奇跡の年 1905』，シュプリンガー・フェアラーク東京.
- レッヘンベルク，ヘルムート,「20 世紀の物理学」編集委員会編，1999,『20 世紀の物理学 Vol. 1』，丸善株式会社.

学会発表（要旨等）

- 富田博之，2003,「ケルビンの「19 世紀物理学の二つの暗雲」をめぐる誤解」，KYOTO-U OPEN COURSEWARE Web site（2013 年 04 月 10 日掲載）. http://ocw.kyoto-u.ac.jp/ja/frp7an/introduntion-to-statistical-physics/html/kelvin.html.
- 西尾成子，1985,「Lord Kelvin の二つの雲と量子論」，日本物理学会第 40 回講演.
- 山根大次郎，1997,「Lord Kelvin の二つの雲」，日本物理学会第 52 回講演.

辞典類

- 『岩波　理化学辞典　第 5 版』，1998，岩波書店.
- 『科学大博物館 装置・器具の歴史辞典』，2005，朝倉書店.（*Instruments of Science—An Historical Encyclopedia*, The Science Museum, London and The National Museum of American History, Smithonian Institute, Garland Publishing, Inc., 1998.）
- 『【縮刷版】科学史技術史辞典』，1994，弘文堂.

雑誌類

- 『科学』，座談会「物性論の進歩とその社会的背景」（小谷正雄・久保亮五・戸田盛和・永宮健夫・伏見康治・富山小太郎），Vol. 23，No. 10，1953.