



量子論の歴史

—アインシュタインによる光量子の実体化について—

森 川 亮

概要 量子なる概念は、プランクの放射公式によって議論に俎上した。しかし、それは未だ単なる関数的関係にすぎず、リアルで現実的な物理的実体ではなかった。プランクの量子は現実存在ではないのである。これに対してアインシュタインは、光量子仮説を導入することで、量子をリアルでビビッドな存在とし、量子は実体となった。これは、量子を粒子として実体化することでもあった。

われわれは、本論において、このアインシュタインのアイデアと実体化の過程を詳細に追跡し、幾ばくかの哲学的側面についての考察も行う。また、考察の過程で波動一粒子の二重性の根源についての議論も行うこととなる。

キーワード 光量子, 光電効果, プランクの放射公式, アインシュタイン, 量子の実体化
原稿受理日 2015年5月11日

Abstract The concept of quantum came up in the discussions by the Planck's formula for radiation. However, it was a merely a functional relation, but not physical substance that is the reality. Planck's quantum does not have a real existence at all. In contrast with this, Einstein proposed the hypothesis of the light quanta as a real and with a vivid existence. Thus the quantum becomes a physical substance. This is also a substantiation of quantum as particles.

We will see the process of this substantiation and the developments of the Einstein's idea in this article in details and have a few philosophical discussions about this process. We will see and also argue about the roots of the wave-particle duality.

Key words Light-quanta, photoelectric effect, Planck's formula for radiation, Einstein, Substantiation of quantum

1. 光の本性と光電効果

光が何物であるのか、ということが科学上の論争として俎上したのはニュートンの時代、つまり17世紀にまで遡る。ニュートンは粒子説を、これに対してホイヘンス⁽¹⁾やフック⁽²⁾といった当時の大物が波動説を唱えて大論争となったのであった⁽³⁾。

しかし、この論争は、19世紀になり、マクスウェルの電磁気学によってあっさりと決着がついたかに思われていた。マクスウェル方程式からの帰結として電磁波が予言され、これが光速と同じ速度を有するということが明らかになるに至って光が波動であることが確実視されてきた。数々の状況証拠—光の回折、干渉、屈折、分散などもことごとく光の波動説を支持するものであった。かくて、光の波動説は揺るぎないものと目されるようになったのである。

(1) クリスティアーン・ホイヘンス (Christiaan Huygens, 1629~1695) はオランダの自然哲学者。数学、物理学、天文学に主な業績を残す。自作の反射望遠鏡を用い、土星の衛星タイタンの発見、オリオン大星雲の発見、などを発見した。1690年、「光についての論考」を公刊し、光の波動説を唱えた。

(2) ロバート・フック (Robert Hooke, 1635~1703) はイギリスの自然哲学者、博物学者。数多ある業績の中で最も有名なものは光学顕微鏡で見た世界を描いた「ミクログラフィア」であろう。晩年は数々の論争に明け暮れた。また、ニュートンの好敵手としても知られていたが、ニュートンによって名前が消された業績も多い。詳細は、以下の二冊に詳しい。

中島秀人、「ロバート・フック ニュートンに消された男」, 朝日新聞社 (1996)

中島秀人、「ロバート・フック」, 朝倉書店 (1997)

(3) 光の波動説を唱えた科学者はもちろん他にも数多いが、ここではニュートンの同時代人に限ってこの兩名を挙げておくことにする。しかしながら波動論の大物として一人だけ、ヤング (トーマス・ヤング, Thomas Young, イギリスの物理学者, 1773~1829) の名前は挙げておくべきであろう。

なお、カッシーラーの認識論に即して述べれば、そもそも、「何物であるか?」という問い自体がその実体的本性の存在を前提とした問いである。あるいはそうした実体を探し求めんとする傾向性を有する問いである。そうした問いの設定は、確かに対象の知見を増加させる原動力となるが、実体的把握は認識を硬化させてしまう働きをも同時に有している。実体は固定化してそれを真なるものと考えてしまえば (そのような傾向が多々あるのであるが……), 認識に対して魔術的硬化性を発揮して、かかる実体を真の存在物としてゆく傾向 (誤謬を犯す傾向) を有するのである。かかる事情は、偶像崇拝を禁止する根源的かつ哲学的解釈を提供している。旧約聖書、出エジプト記20:4「モーセの十戒」には以下のようにある。—あなたは自分のために刻んだ像を造ってはいけぬ。天にあるもの、地にあるもの、水のなかにあるもの、どんな形 (あるもの) も造ってはいけぬ。それにひれ伏してはいけぬ。それに仕えてはいけぬ。

すなわち、ひとたび実体が借定されると、いかにそれが仮想 (あるいは仮象、またあるいは仮構) であってもかかる実体はあたかも現実であるかのように一人歩きを始め、われわれを真の世界認識から遠ざけてしまう傾向がある、ということである。これと同じように、キリスト教やイスラム教において偶像崇拝を禁止しているのは、かかる偶像が神の仮象であることを離れ、あたかも神であるかのごとく一人歩きしてしまいかねないからである。—以上はカッシーラーの著作全般、特に、「シンボル形式の哲学1~4 (岩波文庫)」、「実体概念と関数概念 (みすず書房)」、「認識問題1~4 (みすず書房)」等を参照のこと。

こうした考え方が後に俎上する量子論の解釈論争と疎通していることは言うまでもない。詳細は本論以降の該当箇所詳述することとなる。

光の波動説を決定的にしたとされるのが、1886年から断続的に行われたヘルツ⁽⁴⁾の実験であった。ヘルツは、マクスウェルの理論的な予言通りに光が電磁波であることを実証した。しかしながら、この一連の実験においてそれを否定する事実、つまり、光の粒子性によってしか説明し得ない事実が観測されていたことは、いかにも象徴的である。

1887年、ヘルツは、論文「電磁放電に対する紫外線の作用について」⁽⁵⁾で、二次回路に誘導されるスパークの長さが、一次回路に生じるスパーク光からスパークギャップをシールドすると（二次回路のスパークギャップをシールドすると）劇的に減少することを見出し、「紫外線は、誘導コイルの放電およびそれと関連する放電のギャップを増加させる力を有している」と述べている⁽⁶⁾。これが、光電効果を記述した最初のものである。ヘルツ以外にも同じ現象に関する研究報告がいくつかなされているが、彼らはその現象（光電効果）の直接的な原因について気が付いてはいなかった⁽⁷⁾。ヘルツの死後、この研究をうけてヘルツの弟子レーナルト⁽⁸⁾は、この現象の正体が、光電的に発生した陰極線であることを確

(4) ハイน์リッヒ・ルドルフ・ヘルツ (Heinrich Rudolf Hertz, 1857~1894) はドイツの物理学者。電磁気についての研究が有名。最初、ミュンヘン大学で工学を学ぶが、後に自然科学に転向してベルリンでヘルムホルツに師事した。1880年、ベルリン大学物理学研究室助手。1883年、キール大学講師。1885年、カールスルーエ工科大学教授。1889年、ボン大学教授となる。マクスウェル理論の正しさを実証し、理論的な整備も行った。1925年にノーベル物理学賞を受賞したギュスタフ・ヘルツ (Gustav Ludwig Hertz, 1887~1975) は甥にあたる。

(5) H. Hertz, Über einen Einfluß des ultravioletten Lichtes ahf die elektrische Entladung, Wiedemannsche, Annalen der Physik 31, (1887), pp.982~1000.

(6) M. Jammer, The Conceptual Development of Quantum Mechanics, McGraw-Hill, 1966, 邦訳:「量子力学史1」, 東京図書 (1974), 原書 p.33, 邦訳版40頁より。

ヘルツは、一次回路にライデン瓶に溜めた電荷を流して放電させてスパークを生じさせ、これを離れた場所にある二次回路と共鳴させて二次回路にもスパークを生じさせることで電磁波の存在を実証した（この時、二次回路の背後には電磁波の反射などを調べるための金属板が設置してあった）。1887年のヘルツのこの報告は、二次回路のスパークギャップを一次回路に生じるスパーク光から隠してしまうと二次回路のスパークギャップの場所に生じる火花の発生時間が短くなる、ということである。

つまり、二次回路に生じていたスパークは一次回路で発生した電磁波に共鳴したものと、一次回路のスパークギャップで生じた光による光電効果で二次回路からたたき出された電子によるものの二種類があった、ということである。二次回路のスパークギャップを光からシールドしてしまうと効果が弱くなったのは光電効果の分がなくなってしまいうからである。

(7) 例えば、A. Schuster, Experiments on the discharge of electricity through gases, Proceedings of the Royal Society of London, (A) 42 (1889), pp.37~379. および、S. Arrhenius, Über das Leitungsvermögen der phosphorescirenden Luft, Wiedemannsche Annalen der Physik 32 (1887), pp.545~572, の二点を挙げておく。

(8) フィリップ・エドゥアルト・アントン・フォン・レーナルト (Philipp Eduard Anton von Lenard, 1862~1947) はハンガリーブレスブルグ生まれの物理学者。1905年、陰極線の研究でノーベル物理学賞を受賞。ブダペスト、ウィーン、ベルリン、ハイデルベルグなど各地で物理学を学び、ブンゼンやヘルムホルツなどに師事した。ボン大学でヘルツの助手として研究に従事した後、1898年、キール大学の教授になり、1907年にはハイデルベルグ大学の教授となる。ナチズムの台頭と共に狂信的な反ユダヤ主義の思想を抱き、「ドイツ物理学」(アーリア的物理学)を提唱し「ユダヤ物理学」を攻撃してアインシュタイン追撃の急先鋒となった。1945年、敗戦と共にハイデルベルグ大学名誉教授の職を追われ、1947年メッセルハウゼンで死去した。(ドイツの物理学、あるいはアーリア的物理学についての詳細は、次稿の Appendix 「ドイツ物理学—あるいはロマンティシズムとリアリズム」を参照のこと。)

認したのであった(1899年)⁽⁹⁾。結果としてヘルツは、現代の視点から俯瞰的に眺めてみると光の本性について極めて現代的な回答を残したと言えよう。すなわち、その電磁波としての波動性と光の今ひとつの側面である粒子性である。

レーナルトはその後も研究を継続し、光電効果を実験的に確かめ、

1. 飛び出る電子一つ一つのエネルギーを計ってみると、それは照らす放射線の強さに無関係であって、
2. 照らす放射線の強さを大きくすると、飛び出る電子の個数(詳しくいうと単位時間あたりの個数、すなわち頻度)が多くなるだけである。そして、
3. 飛び出る電子一つ一つのエネルギーは照らす放射線の色に関係する。すなわちその放射線の波長が短いほどエネルギーの大きな電子が飛び出してくる。

という三点を確認した⁽¹⁰⁾(1902)。この三点は、まぎれもなく光の粒子性をもってしか解決しようのないものであって、波動説ではまったく説明できない事実であった。

ここへ、この現象を説明する理論としてアインシュタインによる光量子の概念が持ち込まれるのである。

なお、ここでいきなり記した、光量子とは(以下の論考の先取りではあるが)、光の量子のことで、粒子としての光のことであることは言うまでもない。

ともあれ、かくして、17世紀から続き、マクスウェル、ヘルツに至って決着したかに思われた光の波動説-粒子説の論争(おそらくは科学史上最大の論争と言ってもいいような大論争)がアインシュタインによって再び新たな装いをもって復活せしめられたのである。高林は、光量子説について、「電子の発見(1897)につぐ第二の素粒子の発見といってよいものであり、ここにおいて量子はダイナミカルな意味を得て、単なる熱統計理論の枠を出て機能しはじめることになる」、と述べている⁽¹¹⁾。

では光量子についての具体論に入ろう。

(9) P. Lenard, Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht, Annalen der Physik, 307, 6, (1900), pp.359~375.

(10) P. Lenard, Ueber die lichtelektrische Wirkung, Annalen der Physik, 313, 5, (1902), pp.149~198—本文は主に、朝永振一郎、「量子力学1 [第2版]」、みすず書房(1952)、53頁より孫引き。(放射は放射の意であるが朝永の表記のままとした。)

(11) 高林武彦、「量子論の発展史」、中央公論社(1977)。ここでは、復刻版は、ちくま学芸文庫(2002)を用いており、当該頁は、32頁である(以後もすべて復刻版を用いていることを付記しておく)。

2. アインシュタインの光量子仮説

1905年は、現代物理学にとって「奇跡の年」であったと言われる^②。現代が科学の時代であることを鑑みれば、物理学にとっての奇跡に留まらず、おそらくは現代文明そのものにとって奇跡の一年と言えよう。この年、アインシュタインは3月に光量子論を、5月にはブラウン運動について、6月には相対性原理の論文を立て続けに著した。このいずれもが現代物理学の根幹となる論文であり、まさに天才の発露としか言いようがない（アインシュタインの天才性については、本論の Appendix を参照のこと）。

では、本論ともっとも関連の深い3月の論文を見てみよう。アインシュタインは、この論文で、前記したように量子を物理的で現実的な存在へと浮上させたのである。論文「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」で、アインシュタインは、放射密度が小さい場合（ということはヴィーンの放射式がよく成り立つ領域であり、言い替え

② 「奇跡の年」、ラテン語で *annus mirabilis* という言葉は、長らくニュートンが物理学と数学—微積分、色彩論、重力理論の基盤を構築し、十七世紀科学革命の礎となった1666年を指していた。しかし、近年、この言葉は、アインシュタインが1905年に為した仕事に対して用いられるようになってきた。本文中では、三つの論文しか挙げていないが、実際に、アインシュタインはこの年に以下の5つの論文を出版している。

- 1 : Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (邦訳：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) *Annalen der Physik*, Bd. 17 (1905) pp.132~148 (受理日は3月18日)。
- 2 : Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen, (邦訳：分子の大きさを求める新手法) チューリッヒ工科大学への学位論文。(翌年, *Annalen der Physik*, 19 (1906) pp.289~305に掲載。論文脱稿日は4月30日)
- 3 : Über die von molekularinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen (邦訳：熱の分子論から要求される静止液体中の懸濁粒子の運動について) *Annalen der Physik*, 17 (1905), pp.549~560 (受理日は5月11日)。
- 4 : Zur Elektrodynamik bewegter Körper (邦訳：運動物体の電気力学) *Annalen der Physik*, 4, Folge, Bd. 17 (1905), pp.891~921 (受理日は6月30日)。
- 5 : Ist die Tragheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? (邦訳：物体の慣性はそのエネルギーに依存するか?), *Annalen der Physik*, 4 Folge, Bd. 18 (1905) pp.639~641 (受理日は9月27日)。

このいずれもが、現代物理学の根幹とその後の方向性を決定づけるような論文である。邦訳は、「アインシュタイン選集1」、湯川他訳、共立出版(1971)、以下で挙げるちくま学芸文庫、および、東海大学出版会の物理学古典論文叢書、にある。

リチャード・ウェストホールによるニュートンの伝記、—*Never at Rest, A Biography of Issac Newton* (Cambridge University Press, 1980)、邦訳「アイザック・ニュートン I、II」田中、大谷訳、平凡社(1993)。当該箇所は、第I巻の第五章(153頁より)—によると、より正確には、「奇跡の年」ではなく、「驚異の数年間(1664~1666年)」*anni mirabiles* であるという。(ジョン・スタチュル編、「アインシュタイン論文選」、「奇跡の年」の5論文、青木訳、ちくま学芸文庫(2011)、136頁も参照のこと。なお、この文献に書かれているウェストホールの著書の頁数は原書の頁であり、誤解を招く。正確には、ここに記した通りの頁数と章立てである。)

れば粒子的側面が露わになってくる領域)の単色放射のエントロピーについて考察を行う。

まず体積 v を占める放射のすべての振動数に対する放射密度 $\varphi(v)$ が与えられていれば放射のエントロピーは、

$$S = v \int_0^{\infty} \varphi(u, v) du$$

で表される。黒体放射において u の満たすべきは、 $\delta \int_0^{\infty} u dv = 0$ (エネルギー保存) の時に $\delta \int_0^{\infty} \varphi(u, v) dv = 0$ (平衡状態でエントロピーが最大値となる条件) である。これより、未定係数 λ を用いて、

$$\int_0^{\infty} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} - \lambda \right) \delta u dv = 0$$

となる (ここで λ は v に無関係)。

体積 $v = 1$ のときの dT に対するエントロピーは、

$$dS = \int_{v=0}^{v=\infty} \frac{\partial \varphi}{\partial u} du dv$$

の増加となる。あるいは、 $\partial \varphi / \partial u$ が v に無関係なので $dS = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial u} \right) dE$ (dE は可逆的に加えられた熱量に等しい) である。よって、 $dS = dE/T$ であり、 $\partial \varphi / \partial u = 1/T$ であることが分かる。そして、ヴィーンの公式より、

$$\frac{\partial \varphi}{\partial u} = \frac{1}{T} = -\frac{1}{\beta v} \log \frac{u}{\alpha v^3}$$

が得られ、

$$\varphi(u, v) = -\frac{u}{\beta v} \left\{ \log \frac{u}{\alpha v^3} - 1 \right\}$$

となる。したがって、振動数が v から $v+dv$ の間にあり、エネルギー $E_v = v u_v dv$ でのエントロピーは、

$$S = v\varphi(u, v) = -\frac{E_v}{\beta v} \left\{ \log \frac{E_v}{v\alpha v^3 dv} - 1 \right\}$$

となる。体積が v_0 から v を占めるようになったとすると、エントロピー変化は、

$$S - S_0 = \frac{E_v}{\beta v} \log \frac{v}{v_0}$$

書き改めると、

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \log \left[\left(\frac{v}{v_0} \right)^{\frac{NE_v}{R\beta v}} \right]$$

でもある。ここでアインシュタインは、ボルツマンの原理を表す式

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \log W$$

と比較して、「密度の小さい（ヴィーンの放射公式があてはまる範囲内の）単色放射は、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 $R\beta v/N$ のエネルギー量子から成り立っているかのようにふるまう。」という結論に至る（ここで N はモル分子数）。係数が煩わしいが、ヴィーンの指数 β は h/k であり、 $R/N = k$ なので、アインシュタインは、「放射のエネルギーは、ととびとびの塊である $h\nu$ からできている」と述べたということである。

以上の理論を提示した後で、アインシュタインは、レーナルトの報告（1902）に触れ、電子が金属の表面から外部へ外出するエネルギーを

$$\frac{R}{N}\beta v - P \quad (= h\nu - P)$$

と論じている（ P は外出するのに電子が要するエネルギーで金属によって異なる定数である）。すなわち、金属中の電子に対して $\frac{R}{N}\beta v = h\nu$ のエネルギーが与えられ、電子が金属中の拘束を離れて動き出し、そのエネルギーが $\frac{R}{N}\beta v - P > 0$ であれば電子は金属の外へと飛び出すのである。

以上が、アインシュタインの光量子仮説の骨子である。こうしてエネルギー量子は、まさしく空間的に粒子化されたのである。言い替えば、現実的な存在物として立ち現れることとなったのだ。特に、光電効果の説明は、完全にメカニカル（つまり、力学的という意味で Mechanical—前記した高林の言葉ではダイナミカル=Dynamical と言うべきところであろう）なものであり、 $h\nu$ なるエネルギーを持つ現実的な粒子が金属内に飛び込んでゆくという非常にリアルなイメージである。あるいは ν で振動する波が空間内を飛んでいるイメージである。一方、プランクの ν はあくまでも振動子が振動している振動数でしかない。現実の時空間との直接的な関連性は希薄である。

しかし、これが実験的に確かめられ、光量子が現実性を帯びてくるのは1916年のミリカン^⑬の実験まで待たなければならなかった。ミリカンは、飛び出す光電子の運動エネルギーと吸収される光の振動数との直接的な比例関係を明白にしたのである。これによってアインシュタインの光量子は一応の実験的根拠を得ることになるのであった。

発表当初、アインシュタインの光量子仮説はプランクの量子仮説の時よりも強い反対に遭遇した。その期間は、短く見積もっても上記したミリカンの実験が公表される1916年までは非常に強いものであった^⑭。量子が導入された当時は、導入したプランクでさえもが自身が導いた公式を古典電磁気学の範疇に組み込むことが可能だと思っており、実際にそうした試みは色々と為されていたのであった。そうした状況の中へアインシュタインによって、 $\varepsilon=h\nu$ なるエネルギーが実際に（プランクが行ったような計算上の便宜などではなく）粒子化され、言わば実体化されて出現したのである。アインシュタインの方向性は完全に古典物理学が破綻してしまう方向を、そしてそれはつまり、新しい理論の可能性の方向を向いていたのであり、まだ人々はその必要性までは感じていなかったのである。プランクの言葉を用いると一般的には、アインシュタイン流の現実的な粒子化とそれに伴う

⑬ ロバート・アンドリウス・ミリカン（Robert Andrews Millikan, 1868～1953）はアメリカの物理学者。電気素量の計測、光電効果の確認など重要な実験結果を次々と提示した。1923年、ノーベル物理学賞を受賞。シカゴ大学教授。後年はカリフォルニア工科大学の設立に尽力し、同校を世界的な大学・研究機関にする礎を築いた。なお、ミリカンは、アメリカの国民的人気を得た物理学者である。日本で言うならば寺田寅彦といったところであろうか……。

⑭ 1913年にアインシュタインをプロシア科学アカデミーの会員として推挙する請願書に当時の指導的物理学者であるプランク、ネルンスト、ルーベンス、ワールブルグ（Emil Gabriel Warburg, 1846～1931）、の四人が次のように記していることは象徴的である。曰く、「現代物理学の諸問題のなかで、アインシュタインが重要な寄与をなしていないものはまず一つもないと言っても過言ではありません。光量子仮説のように、彼であっても時には推論的的をはずしたこともあります。これをもって彼を必要以上に非難することは適当ではありません。……云々……」。すなわち、まだ、この1913年の段階であっても光量子は否定的に捉えられていたのである。—C. Seeling, Albert Einstein—Eine Dokumentarische Biographie, (1954独語版, 1956英訳版), 日本語訳; 「アインシュタインの生涯」, 広重徹 訳, 東京図書 (1974), 153頁より。

電磁気学の制限（あるいは書き換え）は、「未だ不必要なステップ」と考えられていたのであった。

とりわけ、ルンマーとゲールケの干渉計による実験（1903）⁽⁵⁾では、干渉可能な光波が200万個以上も連続することになってしまい、この事実の一つの光量子の進行方向の空間的な広がりか1メートル以上にもなることを示していた。また、望遠鏡の対物レンズの両端を通過した光が干渉できるという事実はさらに不可思議であった。もし光量子がそんなに大きければ、そもそもその全部が目の網膜に入らないからである。光量子仮説によれば、光量子が一つ丸ごと眼に飛び込まねばならず、光が見えるということは、網膜内の物質に飛び込んだ光量子からエネルギーが伝達される必要がある。ところが、もし本当に光量子がこれほどの大きさであれば眼に入るはずなどない。こうした困難も光量子仮説には不利に働いていた。なお、これは、量子論に最初に現れたモデル化に付きまとう最初の混乱であった⁽⁶⁾。

もちろん、これ以外にも光量子論が疑問視される理由はいくつかあった。例えば、光量子論は光の波動説で説明できる回折や屈折といった光の特性については説明しきれていなかった。これらについては、ただただ「統計的に解釈すべきであろう」というだけで具体的になんらの処方箋が示されなかったのである。これもまた、光量子を疑問視する論拠であった。

しかしながら、こうして実体化された、少なくとも「実体的な現実の存在」として俎上せしめられた量子は、これ以降、徐々に現実化してゆくこととなり、様々な意匠をほどこされて概念化されてゆくことになる。

ところで、概念化とはすなわち言語化の過程でもある（もちろん、この言語化には数学的意匠も入っている）。しかしながら、人間は、既に存在する現実世界をあたかも模写す

(5) O. Lummer, E. Gehrcke, Über die Anwendung der Interferenzen an planparallelen Platten zur Analysefeinster Spektrallinien, Annalen der Physik, 315, 3 (1903), pp.457~477.

オットー・ルンマー (Otto Richard Lummer, 1860~1925) はドイツの物理学者。主に光学と熱放射の研究を行った。現ポーランドのブレスラウ大学教授。

エルンスト・ゲールケ (Ernst. J. L. Gehrcke, 1878~1960) はドイツの物理学者。フリードリヒ・ヴィルヘルム大学で学び、1901年よりシャルロテンブルグの国立物理学・工学研究所で研究を行う。ベルリン大学教授を務めた。

ルンマーとゲールケは、共同開発したルンマー=ゲールケの干渉計についての業績が有名。ゲールケは、後年、いわゆるドイツの物理学（アーリア的物理学）に傾倒してゆき、プランクの放射公式を「(ルンマーとプリングスハイムの実験によって基礎付けられた曲線にたいして) 単なる数学的付録をものしたに過ぎない」(天野清, 「天野清 選集 2」, 日本科学社 (1947), 46頁) とこき下ろすことまで行った。(次稿の Appendix, ドイツ物理学—あるいはロマンティシズムとリアリズム, でさらに詳述する。)

(6) 天野清, 「量子力学史 (復刻版)」, 中央公論社 (1973), 58頁。

るように言語化しているのではない。そうではなく、言語化、あるいは概念化することでそのような現実を、あるいはそのように現実を認識可能な現実としてあらしめるのである。かかる事態は、ハンソンならば「理論負荷性⁽¹⁷⁾」と、スペンサー＝ブラウンならば「指し示し⁽¹⁸⁾」とそれぞれ名付けたであろうものだが、ここでは、ソシュール言語学からの援用がより包括的で適切であろう。つまり、「思想は、それだけ取ってみると、星雲のようなものであって、そのなかでは必然的に区切られているものは一つもない。予定観念などというものはなく、言語が現れないうちは、なに一つ分明なものはない⁽¹⁹⁾」のだ、ということである。

アインシュタインによる光量子の提示は、混沌とした星雲のような対象世界をまさしく区切ることとなったのである。区切られた世界は、徐々に成長し、自ずとさらなる概念的高度化が為されたことは言うまでもなくわれわれの知るところである。

3. プランクの公式と光量子論

一方でアインシュタインの論理展開と推論は極めて強力である。以下、二つの項目に分けてアインシュタインの論理展開をサマライズしてみよう。

(1) プランクの公式に現れる二重性

本研究の第一稿の第9節⁽²⁰⁾で述べたプランクの公式に現れる波動と粒子の二重性を再度、アインシュタインの議論に沿って眺めてみる。

1909年、アインシュタインは、「輻射の問題の現情について」という論文の中で、プランクの公式のゆらぎの二乗平均を取ってみせる⁽²¹⁾。すなわち、

(17) N. R. ハンソン、「科学的発見のパターン」、村上陽一郎 訳、講談社学術文庫 (1986)。

(18) G. スペンサー＝ブラウン、「形式の法則」、大澤真幸、宮台真司 訳、朝日出版社 (1987)。あるいは大澤真幸、「行為の代数学—スペンサー＝ブラウンから社会システム論へ」、青土社 (1995)。

(19) フェルディナン・ド・ソシュール、「一般言語学講義」、小林英夫 訳、155頁、岩波書店 (1972)。

(20) 森川亮、「量子論の歴史—その概念発展史と哲学的含意—黒体放射からプランクの量子仮説まで」、近畿大学「商経学叢」62巻 第1号 (2015)。以下、本研究、あるいは第一稿と書かれた場合は同じ論考を指す。

(21) A. Einstein, Zum Gegenwertigen Stand der Strahlungen problem, 「輻射の問題の現情について」, Physikalische Zeitschrift, Bd. 10, (1909), pp.185~193. (邦訳：物理学古典論文叢書2)

なお、このアインシュタインの論法は、論理的にはプランクが $\frac{d^2S}{dU^2} = \frac{a}{U(U+b)}$ より放射の公

$$\langle \Delta E_p^2 \rangle = h\nu \langle E \rangle + \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \frac{\langle E \rangle^2}{\nu d\nu}$$

である（ここではアインシュタインの当初の係数表記ではなく現代の馴染み深い表記に直してある。以下も同じ）。これは、明らかにレイリー・ジーンズの公式によるゆらぎの二乗平均

$$\langle \Delta E_{RJ}^2 \rangle = \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \frac{\langle E \rangle^2}{\nu d\nu}$$

および、ヴィーンの公式によるゆらぎの二乗平均

$$\langle \Delta E_W^2 \rangle = h\nu \langle E \rangle$$

を加算したものである。レイリー・ジーンズからとったゆらぎの二乗平均は、波動に特有のもので、ゆらぎは $\langle E \rangle^2$ に比例するが、ヴィーンの公式からとったゆらぎの二乗平均は、 $\langle E \rangle$ に比例する粒子に特有のものとなっている^②。プランクの公式はこの二つのゆらぎの重ね合わせになっている。朝永の表現を借りると、「プランクの公式がこの二つの項から成り立っているということは、実際の光は、純然たる波動と考えられないと同様に、純然たる粒子と考えるわけにもいかないということである^③」。そして、「一般にプランクの公式の成立する場合には、この両方の性質を兼ねた何物かのように作用するということになる^④」、ということなのである。（傍点は筆者による）

アインシュタインの主張は、プランクの意図とは別に、プランクの公式にはそもそも光量子が入り込んでいるということであり、従って、これを現実の粒子として認める必要があるのだ（あるいは控えめに述べても解釈する必要があるのだ）、ということである。

(2) プランクの公式の導出に現れる二重性

プランクの今ひとつの二重性は、これも本研究の第一稿の10節で述べたように、その放

ㄨ式を導いたことの逆向きである。これは、この式の逆数をとって、 $\left(\frac{d^2S}{dU^2}\right)^{-1} = \alpha U + \beta U^2$ と書けば

より一層はっきりとしてくる。

② 定量的な説明は、朝永振一郎，前提書，41～52頁を参照のこと。

③ 朝永振一郎，前提書，50頁。

④ 朝永振一郎，前提書，51頁。

射公式の導出の中にも見出される。ここにも、古典電磁気学からの直接的な帰結としての

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U \text{ がある一方で、論文の後半ではエネルギーが不連続になってしまう。}$$

この矛盾に対するアインシュタインとプランクの態度の違いが両者の考え方の違いを象徴的に際立たせる。アインシュタインは、これこそを光量子の存在を裏付けるものとして捉え、電磁気学を無制限に適応することができないことの証拠であると考えているのである。そして、この二者択一の状態について、どちらかを放棄するか、さもなければこの両方を放棄する選択を迫られているのである、と声明している（1909年「輻射の問題の現情について」）。この選択に対して、アインシュタインは、電磁気学を制限、あるいは書き直す、という選択肢を選び、プランクは（そして当時の物理学者の多くが）電磁気学を死守しようと試みたのである。これは、電磁気学を連続性、光量子を不連続性と置き換えても同じことであり、結局は、不連続性を認めて新しい理論の必要性を認めるか、これを認めないかということになるのである。—ということは、言い替えれば（いくらか上記してきたことの繰り返しになるのだが）、光量子を現実的な粒子たるものとするか、これを便宜上のものとするか、ということである。

こうした側面からもプランクの公式は古典物理学と現代物理学（量子論）とのまったくの中間点に立つものだったのである。

4. 危機的状況に陥る物理学

二十世紀初頭に来て、物理学はかつてないほどの危機的な状況に直面していたと言えよう。量子の導入—しかも、ただの導入ではなく、その実体化がなされるに至って古典物理学、特に電磁気学は修正を余儀なくされるか、下手をすると完全に破棄されかねない状態にあった。加えて、同じくアインシュタインによってエーテルの存在まで否定されるに及び、事態はさらに深刻さを増した^㉞。

㉞ 衆知のことであるが、アインシュタインは、特殊相対性理論の定式化（本論の脚注㉞の4）でそれまで実体的存在であると目されていたエーテルの存在を完全に否定したのであった。

十九世紀の物理学において中心的な役割を果たしていた「エーテルの物理学」はエーテルの存在と共にその役割を終えたとされる。しかし、「エーテルの物理学」が「空間の物理学」あるいは「空間の物理的性質」と解釈されればよいのだ、というドルーデの言葉に乗せて述べているマコーマックの言表は認識論的にまったく妥当である（R. マコーマック（本論の脚注㉞）, 141頁を参照のこと）。アインシュタインの相対論が為した認識論への貢献は、結果的に、エーテルの性質について語ることの限界性（あるいは不必要性）を示し、それよりは、空間が（あるいは時間が）、斯く斯く然々の性質であるところの関係性（あるいは機能=function）を有する、ということを示すことの認識論的な豊穡性を示したことにある。そうすることで、アインシュタインは、エーテルという実体を排除したのである。—以上は、カッシーラーの前提書、および「アイブ

二十世紀の初頭とは、言わば、それまで絶対的であると目されていたものの根幹が激しく動揺しはじめた時代でもあったのである。—21世紀に生きるわれわれは、この時期に動揺した数々のものが20世紀の荒波の中で次々と崩壊していった様を、あるいは崩壊せずとも著しい後退を余儀なくされたことを知っている²⁶⁾。

放射公式について言えば、プランクは、1923年に出版した「熱輻射論 第五版」においてもまだ古典電磁気学からの解決に希望を見出している。ここではプランクだけを具体的に挙げているが、プランクは旧世代の保守的な物理学者の代表として挙げたにすぎない。多くの旧世代の物理学者はプランクと同じように感じており（例えば、ローレンツ²⁷⁾、レイリー、ジーンズなど）、物理学がいかに危機的であったかが分かる。と同時に、アインシュタインの投じた光量子がいかに計り知れないほどの革命であったかが推測できる²⁸⁾。

しかしながら、二十世紀に入ってから、徐々にではあるが国際的に認知されるようになってきた量子は、個々の具体的な問題にも適応されるようになってゆく。特に、エネルギーの等配分則が適応できない事例に対して量子論が適応されはじめる。その一例が、アインシュタイン（1907）やデバイ²⁹⁾（1912）の比熱理論であり（本論の Appendix を参照のこと）、これはボルン³⁰⁾とカルマン³¹⁾によってもほとんど同時期に研究された。また、多

アインシュタインの相対性理論、山本義隆 訳、河出書房新社（1996）」を参照のこと。

²⁶⁾ 量子論と相対性理論の出現は古典物理学の後退であることはもちろん、論理学や数学の面でもこうした傾向は顕著である。例えばゲーデル（クルト・ゲーデル、Kurt Gödel、オーストリア・ハンガリー帝国（現チェコ）生まれの数学者・論理学者、1906～1978）の不完全性定理であり、ウィットゲンシュタイン（ルードヴィヒ・ウィットゲンシュタイン、Ludwig Wittgenstein、オーストリア生まれの哲学者、1889～1951）の論理哲学論考などであろう。また、社会や共同体、社会を根底で支えていた宗教的な権威や基盤など、そしてついには人間そのものまでもがそれまでとは大きく変わり、急激な変化と崩壊を余儀なくされたのが20世紀であったとも述べられるであろう。量子論による科学革命は（もちろん、本論では触れないのだが、相対論による革命も）、こうした変貌の象徴とも言えるのである。

²⁷⁾ ヘンドリック・アントーン・ローレンツ（Hendrik Antoon Lorentz, 1853～1928）はオランダの物理学者。相対性理論に現れるローレンツ変換や電磁気学のローレンツ力などで知られる。また、現代物理学の歴史を語る上で、彼の「電子論（1895）」は避けて通ることはできない業績である。1920年、ゼーマン効果の研究でノーベル物理学賞を受賞。ライデン大学教授。

²⁸⁾ この衝撃と動揺は、Russell McCormmach, *Night thoughts of a Classical Physicist*, Harvard University Press（1982）、邦訳：ラッセル・マコーマック、ある古典物理学者の夜想、小泉賢吉郎 訳、培風館（1985）、に詳しい。

²⁹⁾ ピーター・ジョセフ・ウィリアム・デバイ（Peter Joseph William Debye, 1884～1966）はオランダの物理学者、化学者。ユトレヒト大学、ゲッチンゲン大学、ライプツヒヒ大学、ベルリン大学などの教授を経て1940年、コーネル大学教授となる。1936年、ノーベル化学賞を受賞。

³⁰⁾ マックス・ボルン（Max Born, 1882～1970）はドイツ生まれのイギリスの物理学者。チェーリッヒ大学、ゲッチンゲン大学などで学び、ゲッチンゲン大学教授となるが、ナチスの台頭でユダヤ人排斥運動にあい、辞職。その後、ケンブリッジ大学講師を経てエディンバラ大学教授となる。量子力学建設者の一人と目される人物。1954年、波動関数の確率解釈によってノーベル物理学賞を受賞。

³¹⁾ セオドア・フォン・カルマン（Theodore von Kármán, 1881～1963）はハンガリーの航空工学者。流体力学のカルマン渦列の研究が有名。

原子分子の回転についてはネルンスト⁶²⁾が研究を行い、これらはすべて量子論に軍配が挙がった。

かくして、古典物理学は、徐々に追い詰められ、事態は危機的な様相を呈してきたのが1910年前後の時期であった。

5. ソルベイ会議と量子

こうした1910年前後の緊迫した、一物理学が破綻してしまうかもしれないという緊迫感の漂う中、1911年の秋、10月30日から11月3日にかけて第一回ソルベイ会議がベルギーのブリュッセルで開かれている。

ソルベイ会議とは、ベルギーの実業家で化学者でもあるエルネスト・ソルベイ⁶³⁾の主催によって4年ごとにベルギーのブリュッセルで開催される物理学の国際会議である（1922年からは化学部門も開催されるようになった）。この第一回が1911年に開催され、各国から指導的な物理学者がブリュッセルに参集した。論題は「放射理論と量子」⁶⁴⁾であった。

確かに、量子は、これをどのように扱うべきか、一つまは、アインシュタイン流に光量子というように粒子として解すべきか、プランクが最初に導入したように放射におけるエネルギーの不連続性（それが何を意味するかはハッキリしなくとも）と限定的に解すべきなのかが分からなくとも、次の一点だけは事実であった。すなわち、もはや、これを葬り去ってしまうわけにはいかない、ということである。量子は、放射の公式を導出できる唯一の仮説なのである。ネルンストの言葉を借りれば、「それらの考え（量子仮説）は、修正や細工を加えられるかもしれないが、無視度外視することはできない」のである。

プランクは、保守的な立場を貫き通したが、彼がこの会議で行った発表は、その後の量子論にとってとりわけ重要なものである。彼の論調も、量子が何か本質的に重要な真相に関係しているということに衆目を向けるものであった。プランクの講演は、以下のような

⁶²⁾ ヴォルター・ヘルマン・ネルンスト (Walther Hermann Nernst, 1864~1941) はドイツの物理学者、化学者。熱力学の第三法則の発見で知られる。プランクと協力してアインシュタインをベルリンに呼び寄せた。ベルリン大学教授

⁶³⁾ エルネスト・ソルベイ (Ernest Solvay, 1838~1922) はベルギーの実業家、化学者、政治家、慈善事業家。1861年に無水炭酸ナトリウムの製造法（ソルベイ法と呼ばれる）を開発したことで事業家として成功した。物理学や化学などの自然科学にも関心が深く、ソルベイ会議を主催した他、ブリュッセル大学に自然科学や社会科学の研究所を設立するなど、ビジネスでの富を社会に還元し続けた慈善家でもあった。後に、ベルギーの上院議員に二度にわたって選出され、最終的には国務大臣を歴任した。

⁶⁴⁾ 詳細は、「輻射の理論と量子：第1回ソルベイ会議報告」、東海大学出版会（1983）を参照。

ものである。

統計力学によれば、エネルギー E の状態にある系が位相空間の体積要素 $dpdq$ に見出される確率は、 $\frac{e^{-E/kT} dpdq}{\iint e^{-E/kT} dpdq}$ である。ここで、 $E = \alpha p^2 + \beta q^2$ (α と β は定数) である。系の平均エネルギーは、

$$\langle E \rangle = \frac{\iint E e^{-E/kT} dp dq}{\iint e^{-E/kT} dp dq}$$

であり、これの単純な積分がレイリー＝ジーンズの公式を与えるのであった。しかしながら、エネルギーは連続ではなく、 $E = nh\nu$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) なのであってみれば、これは、不連続化され

$$\langle E \rangle = \frac{\sum_n E_n e^{-E_n/kT}}{\sum_n e^{-E_n/kT}} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

となる。これより、プランクは、を位相空間内の素領域の有限な大きさを表すものと解釈するのである。つまりの位相空間内でのトラジェクトリーの線上だけが許され、この線と線との間の面積がになると解釈する。すなわち、

$$\int_E^{E+h\nu} \int dp dq = h \text{ あるいは } \iint dp dq = nh$$

である（次項の図-1 参照のこと）。

プランクは、これによって、エネルギー量子が示唆するものは、もっと根源的で一般的な原理の帰結なのだと述べた。そして、「確率の素領域 h というものは確認可能な有限値をもつのだという原理だけに考えを限定し、この注目すべき定数の物理的意味についてこれ以上の推測をすることは避けるべきである」と論じたのである⁹⁵。これは、デバイによって、1自由度の周期運動について、 $\oint pdq = nh$ と表され（1913）、今日、ゾンマーフェルトの量子条件⁹⁶として知られる $J_i = \oint p_j dq_j = nh$ へとつながることとなった。

⁹⁵ マックス・ヤンマー、前提書、原書：pp.53～54、翻訳版：65～66頁。

⁹⁶ アルノルト・ヨハネス・ゾンマーフェルト（Arnold Johannes Sommerfeld, 1868～1951）はドイツの物理学者。ロシアのケーニヒスベルクに生まれ、ゲッチンゲン大学で学んだ。もっとも有名な業績は、ゾンマーフェルトの量子条件（1916）と呼ばれるもので、前期量子論の金字塔である。その他、微細構造定数、磁気量子数などの業績で知られる。1906年、ミュンヘン大学の物理学教授となる。多くの優秀な弟子を育てたことでも知られ、ゾンマーフェルト学派と称される。

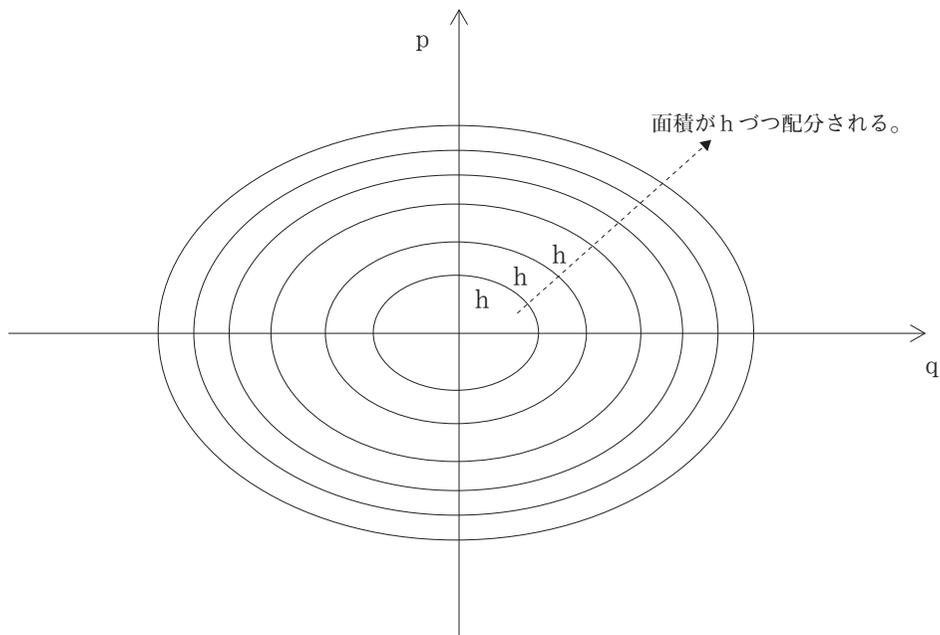


図-1 (q, p) 位相空間

この会議に出席していたポアンカレ⁶⁷⁾は、「この会議で論じられた新しい研究は力学の根本原理を疑わしくしたばかりではない。従来、自然法則一般の概念とまったく混用されてきた一点をも動揺させる。すなわち、われわれはなおその法則を微分方程式の形で表するか否かが問題である」⁶⁸⁾と述べている。彼は、様々な前提に基づいた計算を行ったが、そのいずれもが失敗に終わり、不連続なエネルギーの概念なしでは正しい放射法則が得られ

ㄨ 主なメンバー（教え子）は、ハイゼンベルグ、ハイトラー、デバイ、パウリなどのノーベル賞受賞者である。なお、ゾンマーフェルトの量子条件については、本論の続編で詳述することになる。

67) ジュール＝アンリ・ポアンカレ（Jiles-Henri Poincaré, 1854～1912）はフランスの数学者。数学のみならず物理学や天体物理学などに様々な貢献を為した。特に、1904年に出された「単連結な3次元閉多様体は3次元球面 S^3 に同掃である」なる予想は後にポアンカレ予想と呼ばれ、その後、100年間にわたって世界中の数学者を苦しめた（2002年から03年にかけてロシア人数学者グレゴリー・ペレルマンによって解決された）。

68) Henri Poincaré, *Dernières Pénitentes*, 1913, アンリ・ポアンカレ, 「晩年の思想」, 河野訳, 岩波文庫（1939）。ここでは、天野が「量子力学史」（60頁）で要約したものをそのまま引用した。ポアンカレの該当書には、ここで記した言葉がそのまま書かれているわけではない。

ポアンカレは、天野が要約したように、力学の概念が根本的に揺らいでいることを述べた後に、以下のように述べている。すなわち、「……前略……ただこれらの思いきったことにもっと別の、もっとずっと度肝を抜く事柄を付け加えようというだけである。人はもはやただ「力学」の微分方程式が変更されなければならないかどうかは問題にしないで、運動の法則がやはりなお微分方程式で表すことができるかどうかを問題にしているのである」と（一部、旧仮名遣いや表記を筆者の手で現代表記に直した）。そして、「自然におけるあらゆる変化は連続的に行われるはずだ」と信じられてきたのであったが、「今日問題になっているのはこの基礎的な思想である。自然法則のうちに不連続なものを、それも見掛けでなくて本質的に不連続なものを導入してはならないかどうか不審に思われているのであって、……云々」—「晩年の思想」邦訳版155～156頁。

ないという結論に達したのであった。ポアンカレのこの結論とこの会議が契機となって量子論の賛同者が一気に増加することとなった。と同時に、不連続性は、まったくもって避けがたいものと目され、 $\iint dpdq = nh$ で示された要素領域ごとの状態だけを物理的系が取るのだ、という認識が広がっていった。

かくしてポアンカレは、「物理的な一つのシステムは判然と区別のつく有限個の状態しか受け容れない。システムはこれらの状態の一つから別の一状態に飛躍するので、これらの中間にある諸状態を次から次へと連続的に移って行くのではない」³⁹⁾と述べるに至るのであった。まことに恐るべき洞察力！と言わざるをえない。なお、このポアンカレの言辭は、「システムが判然と区別のつく有限個の状態…云々」であるところから、極めて量子の実体的解釈に近いと言えよう。

この会議から二年後の1913年、ボーアは量子を大胆な仮説の元で原子モデルへと適応する。このボーアの理論はそれほどの抵抗もなく受け容れられることになったが、そうした下地を形成したのもこの会議の成果だったのである⁴⁰⁾。

— 〈Appendix〉 —

1911年のソルベイ会議で示されたゾンマーフェルトによる試みもまた重要である。この試みは、後にいわゆるゾンマーフェルトの量子条件となって結実する。以下に Appendix としてアインシュタインとデバイによる固体比熱の理論（量子論の具体的問題への最初の適応）と共に記しておくこととする。

また、アインシュタインについては、病跡学的研究（パトグラフィー）の知見から彼のパーソナリティーと彼の物理学との関係を簡単に考察しておくことにする。この関係は偏にアインシュタインの個人的な問題に限られたものではなく、現代科学文明全般に対する考察へと射程を広げる可能性を有するものである。なお、この段階でこうした考察を為しておく理由は、いささか唐突感を拭えないであろうが、これらは、後にロマンティック（ロマンティズム）とリアリズムという思潮を量子論との関係（主に量子論の解釈との関係）で考察する際に重要となってくるからである。

³⁹⁾ ポアンカレ、前提書、原書：p.185, 邦訳版：174頁。また、天野清は、「量子力学史」、60～62頁で取り上げている。

⁴⁰⁾ 詳細は本論の統編を参照のこと。

1. 量子の適応例

この時期（アインシュタインの光量子仮説以降から第一回ソルベイ会議前後まで）に行われた光量子，およびエネルギー量子の具体的な問題への適応について，重要なもの—アインシュタインとデバイの固体比熱の理論を記しておく。これらは，いずれも量子仮説を用いなくては説明不可能であった具体的現象に対する最初の量子論の適応として意義ある試みである。（周知のごとくこの二つの理論は，どんな量子統計力学や物性論の本にもほぼ漏れなく解説されており，歴史的な意味のみならず，現代的な意味ももちろん薄れていない。）

19世紀後半になると，それまでデュロン＝プティの法則として知られていた比熱の法則—すべての単体の一原子あたりの比熱は同じである（1819），が低温では成り立たないことが明らかになってきた。ここへ，アインシュタインが量子仮説を導入することでこの矛盾を解決するのである。アインシュタインの理論的な骨子は以下である。

(1) アインシュタインの比熱理論

デュロン＝プティの法則は，古典統計力学のエネルギー等分配則から1モルあたりのエネルギーが $3RT$ であり，従って比熱が， $C=3R$ となることを説いている。しかしながら，低温になると，量子的な効果が優勢になってきてこれが成り立たなくなってくる。そこで，アインシュタインは，1907年の論文，「プランクの放射理論と比熱の理論」において，エネルギーをプランクの公式を用いて，

$$E = \frac{3N\hbar\nu}{e^{\beta\nu/T} - 1}$$

と表し，これよりモル比熱

$$C = \frac{dE}{dT} = \frac{3R \left(\frac{\beta\nu}{T} \right)^2 e^{\beta\nu/T}}{\left[e^{\beta\nu/T} - 1 \right]^2}$$

を得た（ただし， $\beta = \hbar/k$ および $Nk = R$ で， N はモル数である）。ここで，高温領域，すな

わち、 $T \rightarrow \infty$ とすると、 $C = 3R$ となってデュロン=プティの法則と一致することを見ることが出来る。

(2) デバイの比熱理論

アインシュタインの理論は、実験データと非常によく一致していたが、極低温においてわずかなズレを見せていた。これは、固体中の分子の振動数を一定としていることに原因があり、これを修正したのがデバイである。デバイは、振動数を上限で切斷することによって、デバイ比熱

$$C = 9R \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{\Theta_D/T} \frac{\xi^4 e^{\xi}}{(e^{\xi} - 1)^2} d\xi$$

を得た。ここで、 Θ_D はデバイ温度である。

2. ゾンマーフェルトの試み

ゾンマーフェルトは、1911年の会議で、作用量子 h を実際に（名ばかりのものでなく）ハミルトンの作用関数 $\int L dt$ と関連付けるべきであると述べた。ここでは L ラグランジアンである。すなわち、原子が素過程を行う場合には、常に一定量 W だけを失うか得るとして、

$$W = \int_0^{\tau} L dt = \frac{h}{2\pi}$$

が基本的仮説でなければならないとした。ゾンマーフェルトは、この仮説から出発してアインシュタインの光電効果の方程式と同様のものを導出した。ゾンマーフェルトのこの試みは、調和振動子の統計というそれまでの量子の適応範囲からそれ以外のものへ適応された最初の例である（上記したアインシュタインとデバイの比熱理論もやはり統計的な現象についての適応である）⁽⁴⁾。また、この試みは、本論の中で述べたプランクの試みと同じように、量子を力学へと接続しようとする試論でもある。

こうして、量子の仮説は、徐々に量子の力学へと変貌を遂げてゆくこととなるのであった。ただし、その結末は、量子の力学、すなわち「量子力学」と称されてはいるが、究極

(4) マックス・ヤンマー、前提書、原書 pp.54~56、翻訳版66~68頁。

的には量子の非力学—Quantum Non-Mechanics⁴²⁾のごとき理論体系へと行き着くことになる。この過程は、本論の続編で徐々に明らかにしてゆくこととなる。

3. アインシュタインの創造性の背景—パトグラフィー的考察

アインシュタインほど人口に膾炙し、ほとんど現代物理学、あるいは科学者のアイコンと化した人物はいない。彼ほど有名な科学者は過去にも、そしておそらくは未来にも存在しないであろう。わざわざここに略伝を書くまでもない。したがって、ここには、飯田と中井による科学者についてのパトグラフィー（病跡学）的考察からの知見など⁴³⁾を用いてアインシュタインと彼の物理学理論との関係を中心に述べておく。

そもそもアインシュタインの発想や着想は、それまでに蓄積されてきた知見や広くは過去全般と切れていたり、どこからそういったアイデアが出現してきたのか判然としたりしないようなものが多々あることは確かである。その代表的なものが彼の代名詞ともなっている相対論である。光量子の発想にしても、相対論ほどではないが、一気に（あるいは躊躇なく）量子を実体化してしまうあたりは飛躍であろう。プランクのそれが、それまでの知見と非常に接続的で連続的であるのとは好対照である。

さて、飯田と中井は、科学者について、代表的な天才と目される人物を「分裂病圏（現在の用語では「統合失調症圏」と記すべきなので以下では統合失調症と記す）」、「躁鬱病

42) D. Bohm, Quantum Theory, Dover, 邦訳：「量子論」, みすず書房 (1950), p.167, 邦訳版194頁。

43) ここでは飯田と中井の著作以外にもっとも代表的な2冊（天才研究の古典）も加えて挙げておく。なお、本論の主題に鑑み、コンパクトに趣旨だけを述べるので、該当の頁をいちいち記載することはしない（以下同様）。

飯田真, 中井久夫著「天才の精神病理—科学的創造の秘密」, 中央公論社 (1972), (復刻版, 岩波現代文庫, 2001)。

エルンスト・クレッチマー, 「天才の心理学」, 岩波書店, 内村祐之 訳 (1953), (復刻版, 岩波文庫, 1982)。

ヴィルヘルム・ランゲ=アイヒバウム「天才—創造性の秘密」, 島崎敏樹, 高橋義夫 訳, みすず書房 (1969), (復刻版はみすずライブラリーに所蔵, 2000年)。

病跡学は、ドイツの精神科医パウル・メビウス (1853~1907, ゲーテの躁鬱病が7年周期となっていることを見いだすなど, 天才と精神病の関係を研究したことで有名) によって始められた天才とその創造性に関する研究に端を発する。その研究手法は、有名な天才の生涯にわたる精神的病跡を読み解き、今日の精神病理学的な考察の対象とするものである。日本では、福島章, 宮本忠雄などがかつてさかんに行っていたが近年になって下火になっている傾向がある（あくまで筆者の主観であるが、主に70年代から80年代半ば頃までがもっとも盛んであったように思われる）。その考察対象の射程は広く、科学者から文学者, 哲学者, 芸術家, 政治家にまで及ぶ。

圏]、「神経症圏」の三つに分類して考察している。アインシュタインは、統合失調症圏に分類されており、同様の科学者としてニュートンとウィトゲンシュタインが挙げられている。そして、彼らの仕事の特徴は、直観的・体系的・世界超脱的・革命的であると述べる。統合失調症圏に分類される科学者の仕事は、世界の本質を直観的、無媒介的に捉えようとするもので、宇宙全体を包含する秩序を構築しようとするものである。彼らの眼に映じている世界は非常に確実なものであるのだが、これを他者に対して論理的に説得力をもって説明することは不可能で、時として妄想的ともいえる特異なやり方で、包括的に世界の全体を説明してみせるのである。あるいは説明しようとするのである。こうした特徴は、異なったタイプの科学者と比較してみると一層際立ってくる。例えば、躁鬱病圏に属する科学者の場合は、高度な抽象性よりは高度な（もしくは執拗な）個別具体性であり、現実に密着し、着実に観察と経験を深め、帰納的なやり方で世界の部分について具体的な結論を引き出すのである。ちなみに、躁鬱病圏に属する科学者としては、フンボルト、ダーウィン、ボーアなどが挙げられており、彼らの特徴は、経験的・感覚的・伝統志向的・漸進的である⁴⁴⁾。

すなわち、以下のような対比がある、ということである。

統合失調症圏 → 直観によって世界全体を客観的に（世界超脱的に）把握し、これを体系化しようとする。なお、これは、よりリアリズム的傾向が強いと言えよう。

躁鬱病圏 → 経験と感覚を通じて世界の部分について個別具体的な結論を引き出そうとする。すなわち、上記に対応するように、こちらはよりロマンティシズム的傾向が強いと言えよう⁴⁵⁾。

アインシュタインの発想がそれまでの知見と切れているのは、彼の世界超脱的に世界を把握しようとする志向性によるものであり、さらに述べれば彼の統合失調症的パーソナリティによる。

統合失調症圏の者は、世界が崩壊する、あるいは世界の断念として切迫する危機的状況を自己の発病の危機と同時に経験するのであり、その崩壊の危機に際して彼らは世界等価

⁴⁴⁾ ちなみに、本論では述べなかったが、飯田と中井は、前提書においてフロイトとウィナーを「神経症圏」に属する学者として挙げている。彼らの共通する仕事の特徴は、境界領域の探求、離れた領域の結合にあると述べている。そして、その創造的状況は、「学問を自己抑制の手段とすることが多いが、重大な葛藤状況を契機に学問が自己解放の手段に転化し、そこで真の自己の主張を発見することが多い」と述べている。—前提書、復刻版244～245頁。

⁴⁵⁾ 森川亮、前提文献、第8節参照のこと。

物としての己の世界を構築する必要に迫られるのである（世界を断念している、あるいは世界が崩壊しているから世界超脱的にならざるを得ない、とも言えよう）。通常、病者の作成した世界等価物は妄想の所産であって普遍性などはない。しかし、時として統合失調症圏にある科学者は（いわゆる天才的な科学者は）、そうした個人的な妄想の世界を突き抜けて、その彼岸にある真の普遍性を有する世界をまさしく直知するのである。アインシュタインが成したことは、つまるところかかる妄想的な世界等価物を論証し、普遍性を付与した、ということである。

ところが、アインシュタインにとって、それすらもが世界の一部にしかすぎないものであり、彼は生涯を通じて己の眼に（おそらくは、心の眼に、あるいは閉じることで見える眼に⁴⁶）映じた世界を説明する理論を探し続けたのであった。彼の眼に量子は実在的に存在しており、それは因果的でもあり、決して統計的・確率的な曖昧な存在ではなかったのである。これは、量子論の解釈の核心にある問いに通じる問題であるが、彼は、これをついに普遍性を持って表現し説明することがその生涯をもってしてもできなかった。直観的、無媒介的に発見された彼らの世界を実証することは、往々にして彼らの全生涯を通じても足りないことがほとんどなのである。アインシュタインの生涯とは、まさしくこうした人生の代表のごときものであろう。

本節で展開されたアインシュタインの帕特グラフィーは、本論の続編で述べるボーアの帕特グラフィーとの対比の中で再考することになる。この対比は、別面から眺める量子論の解釈問題でもあり、究極的には量子論の（ひいては現代物理学の）解かれざる問題、しかももっとも根本的な問題に対する新たな視座を与えることになる、と現段階では述べるに留めざるをえない。

⁴⁶ Ryo Morikawa, *Between*, Proceeding of Alternative Natural Philosophy Association, ANPA Cambridge (2003), pp.24~31.