

# 解説

## 光の粒子性・波動性について

矢島達夫

日本大学文理学部物理学教室 〒156 東京都世田谷区桜上水 3-25-40

(1991年2月19日受理)

### On the Particle and Wave Nature of Light

Tatsuo YAJIMA

Department of Physics, College of Humanities & Sciences, Nihon University,  
3-25-40, Sakurajosui, Setagaya-ku, Tokyo 156

#### 1. はじめに

光が粒子・波動の二重性を持つという事実は、物理学を正式に学んだ人ならば誰でも知っている事柄である。また、このことが量子力学を生み出す最も重要な端緒になったことも同様に周知のことであろう。では、光の量子論は既に完成された古くさい学問かという決してそうではない。

主としてレーザーの登場以来、光の基本的な性質が改めて見直され、その量子論的な性質に関しても多くの新しい研究が理論・実験の両面から活発になされてきた。また、光を用いた量子力学の基礎の検証という研究も近年盛であり、量子論における光の役割のリバイバルともいえる状況である。さらに、最近光の量子論的な性質を積極的に制御して新しい非古典的光をつくりだし、その応用を目指す研究も重要なトピックスになっている。このように、光の量子論は現在でもなお生き生きと発展している課題であり、それらは量子光学と呼ばれる分野の重要な一側面を担っている。

本稿では、この量子光学の最近の発展を解説するのが目的ではなく、その根底となる最も重要な基礎的概念である光の粒子・波動の二重性という問題について注意を喚起しようというものである。というのは、このよく知られている筈の概念について、正しくない認識が極めて広くかつ深く浸透していると思われるからである。これは、光に関する教育・研究の今後の発展のために見逃ごせない問題であると考えられるので、ここに取り上げて議論する次第である。

#### 2. 光の粒子性に関する歴史的事実とその記述

古典物理学では、光はマクスウェル方程式から導かれる電磁波動として表される。したがって、光の粒子的挙動が、古典物理とは相容れない、いわば量子論的な性質の象徴として登場してきたわけである。そこで、まず問題提起として、光の粒子性の発見や概念の確立に関わる初期の歴史的事実と、それが物理の基礎教育においてどのように取り扱われているかについて、後の議論に必要な要点を簡単に述べておく。

高校の物理教科書、大学の一般物理・基礎物理・量子力学・その他の教科書などでは、光の粒子性を示す代表的な歴史的事実として以下の三つの現象の一部または全部が大抵述べられている。

##### 2.1 熱輻射

Planck は黒体輻射のスペクトル特性を説明するため、1900年にエネルギー量子の考えを初めて導入して

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/k_B T) - 1} \quad (1)$$

の形の輻射エネルギー密度の式を導き、実験結果がよく説明できることを示した<sup>1)</sup> (T: 温度,  $\nu$ : 周波数, 他は基礎物理定数)。ここで、Planck は物質を構成する要素を振動子で表し、そのエネルギーが  $h\nu$  の単位で量子化されているとして振動子のエネルギー分布を統計的に求め、これと熱平衡にある輻射のエネルギースペクトル、すなわち熱輻射式を導いたのであった。その結果として、エネルギー保存則の要請から、光のエネルギーも

$h\nu$  を単位として物質とやり取りされることになる。当時はまだ光量子の考えは全くなかった。しかし、このことが、光のエネルギーそのものが量子化されていることを意味し、さらには光の粒子性を示すものである、と説明している教科書も少なくない。

2.2 光電効果

Einstein は1905年に独自の考えから初めて光量子仮説を唱え、これを光電効果に適用して実験結果をうまく説明した<sup>2)</sup>。さらに、1906年には Planck の量子仮説に積極的に注目してこれが光量子の存在を示すものとの意味付けを行った<sup>3)</sup>。このような経緯から、光電効果は光の粒子性を示す最も代表的な現象として、高校レベルから必ず取り上げられる問題である。中でも基本的な特性は、入射光の周波数  $\nu$  と光電子の最大エネルギー  $K$  との関係

$$h\nu = \phi + K \quad (2)$$

である ( $\phi$  は仕事関数)。これはエネルギー保存則を表す関係式で、光を波動と考えたのでは説明できず、光をエネルギー  $h\nu$  をもつ粒子 (光子) と考えることによって初めて説明できる現象であると、大抵の教科書で記述されている。このほか、(i) 光の強度を増すと、光電子の最大エネルギーは変わらず、数が増える、(ii) 光を当てると、時間遅れなく光電子が直ちに飛び出す、という実験事実もやはり波動では説明できず、光の粒子性の根拠を示すものとして大抵記述されている。

2.3 コンプトン効果

自由電子によるX線の散乱過程 (コンプトン散乱) において、散乱X線の波長がずれる現象をいい、1923年に Compton によってその本性が明らかにされた。散乱前後の波長を  $\lambda, \lambda'$  とすると、そのずれは

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta) \quad (3)$$

で与えられ、散乱X線の方位角  $\theta$  だけに依存する。この結果は、X線をエネルギー  $hc/\lambda$ 、運動量  $h/\lambda$  をもつ光子と考え、電子の相対論的運動を考慮して、エネルギー保存則と運動量保存則とを同時に適用すれば容易に導き出すことができる。エネルギーに加えて運動量の保存則にも従うことから、光電効果よりもさらに一層、光の粒子性を強く示す現象と見なされ、粒子性の最も確かな実証であると一般にいわれている。これもやはり、大抵の教科書で、光の波動論では説明できず、粒子像によって初めて説明できる現象であると記述されている。

これら三つの現象に共通していえることは、(1) その説明は古典物理学だけでは不可能で、量子論を必要とす

る、(2) 光を粒子 (光子) と考えると直観的にわかりやすく説明しやすい、という2点である。では、一般にいわれるように、これらは波動ではどうしても説明できないものだろうか? いい方を変えると、量子論が必要ということは、光子が必要ということと同等だろうか? 答えは NO である。このことを以下3, 4節に示そう。

3. 光の粒子性を象徴する現象の波動による説明

説明の便宜上、以下には歴史的順序とは異なる順番で話を進める。

3.1 光電効果

光の粒子性の代表格として扱われているものであるが、実は一般的常識に反して、光の波動性によってもほぼ完全に説明できる現象である。これについて述べられた文献<sup>4-7)</sup>は古くからあるが、量子力学のやさしい演習問題としてごく自然に理解できる事柄なので、ここにその筋道を述べておこう。

いま、光を古典的波動として扱い、時間変化だけに注目してその電場が

$$E(t) = E_0 \cos(2\pi\nu t) \quad (4)$$

の形で与えられるものとする。一方、電子の方はエネルギー単位を用いて量子力学的に扱い、(4)式の光電場を受けた場合の挙動を調べてみる。すると、光によって光電子が飛び出す過程は、振動的時間変化をする摂動によって、電子が物質に束縛された基底状態  $g$  から、運動エネルギー  $K$  をもつ自由電子の量子状態  $j$  へ遷移する過程として記述される (図1)。時刻  $t=0$  に摂動が開始されたとし、これに対して量子力学の標準的な1次摂動理論を適用すると、 $0 \sim t$  の時間内に上記の遷移が起こる確率は

$$P_{jg}^{(1)} = \left( \frac{\mu_{jg} E_0}{h} \right)^2 \frac{\sin^2[\pi t \{(\epsilon_j - \epsilon_g)/h - \nu\}]}{[(\epsilon_j - \epsilon_g)/h - \nu]^2} \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 $\epsilon_j, \epsilon_g$  は  $j, g$  状態のエネルギー、 $\mu_{jg}$  は遷移双極子モーメントを表す。次に

$$(2/\pi) \lim_{t \rightarrow \infty} \{\sin^2(at/2)/a^2 t\} = \delta(a) \quad (\delta \text{ 関数})$$

の関係を用い、十分長い時間  $t$  を考えると、 $P_{jg}^{(1)}$  は近

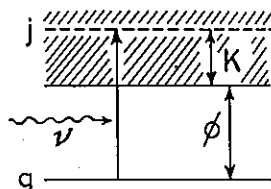


図1 光電効果のエネルギー単位図

似的に

$$P_{jg}^{(1)} = \left( \frac{\pi \mu_{jg} E_0}{h} \right)^2 \epsilon \delta \{ (\epsilon_j - \epsilon_g) / h - \nu \} \quad (6)$$

と表すことができる。

自由電子の最低エネルギー状態と  $g$  状態とのエネルギー差すなわち仕事関数を  $\phi$  とすると

$$\epsilon_j - \epsilon_g = \phi + K \quad (7)$$

の関係になるから、(6)、(7)から、 $P_{jg}^{(1)}$  は

$$h\nu = \phi + K \quad (8)$$

の条件が成り立つ場合のみゼロでない値を持つことがわかる。  $K$  は電子のエネルギー損失がない場合すなわち最大の運動エネルギーを表すから、これは(2)式と全く同じで、エネルギー保存則を表すものであり、光の粒子性から導いたものと全く同じ結果になる。厳密に言えば、有限時間内の遷移に対しては、不確定関係に支配されるある幅の範囲内でのみエネルギー保存則が成り立つが、これは粒子像による場合も同様である。(8)式はまた、周波数  $\nu$  の振動光電場と  $j, g$  2準位間の共鳴条件を表すものといってもよい。

$P_{jg}^{(1)}$  は  $j$  状態の存在確率をも表し、特定のエネルギーをもつ光電子の数に比例するから、これが光の強度に比例して増大することも上式からわかる。また、光が当たった直後から  $P_{jg}^{(1)}$  は有限の値をもつから、光電子が時間遅れなしに発生することも説明できる。

このように、物質を量子論的に扱えば、光電効果の基本的性質はすべて光の波動論でも説明できることになる。つまり、光電効果の説明に量子力学は必要であるが、光子は必ずしも必要ではないというわけである。

### 3.2 コンプトン効果

散乱現象は一般に高次の自然放出過程を含むので、コンプトン散乱も現象のすべてを古典光波で説明することは困難である。しかし、現象のある側面については、光の波動論で説明することも可能である。例えば、その散乱強度を与える有名な Klein-Nishina の式は量子化されない光の波動場によって計算されたものである<sup>9)</sup>。

ここでは、光の粒子性の根拠と一般にいわれる(3)の関係式が、電子を量子力学的に記述し、散乱過程をこの電子と入射・散乱二つの光波との相互作用として捉えるならば、光を波動として扱っても導き出せることを筆者のやり方に従って示そう。

ここで、入射光と散乱光はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} E_0(t, r) &\propto \cos \{ (2\pi c/\lambda)t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} \} \\ E_s(t, r) &\propto \cos \{ (2\pi c/\lambda')t - \mathbf{k}' \cdot \mathbf{r} \} \\ |\mathbf{k}| &= 2\pi/\lambda, \quad |\mathbf{k}'| = 2\pi/\lambda' \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

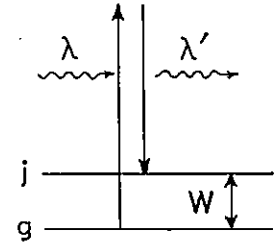


図2 コンプトン散乱のエネルギー準位図

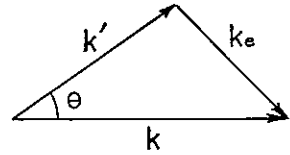


図3 コンプトン散乱における位相整合

の形の波動電場で表されるものとする。電子の状態はエネルギー準位によって表すとすれば、散乱によって運動エネルギー  $W$  の自由電子が生ずる現象は  $E_0$  波、 $E_s$  波による摂動を受けた電子が始状態  $g$  から  $W$  だけ高いエネルギーの状態  $j$  に遷移する過程として扱われる(図2)。

すると、光電効果の場合と全く同様の論法によって、その遷移確率の性質から共鳴条件、すなわちエネルギー保存の関係が得られる。ただし、光電効果と違うのは、今度は2次の摂動論を用いなければならないことである。その遷移確率を  $P_{jg}^{(2)}$  とし、共鳴条件に関わる因子だけを取り出すと、近似的に

$$P_{jg}^{(2)} \propto \delta \{ (c/\lambda) - (c/\lambda') - (W/h) \} \quad (10)$$

と表される。これよりエネルギー保存の関係

$$(hc/\lambda) - (hc/\lambda') = W \quad (11)$$

が得られる。

では次に、運動量保存則に対応する関係式は、波動像ではどうしたら導かれるかということ、それには非線形光学で広く使われる位相整合の条件に着目すればよい<sup>9)</sup>。複数の波動が関わる光学現象がある場合、出力光波の強度が最大となる条件を与えるのが位相整合で、関与するすべての波動の波数ベクトルの間の関係式として表される。

コンプトン散乱の場合には、運動量  $P$  の電子を、波数ベクトル  $\mathbf{k}_e = 2\pi P/h$  をもつ電子波として表すならば、位相整合の条件は

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}' + \mathbf{k}_e \quad (12)$$

となる(図3)。これに  $h/2\pi$  をかければ、(12)式は光子・電子系の運動量保存関係になることがすぐわかる。

電子の相対論的運動を考慮すると、

$$W = mc^2(\sqrt{1 + (p/mc)^2} - 1)$$

となり、(11)と(12)を連立させて解けば、粒子像によるものと全く同じ結果(3)式が得られる。

この例に限らず、一般に位相整合条件で表される波動現象は、すべて運動量保存則に支配される粒子の現象に翻訳できる。その逆もまた然りである。つまり位相整合と運動量保存とは等価であって、同一事象の異なる表現とすることができる。位相整合は光学における単なる技術的手段と捉えられることが多いが、このように基礎物理学的にも極めて重要な概念であることを忘れてはならない。

以上のようにして、コンプトン効果についても、光電効果と同様、その基本特性を説明するのに、量子力学は必要であるが、光子は必ずしも必要でないといえることができる。

### 3.3 熱 輻 射

「Planck が熱輻射スペクトルを説明するために 1900 年に導入した量子仮説の結果として、光のエネルギーは  $h\nu$  を単位として物質とやり取りされねばならないことになった。」

「Einstein は、1905 年に、光自身のエネルギーが  $h\nu$  を単位とする不連続構造をもち、粒子的性質を持つとして光量子仮説を唱えた。」

この二つの事実は、結果的には同じことになるので、一見すると同じことをいっているように思えるかも知れない。しかし、実は光に対する考え方として両者の間には本質的な違いがあることに注意しなければならない。

Planck が量子化の要請をしたのはあくまで物質の方であって光ではなく、その結果として物質と交換する光のエネルギーが不連続になるというだけである。このことは直ちに光自体が不連続構造を持つことを意味するものではない。連続的構造を持つ光であっても、やり取りするエネルギーが不連続になることは可能だからである。

これに対し、Einstein は、物質の存在に関わりなく、光自身が本来、不連続的な構造、すなわち粒子性をもつと考えた。ここが本質的な違いである。

Gamow は、Planck の熱輻射式が登場してから Einstein の光量子説が出るまでの光に対する考え方を次のような面白い表現で述べている<sup>5, 6)</sup>。

「光の放出や吸収が、 $h\nu$  を単位とするエネルギーで不連続的に起こることの起源は物質のほうにあるのであって、光にあるのではない。光自身はバターのようなもの

である。バター自身はどんな量でも存在し得る連続的なものであるが、それが店頭では (1/4) ポンドの単位でしか取り引きされない。……」

Planck が量子仮説を初めて導入した熱輻射の原論文<sup>7)</sup>では、光の本性に関してはほとんど述べられていないので、Planck 自身が光そのものをどのように考えていたかは明らかではない。Planck はその後量子論に対して消極的であったといわれ、少なくとも光量子的考えを表明していなかったことは確かである。教科書の中には、「Planck 自身が光の本来的なエネルギー不連続構造、さらには粒子的性質を考えて熱輻射式を導いた」といったような説明もしばしば見かけるが、これは歴史的事実を正しく捉えた記述とはいえない。

さて、先に「連続的構造を持つ光であっても、やり取りするエネルギーが不連続になることは可能」といったが、このことは前項で述べた光電効果とコンプトン効果の波動による説明の中に既に現れている。光の波動性を用いても、光の粒子性を用いた場合と全く同じエネルギー保存関係を表す式(8)、(11)が導かれることを示した。これらの式は、光自身が波動という連続的構造をもつにもかかわらず、エネルギーのやり取りは  $h\nu$  を単位として不連続的に行われることを明瞭に示している。Gamow のいう光のバター・モデルが現在でもある意味で生きていることを示すものである。

熱輻射の現象も自然放出過程を含むので、現象の機構や特性のすべてを光の古典的波動で説明するには無理がある。しかし、少なくとも、光と物質とのエネルギーのやり取りが  $h\nu$  を単位として行われることについては、上に述べたように光の波動論でも十分に説明できる。

以上のような考察と、ここに述べた歴史的事実とから、熱輻射の法則もやはり、その基本的なところを説明するのに、量子力学は必要であるが光子は必ずしも必要ではないといえるのである。

## 4. 光の二重性の正しい解釈

2, 3 節で述べてきたことをさらに一般的にまとめていけば以下ようになる。

物理の基礎教育における、光の二重性に関する従来の取扱いを見ると、「光学現象には、光を波動と考えなければ説明できない現象と、光を粒子と考えなければ説明できない現象とがある」というふうに記述されているのが一般的のようである。これを正しいとすると、「光は波動または粒子のどちらかの状態にあるのであって、現象によって波動の状態になったり、粒子の状態になったり

する」という理解に導かれてしまう。これは、光の二重性の本質を誤解させる記述であり、誤った理解である。

前節に示した例に留まらず、実は多くの光学現象の主要な性質は、光を波動と考へても粒子と考へてもどちらでも説明できるのである。現象によって粒子的な(または波動的な)性質の方が強く現れたり、粒子像(または波動像)を用いる方がわかりやすいとか、説明しやすいとかいう程度の違いがあるだけである。したがって、一方の描像でなければどうしても説明できないというものではない。つまり、粒子性と波動性とは光の存在様式ではなく、表現様式として理解すべきものである。存在様式ならば異なる状態が同時には存在し得ず互いに排他的となるが、表現様式ならば同一のものの異なる記述が幾らでも可能である。

粒子像・波動像どちらでも説明できる光学現象というのは一般物理教育ではほとんど取り上げられることがないが、レーザー物理や非線形光学の中では豊富な例があり、このことを理解するための好適な場となる。最も基本的な光の吸収と誘導放出の過程をはじめ、各種の波長変換過程、誘導散乱過程、多光子過程など、いずれも光の粒子・波動のどちらの描像を用いても主要な性質が記述できる。

光の粒子性と波動性が光の表現様式であって、両者が等価であるということは、現在の光の量子論の理論形式において明瞭な形で現れている<sup>11)</sup>。そして、このことが前述の「多くの光学現象は光の粒子像・波動像どちらを用いても説明できる」ということの根拠になっているともいえよう。そこで、以下にこれについて述べよう。ここで忘れてはならないのは、光の粒子性は量子論的性質の端的な現れではあるが、そのすべてではないことである。量子論は古典論を極限として含む一般理論であるから、本来、粒子性・波動性を合せて光のあらゆる性質を統一的に記述するものである。

一般の物理系と同様、光の量子状態を記述するには基底となる何等かの固有関数系が必要である。固有関数系は表現の枠組であるから幾通りでも異なるものが可能で、それらは等価であり、互いに交換ができる。光の固有関数系として代表的なものは光子数確定状態(エネルギー固有状態)とコヒーレント状態(場の複振幅の固有状態)の二つである。前者は光の粒子性を表し、後者は古典的電磁波の量子力学的表現である。これらの固有関数系はどちらも完全系をなすので、光のどんな状態でも、どちらかの関数系で展開して表すことができる。その特別な場合として、一方の系の一つの固有関数を他の

固有関数系で展開して表すことができる。例えば、あるコヒーレント状態 $|\alpha\rangle$ は光子数確定状態 $|n\rangle$ の系を用いて

$$|\alpha\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} C_n |n\rangle$$

$$|C_n|^2 = \frac{|\alpha|^{2n}}{n!} \exp(-|\alpha|^2) \quad (13)$$

と表すことができる。その逆もちろん可能である。つまり、光の波動状態は粒子状態の重なりと等価であり、光の粒子状態は波動状態の重なりと等価である。このように光のある特定の状態は波動・粒子のいずれによっても記述できるのであって、したがってその光が関与する光学現象もまた然りということになる。

粒子・波動というものを古典的な意味でなく、量子力学的に正しく記述されたものとして捉えるならば、結局すべての光学現象は光の波動像・粒子像いずれを用いても記述できるといって過言ではない。そして、同一現象に対し、いずれの描像から出発しても量子力学を正しく適用するならば一致した正しい結果が得られるはずである。これが光の二重性の本質と理解すべきである。

ただし、ここでいう波動とは、古典的波動と完全に同じものではないから、波動でも説明できるということが、光の量子力学的記述の不要性を意味するのではないことを注意して頂きたい。ゆらぎの問題や単一光子効果など、光の古典論では十分に記述できない重要な問題がいろいろある。しかし、教科書の常識から考えられるよりは、はるかに広い範囲で光の古典的波動論が有効であることも認識しなければならない。

前節では、光の粒子性によらなければ説明できないと一般にいわれている現象が、波動性によっても説明できることを示した。その逆もまた同様である。光の波動性によらなければ説明できないと普通いわれる現象も量子力学を用いれば粒子性によって説明可能である。例えば、波動性の典型的な現れと見なされる干渉現象についていえば、干渉縞は粒子の到達する場所の確率分布を表すものと解釈され、粒子の統計的挙動の追跡によって干渉縞をつくらせることもできる。

以上のことは量子光学的な概念に不慣れな人にはややわかりにくいかも知れないが、次のようなアナロジーを考えれば容易に理解できるのではないだろうか。

一般に時間変化をする動的物理現象は時間領域と周波数領域のどちらの描像を用いても表せることはよく知られている。前者は物理量を直接に時間の関数として表すものであり、後者はそれをフーリエ展開して周波数成分

の重ね合わせとして表すものである。前者はさらに要素的なインパルスの重なりとして表すこともできる。これらを式で表せば

$$V(t) = \int V(t') \delta(t' - t) dt' \quad (\text{時間領域}) \quad (14)$$

$$V(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int f(\omega) \exp[i(\omega t + \phi(\omega))] d\omega \quad (\text{周波数領域}) \quad (15)$$

となる。両者は全く異なる描像ではあるが、同一現象の異なる表現であることは明らかである。\$V(t)\$ を物質に加わる外場と考えるならば、これと物質との相互作用の結果は時間領域ではインパルスレスポンス、周波数領域では周波数レスポンスに基づいて記述できる。これもまた同じことの異なる表現である。

ここで、フーリエ成分を波動、インパルスを粒子に対応させるならば、この問題は先に議論した光の二重性の問題とよく似ていることがわかり、二重性の理解に役立つのではなからうか。

## 5. おわりに

光の粒子・波動の二重性の概念について従来広く蔓延している誤解について指摘し、その正しい解釈について述べた。

物理の基礎教育あるいは初等教育においては、多くの面において物事を理想化し、わかりやすいストーリーを組み立てるという作業が通常行われる。そのために、厳密性をかなり犠牲にして説明を単純化せざるを得ないという宿命がある。しかし、それにも限度がある。可能なことを不可能とって教えるのは、真実を曲げることであって、やはり正しい教育とはいえないであろう。

さらに考慮しなければならないのは、これが単なる教え方の技術の問題ではないことである。教科書の前記のような一般的状況から判断すると、教わる学生の方だけでなく、教える教師の側にも光の二重性に対する誤解が蔓延しているであろうことが容易に推察できる。まずその方の認識を改めてもらわない限り正常な教育は望めないであろう。

では、この光の二重性の正しい物理を基礎教育や初等教育にどのように取り入れて説明したらよいかというと、これも余り簡単な問題ではないかも知れない。高校教科書の場合、物理学的には正しいことであっても、ある種の規範を外れた記述をすると検定不合格になるという障壁があることも聞く。しかし、少なくとも大学教育では工夫次第でもっと正しい教え方ができるのではない

だろうか。表現の微妙な言い回しに注意するとか、適当な注釈をつけるとか、あるいは歴史的事実と現時点からみた正しい物理とをはっきり区別して説明するとか、いろいろ方法はあるはずである。

ここに取り上げた問題は、物理の基礎教育だけではなく、研究にも関わることも言及しておこう。光学関係の専門家といわれる研究者の間でさえも、この二重性に関する認識不足ないしは誤解が少なからずあることを筆者は見聞している。最先端の研究といえども基礎概念の認識が誤ってはい健全な発展は期待できないであろう。

また、誤解のないように次のことをお断りしておきたい。ここに述べたことは、光の粒子性に関して先駆的な仕事をなした Einstein その他の人々の最初の考えや主張とは違ったことをいう結果になっているかも知れない。しかし、それは、この偉大な先駆者たちの業績を批判したり過小評価するものでは決してないということである。これらの人々の天才的な着想や量子力学への貢献度はいささかも価値を減ずるものではない。しかし、ある学問分野が発展すれば、その内容にも次第に修正・整理・一般化等が施され、先駆者達の最初の考えや主張がそのまま 100% 通用するとは限らない事態になるのもまた必然的ななりゆきである。現代の科学者はこういうことも素直に理解し受け止めて、それを教育や研究に反映させる心がけが必要ではなからうか。

粒子・波動の二重性は光だけの問題ではなく、物質にも当てはまることはもちろんである。最近、固体内の電子波の物理やその応用がクローズアップされているが、ここでもその二重性に対する正しい認識が要求されよう。究極的には自然界の構成要素のすべてが粒子・波動の両面をもつから、その二重性の問題は、大げさな言い方をすれば、自然認識の基本に関わる問題ともいえる。こういった観点からもその正しい理解の重要性をおわかり頂きたいと思う。

## 文 献

- 1) M. Planck: "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum," Verh. Dtsch. Phys. Ges., 2 (1900) 237-245; 辻 哲夫訳: 熱輻射と量子, 物理学古典論文叢書第 2 巻, 物理学史研究刊行会編 (東海大学出版会, 1970) に収録。
- 2) A. Einstein: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt," Ann. Phys., 17 (1905) 132-148; 高田誠二訳: 光子論, 前掲第 1 巻 (1970) に収録。
- 3) A. Einstein: "Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption," Ann. Phys., 20 (1906) 199-206; 広重 徹訳: 光子論, 前掲第 1 巻 (1970) に収録。
- 4) G. Wentzel: "Über die Richtungsverteilung der

- Photoelektronen," Z. Phys., 41 (1927) 828-832.
- 5) M. O. Scully and M. Sargent III: "The concept of the photon," Phys. Today, 25, March (1972) 38-47.
  - 6) M. Sargent III, M. O. Scully and W. E. Lamb, Jr: *Laser Physics* (Addison-Wesley Publ. Co., Reading, 1974) pp. 29, 222; 霜田光一, 岩澤 宏, 神谷武志共訳: レーザー物理 (丸善, 1978) pp. 31, 243.
  - 7) 矢島達夫: "光の量子効果", 量子力学と新技術, 日本物理学会編 (培風館, 1987) 第9章, pp. 182-203.
  - 8) Von O. Klein und Y. Nishina: "Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac," Z. Phys., 52 (1929) 853-868.
  - 9) Y. R. Shen: *The Principles of Nonlinear Optics* (John Wiley & Sons, New York, 1984).
  - 10) G. Gamow: *The Thirty Years That Shook Physics* (Doubleday, Garden City, N. Y., 1966) p. 22.
  - 11) R. J. Glauber: "Coherent and incoherent states of the radiation field," Phys. Rev., 131 (1963) 2766-2786.