

光と生命（一九三二年）

N・ボーア
天野 清訳

一 物理学と相補性

序説 私は、生命のない物質の性質を探究することを仕事としている物理学者ですから、光の治療効果についての知識を向上させるためにここに会合せられた科学者諸君の前で、お話するようにという親切なお勧めを承諾しますには、多少躊躇しないではありませんでした。人類の福祉に極めて意義深いこの学問の分野に、自ら貢献をするということは、私の能くするところではありませんから、せいぜい純粹に無機的に光の現象について、二、三の考察を致すことに止めなければなりません。

この光の現象は、あらゆる時代を通じて物理学者から特別に注目されてきたのですが、それには光が最も重要な観測の手段であるということも、少なからぬ理由だったのであります。けれどもこの機会に、そうした二、三の考察と関連して、物理学の限られた領域でえられた結果は、生きた有機体が自然科学の組織の中で占める地位について抱いている見解に対し、いったいどんな意義をもつであろうかという問題を論じるのは、おそらく興味のあることでありましょう。

生命の謎は究めつくせぬものですが、この問題は科学の発達などの段階でも現われておりました。それは本来科

学的説明というものが、複雑な事態を簡単なものに帰着させることである以上、当然であります。しかし、最近の原子論の発展から、われわれは自然の機械的（力学的）な記述には限界があるという思いがけない事実を教えられましたので、今日この古い問題は新しい興味をもって迎えられることになりました。この限界は、まさに光と物質との相互作用を詳細に研究して、従来物理的説明に要求されていたことと調停できないようなある性質が明らかになった結果、初めて認識されたのであります。これから明らかにしようと思いますが、この状況を会得しようとする物理学者の努力は、ある意味で生物学者が多少とも直覚的に、生命の諸問題に対して取ってきた立場をもっておられます。しかし、同時に私は、光があらゆる物理的現象の中で、おそらく一番簡単なものであり、ただ前述の純粹に形式的な点で生命と似ているだけであつて、生命の多様性に至つては、科学的探究の領域を遙かに越えたものであることも強調したいのであります。

光の波動性と量子論 物理的な見地からすると、光は空間的に離れた物体間のエネルギーの伝達としていいあらわすことができます。御承知の通り、こうしたエネルギー伝達は電磁理論で簡単に説明されますが、この理論は古典力学の趣意を拡張したものと見られ、遠隔作用と近接作用の対立を取り除くのに適したものであります。この理論によると、光は電氣的と磁氣的の振動が組み合わさつたものとして記述され、無線電信に利用されるような普通の電磁波とは、ただその振動の周波数が大きく、波長が短い点で違うだけであります。光が實際上ほぼ直線的に進行するということは、われわれが直接肉眼で見える限り、適当な光学器械を使うなりして、物体相互の位置を決定する場合によりどころとしていますが、実は、観察されている物体や器械の大きさと比べて、波長が非常に小さいという条件があればこそそうなるのであります。

ところが、この光の波動性という観念は、分光学で物質の内部構造を明らかにするのに非常に価値があつた色の現象を説明する根拠となるばかりではありません。これはまた、光学的現象を精細に分析する上にいつも重要な役

割を演じるのであります。典型的な例として、いわゆる干渉像だけをあげれば十分であります。これは同一の光源から出た光が二つの違った道を通って、白い衝立に到達した時に現われるものであります。この場合には別々の光束がそれ自身で生じるはずの作用が、両方の波の列が同じ位相をもつような、つまり両方の光束の中で電氣的と磁氣的の振動が同じ方向をもつような衝立の個所では強められますし、それらの振動が反対の方向をもつような、あるいは、波の列が位相が外れているといわれるような個所ではこの作用は弱められ、時には完全に消えることさえあります。この干渉像で光の伝播の波動的性質を極めて精細に証明することができますから、この表象は決して普通の意味での仮説として考えるべきでなく、問題の現象を記述するのに欠くことのできない手段と見るべきであります。

それにも拘^{かかわ}らず、私共が誰でも知っているように、エネルギー伝達の機構中に電磁論の立場からでは全く理解できない独特な原子的相貌が発見されたのを根拠として、光の本質に関する論争が近年再び新たに取りあげられました。それは、すべて光によるエネルギー伝達は個別的な過程から起り、その際いつも一つの光子といわれるものが交換され、そのエネルギーは電磁振動の周波数と、プランクの常数、いわゆる普遍的な作用量との積に等しいということが明らかになってきたからであります。光の過程の個別性と電磁論から要求されるエネルギー伝達の連続性との尖鋭な対立の結果、私共は、いまだかつて物理学で見られなかったような一つのディレンマに直面するのであります。それは波動像が不完全なことは目に見えているにも拘^{かかわ}らず、それを通常の力学的觀念に基づいた別の像で置き換えることが到底問題にならないからであります。とくに力説しておきたいのは、光子の觀念を導入するということは、光のエネルギーの担い手がはっきり決まった軌道をもった物質粒子であるという古い觀念に帰るのでは断じてないということです。即ち、すべて光の現象でそれを記述するのに波動像が決定的な役割を演じている場合には、光子の個々の軌道を追跡しようとするあらゆる実験は、今分析しようとしている現象そのものを破

壊してしまうということがいえます。それはちょうど、光のエネルギーが二つの路のどちらかを通って光源から衝突へ伝播することを確かめるために、片方の光束を不透明な物体で切断すれば干渉像が消えてしまうのと全く同様であります。

光の両性質の相互補足性 以上のようなわけで一方時空中を伝播する場合の連続性と、他方光の作用の原子性は、それぞれに光の現象の重要な諸相を表現しております。力学の立場からはそれらを調停できなくとも、決して直接撞着ダイレクト・コンタクトすることはありえないという意味で、同一事物の相互に補足的な側面として捉えなければなりません。なぜなら、力学的な表象に基づいて、一方の相かあるいは他方の相をさらに精細に分析するには、相互に相いれない異なる実験装置を必要とするからであります。これと同時に、まさにこうした事情がありますので、光の現象について因果的な記述を遂行するのを断念し、光によるエネルギー伝播の電磁的記述は、統計的な意味ではやはり成り立つという事実に基づいている確率計算で満足しておかなければならないのであります。

このような計算はいわゆる対応論的推論の典型的な応用であります。対応論は、力学的表象や電磁的表象を適当に制限して利用する場合に、作用量子そのものはこれらの理論の見地からは不合理なものと見なさなければならぬいではありませんが、古典物理的理論の合理的一般化と見られる原子現象の統計的記述を保存しようという私共の努力の一つの現われであります。

おそらく一見すると、ここに述べた事態は頗るすば不満足に思われるかも知れません。しかし新しい発見によって、従来それが一般に成り立つことは少しも議論の余地がないと思われていた観念に根本的な制限のあることが明らかにされたとき、科学の歴史に幾度も起りましたように、ここでこそ、われわれはこれまで調停できないと考えられた現象の間に一歩進んだ関係をさえも見つけ出す広い見地と大きい能力をえることで償われるのであります。まさにこのようにして、古典(力)学に作用量子で象徴化されるような特異な制限を加えて、およそ自然現象を力学的に記

述する場合に、いつも基本的な前提となっている原子独特の安定性を理解するための鍵が与えられたのであります。**原子の安定性** 原子の不可分性は機械的な概念では説明されないという認識は、なるほど、いつも原子論の特長でありました。そして物理学の発展によって、不可分の原子が電氣的な粒子、即ち今日元素の原子も化学的化合物の分子もそれから成り立っていると考えられている電子と原子核とで置き換えられました。この事態は本質的には変わりませんでした。

しかし、私がここで言及したのは、これの素粒子そのものの安定性の問題ではなくて、これらの粒子から構成された体系に必要な安定性であります。古典力学や電磁理論の特長である連続的なエネルギー伝達の可能性そのものは、その本質上、元素や化合物の特長をなす種々の性質を説明することは調停できません。否、古典理論は、現象を時空の中に秩序づけることを目的とするすべての測定が究極において土台としている、固体の存在という事実を説明することさえもできないのであります。

しかし作用量子の発見と関連して、われわれは原子や分子のあらゆるエネルギー変化は、原子や分子が、問題の体系に特長的なある一つの定常状態から、他の一つへ移る要素的過程と見なさなければならぬことを知りました。光が原子から発射されるか、吸収されるかする一つの遷移過程では、ちょうど一個ずつの光量子が発生するか、消滅するかします。で、われわれは分光学的な観測の助けを借りて、直接これら各々の定常状態のエネルギーを測定できるのであります。このようにして得られた知識は、原子衝突の際や、化学反応の際のエネルギー交換の研究からも確証され、極めて教えられるところが多かったのであります。

近年になって原子論は異常な躍進をとげ、現在では、原子の定常状態のエネルギーの値でも、遷移過程の確率でも、計算できる非常に完全な方法をもっております。ですから、原子の性質を対応論的推論の意味で説明する場合、その完全で首尾一貫している点にかけては、ニュートン力学で天文学上の経験を説明するのに比べても、決して遜

色がないのであります。もちろん、原子力学の問題を合理的に取扱うのは、新しい記号的な補助手段を導入して始めてできたことではありませんが、われわれが光の現象の分析からえた教訓は、この発展を検討する場合には、なおいつも決定的に重要であります。即ち、定常状態の概念を明確に用いることは、原子内の粒子の運動を力学的に分析することとは、排他的に補足し合うのでありまして、ちょうど前述の光量子の観念が、電磁的放射論と補足し合うのに相当します。実際、遷移過程の経過を細部まで追跡しようとする実験では、いつも原子と測定装置との間に制御することのできないエネルギーの交換が伴って、われわれの研究しようとしているエネルギーの遷移そのものを全くかき乱すことになりましょう。

因果性と相補性 古典的な意味での因果的記述は、問題にしている作用が作用量子に比べて大きく、従って現象を本質的に乱さずに、細かく分析することのできる場合にしか行なわれません。この条件が満たされていないと、われわれは測定装置と研究対象との間の交互作用を度外視する訳にいかず、何は措おいても、現象を力学的に記述するのに必要な種々の測定が、互いに他と相いれないような実験装置を使わなければならないという点を顧慮しなければなりません。この力学的分析の原理的な制限をすっかり会得するには、一つの物理的な測定では、対象と測定器械との交互作用を直接眼中におくことは決してできるものではないということも、はっきりさせておく必要があります。つまり器械自身は、観測手段という役割を演じているその性質上、同時に研究の中を含めるわけにはいかない所以であります。相対性の概念が、物理的現象はそれを時空の中に秩序立てるのに用いられる基準系に根本的に依存するものであることを示しているように、相補性の概念は、現象はそれを観測する手段から独立して存在するというわれわれの通常の観念を、根本的に制限する事情が原子物理学に現われてくることの象徴として役立つのであります。

生物学と原子理論

この力学の基礎の変革は、物理的説明ということであつた。何を意味しているか、という問題にまで関係してくるのですが、これは単に原子論の内部の状況を説明するのに決定的であつたばかりでなく、生物学の問題に対して物理学がどんな立場にあるかを論じるのにも、新しい背景を創りだしました。けれども、このことは決して、本来の原子現象では普通の物理現象よりも、もっと生きた有機体の性質によく似た様子が見られるという意味ではありません。一見したところでは、原子力学の原理上統計的な性格は、どの生活体にも見るような極めて微細な胚芽の中にすでにその種族のあらゆる典型的な性質を潜めている感嘆すべき微妙な組織とは、到底調和することがむずかしいようにさえ思われるかも知れません。けれども、機械的因果記述を許さず、相互補足的な記述でしか捉^{とら}えることのできない原子過程独特の合法則性は、生物の機構を理解する上にも、少なくとも無機的な物質の種々の特質を説明するのと同程度に重要であるということを忘れる訳にはいけません。たとえば、植物の炭素同化作用には、動物の栄養もかなりお陰を蒙っているわけですが、これを理解するには、光化学的過程の個性が必要なことは極めて明白なことであります。さらにまた、原子構造の機械的でない安定さが、植物の同化作用や動物の呼吸作用に重要な役割を演じる葉緑素やヘモグロビンのような非常に複雑な化合物の特性が現われていることを見逃すことはできません。

しかし、化学上の経験からとつたアナロジーは、生命を火に比べる古い喩^{たと}えと同様で、よく行なわれる時計仕掛のような純器械的なモデルに比較すること以上に決して生きた有機体を満足に理解させるものではありません。確かに生物の独自性は、通常の力学で分析される性状と典型的な原子的性状とが、無機的世界には全く相当するものがないように、互いに織り合わされているその特殊の組織の中のみ求むべきものであります。

感覚器官の機能 この組織がいかに微妙にできているかは眼の構造と機能とを研究して見ると興味深く教えられます。これにはまたも、光の現象が簡単なことが非常に役に立つてきました。この会合では一々細かく説明する必

要はありませんが、ただ人間の眼が光学器械としてどんなに理想的な性質をもっているか、眼科学の教える所を想起したいと思います。光の波動性の結果として、眼の中に像が形づくられるのに限界を与える干渉像の大きさは、まさに、脳に通じる別々の神経の路をもっている網膜の微小部分の大きさとほぼ一致するのであります。また極めて少数のおそらくは、ただ一つでも、光量子がこのような網膜要素によって吸収されれば光の感覚を起すのですから、一歩進んで、眼の感度は光の現象の原子的性格によつて置かれた絶対的限界まで達しているといわなければなりません。この両性質の点では、眼というものは、個々の光の過程を記録する適当な増幅装置を備えた上等の望遠鏡か顕微鏡と同じような性能に達しております。もちろんこのような器械的補助手段を用いて、われわれの観測能力を著しく増すことはできますが、しかし、光の現象の性質上制限がおかれる結果、眼ほどその目的に対して効能のある光学器械は想像することができません。このように、眼がいわば理想的に精巧にできていることは、最近の物理学の発展で始めて十分に認識されたことでもあります。これはある感官の印象を受け取ったり、このような印象に対する有機体の反応に役立つたりする他の器官もまたその目的に対し、同じように適応していること、また作用量子で象徴化されている原子的な性状が、適当な増幅の機構と結びついて到る所で決定的な意義をもっていることを推測させます。今までのところ限界を他の器官で見出すことができなかつたのは、おそらくは、すでに幾度も強調しましたように、他の物理的現象に比べると光の現象が著しく簡単だという点と関係があるのでありましょう。

物理的研究の限界 それにしても、根本的に原子的な性状が、生きた有機体の機能に対して重要な意義をもつことを認識するだけでは、まだ諸々の生物学的な現象の独自な本質を説明するには決して十分ではありません。従つて、決定的な点は、自然現象の分析にはなお一つの本質的な見地が欠けているのではないかという問題にあります。生物学的現象は実際上究め^{きわ}尽せないほど内容が豊富だという点を全く度外視しましても、物理的説明の本質に関する問題を作用量子の発見に促されてすでに行なわれたよりも、さらに深く追究しなければ、これに対する解答を与

えることは殆んど不可能でありましょう。生理学上の研究は生命のない自然について知っているのとは非常に性質のちがうような驚嘆すべき幾多の事実を、着々と明るみに出してきます。そこで一方では多数の生物学者は生命の独自の本質を、純粹に物理的基礎に立つて、眞実に理解できるようにすることを疑うようになりました。他方この——しばしば生氣論 (Vitalism) と呼ばれる——見解は、物理学には全く知られていない何か特殊な生命力が、すべての有機的生命を支配しているというような古い推測では、決して十分にその趣旨を表わすことはできません。なぜなら、われわれは殆んど皆、科学の本来の基礎は自然は同一の条件では同一の合法則性を示すという確信にあるとする点では、ニュートンに一致しているからであります。そこでもし生きた有機体の機構の分析を原子現象と同じ所まで進めることができたとしても、その場合無機的な物質とは何か異なつた性状を發見するとは殆んど期待しないのであります。しかしこのディレンマに直面して、生物学的研究と物理学的研究とで知られる性状は、直接互い同士を比較することはできないという点を考慮しなければなりません。それというのは研究対象を生かしておくという必要は、生物学的研究にとつて、物理学的研究の方にはそれに相当するものがない一つの制限を意味するからであります。たとえば、動物の器官を研究して一つ一つ原子がどう生活機能に参与しているかを示せるほど深入りすれば、その動物を殺してしまうことは疑問の余地がありません。従つて生きた有機体について実験する場合には、その置かれてある物理的な条件にはいつもある不確かさが残つております。そこで、かような意味で私共が有機体に許してやらなければならないごく僅かな自由でも、まさに彼らの最後の秘密を隠すに足るほど重大なものではないかという思想が湧いてくるのを禁じえません。この見地からすれば生命の存在ということは、一つの基本的な事実と考えるべきもので、それ以上さらに根拠づけることはできず、それを生物学の出発点と見なさなければならぬことは、まさに古典力学的な物理学の立場から不合理な要素に見える作用量子が、素粒子の存在と相まって、原子物理学の基礎をなすのと似ております。本来の生活機能がここに述べましたように、物理的化學

的には説明できないものであるということは、この意味において原子の安定性を理解することが機械的分析のよくするところでないのと同様であります。

物理学と生物学の方法の差異　しかし、このアナロジーをさらに追究していく際に、物理学の問題と生物学の問題とは本質的に違った側面をもっていることを念頭におかなければなりません。それは原子物理学ではまず何よりも、極めて簡単な形で物質の種々な性質に関心を持つているのですが、生物学で取扱う物質系の複雑な性状は、本質的な意義をもってあります。それというのは極めて原始的な有機体でさえも、すでに多数の原子を含んでいるからであります。古典力学の応用領域は、原子物理学で利用される測定装置にも及んでいるほど広汎ですが、それは多数の原子を含む物体を記述する場合には、作用量子のために起る相補性を大部分は度外視できるということに基づいていることもちろんであります。しかし、生物学上の研究では、一個一個の原子が置かれている外部の条件は、原子物理学の基礎的な実験の場合と同じようには、制御できないという点が特長なのであります。事実上厳密に考えて、いったいどの原子がある生きた有機体に属しているのかさえ決定できません。それというのはあらゆる生活機能には新陳代謝が伴っており、そこでは不断に原子が有機体に摂取されたり排泄されたりしているからであります。

この物理的研究と生理学的研究との根本的な相違の結果として、物理的な表象を生命現象へ適用する場合には、原子力学で行なったように、力学的因果的記述の領域と本来の量子的過程とを分離することに相当するような、はっきり決まった限界を引くことは決してできないことになります。もつともこの事態の結果として上述のアナロジーにおかれる制限は、主として物理学とか力学とかいう言葉をどんな意味に使うかという約束にもよることです。一方では、生物学的における物理学の制限という問題は、もし物理学という言葉でその語源の意味に一致して、ただ自然現象の記述をいうことを了解しようとすれば、全く意味をなさなくなってしまうます。他方、もし日常の

言葉づかいのようにメカニクスという言葉を現象の一義的な因果記述を表わすだけに用いようとするならば原子力学メカニクスというような表現は誤解を生むかも知れません。

私はここでこのように言葉の争いディアレクテックにすぎない問題にこれ以上立ち入ろうとは思いません。

ただ上述のアナロジーの核心は、一方すべての物理的分析に必要な細分と、他方個体の自己保存とか、繁殖とかいう極めて特長的な生物学的現象との間に成立する典型的な相互排他的な補足関係であることを強調しておきたいと思えます。さらにこの事態の結果として、生命の本質に考慮を払わなければならないような問題では、力学的分析では何ら容れる余地のない、合目的性の概念にも、ある種の応用領域があるということがいえます。この意味において生物学での目的論的推論の役割は、原子物理学で作用量子を合理的に考えに入れようという、対応論的推論で定式化されている努力を想起させるものがあります。

心理作用の問題 生きた有機体に力学的概念が適用できるかどうかという問題を取扱う場合、有機体をまるで他の物質的な対象と同じように見てきました。しかし生理的研究の特長であるこの態度は、何も生命に結びついていゝる心理的過程を無視するわけでないことは取り立てていうまでもありません。むしろ原子物理学で力学的表象が制限されることを認識すると、これは生理学と心理学とを特長づける外見上対立した見地を調停するのに極めて適しているように思われます。即ち、原子力学で測定装置と研究対象との間の交互作用を顧みる必要があるということ、まさに心理的分析の場合に出会う独特の困難を想起させるのでありますが、その困難というのは、意識の内容は、その要素の一つに注意を向けようとするや否やすぐに変わってしまうという事実から由来するものであります。この最後のアナロジーは、生物学的な問題の特殊な性格を必要に応じて顧慮すれば、いわゆる精神物理的並行性のせんめい 説明に新しい出発点を与えるものでありましょう。けれども、これ以上進むことはわれわれの題目からあまり離れることになるかも知れません。ただこれに関連して私がつきり力説しておきたいのは、ここに述べたような考察

は、原子現象を分析するのに因果的記述の適用が制限されるということから、物質的過程へ直接心理的に働きかけることに新しい可能性が開けたと見るあらゆる企てとは、雲泥の相違があるということであります。たとえば、もし人あつて、意志は、原子論に基づき確率的計算しかできない有機体中の、原子的過程を統御することにその活動領域があると考えたとすれば、これはここで述べた精神物理的並行性の説明とは調停できない見解であります。私共の立場からする之、意志の自由の感情は意識生活に独特な一つの特性と見るべきもので、それと物質的に並行するものは、力学的因果記述も至りえず、また原子力学の統計的法則の明確な適用を十分徹底させる物理的研究をも許さないような、有機的機能の中に求むべきものであります。なおここで、およそ「説明」概念そのものの分析が、その本質上、われわれ自身の意識的な活動を説明する点ではいつも一つの断念をもって始まり、それに終らなければならぬということもいってもおそろく形而上的な瞑想に陥ることにはなりません。

結論 結論として私は、この私の考察から、物理的科学や生理的科学の将来の発展の可能性に対して、何か懷疑めいたことをいい表わそうとしたのでないことを強調しておきたいと思ひます。このような懷疑は、最も基本的な概念に限界を認識したそのことが、まさに科学が多方面な徹底的な発展をきたす結果となつたこの時期に當つて、一個の物理学者にとつて思いもかけないことであります。同様に生命そのものの説明を断念せざるをえなかつたということは、現代生物学のあらゆる分野を通じる（治療術についても極めて有効であつた）驚嘆すべき進歩に対して何の障害ともなつておりません。われわれは物理的基礎からは、健康と病氣との間に何ら明確な境界を引くことができないかも知れません。けれどもフィンセンニールス、一八六〇—一九〇四、デンマークの医学者、光線療法の開拓者、一九〇三年度ノーベル生理学賞受賞者の開拓的な研究以来、極めて順調に継続されている、光線療法の医療効果の研究とその物理的基礎の探究を緊密に結びつけることを特長とする進歩の大道を逸脱しなければ、それはこの會議の意義深い課題の解決に対して、何ら懷疑の根柢を与えるものではないのであります。

-
- 『世界大思想全集』第35巻（河出書房新社、一九六〇年四月）所収。
 - 読みやすさのために、適宜振り仮名をつけた。
 - PDF化には \LaTeX 2_εでタイプセッティングを行い、`dvipdfmx`を使用した。

科学の古典文献の電子図書館「科学図書館」

<http://www.cam.hi-ho.ne.jp/munehiro/sciencel1b.html>

「科学図書館」に新しく収録した文献の案内、その他「科学図書館」に関する意見などは、「科学図書館掲示板」

<http://6325.teacup.com/munehiroumeda/bbs>

を御覧いただくか、書き込みください。