

光の粒子性を押し立て古典論の限界に触れる量子力学入門教材の開発研究

阿部 春樹*・舟橋 春彦

京都大学大学院 人間・環境学研究科 相関環境学専攻
〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町

要旨 量子力学は現代科学の礎であるが、その難解さから世間一般には理解が浸透していない。現行の学校教育においては高校理科の科目「物理」に基礎事項が配当されており、履修する生徒は限られる。そこで、意欲の高い中・高校生、更には広く一般大衆に向けて量子力学の基礎を紹介する授業案を構築することを目指した。本研究では、R. P. Feynmanの講演録を訳出した『光と物質のふしぎな理論 私の量子電磁力学』を底本として、予想と実験に基づく授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉を考案、実験授業を行った。講演に倣い光の粒子性を押し立てて授業を進めることで、古典論の破綻を体感し、量子論へ興味・関心を抱いてもらうこと、予想と実験が両輪となり発展する科学の方法論に触れてもらうことを主目的とした。板倉聖宣が提唱した「科学的認識の成立過程」の理論は、狭義の仮説実験授業のみならず科学全般に対する教育・研究にも適用され得る。当時のFeynmanの講演では実施されていない実験を教室でも実施できる装置・演示方法を構築すると共に、選択肢を伴う設問文を考案してより明確に問いかけている。研究目的の達成の如何を、この授業案を用いた実験授業の後に受講生に求める評価・感想から検討した。

1. はじめに

本稿は量子力学の入門的な教材の開発研究について論じたものである。量子論特有の性質である「粒子と波動の二重性」という学習の難所に対し、粒子性を前面に押し立てるといふ特異な戦略を採用し、

- ・古典論に基づく認識の限界に触れ、量子というミクロの世界へ興味・関心を抱くこと
 - ・予想と実験を積み上げる、科学の世界観の一端に触れること
- という二つを目標とした。

およそ100年前、幾多の著名な物理学者たちの苦闘の末に誕生した量子力学は、現代科学の礎である。普段の我々の生活に欠かせない光や電子の挙動は量子論に従い、あらゆる電子機器に用いられている半導体の原理は量子力学なしでは説明で

きない。昨今大きな注目を集めている量子コンピュータを始めとする量子情報技術もまた、古典物理では見られない量子論特有の性質に端を発している。このように量子論は、我々の生活に深く根付いている。

その一方、現代科学の基盤である量子力学は、世間一般に馴染みがない。その要因として、量子力学の専門性の高さが挙げられる。現行の学校教育において、生徒が初めて量子論に触れるのは高校理科である。科目「物理基礎」を終えた後に主に理系進学希望の高校生が履修する科目「物理」の授業において量子論が扱われており、学ぶ人が限られる。これは、中学理科や科目「物理基礎」でも取り扱われている古典力学や電磁気学とは大きく異なる点である。大学物理における量子論・量子力学の講義は、主に物理学を専門とする学科で2年次後期から3年次にかけて開かれており、非常に専門性が高い。仮に理系学部に所属してい

たとしても、物理学を専門とはしていない学生が受講する機会は少なく、また仮に興味があっても、粒子と波動の二重性や Hilbert 空間から始まる一般的な教科書やそれに従って進められる講義をすぐに受け入れて理解することは非常に難易度が高いと言える。

科学史・教育学・科学教育史を専門とした板倉聖宣は「全て認識というものは、実践・実験によってのみ成立する」と提唱した [1, p203]。これを、「科学的認識の成立過程」の理論、と呼称する。板倉はこの考え方にに基づき、授業の中で「問題→予想→討論→実験」という過程を繰り返し積み上げることで科学の最も基本的な法則や概念を学ぶ「仮説実験授業」を提唱しその発展に尽力した。仮説実験授業は、誰もが学ぶに値することを扱う。しかし「科学的認識の成立過程」の理論は、狭義の仮説実験授業のみならず科学全般に対する研究・教育にも適用され得るものである。

量子力学について「科学的認識の成立過程」の理論に従った教育が行われるべきと考え、授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉を考案した。これは、量子力学の理解を妨げる「粒子と波動の二重性」の困難に対して、R. P. Feynman が行った一般向けの講演録 *QED: The strange theory of light and matter* [2] 及びその訳書『光と物質のふしぎな理論 わたしの量子電磁力学』[3] に沿うという方針を試みたものである。光の粒子性を前面に押し出した講演で Feynman がなした問いかけや実験方法の提示は、板倉が提唱した「科学的認識の成立過程」の理論に見合うものであった。授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉では、当時の講演のその場では実施されなかった実験を教室で実施できるよう装置・演示方法を構築するとともに、その実験の結果を予想する選択肢の伴う設問文を考案してより明確に問いかける。このように「科学的認識の成立過程」の理論を強く意識し作成した本授業案は、受講生に量子論という未知との出会いを提供する。この「遭遇」は、各々が持っていた光の描像との葛藤をもたらし、そのイメージを省みる機会を与える。予想と実験を繰り返す中で、量子論へ興味・関心を抱いてもらうことを図る。

授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉の冒頭では、以下のような Feynman の言葉を紹介している。「ある理論を気に入る入らないということが肝心なのではなく、その理論が実験の結果を予測できるかどうかの方が、はるかに大切だ」[3, p14] という言葉の通り、物理学・科学の研究においてはある仮説の実体が定かでなくても、実験を以てその仮説の検証をする、という過程を幾度となく積み重ねることで世界の探求を進めていく。「科学的認識の成立過程」の理論に則り作成した授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉は、単なる量子論入門の枠を超え、科学の方法論の紹介に寄与することを期するものである。

なお量子力学と量子論は厳密に区別されるものではないが、本稿では両者を意図的に使い分けている。「量子力学」は、前期量子論から始まり Schrodinger 方程式などの定式化を以てミクロの物理現象を記述する、例えば大学の専門科目名にあるような物理の一分野として用いる。一方の「量子論」は広くは前期量子論から量子力学、更には場の量子論までを包括するものとして扱われるが、ここでは特に古典論では説明できない実験結果の矛盾を克服していった前期量子論を強く意識して用いる。

2. 既存の量子力学教育と物理教育研究

現行の指導要領における量子力学の取り扱いについて簡単にまとめる。

中学理科では、「物質は原子や分子からできていること」や「物質を構成する原子の種類は記号で表されること」をごく簡単に学ぶ [4]。高校物理に目を向けると、文系理系ともに学ぶ機会がある科目「物理基礎」では、量子力学に関する話題は取り扱われていない。理系の高校生が学ぶ科目「物理」の授業において「様々な運動」「波」「電気と磁気」に並ぶ四つ目の柱として「原子」がある [5]。この科目では、電子の電荷や質量から始まり、粒子と波動の二重性や原子のスペクトルについて簡単に学ぶ。科目「物理」が、学校教育の場で量子力学に触れる最初の間である。

大学物理では、二年次後半から三年次にかけて量子力学の授業が配当されている。専門書に拠って導入に用いられる具体的な歴史的実験は異なるが、一般には粒子と波動の二重性や Bell の不等式といった古典論の限界を紹介し、基礎方程式である Schrödinger 方程式へと繋いでいく [6~10]。いずれも古典論が破綻し、量子論が成立する大まかな経緯について記されているが、それは既に科学者たちによって支持されている研究の成果としていわば「押し付け」られるものであり、直感に反する量子論の性質は、特に物理学を専攻としている人以外には容易に受け入れられるものではない。

量子力学の専門性の高さから、物理教育研究において量子力学の教育研究は少ない。それらを分類・分析したレビュー論文 [11] によれば、量子力学の教育研究は殆どの場合で学部生或いは大学院生相当を対象として行われており、量子力学は初学者には変わらず非常に難易度が高い。

以上のように、量子力学の教育は古典論の崩壊を「紹介」するところから始まる。本研究では、既存の量子力学教育のような単なる文章や数式の上の「紹介」にとどまらず、次章で詳述する「科学的認識の成立過程」の理論に従い予想と実験を繰り返すことで古典的な認識の崩壊に「遭遇」してもらおうことを目指している。

3. 仮説実験授業

3.1 科学的認識の成立過程

板倉聖宣 (1930-2018) は、『理科教室』(1966年6月号)に発表した論文「科学的認識の成立過程」において、科学的認識の成立条件について、

「全て認識というものは、実践・実験によってのみ成立する」……………(*)と提唱した [1, p203]。実験を通じて、初めて科学的な認識が成立するというものである。ここでいう実験とは、目的意識的に対象に働きかけ予想を確かめる活動を指す。

当該論文の題に倣い、以降は上記の理論(*)を「科学的認識の成立過程」の理論と呼称することにする。板倉は、科学史の研究からこの理論を

導いた。そして、「仮説実験授業」を組織し、(*)を検証・応用した。

3.2 仮説実験授業の成否の判断

仮説実験授業を実際化するにあたりその成否は授業後受講生に求める評価・感想に問う。板倉は授業の成功失敗の条件の一つとして、「クラスの過半数の子どもがこの授業をおもしろい、たのしいということ——少なくとも『つまらない』『いやだ』という子どもが例外的にしかないこと」[12, p43]と述べている。

成否を判断するために、〈授業がたのしかった度合い〉を

5. とてもたのしかった。
4. たのしかった。
3. どちらとも言えない。
2. つまらなかった。
1. とてもつまらなかった。

の五段階から、授業を受けた後に選んでもらうことがある。これを特別に〈たの度〉と呼称することにする。

また板倉は、受講生の気持ちを勝手に推測せずに、彼らに自由に感想を書いてもらうことの重要性についても強調している [12, p21]。仮説実験授業は、評価・感想を問い成否を確かめる実験授業を積み上げることで、再現性を確立する。

3.3 授業書の構成と運営方法

仮説実験授業は、授業内で「問題に対して予想を立て、討論をし、実験をして確かめる」という過程を積み上げ科学上の最も基本的な概念や原理・原則を教えることを目的としている。これを実現する方法論が「授業書」である [1, p224]。

仮説実験授業は、その教育内容に応じて十分に準備された授業書に従って運営される。例えば《ものとその重さ》・《ばねと力》・《自由電子が見えたなら》など多くの優れた授業書があり、クラスや教室の個性を越えて受講者に歓迎されている。これらは多くの精力的な実験授業を経て、授業科学の成果として再現性を確立している。

授業書は、「問題」を中心に構成されている。この「問題」は、「すべての児童、生徒が各自で

予想をたて、自分自身で考えて討論に参加し、実験に訴えてその真否を明らかにすることを要求するもので、通常、選択肢を含む問題・予想・討論・実験の4段階からなっている」[1, p224-p225] ものである。

この「問題」には、必ず予想の選択肢が与えられている。問題文の一部としてあらかじめ選択肢が用意されていることで、「問題」の意味が明確になる。

「問題」と同じように生徒に問いかけるものとして、「質問」がある。これは「問題」のように予想をたてて実験によって客観的にその真否を確かめられるものではなく、過去の経験や記憶を尋ねるものである。「質問」は授業の導入部分や、生徒たちの経験と授業内容を結びつける。

他に重要な構成要素として、「読物」がある。これは、「授業で確認された科学の基礎的な概念・法則を中心にした話題を提供し、子どもたちの視野を広げ、興味・関心をかきたてることをねらうものである」[1, p233]。

他、「新しい科学の言葉」「研究問題」「練習問題」「資料」などの構成要素があるが、本稿で取り扱う授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉には無いため、説明を割愛する。

仮説実験授業には、以下のような授業運営の原則が存在する。これは個々の授業書の構成に拠らない、一般的な原則である。

授業は、授業書を読んで課題を理解するところから始まる。「質問」は選択肢があれば挙手させるものの、深入りせずごく簡単に扱う。「問題」の場合、問題文に対して自分1人の予想をたててもらい、授業書に記入させる。

記入が終わったら、挙手を求め、クラスの予想を集計する。その選択肢を選んだ人数を数え、黒板上に板書する。集計が終わったら、それぞれの選択肢を選んだ理由を発表してもらう。

選択肢毎に選んだ理由の発表ののち、他の選択肢の理由に対する質問や反論があれば、それについて討論する。この討論は発言を求めた者にのみ行わせ、発言を強要しない。

討論を経て、先に選択した予想の変更を申し出

る者がいれば、黒板に板書した予想の分布にその移動を記載する。

「問題」に対する予想の変更がなければ、実験に移る。「実験はどの予想が正しいかということを示すことが可能なだけの正確さを持って行われなければならない」[1, p247] ものであり、必要以上の高精度の測定はかえって理解の妨げになることが往々にして生じるので、注意が必要である。また、「実験の本質は対象に対して具体的な予想をもって問いかけることであって、自ら手足を動かすことではない」[1, p249] ことから、必ずしも生徒各自で実験するには及ばない。教師実験でも、十分に大きな印象を残すことができる。

仮説実験授業は、以上の過程を授業の中で積み重ねていく。その一連の「問題」の最終段階で、クラスの少なくとも90%以上が正しく予想をたてられることを期し、個々の問題や実験方法、問題群の配列について、実験授業の実験結果と照らし合わせながら、研究・開発を進めていく。

本稿で取り扱う授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉でも、以上の運営方法・開発の進め方に倣った。ただし量子力学は、仮説実験授業が扱う「誰もが学ぶに値すること」には当たらない。そのため、仮説実験授業の狭義の「授業書」と区別して、授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉とし、授業案と呼ぶに留めた。

4. 授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉

授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉は、*QED: The strange theory of light and matter* [2] の訳書『光と物質のふしぎな理論 わたしの量子電磁力学』[3] を底本にした。これらは、1983年に行われたカリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)におけるR. P. Feynmanの講演が元になっている。Feynmanは、1965年に朝永振一郎・J. S. Schwingerと共にNobel物理学賞を受賞した著名な物理学者であり、UCLAでの講演は、彼らのNobel賞受賞の功績である量子電磁力学を、一般の人々に向けて紹介す

るものであった。

講演の大きな特徴として、光の粒子描像を押し出して話を進めているという点が挙げられる。一般には光は粒子と波動の二重性という性質を有しているとされているが、この性質は日常で培われる我々の直感に反しており、非常にイメージし難いものである。この講演の文脈や問題配列に倣った授業案〈フاینマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉では単一光子の計数実験から説き起こし、「光は粒子である」という描像を一貫して押し通して議論を展開しており、初修者は二重性に煩わされることがない。

量子電磁力学に沿い「粒子と波動の二重性」への問いを避けた教案の先行事例として『アドバンス物理 AS』[13]の第7章がある。「量子的振る舞い」を論じるその本質は後述の「ルール」と通底するが、本研究は以下の点に特色がある。

講演における Feynman による問いかけや実験方法の提示は、板倉が提唱した「科学的認識の成立過程」の理論に見合うものであった。Feynman の講演の運びを仮説実験授業の授業書のように選択肢を設けた「問題」に整えることで、講演の問題意識を受講生が更に受け取りやすくなることを期待した。その上で当時の講演では実施されなかった単一光子計数実験を比較的安価かつ簡便に教室で実施できるよう装置・演示方法を開発し、選択肢の伴う設問文を考案してより明確に問いか

けた。

4.1 授業案〈フاینマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉第1部

以下に授業案の目次を示す(表1)。底本では、第1部は「はじめに」と銘打たれている。光は数えることができる、という実験を紹介するところから始まり、ガラスの一表面での光の部分反射、二表面での光の部分反射、光の色へと話題が移っていく。光が粒だと考えることで、部分反射という光の波動的な性質がどのように説明されるのか、それが、第1部の主要な内容である。この点から、授業案における第1部には「光の正体」というタイトルを与えた。

暗箱の中での光子1個単位まで検出できる感度でのフォトンカウンティング実験について以下に詳述する。この授業案では光の粒子性を押し立てて授業を展開する。冒頭【質問1】で「光が数えられるものである」ということを強く印象付けることを狙い、教室で実験できる可搬な装置を考案した。

実験装置を図1に示す。単一光子計数可能な光電子増倍管が内蔵されたフォトンカウンティングヘッドで、LEDの光を捉える。暗箱の内寸は横幅が400 mm、縦幅が320 mm、深さが200 mmである。

使用した定格1.6 Vの赤色LEDは100 Ωの抵

表1 授業案〈フاینマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉第1部及び第2部 目次

<p>〈第1部 光の正体〉</p> <p>【質問1】光の正体はどうなっているのだろうか 読物「光は数えることができる」 読物「光はただの“粒”なのか」 読物「光の部分反射」 読物「二つの面による反射」</p> <p>【問題1】ガラスの二つの表面による反射はどうなっているだろうか 読物「部分反射の不思議」</p> <p>【問題2】ガラスの厚さを次々変化させると反射される光子の数はどうなるか 読物「ガラスの厚さによって反射される光子の数は変わる」 読物「矢印とストップウォッチのお話」</p> <p>【質問2】光の色は矢印とストップウォッチのルールで説明できるだろうか 読物「光の色」</p>	<p>〈第2部 光の粒子〉</p> <p>【問題1】入射角と反射角が等しくないような光の反射は起こるだろうか 読物「鏡に当たった光の反射」</p> <p>【問題2】削った鏡によって強い反射は起こるだろうか 読物「回折格子による反射」</p> <p>【問題3】色の違う光でも削った鏡で強い反射は起こるだろうか 読物「回折格子による白い光の反射」 読物「空中から水に差し込む光」</p> <p>【質問1】最も早くたどりつけるのはどの経路か 読物「所要時間が短くて済むのはどこか」</p> <p>【質問2】蜃気楼はどうして起きるのか 読物「蜃気楼の原理」 読物「光はなぜまっすぐ進むのか」</p> <p>【問題4】遮光ブロックで経路を狭めると光の広がりはあるだろうか 読物「不確定性原理」</p>
--	---

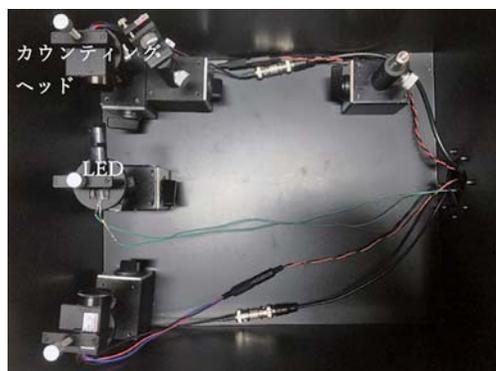


図1 暗箱内の実験装置。【質問1】の後にフォトンカウンティングを行い光の粒子性を印象付ける

抗と暗箱外部の電源に接続されており、電源電圧を1.5V程度から1.1V程度まで上下させることで、LEDを徐々に暗くしたりすることができる。まずは電源と接続した暗箱外部のLEDを用いてこのことを印象付け、その後に暗箱内部での光子の計数を演示する。

光子を数えるために使用したのは、浜松ホトニクス社のフォトンカウンティングヘッド(H10682-110)を用いたサイエンテック社のフォトンカウンタ(SUC-100)である。フォトンカウンティングヘッドH10682-110は、単一光子検出感度を有する光電子増倍管(PMT)を内蔵している。光電面の大きさは直径8mm、感度波長範囲は230nm~700nm(バイアルカリ光電面)である。暗中で30分放置した後のダークカウントの試験成績は2.0個/秒であり、図1の暗箱内で30分放置した後では2.5個/秒であった。本研究では、光電面に幅約0.3mmのスリットを設置し、後の実験のために幾何光学を制限している。

フォトンカウンタSUC-100は、カウンティングヘッドの計数率をコンピュータ(PC)へと送る。PC側ではリアルタイムで計数率を見ることができる。この製品は、ヘッドからカウンタに入る回路を繋ぎ変えることで、計数時にヘッドからフォトンカウンタへと流れる一光子検出のロジック信号を外に取り出すことができる。

以上の装置を用いて、光が粒として観測されていることを演示する。演示に際し、二種類の方法を実践した。一つは、端末に表示される計数率と、

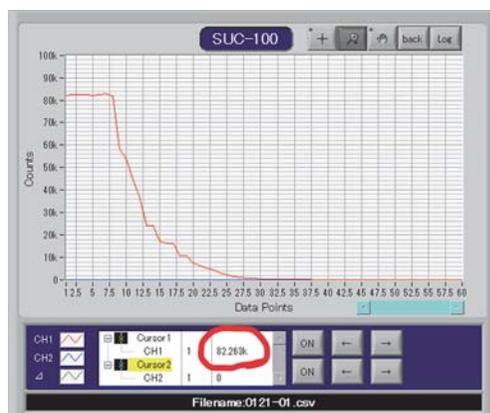


図2 LEDの光量減少に応じて計数率が減る様子を示したグラフ

時間ごとの計数率のグラフを見てもらうという方法である(図2)。

図2の見方を説明する。図下部で囲んだ部分には、フォトンカウンティングヘッド(CH1)の計数率が表示される(図2では82.263k=82263個/秒)。ここでは1秒ごとに60回測定した。また図の中央にあるグラフは、時間(横軸)と計数率(縦軸)との関係を示したものである。暗箱外部の電源電圧を1.5Vから段々と下げ、LEDを暗くしていくことで、光子の個数がどんどん減っていく暗箱内の様子をグラフから視覚的に確認することができる。

もう一つは、計数の頻度を耳で体感する方法である。ヘッドからの光子検出のロジック信号を、その入力のタイミングで短いブザー音を出す回路に繋ぎ、光量の変化に伴う音の変化を聞いてもらう。暗箱内部にあるLEDの光の明るさに応じて、ブザー音の頻度が変わる。図2のグラフと照応すると、電源電圧が1.5VのときのLEDの光量では毎秒100000個近く計数されて高い頻度でロジック信号が送られ一瞬だけ音を鳴らす回路の音は連続的にしか聞こえない。しかし、電圧を徐々に下げLEDを暗くし平均の計数が毎秒100個を下回るようになってくると、回路の発する音がだんだん離散的に聞こえるようになる。光の到来が離散的であることを聞き取り、光の粒子性のイメージを形成する契機となる。

光が離散的な粒からなっていることのイメージ



図3 水が分子という粒からできていることから連想して「光子」のイメージを培う分子模型の提示

を深めるために、フォトンカウンティングの他に、水とのアナロジーを意識した提示物も使用した(図3)。

授業案では、「わたしたちが普段飲んでいる水について考えてみてください。粒からできているようにはとても見えませんが、私たちは水が分子と言う非常に小さい粒からできていることを知っています」という文章を記載している。光と同じく、水もまた普段の生活では連続的にしか見る事は出来ない。しかし、中学理科で「物質は原子や分子からできていること」[4]を学ぶため、水に関しては分子からできていることに疑いを持つ生徒はほとんどいないであろう。そこで、1億倍の水分子モデルを用い、水がコップから流れて出ているさまを表したモデルを提示することで、光もまた粒でできているという考え方を後押しすることができる。

以上のようにして強く印象付けた光の粒子描像を以て、授業案は光の部分反射へと話題を展開する。まずはガラスの表側のみ、一表面での反射を扱う。一般的なガラスに光子が100個入射したとすると、そのおよそ4個が反射されることを紹介する。この事実は、【質問1】の実験で後押しされた粒子描像では容易に説明ができないものである。

ここから、ガラスの表側の面と裏側の面での反射を取り上げる【問題1】、ガラスの厚さと反射される光子の数にどのような関係があるのかという【問題2】へと続く。これらの問題に対し、教室で結果を演示できる実験を構築した。

【問題1】では、ガラスの表側の面と裏側の面という二表面での反射を問う。光子がガラスに100個入射したとすると、一体何個の光子が反射されるだろうか。一表面では反射される光子の割合がおよそ4個であることから、二表面ではおよそ8個の光子が反射する、という予想が最も多いことが予想される。実際、5章以降で詳述する実験授業ではいずれのクラスも8個が多数派であった。ところが、8個になるのはほんの一部のガラスだけで、実際は8個より大きい値も、小さい値もとることになるのである。

【問題2】では、ガラスの厚さを段々厚くしていくと反射される光子の割合が増えるのか、減るのか、それ以外なのか、以上の三つの選択肢を提示して問いかけた。実験授業では、ガラスの厚さによって単調に変化するという予想が殆どであった。ところが実験をしてみると、ガラスの厚さによって、反射される光子は0個から16個を上下するのである。

これらの「問題」に対して行われる実験結果は、第一部の冒頭で押し立てられた光の粒子描像からは容易に想像し得ない驚きに溢れたものである。この二つの問題の実験を実施するために構築した実験装置を示す。今度はLEDよりも単色性が高く可干渉長の長いレーザーからスライドガラスに向けて光を照射し、ガラスで反射及び透過した光をフォトンカウンティングヘッドで捉える(図4及び図5)。

先ほどの演示実験とは異なりフォトンカウンティングヘッドを2つ用いており、反射光と透過光を同時に測定することが可能になっている。もう一つのフォトンカウンティングヘッドも先のもと同じ型(H10682-110)であり、光電面の大きさや感度波長範囲については同一である。一方、暗中で30分放置したあとのダークカウントの試験成績は9.8個/秒であり、ダークカウントが多い。しかし、後述する演示実験は計数率が1000個/秒以上のオーダーで行っており、実験が「どの予想が正しいかということを示すことが可能なだけの正確さを持って」[1, p247] いるため、以降ダークカウントについては考慮しない。

実験内容を詳述する。図中右上の緑色レーザー

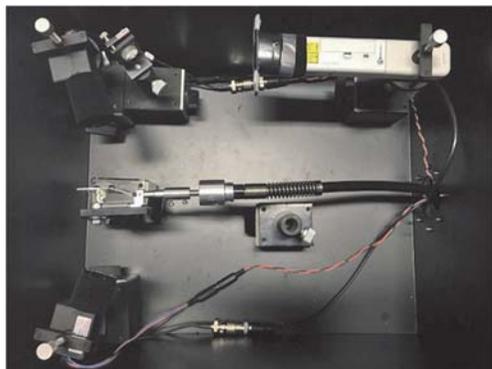


図4 ガラスによって反射される光子を計測する実験装置

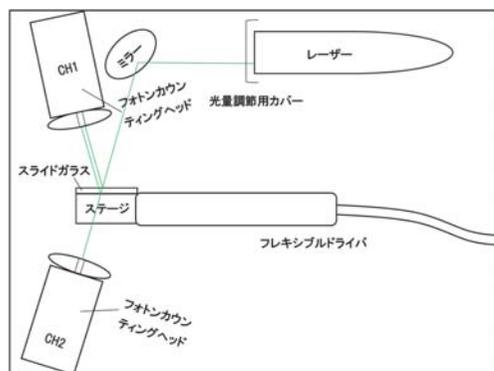


図5 図4の実験装置の模式図

ポインタ（波長：532 nm）からスライドガラスへと光を照射する。ヘッドが数えられる光子の数の上限に対してレーザーは非常に明るいので、偏光板を重ねて作成した減衰フィルターを被せてある。図中左上のヘッド（CH1）で捉える反射光と、左下のヘッド（CH2）で捉える透過光の和が入射光であるので、入射光に対する反射光の割合を示すことができる。「ガラスの厚さによって、反射される光子は0個から16個を上下する」のはあくまで理想的なケースであり、これに近づけるようそれぞれのヘッドに幅約0.3 mmのスリットを取り付けている。

スライドガラスは凡そ二つの面が平行であるものの、完全に平行とは言えない。したがって光が当たる場所を変えるとごく僅かだが厚さの違いが生じる。スライドガラスを動かすことで表面の反射と裏面の反射とで光路長に僅かな変化が生じ、

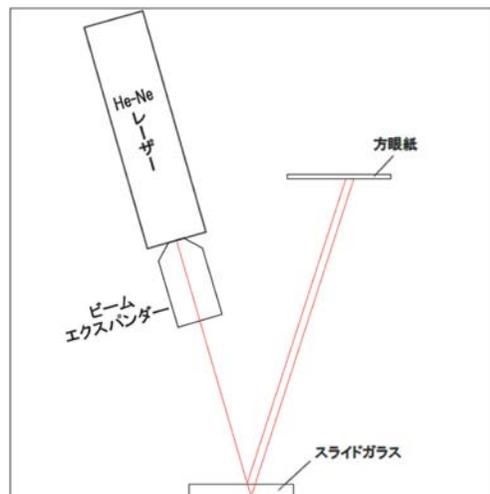


図6 スライドガラスの干渉縞を観測する光学系

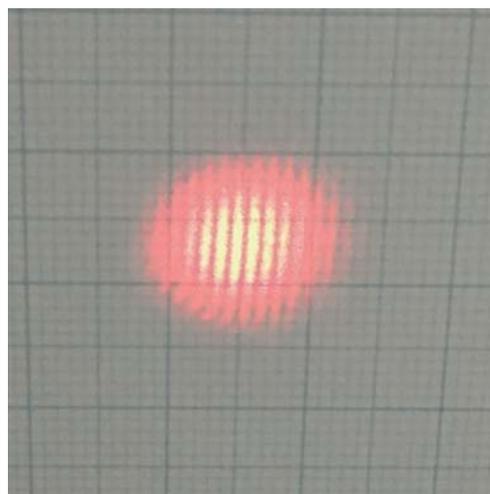


図7 1 mm 方眼紙に映したスライドガラスの干渉縞

反射率が増減することになる。

図6のような光学系を用いて赤色 He-Ne レーザー光（波長：633 nm）を照射し、スライドガラスの干渉縞（図7）を観察することができる。図7から、このスライドガラスは1 mm 当たり約320 nmの厚さの違いが生じていることが分かる。

100 ms ごとに600回（計60秒間）測定することで、【問題1】【問題2】の予想を確かめる実験を行うことができる。【問題1】ではある一点での反射する光子の割合を演示した。【問題2】では測定開始と同時にステージを動かして光が照射

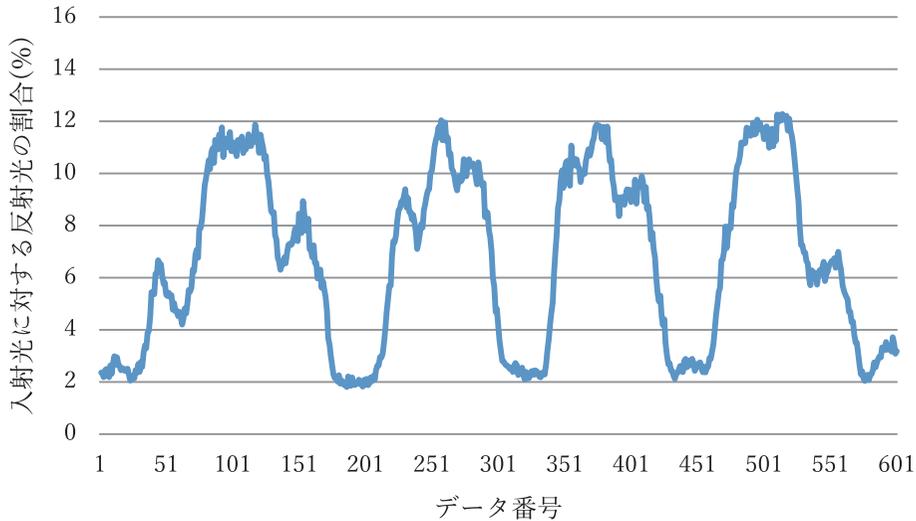


図8 スライドガラスを移動させた際の反射率の増減を示したグラフ

される位置を変えることでガラスの厚さを変化させた。100 ms ごとのデータそれぞれに対し反射光と透過光の和で入射光を計算し、入射光に対する反射光の割合をグラフにした。

図8に示したのは、後述の実験授業（クラスⅢ）で演示した実験のデータである。このデータにおける入射光に対する反射光の割合の最大値は12.3%、最小値は1.8%であった。最大値と最小値の平均は6.8%である。

殆どの受講生の予想は「ガラスが薄ければ薄いほど全て抜けてしまいそうだから、ガラスが厚いほど反射する光子の数が増えるだろう」または「ガラスが厚いほど裏面に達する光子は少ないだろうから、反射する光子の数は減るだろう」というものであった。これらの予想に反し、ガラスの厚さを厚くしていくと反射する光子の割合は、単調な変化ではなく、最大値から最小値まで何回も増えたり減ったりするのである。

暗箱内での実験であるため、実験装置のブラックボックス化を出来るだけ避けるという意味で実験の内容が分かりやすくなることを期待し、「手でドライバを回していくと段々とステージが動いていく」というある種原始的な実験装置を採用した。その結果、回す速度が一定でなかったり一瞬逆向きにドライバが巻き戻ったりするため、理想的な正弦関数ではなく凹凸がやや目立つ結果に

なる。しかし、ガラスの厚さを変えていくと反射する光子の割合が何回も増えたり減ったりすることがはっきりと示せており、この実験は「どの予想が正しいかということを示すことが可能なだけの正確さを持って」[1, p247] いるのである。

このようにして驚きと共に示された光の部分反射の実験結果を粒子描像で説明するため、Feynman は光子に対し「ストップウォッチ」と「矢印」という属性を伴わせる。

1. 一つの事象が起こる確率は、矢印の長さの自乗に等しい。
2. 起り得る全ての経路の矢印を足し合わせる。
3. 矢印の向きは、光子が光源から検出器に届くまで回り続けるストップウォッチの向きで決まる。

という「ルール」によって部分反射が起こる確率を計算することしかできないのだ、と Feynman は述べている。「ストップウォッチの針の向き」は専門的には位相に相当し、「矢印」とその和は確率振幅に相当する。この「ルール」により、波動性に対する一切の言及なく光の部分反射を説明している。

4.2 授業案〈フاینマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉第2部

続いて第2部に移る。底本第2部は「光の粒

子」というタイトルである。第1部で天下一的に導入された、事象が起こる確率を計算するという「ルール」が、第1部で扱った部分反射以外の光に関する様々な現象も説明できるのか。鏡面反射や光の直進という具体的な現象に対し、上記の「ルール」を適用し検証していく。

第2部ではまず鏡による光の反射について扱う。鏡に光を当てたとき、鏡面反射ではない、入射角と反射角が等しくならないような反射は起こるのだろうか、という【問題1】に始まる。部分反射を説明するためにFeynmanが導入した「ルール」に拠れば、入射角と反射角が等しくならないような反射は起こるはずである。この「ルール」に従い、足し合わされた矢印(確率振幅)が長くなる(=確率が大きくなる)ように細かい楕状に削った鏡(反射型回折格子)に対し、入射角と反射角が等しくならないような強い反射が起こるかどうかを問う。これが授業案の【問題2】に当たる。更に、色の違う光ならどのような反射が起こるかを問う【問題3】へと展開する。「ルール」に拠れば、「削った鏡」に光を照射すると入射角と反射角が等しくならないような強い反射が起こる。赤色レーザーポインタと緑色レーザーポインタ、及び「削った鏡」としてコンパクトディスクを用い、この予想を確かめる実験を構築した。

続く【質問1】、【質問2】は今回の実験授業クラスⅠ、Ⅱ、Ⅲのいずれでも割愛した。

【質問2】の後、【問題4】として不確定性関係にも話題が及ぶ。光が直線的に進むという現象もまた、「ルール」によって完全に説明される。単スリットによりレーザーの光が通る経路を狭める

ことで、光の進路が拡がるとする「ルール」の予言を検証する実験を行った。これは、位置と運動量に対する不確定性関係に他ならない。

第2部における上述の演示実験の詳細については、本稿では割愛する。

5. 実験授業〈フاینマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉の実施

授業案〈フاینマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉の成否を確かめるために、現在までに5つの実験授業を行った。

授業の対象とした層によって、実験授業は3つに分類される。クラスⅠは、文系理系の混ざった高校1年生を対象にしたクラスで、途中休憩を挟んで計180分の実験授業を1日で行った。クラスⅡ・クラスⅤは主に文系の学部1回生、クラスⅢ・Ⅳは理系大学生及び大学院生に対する実験授業である。また、クラスⅡ、クラスⅢは共に30分、90分、90分の順で全3回3週に渡って実験授業を行い、内容としては第1回で第1部の質問1の演示実験まで、第2回で第1部の終わりまで、第3回で第2部を取り扱った。クラスⅣ、クラスⅤは全3回90分ずつ3週に渡って実験授業を行い、内容としては第1回で第1部問題1の手前まで、第2回で第1部の終わりまで、第3回で第2部を取り扱った。

表2 実験授業の一覧

授業クラス	実施年度	授業対象	受講者数	授業者
クラスⅠ	2018年度	福井県立高志高校 スーパーサイエンスハイスクール(SSH)研修	19名	舟橋 (授業補助:阿部)
クラスⅡ	2019年度	京都大学全学共通科目「みんなの物理Ⅱ」	50名弱	舟橋 (授業補助:阿部)
クラスⅢ	2019年度	京都大学教職課程科目「理科教育法Ⅱ」	20名弱	模擬授業先生役担当者 (授業補助:阿部)
クラスⅣ	2020年度	京都大学教職課程科目「理科教育法Ⅱ」	15名弱	阿部 (一部オンライン)
クラスⅤ	2020年度	京都大学全学共通科目「みんなの物理Ⅱ」	20名弱	阿部 (オンライン授業)

6. 実験授業〈フاینマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉の評価・感想と授業案の検討

それぞれのクラスにおける実験授業後の評価を掲載する(表3~表5)。☆及び★はそれぞれの選択肢を選んだ人数を表す。

次いで授業後に得られた感想から抜粋した観点を表6に掲載する。

求めた評価と感想から、以下の事を読み取ることができた。

量子論を初めて学ぶ高校生を対象に行ったクラスⅠでは、難しい内容の割に量子論の奇異な性質との出会いを楽しんでもらえた。また、表6:Aや表6:Bなどからも読み取れるように、予想と実験を積み上げて発展する科学の世界に触れる機会を与えることができた。

主に文系学部一回生を対象に授業を行ったクラスⅡ・Ⅴでは、彼らの専門からは縁遠いところにある物理学に対し「ある理論を気に入る入らないということが肝心なのではなく、その理論が実験の結果を予測できるかどうかの方が、はるかに大切だ」というFeynmanの言葉を許容する受講生も少なくなかった。万人に対し、物理学・科学を

好きになってもらうことは、必ずしも必要なことではないが、表6:C、表6:Kのような感想は、この授業案が物理や科学のイメージの紹介に大きく寄与したことを読み取れるものである。

また、受講後の光のイメージについて、表6:J、表6:Lにあるように、自らが持っていたイメージとの相違に葛藤する様が見受けられた。ただ葛藤する機会を与えるだけではなく、そのイメージを省みたり再考したりする機会を提供することができた。

理系大学生を対象にしたクラスⅢ・Ⅳでは、既に量子力学を学んだ受講生も多い。表6:E、表6:F、表6:G、など、実験を含んだ量子力学の今までにない語り口の授業として高い評価を得ることができた。表6:Hの感想から、物理の本質に馴染みがない層にも量子力学の世界への興味・関心を掻き立てることができたことも読み取れた。

加えてクラスⅢでは教職生が先生役となって授業運営が行われている。仮説実験授業の目標として、「教育に熱意のある教師ならだれでも実現できる」ように授業書の準備だてが為されている点がある[1, p22-223]。授業進行を学生に担ってもらい、高い評価・感想を得られたことで、本授業案が特定の講師に拠らずに行われ得ることを示すことができた。

表3 〈たのしかった度〉の分布(クラスⅠ)

5.	☆☆☆☆
4.	☆☆
3.	☆
2.	
1.	

表4 〈たの度〉の分布(クラスⅡ(☆)及びクラスⅤ(★)の合計)

5.	とてもたのしかった	☆☆☆☆★★★
4.	たのしかった	☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆★★★
3.	どちらともいえない	☆☆☆☆☆☆☆☆★
2.	つまらなかった	☆☆
1.	とてもつまらなかった	

表5 〈たの度〉の分布(クラスⅢ(☆)及びクラスⅣ(★)の合計)

5.	とてもたのしかった	☆☆☆☆☆☆☆☆★★★
4.	たのしかった	☆☆☆☆☆☆☆☆★★★
3.	どちらともいえない	☆
2.	つまらなかった	
1.	とてもつまらなかった	

表6 実験授業後に各クラスから得られた感想

A) 量子力学を扱っていて私にとってはとても難しい話ではありましたが、一つ一つ予想をし、それを実験してみる。そして、予想が違ったらまた新たな予想を立てて実験する。その繰り返しを実際に講義の中で体験出来ました。 (クラスⅠ 高校1年生)
B) 今回の講義・実習を振り返って、予想することの大切さを知りました。普段の学習では、自分で予想してみる機会があまりないので、1つずつ問題に対して結果を予想してみるというのは新鮮でした。これまでに習ったことを思い出し、その事と問題を関連づけて予想することで、学習したことが定着していったり、予想が当たったとしても外れたとしても、自分で考えたことなので何故そういう結果になるのか知りたくなったりするなと思いました。 (クラスⅠ 高校1年生)
C) 理屈に合わないと思うことを容易に信じられないのは当然としても、実験して、その結果と対応するようなものを受け入れていくのが大事だと感じた。 (クラスⅡ 文学部1回生)
D) 物理を深く学ぼうとすればするほど説明できないふわふわしたものに当たるといった印象があります。それが自然の在るそのままの姿であるということなのかもしれませんが、私にはそうした考え方の学問はなじまない感じがします。 (クラスⅡ 法学部1回生)
E) 「波」の性質+「粒子」の性質を量子力学の確率で説明する際に最も直観的に分かりやすいルール説明だったように思う。 (クラスⅢ 理学部物理3回生)
F) 粒子性を前提として、波動性を導入していくというのは、通常と逆順なので面白いと感じた。 (クラスⅢ 理学部2回生)
G) 波動性の観点 (Maxwell 方程式等) から反射・回折を分析する機会がよくあるのだが、粒子性の観点からの納得は得られていなかった題材であるので非常に興味深い議論だと感じた。 (クラスⅢ 理学部2回生)
H) 自然のありのままを受け入れるということや変な理論を持ち出すことに抵抗を感じる人もいます。しかし、実際に授業を聞くと私がそうだったように、その変な理論によって光の様々な性質が説明できるようになることに感動を感じるのではないかと思います。ファインマンの言葉も受け入れられるようになるのではないかと思います。 (クラスⅣ 農学部食品生物科学科4回生)
I) 離散と連続の移り変わりが感覚的にも理解できて面白かったです。 (クラスⅣ 理学部2回生)
J) 入射角と反射角は等しい、光は直進する、といった中学で習った光のルールが、あくまでも近似であるを知って驚きました。個人的には、光が粒であることを実験結果から分かっているのですが、やはり今までのイメージと違うので感覚的には受け入れがたいです。 (クラスⅤ 文学部1回生)
K) なぜそうなるかは分からないけれど実験がそのように示すから、反例が今のところ見つからないからという見方によっては消極的ともいえる理由で自然を理解しているんだなと感じた。しかし、その消極的な理由が無数に集まることで、互いに矛盾するどころか補完しあい、科学という一つの強固な理屈が形成されているんだなと思った。 (クラスⅤ 法学部1回生)
L) 光はよりよくわからないものになったが、「詳しくは知らないという意味でよくわからないもの」から「なぜよくわからないか説明できるよくわからないもの」になった気がする。 (クラスⅤ 文学部1回生)

7. おわりに

「科学的認識の成立過程」を元に、量子力学の入門的な授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉を試作し実験授業を行った。これは粒子性を前面に押し立てる Feynman 著『光と物質のふしぎな理論』を底本とするものである。Feynman の問いかけに適切な選択肢を設けて実験結果の予想を求めることでより明確に問題意識を喚起し、その結果を教室で可能な演示実験で示せるように開発研究を行った。

実験授業の後で求めた評価と感想からは、受講生に応じて様々な論点を読み取れた。予想と実験を中核に据え、各々が持つ光のイメージを省みる機会を提供することで、量子論へ興味関心を抱いてもらうこと、そして、物理学・科学のイメージに触れる機会を与えること、これらを目的とした量子力学「入門」教材として一定の効果を示すことができたと言えるだろう。

更なる研究の余地は残されている。授業案〈ファインマン著『光と物質のふしぎな理論』を読む〉は、現在までに講演録全4部のうち第1部と、第2部の凡そ7割程度を取り扱っている。素

粒子を紹介することを目的とする第4部はともかく、光子と電子の相互作用を導入した第3部については「科学的認識の成立過程」を実現するような授業が可能である。複合事象に対して「矢印」のルールを適用してみる第2部の後半と、光子と電子の相互作用という概念に触れ、光の屈折を説明する事を目指す第3部を底本とした授業案を作成したい。

参考文献

- [1] 板倉聖宣『科学と方法』季節社 (1969).
- [2] R. P. Feynman, *QED: The strange theory of light and matter*, Princeton Univ. Press (1985).
- [3] R. P. ファインマン(釜江常好 大貫昌子訳)『光と物質のふしぎな理論 わたしの量子電磁力学』岩波現代文庫 (2007).
- [4] 文部科学省, 中学校学習指導要領 (平成 29 年告示), https://www.mext.go.jp/content/1413522_002.pdf, (参照 2021-03-26).
- [5] 文部科学省, 高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示), https://www.mext.go.jp/content/1384661_6_1_3.pdf, (参照 2021-03-26).
- [6] 猪木慶治, 川合光『基礎量子力学』講談社サイエンティフィック (2007).
- [7] 清水明『新版量子論の基礎』サイエンス社 (2004).
- [8] 北野正雄『量子力学の基礎』共立出版 (2010).
- [9] J. J. サクライ『現代の量子力学上』吉岡書店 (1989).
- [10] R. P. ファインマン『ファインマン物理学 V 量子力学』岩波書店 (1979).
- [11] K. Krijtenburg-Lewerissa, H. J. Pol, A. Brinkman and W. R. van Joolingen, “Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education,” *Physical Review Physics Education Research* **13**, 010109 (2017).
- [12] 板倉聖宣『仮説実験授業の ABC 仮説社 (第 1 版 1977, 第 5 版 2011).
- [13] J. オグボーン M. ホワイトハウス編 (笠耐 西川 恭治 梶具博義訳)『アドバンスング物理 AS』シュプリンガー・フェアラーク東京 (2004).

Research and development of introductory teaching materials for quantum mechanics : taking students to the limit of classical theory by promoting the particle nature of light

Haruki ABE* and Haruhiko FUNAHASHI

Graduate School of Human and Environmental Studies,
Kyoto University, Kyoto 606-8501 Japan

Summary Quantum Mechanics (QM) is the cornerstone of modern science, but its esoteric nature has left it an unfamiliar mystery to the general public. In the current school system, high school physics discusses QM only superficially, and the number of students who learn even this content is limited. Therefore, we aim to construct curriculum to help high school students, highly-motivated junior high school students, and the public in general attain a deeper understanding of QM. In this paper, we discuss the lesson plan “Reading Feynman’s *QED: The Strange Theory of Light and Matter*”. This lesson plan is based upon the recorded lectures of R. P. Feynman. The main purpose of the lesson is to let students experience the collapse of classical theory and develop an interest in QM by promoting the particle nature of light. This lesson is designed to also deepen student understanding of the nature of science, particularly how expectations and experiments strongly interact with each other. “The Process of Establishing Mental Recognition in Science” advocated by Kiyonobu Itakura can be applied not only to *Hypothesis-Experiment Class* in a narrow sense but also to education and research on science. For this lesson, we have created apparatus that can demonstrate experiments and devised and tested multiple choice questions to empower students to experience the process of established mental recognition in science. We will discuss the effectiveness of the lesson by considering evaluations and impressions collected by the students after the lesson.