

## 3 年生特別研究 3 8 物理分野「光の波動性と粒子性」

### (1) 研究開発の概要

3 年生理系物理選択者を対象に、光の示す二面性（波動性と粒子性）を中心のテーマとして、光学の研究史を扱う講義・実験「光の粒子性と波動性」を実施した。

この中で、光学の研究史の講義と光の粒子性に関する代表的実験である「光の二重スリットの実験」を名古屋市科学館学芸課の山田吉孝先生に実施していただいた。

### (2) 研究開発の経緯

平成 17 年 2 月に、講師の名古屋市科学館学芸課山田吉孝先生に、高感度イメージインテンシファイアを用いた光の二重スリット実験装置（科学館所蔵）を利用した実験を教室で見せて欲しいと依頼した。

その後、メールや電話による打ち合わせの後に、4 月中旬、名古屋市科学館で、授業の概要（授業のねらいや大まかな流れ、生徒の到達度、どんな演示実験を組み合わせるか）について打ち合わせた。また、特別研究の直前の 5 月下旬には、授業の詳細（講義内容の検討、演示実験の方法）について打ち合わせを実施した。

### (3) 仮説（ねらい、目標）

光の本性をめぐる議論においては、波動であるとする説（波動説）と粒子であるとする説（粒子説）の間で何度も支持が入れ替わった経緯がある。この過程を詳しくたどると、科学者が、その時点において支持されている説に大きく影響を受ける形で自身の研究を進めてきた様子が見て取れる。この様子を学ぶことにより、自然科学の研究においては、先入観に惑わされず、自らの目と頭で、自然を幅広い視点から観察することが大切であることを理解させる。

### (4) 研究の方法および内容

ア 対象生徒：3 学年理系物理選択者 164 名

イ 実施日程：平成 17 年 6 月 7 日（火）、9 日（木）

ウ 実施場所：愛知県立一宮高等学校 視聴覚教室

エ 実施内容：

#### (ア) 事前指導

本特別研究に先立ち、ヤングの実験やニュートンリングの実験といった光の干渉に関する準備授業を行い、光が波動性を示すことを確認し、その中で光が粒子としての性質も合わせ持つことについて触れておいた。また光の粒子性に関しては、平成 17 年 5 月 18 日（水）に実施した、スーパーサイエンス文化講演会（江崎玲於奈先生特別講演会）の事前授業「不思議な電子の性質 - 量子論に触れてみよう -」も役立った。この事前授業では、量子論が必要となった背景としてプランクの指摘した光輻射のエネルギーの問題を紹介し、量子論がもたらしたトンネル効果などの成果に触れるとともに、「シュレディンガーの猫」や「二重スリットの実験」など、量子論が現在もなお克服できないでいる諸現象についても言及した。

#### (イ) 特別講義の内容

##### 国際物理年

今年 2005 年は、アインシュタインが現代物理学の基礎となる光電効果の理論、特殊相対性理論、ブラウン運動の理論の 3 論文を提出した奇跡の年 1905 年の後の 100 年目にあたり、国際物理年とされている。

##### 光の研究史 1（光は波である）

1672 年にニュートンが光の粒子説を発表するまでは、デカルト、フックやホイヘンスの原理で有名なホイヘンスらの研究により光は波であると考えられていた。

##### 光の研究史 2（光は粒子である）

ニュートンは光を粒子として考え、屈折の法則や彼が詳しく研究したニュートンリングを、粒子説の立場から説明した。その後、ヤングがヤングの実験（1801）で光を波として説明するが、詳細な数学的検討がなされなかったためヤングの波動説は「実験でも何でもない」などと酷評された。



講義風景

### 実験1 ヤングの実験（光の波動性の証拠）

生徒一人一人が、赤・緑のレーザー光や、赤・橙・緑・青の発光ダイオードの光を、回折格子レプリカやスリットを通して観察することにより、明暗の縞が観察されることや波長が短くなるほど縞の間隔が狭くなることを確認した。

### 実験2 光電効果の実験（光の粒子性の証拠）

大型箔検電器の上部の金属板をアルミホイルで覆った後に負に帯電させて金属箔を開かせた上で、金属板に殺菌灯（4 W）からでる紫外線を照射すると金属箔が閉じることを確認した。また同様の実験を、箔検電器を正に帯電させて行っても変化が起きないことや、光源に電力のより大きな普通の蛍光灯（10W）の光を当てても、負に帯電した箔検電器の箔は閉じないことを確認した。

紫外線は目に有害なので、生徒には、紫外線カットの能力を持つ安全ゴーグルをさせ、かつ注視する場合は、スクリーンに投影したビデオカメラの映像を見るように指導した。

#### 光電効果について

波長が長いと、光がどんなに強くても金属表面から電子は飛び出さない。一方、波長が短い場合には光がどんなに弱くても即座に電子が飛び出してくる。これは、光電効果を象徴する現象である。光を波として考えると、光が弱い場合には、金属から電子を飛び出させるために必要なエネルギーを与えるのに光を当ててからいくらかの時間が必要であると思われるが、実際には即座に電子が飛び出してくる。この現象は、光を粒子と考える重要なきっかけになった。また、この光電効果を理論的に説明したのはアインシュタイン（1905）で、この功績によりノーベル賞を受賞した。

#### 光の研究史3（光はやはり波である）

以下の研究により、光が波であることが確固たるものになっていった。

マリウス 偏光の発見

フレネル 回折や干渉、複屈折を数学的に証明（1816～1818）

フーコー 水中での光速度は空気中の3/4倍でありニュートンの考えは成り立たない。

マックスウェル 電磁方程式（1867） 光は横波である。

ヘルツ 電波の存在を実験で証明

#### 光の研究史4（光はやはり粒子である - 光の波動説の矛盾）

光を波として考えると、計算上は、シリウスなどの星からの光は、星が非常に遠いために、目の網膜が光を感じる仕組みであるレチナールを励起させることができない計算になる。しかし現実には、私たちの目には星の姿がしっかりと見える。たとえば、これと同じことを考えると、私たちは暗黒の中で500m離れた100Wの電球が見えないはずであるが、私たちは即座に見ることができる。また、光を横波と考えると媒質（エーテルと呼ばれた）が必要になるがそのようなものが存在する気配がない。

その後、量子力学の発展によって光量子論は認められていった。その中には光だけでなく、物質も波として扱われることになる（ $\lambda = h / mv$ ）。また、光は質量がなく、速さが一定と考えられている。

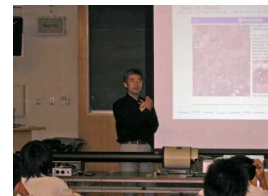
#### 実験2 イメージインテンシファイアによる光の2重スリットの実験

##### (a) 実験装置の構造

実験装置の構造はヤングの実験とほぼ同じである。装置は、光源（発光ダイオード）、スリット、イメージインテンシファイアと画像を積分して表示できる画像処理装置からなっており、イメージインテンシファイアと画像処理装置はヤングの実験のスクリーンにあたる。

##### (b) 実験で観察できる内容

光源からの光が強いうちは、画像はヤングの実験と同じように光の明暗の縞模様となる。しかし、光を弱くしていくと、光が一粒一粒スクリーンに到達する様子が映し出され、ヤングの実験で見られた明暗の縞模様が、多くの光の粒



実験装置の解説



光の粒子性の実験

の到着跡の重ね合わせであることが理解できる。しかし、光が粒子であることを主張すれば、光はどちらか一方のスリットを通ったと考えるのが妥当であり、そのようなしくみを考えると、今度はどのようなしくみでヤングの実験で得られたような縞模様を得られるかの説明が難しくなる。

(ウ) 事後指導

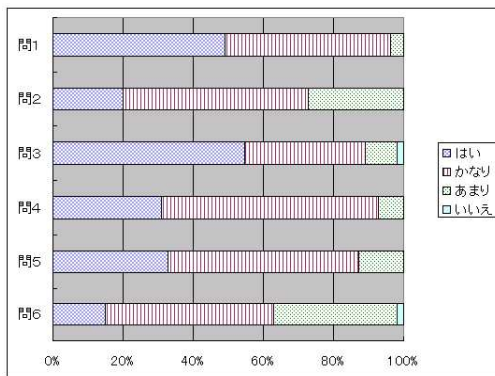
特別研究の授業の後に、その内容をまとめるレポートを課して生徒の理解度を確認した。それに基づいて物理の授業の中でまとめと解説からなる事後指導を行った。

(5) 検証（成果と反省）

ア アンケートから

授業や事前授業で波動分野を学んだあとの実施であったため、ヤングの実験や光の科学史についての講義については、理解度が高く、興味が持てたことが分かる。一方、光電効果の実験は、原子分野が未履修であったことなどから理解度がやや落ちた。このように、特別研究を行う際は通常の物理の授業の進度を十分に考慮する必要がある。

二重スリットの実験は、本特別研究の中心課題であるが、興味は持てたものの十分な理解にまでは至っていないと答えた生徒が多い。しかし、この実験は現在の物理学でも説明がつかないとされる量子力学の根本部分にあたるもので、この結果で量子力学への導入という当初の目的は達成されたと考えている。



質問の内容

- 問1 ヤングの実験の演示は理解できましたか。
- 問2 光電効果の実験の演示は理解できましたか。
- 問3 光の科学史の講義に興味を持ってましたか。
- 問4 光の科学史の講義は理解できましたか。
- 問5 二重スリットの実験に興味を持ってましたか。
- 問6 二重スリットの実験は理解できましたか。

生徒アンケートの結果

イ 生徒の感想から

特別研究の内容が、既習事項の復習を兼ねた内容であったことが生徒には好評であった。また、各生徒がそれぞれのレベルで量子力学の不思議な性質について感じることができた。

- ・波や光の性質については、授業で詳しく学んでいたので講演の内容がスムーズに頭の中に入った。
- ・授業で学んだ内容の背景にあるものを知ることができて知識に厚みができたように感じる。
- ・光電効果の実験では、なぜ光が粒子であることになるのかがよく分からなかった。
- ・光は波そのものだとしたそれまでのイメージを一掃するような新鮮な実験を見せて頂いて、光が波なのかそれとも粒子なのか興味を持った。
- ・過去の偉大な科学者（ニュートンら）の影響力は大きいのでしっかりと数学を用いた理論を作らないと新しい理論は認めてもらえないことが分かった。
- ・教えられたことが当たり前だと思ってしまうことは大変怖いことだと分かった。何ごとにも疑いの目を向けなければならないことが分かった。
- ・光のような身近なものなのに解明できていないことが多いことを知り興味を持った。
- ・実際におこっていることなのに確率でしか表現できない量子力学は変なものだと思った。
- ・光が粒子としての性質と波としての性質を持っているとされる理由がよく分かって良かった。
- ・二重スリットの実験が一番不思議で興味を持てた。波であり粒子であるというのは矛盾を感じるが、実際に見ることで、何となくイメージができて良かった。

- ・二重スリットの実験は驚く内容であったが、中途半端な理解で終わっているために素直に感動することができない部分もある。今回見せてもらった実験は心に大事にしまっておいて、将来、大学で量子力学を学んだ時に再び取り出してその有り難みを噛みしめたいと思った。