**１．実験の目的**

　光電管を利用してプランク定数と仕事関数を求め、光電効果を理解する。

**２．実験原理**

　固体が光を吸収して電子を放出する現象を光電効果といい、放出された電子を光電子という。観測によると、光の周波数νがある値ν0より小さいときは光を強くしても光電子は発生しない。また、νがν0より大きいときには、各光電子の持つエネルギーはνが大きいほど大きくなり、光が強いほど光電子の数が増加することなどが分かった。この現象を説明するために、アインシュタインは光量子仮説を提案した。

　光量子仮説によると、周波数νの光はエネルギーhνを持つ粒子からなる。hはプランク定数である。この粒子を光子(photon)とよぶ。固体が吸収した光子のエネルギーhνは一個の電子に与えられるが、電子が固体表面から外に出るためにはある大きさWのエネルギーを費やさなければならない。 Wは物質特有の値で仕事関数と呼ばれる。したがって、 hν＜Wならば光電子は発生せず、 hν≧Wならば発生した光電子の運動エネルギーEは

*E= hν-W*　(1)

によってあたえられる。もし二つ以上のνの値に対してそれぞれEが測定できれば、(1)式からhとWを決めることができる。Ｅは、光電子を減速する向きの電圧Ｖ（逆電圧）を徐々に大きくし、光電流がほぼ０になる電圧Ｖ０（－Ｖ０は阻止電圧）を知ることにより、Ｅ＝ｅＶ０から測定できる。（ｅは電子の電荷でＶ０＝１［Ｖ］の時、Ｅ＝１（ｅＶ）＝１．６０×１０－１９［Ｊ］）

**３．実験方法**

図．１　分光器の構成

1. 本体操作パネルのタ－ミナルに電圧計（３Vレンジ）と電流計（１００μAレンジを、正負の向きを正しく接続する。以後どちらもレンジを変えない。
2. 各スイッチとつまみを次の位置にする。

「ＬＡＭＰ」ＯＦＦ

「ＣＯＬＬＥＣＴＯＲ ＶＯＬＴＡＧＥ」最小（反時計方向）（ポテンシオメータなので摩耗を防ぐために５秒で１回転くらいのゆっくりした速度で回す。）

「ＺＥＲＯ ＡＤＪ．」 中央(真上)

「ＧＡＩＮ」×１

1. 「ＰＯＷＥＲ」をＯＮにする。
2. 「ＣＯＬＬＥＣＴＯＲ ＶＯＬＴＡＧＥ」を時計方向にゆっくり回し、電圧計を３Ｖにする。
3. 目盛板を０°にする。このとき光電管にあたる光の波長は５８９ｎｍ。
4. 「ＬＡＭＰ」をＯＮにする。
5. 入射スリットを閉じる。スリットを通った光を紙に当ててみると分かりやすい。完全に閉じない時は紙を置いて光を遮る。
6. 電流計がゼロからずれていれば、「ＺＥＲＯ ＡＤＪ．」によりゼロに調整する。
7. 「ＧＡＩＮ」を×１００にして、同様にゼロ調整する。
8. 「ＧＡＩＮ」×１に戻す。
9. 「ＣＯＬＬＥＣＴＯＲ ＶＯＬＴＡＧＥ」を反時計方向にいっぱい回して逆電圧をゼロにする。
10. 入射スリットをゆっくり開き、光電流を１００μＡにする。±１μＡ程度の誤はあってよい。
11. 逆電圧を３Ｖに戻す。
12. 「ＧＡＩＮ」の×１と×１００の順で再び電流計のゼロ調整をする。
13. 逆電圧を３Ｖから徐々に下げ、光電流が０．０１μＡ（×１００でμＡ）になる逆電圧を読む。逆電圧を変えてから電流が落ち着くまで１０秒程かかる。
14. 同様にして、光電流が０．０２μＡ、０．０４μＡ、０．１μＡ、０．２μＡ、０．４μＡ、１μＡ、２μＡ、４μＡ、１０μＡ、２０μＡ、４０μＡとなる逆電圧を読む。
15. 「ＣＯＬＬＥＣＴＯＲ ＶＯＬＴＡＧＥ」を３Vに戻す。
16. 以上の測定結果を、逆電圧を直線スケール、光電流を対数スケールでグラフ上にプロットする。
17. 目盛板を－８°（波長３８６ｎｍ）にして、（７）から（１８）までの操作を繰り返す。ただし、（８）から（１０）は省略してよい。
18. ０°～－８°の範囲にある別の２つ以上の角度に対して同様の操作をする。
19. 実験を継続するときは、スイッチを切らずにおく。
20. スイッチを切るときは、逆電圧を３Ｖに戻してから、「ＬＡＭＰ」「ＰＯＷＥＲ」の順に切り、電流プラグを抜く。

**４．実験結果**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 表１．逆電圧と光電流の関係 | | | | |
|  | 逆電圧 V | | | |
| 光電流(μA) | 0° | -3° | -6° | -8° |
| 0.01 | 0.645 | 0.865 | 1.280 | 1.650 |
| 0.02 | 0.600 | 0.815 | 1.210 | 1.530 |
| 0.04 | 0.565 | 0.780 | 1.160 | 1.460 |
| 0.1 | 0.530 | 0.740 | 1.100 | 1.380 |
| 0.2 | 0.500 | 0.705 | 1.055 | 1.320 |
| 0.4 | 0.470 | 0.675 | 1.005 | 1.260 |
| 1.0 | 0.430 | 0.620 | 0.925 | 1.165 |
| 2.0 | 0.400 | 0.580 | 0.875 | 1.100 |
| 4.0 | 0.360 | 0.535 | 0.780 | 0.990 |
| 10.0 | 0.300 | 0.450 | 0.655 | 0.815 |
| 20.0 | 0.240 | 0.370 | 0.520 | 0.650 |
| 40.0 | 0.160 | 0.260 | 0.360 | 0.430 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 表２．逆電圧と振動数の関係 | | | | |
| 角度(°) | 0° | -3° | -6° | -8° |
| 逆電圧(V) | 0.645 | 0.865 | 1.28 | 1.65 |
| 波長(nm) | 589 | 514 | 437 | 386 |
| 振動数(×1014Hz) | 5.09 | 5.83 | 6.86 | 7.78 |

さて、この実験では逆電圧をかけているため、(1)式は

*E= hν-W－ｅＶ*　　　（ｅは電子の電荷）

と書ける。いまここで光電流が０．０１［μＡ］の時、Ｅは限りなく０に近いから

　(2)

と変形できる。よって、Ｖがνの関数として表され、それが直線関数であることがわかる。ここで実際にｈとＷを求める。

☆最小自乗法

Ｙ＝ＡＸ＋Ｂにおいて、Ｘの値に対しＹがそれぞれと測定されたとする。ここから予想される理論値と測定値の差の自乗の和



を最小にするＡとＢの値がもっとも正しい値と考えられる。このようなＡとＢはとの２つの条件から決められ、これらの条件はつまり、



であるからこれらを解けば、ＡとＢが求まる。

上式において、Ｘをν、ＹをＶ、Ａ＝、Ｂ＝－として考え、それぞれの値を求めると

Ａ＝３．７８５×１０－１５

Ｂ＝－１．３０８４

が得られる。よって、

ｈ＝ｅ×３．７８５×１０－１５＝**６．０５６×１０－３４［Ｊｓ］**

Ｗ＝ｅ×１．３０８４＝**２．０９３４４×１０－１９［Ｊ］**

となる。

**５．考察**

1. 誤差について

上の結果ではプランクの定数は６．０５６×１０－３４［Ｊｓ］となったが、実際には６．６２６×１０－３４［Ｊｓ］である。この誤差の原因として、この実験では、ｈおよびＷを決定する際、「光電流が完全にゼロとなる逆電圧、すなわち阻止電圧Ｖ０は明確に決めにくい」という理由から光電流が０．０１μＡとなる逆電圧をＶ０とみなして計算したことがあげられる。この簡略化が計算に与える影響がどのくらいのものなのか考えてみる。

まず、０°，－３°，－６°，－８°のそれぞれの阻止電圧をＶｉ＋ΔＶｉ（ｉ＝１～４）とする。この際、グラフ１のそれぞれの曲線の様子から考えて、０．０１μＡの時の電圧より０μＡの時の電圧の方が小さいことが予想されるのでΔＶｉ≧０とする。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 表３．　０μＡでの逆電圧（阻止電圧）と周波数との関係 | | | | |
| 角度［°］ | 0° | -3° | -6° | -8° |
| 真の阻止電圧［V］ | 0.645+ΔＶ１ | 0.865+ΔＶ2 | 1.280+ΔＶ3 | 1.650+ΔＶ4 |
| 周波数［×１０１４Hz］ | 5.09 | 5.83 | 6.86 | 7.78 |

上の表の阻止電圧と周波数について最小自乗法を考える。それぞれ、、、、を計算し、Ａを求めるとＡはΔＶｉの式となる。ここで、ｈ＝６．６２６×１０－３４とｅ＝１．６×１０－１９より、Ａが求まるのでΔＶｉの式は



となる。この時、グラフ１において１０－２μＡ付近で－６°、－８°に比べ０°、－３°の時の曲線の傾きが急なので、ΔＶ１とΔＶ２はないものと仮定する。つまり、



となり、ΔＶ３とΔＶ４を同じ物として計算するとΔＶ３，４＝０．０８が得られる。グラフ１よりΔＶ４の方が大きいから、－８°の時に０．０１μＡを阻止電圧として扱うとΔＶ４＞０．０８の誤差要因を持つことがわかる。

1. スペクトル変化の観察の際に、－２２．５°付近で色分けがされな

　かった理由

以下に示すのは４０°～－９０°のスペクトル変化の様子である。

４０°～８°　　　　：　赤→青

８°～－１２°　　　：　８未満：赤、－１２°：青

－２２．５°　　　　：　白色光

－３０°～－５７°　：　青→赤

－５７°～－９０°　：　青→赤

回折格子

β

α

ｄ

図．２　回折格子における光の入射と反射

まず、上図のように光が入射し、反射している回折格子を考える。（α＜β）二つの光波の光路差をΔとすると、





二つの光波が干渉しあう条件は光路差が半波長の整数倍になることだから、



　（ｍ＝１，２，…）

となる。一方実験においては、光源と回折格子と光電管のなす角度は４５°であるから、回折格子の回転角度を－２２．５°としたとき入射角と反射角の角度が２２．５°となり等しくなる。よって、α＝β＝２２．５°となるため、



つまり、光路差が０だから、光波は互いに干渉することなく光源の光がそのまま反射して光電管側で観測される。よって、スペクトルは観測されない。

1. 光を粒子として考えなければならない理由

光電効果の研究をしていたレナルト（Lenard）は１９０２年に次の注目すべき事実を見出した。

　（Ⅰ）光電効果を起こすためには、ある限界振動数よりも大

　　　きい振動数の光を照射しなければならない。限界振動数

　　　は金属に応じて異なる。

　　（Ⅱ）光電子の最大エネルギーは光の強さによらず、光の振

　　　　動数と共に増す。

　　（Ⅲ）限界振動数以上であれば、光の強さが非常に弱くても、

　　　　光を当てると直ちに光電子が出る。光の強さを増せば、

　　　　光電子の数が増すだけである。

これらの事実は光を波動と考えたのではまったく説明のつかない事柄である。なぜなら古典論によれば、光の波は一点に局在するのではなくて、空間的な広がりを持っており、光のエネルギーはその空間的広がりの中に連続的に分布している。そしてこのエネルギーを荷電粒子は連続的にしか放出吸収できないものと考えられている。それゆえ光の振動数がいかに小さくても十分強い光を照射すれば、金属内の電子は十分なエネルギーを光から吸収して表面から飛び出しうるはずである、またいかに振動数が大きくても、非常に弱い光であればエネルギーが足りず、電子が飛び出すのに必要なエネルギーを集めるには、かなりの時間が必要で、瞬間的に飛び出すことはできないはずだからである。

アインシュタインは光電効果を次のように説明した。彼はプランクのエネルギー量子の考えをさらにおしすすめて、振動数νの光はｈνなるエネルギーを持つ粒子の流れであると考えた。この粒子を光子という。そして電子が光のエネルギーを吸収する際には、一個の光子が一挙に一個の電子に吸収されるものと考えたのである。金属の表面から電子一個を取り出すのに要する仕事の最小値をＷ（仕事関数）とすると、光の振動数νが条件

ｈν＞Ｗ

を満足する場合に光電効果が起こることになり、（Ⅰ）の事実が説明できる。Ｗ／ｈが限界振動数である。また、放出される光電子の最大エネルギーは保存則より



となり、（Ⅱ）も説明される。光の強さは含まれる光子の数に比例し、また一個の光子が一挙に、一個の電子に吸収されると考えるのであるから、（Ⅲ）は当然のこととして説明される。こうして光電効果の現象は、古典論とはまったく異なる光子という考えによって説明されたのである。

1. 光の研究の歴史

光の研究は、まず光線の幾何学として成長した。この成果が、例えば望遠鏡や顕微鏡の進歩を導き、それらがほかのあらゆる経験科学の発展に貢献してきたことも、見逃してはならない。一方、光の本性については、古くギリシア時代から問題にされていたけれども、光の現象を統一的に把握する科学の体系が確立されたのは、ようやく１９世紀になってからである。つまり１７世紀には、すでにホイヘンスが光の波動説を主張し、同時代のニュートンはこれに反して粒子説の優位を認めていたが、このどちらがいっそうすぐれた体系であるかを決定するには、経験的事実がまだ十分に整っていなかったと考えられる。１９世紀のはじめに、ようやく干渉や回折の事実を通して、光の波動としての性質が導入され、ヤングやフレネルなどは、改めてホイヘンスの波動説を支持するようになった。さらに偏光という現象は、光波が純粋に横波であるという仮説を導いた。そうしてついに、媒質中の光速度測定の結果は、決定的に粒子説を放棄させたのである。このようにして、光についてのあらゆる現象は、光波という描像のもとに、初めて統一的な理解を得たわけである。

ところが、光波の媒質として仮定されたエーテルは、透明な物質をはじめ全空間を満たす（横波だけを許すような）特定の弾性体に違いないが、それでも物質の運動には、どんな影響も与えてはいないはずである。このように特殊な媒質のメカニズムをたずねることは、非常に困難な問題であった。

しかし一方では、電気や磁気の現象を統一的に理解することができたマクスウェルの場の理論から、必然的に真空中をも伝播する、電磁波の存在が予見され、しかもその伝播速度が光波の速度に一致するところから、光波も電磁波に違いないと結論された。このマクスウェルの理論は、あとでヘルツによって実験的に検証され、ここに光の電磁（波動）論が確立されたのである。その結果、エーテルの実在性の問題は、電磁場の構造の中に解消し、縦波が自然に除かれる点も、この理論がエーテルの弾性波動論より、はるかにすぐれていることを示している。

こうして巨視的な領域における光の理論が、とにかく電磁場の理論に統一されたことは、自然法則の普遍性に対する確実な証拠の一つであるとみなしてよいだろう。しかし光の発生や吸収、あるいは散乱の現象（光と物質との相互作用）を理解するためには、どうしても物質の微視的な構造に立ち入らなければならない。アインシュタインはこれと同時に、光に対しても粒子説の復活を指摘したのである。けれども、この粒子像はもはやニュートンの構想を単に再現しただけではない。やがて波動像との根本的な調和の一面をになうようになった。これがエディントンのいう波粒(wavicle)として、場の概念と粒子の概念とを一応統一した、量子力学の自然像を準備したのである。

1. 光電効果の応用

地球を回る人工衛星の動力源

などとして利用されている太陽

電池は光電効果を用いたもので

ある。この現象を簡単に確かめ

るため右図のような実験装置を

用意する。まず、はく検電器の

上に亜鉛板をのせ、検電器を負

に帯電させ、はくを開いておく。

図．３　光電効果

亜鉛板に紫外線を当てると、は

くは閉じるが、赤外線を当ててもはくは閉じない。この理由として、金属の内部には自由電子があるが、陽イオンの引力を受けてひとりでには外へ飛び出せない。しかし、紫外線があたると、電子はエネルギーをもらって陽イオンの引力を振り切って外へ飛び出すのである。電子が飛び出した後の金属は正に帯電する。この静電気が検電器に溜まっていた負の電気と中和するためにはくが閉じたと考えられる。一方、赤外線をあてたときはくが閉じないのは、赤外線の振動数が限界振動数ν０より小さいため電子が飛び出さなかったからである。

ここで、太陽電池の基礎となる光電池について述べる。これは、次項の図４のように、金属板の上にセレンのような半導体を密着させ、さらにその上を金や銀などの金属半透明膜でおおったものである。金属表面と半導体を密着させるのは光電子が飛び出しやすくなるからである。そこで半透明膜を通過した光は、光電効果によって金属板表面より電子をとび出させ、半導体（セレン）は一方向だけに電子を流す性質が有るので、光電子は膜に集まる。したがって、膜は陰極に、金属板は陽極となって電流が流れることになる。これを光電池といい、露出計、照度計や太陽電池などに用いられている。

図．４　光電池

太陽電池の種類は、非常に多いが、ここでは一般に広く使用されている結晶系シリコン太陽電池を例に挙げる。図５は、太陽電池の構造と電気が発生する様子を示している。

太陽光はあるエネルギーを持った光の粒子の集まりである。太陽光が太陽電池の表面に照射されると、光の一部は表面で反射されて外部へ逃げてしまうが、大半の光は太陽電池、すなわちシリコンの結晶の内部に入っていく。このようにして太陽電池に入った光も、一部はそのまま太陽電池を通過して裏面から外部に出てしまう。表面で反射した光と裏面から出てしまった光以外のものが、結晶の中で吸収されて電気の発生に利用される。図５に示すように、太陽電池はｎ型およびｐ型と呼ばれるシリコンの材料（半導体）で成り立っており、受光面がｎ型、裏面（基盤）はｐ型という構成になっている。ｎ型とｐ型の半導体の境界部分はｐｎ接合と呼ばれていて、この部分の存在が電気を生ずるための重要なポイントとなっている。

太陽電池に太陽光が照射され吸収されると、プラスの電荷を持った正孔とマイナスの電荷を持った電子とが発生する。これが半導体の光電効果と呼ばれる現象である。発生した電子と正孔は、太陽電池の内部を自由に動きまわることができるが、ｐｎ接合を境にして電子はｎ型半導体の部分に、正孔はｐ型半導体の部分に集まりやすいという性質を備えている。このために、太陽電池に光を当て続けると表面には負の電気が、裏面には正の電気が溜まってくる。

この状態で受光面側と裏面に電極を備えて、例えばまめ電球のような負荷をつなぐと、裏面の正電極から電気が流れだし、まめ電球を通して負電極へと電気が流れる。このようにして、太陽電池から外部に電力が供給されるのである。

図５．　太陽電池の構造と発電の原理

６．参考文献

・物理学の歩み　　鳴海元　著　　（株）培風館

・生活の中の物理　　藤城敏幸　著　　（株）東京教学社

・太陽エネルギーへの挑戦　　京セラエネルギー事業部　著

　　　　　　　　　　　　　　　　　　　（株）清文社