

Oleksandr Proskura

Einsteins Quantentheorie des lichtelektrischen Effektes

Dank den ersten Arbeiten von Albert Einstein (1879–1955), die im Jahre 1905 erschienen waren, wurde dieses Jahr als „annus mirabilis“ benannt, weil Einsteins Genie in diesem Jahr die wissenschaftliche Denkweise von der klassischen Physik des 19. Jahrhunderts zu der modernen Weltanschauung veränderte und das Weltbild der Physik damit grundlegend prägen sollte.

In der ersten Arbeit aus dieser Reihe schlug Einstein eine Lichtquantenhypothese vor und stellte in Übereinstimmung mit dieser Hypothese seine ganz originelle Quanteninterpretation des lichtelektrischen Effektes auf [1]. Dazu akzeptierte Einstein die grundsätzliche Idee von Max Planck (1858–1947) über die Entdeckung des Energiequantums. In solcher Weise wurde die Quantentheorie geschaffen.

Im vorgelegten Beitrag möchte ich die geschichtlichen Ursprünge der ersten Publikation von Einstein aufzeigen, ihre Bedeutung analysieren sowie die experimentelle Bestätigung der Einsteinschen Quantentheorie des lichtelektrischen Effektes erläutern.

Das Problem der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie hat eine fundamentale wissenschaftliche Bedeutung. Im Rahmen der Erforschung dieses Problems ist die Quantentheorie durch experimentelle und theoretische Forschung der Wärmestrahlung des schwarzen Körpers entstanden. Das Forschungsinteresse an der Wärmestrahlung war durch den praktischen Bedarf, elektrische Glühlampen zu kalibrieren und die Lichtmessungsstandards auszuarbeiten, beeinflusst worden. Mit Erfolg führten Berliner Physiker entsprechende Forschungen unter Förderung von Hermann von Helmholtz (1816–1892) an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt und an der Technischen Hochschule Charlottenburg durch. Zu dieser Zeit musste man schon die Energieverteilung im langwelligen Teil des gemessenen Spektrums richtig beschreiben. Das machte Planck, dem es zwischen dem 19. Oktober und dem 14. Dezember 1900 gelang, theoretische Klarheit über das Problem der Strahlung zu gewinnen. Heinrich Rubens bekräftigte die neue Formel von

Planck und informierte ihn über die gute Übereinstimmung seiner Messungen im fernen Infrarot mit den nach der neuen Formel berechneten Werten. Es war u.a. wichtig, dass Planck bei der theoretischen Vollendung seiner Formel einen neuen Begriff „Energieelement ϵ “ eingeführt hat. Das Energieelement muss proportional der Frequenz ν eines elementaren Resonators sein, also $\epsilon = h \cdot \nu$, wo h die Plancksche Konstante ist. Das war der Anfang der Quantentheorie.

Wenden wir uns nun dem lichtelektrischen Effekt zu. Der Effekt wurde Anfang 1887 von Heinrich Hertz (1857–1894) entdeckt, der eine Einwirkung einer elektrischen Entladung in einem elektrischen Kreis mit einem Luftentlader auf eine elektrische Entladung im anderen analogen Kreis bemerkte. Die Einwirkung zeigte sich als Vergrößerung eines Abstandes zwischen metallischen Elektroden des passiven Entladers durch die UV-Bestrahlung der negativen Elektrode von den aktiven Funken. Seine Versuche stellte Hertz in 18 Punkten eingehend dar [2].

Den nächsten Schritt machte Wilhelm Hallwachs (1859–1922) am 27. November 1887 mit seinem Grundversuch der lichtelektrischen Entladung. Mit Hilfe eines Elektroskops demonstrierte Hallwachs eine Freisetzung der negativen elektrostatischen Ladung von einer aufgeladener Zn-Platte beim UV-Belichten dieser Platte [3]. Die vorher negativ geladene Platte verlor ihre Ladung und lud sich schließlich bis zu einem bestimmten Potenzial positiv. Nach den Versuchen von Hallwachs wurde die von ihm erforschte Erscheinung einige Zeit als Hallwachs-Effekt benannt. Dieser Effekt ergibt sich bei allen festen Körpern.

Der Erforschung des lichtelektrischen Effektes wandten sich viele Physiker zu. Einer der ersten war Augusto Righi (1850–1920), der einen neuen Begriff der „Photozelle“ einführte und die Potentialdifferenz zwischen beiden Elektroden der Photozelle vermessen konnte.

Zur selben Zeit 1889 beobachtete Alexander Stoletov (1839–1896) dank seiner neuen Methode die so genannten „aktinoelektrischen Ströme“. Diese Ströme bestehen darin, dass wenn man eine, sich in Vakuum befindliche Metallelektrode mit dem negativen Pol einer Batterie verbindet und dann durch die andere Elektrode, die ein Drahtnetz darstellt, belichtet, ein Strom von der belichteten zu unbelichteten Elektrode hinüberfließt. Somit befand sich A. Stoletov der Entdeckung der Kathodenstrahlen sehr nahe. Stoletov formulierte auch das erste lichtelektrische Gesetz – der Lichtstrom ist der Lichtstärke direkt proportional [4].

Hallwachs fasste zusammen: dass „... fast alle prinzipiellen Fortschritte in den ersten drei Jahren seit Eröffnung dieses Gebietes hervorgebracht worden sind ... Allgemeine Resultate: Die Wirkung des Lichtes erfolgt auf den Körpererraum, nicht auf den Gasraum. Die Absorption von Licht ist notwendige Bedingung. Die entladenen Elektrizitätsmengen sind der Lichtstärke proportional. Auch von hinten eintretendes Licht ruft Lichtelektrizität hervor. Ein Zeitverlust im Eintreten der Erscheinungen oder eine Nachwirkung findet nicht statt. Eine sehr große Anzahl verschiedenartigsten Körper ist lichtelektrisch wirksam“ [3].

Die o.g. bedeutenden Physiker hatten auch ihre Vorläufer. Manuelli beobachtete im Jahre 1869, dass das Belichten der Kathode das Funkenüberspringen erleichtert [5]. A. Nodon verlor 1885 die Priorität, weil er seine Ergebnisse, die mit Ergebnissen von W. Hallwachs übereinstimmten, nicht rechtzeitig veröffentlichte [4].

Seit 1888 entwickelten Julius Elster (1854–1920) und Hans-Friedrich Geitel (1855–1923) eine kugelförmige Photozelle mit einem Sonderfenster für den Lichteintritt zur Kathode und entdeckten den lichtelektrischen Effekt in Alkalimetallen beim Belichten dieser Stoffe durch Licht mit langen Wellen. Ihre Ergebnisse waren für praktische Verwendung des lichtelektrischen Effektes von großer Bedeutung.

Die grundlegenden Untersuchungen auf dem Gebiet der lichtelektrischen Eigenschaften von Metallen wurden von Philipp Lenard (1862–1947) im Zeitraum zwischen 1899 bis 1905 durchgeführt. Mit seinen Beiträgen zur Physik der Kathodenstrahlen und anderen Beiträgen zur zeitgenössischer Physik gehört der Nobelpreisträger des Jahres 1905 Ph. Lenard zu den profiliertesten Physikern an der Wende zwischen 19. und 20. Jahrhundert. Lenard stellte fest, dass die Geschwindigkeit der losgelösten Elektronen nicht von der Intensität, sondern von der Frequenz der auffallenden Strahlen abhängt und zusammen mit der Frequenz wächst ([6], [7]). Es wurde festgestellt, dass die Variierung der Intensität des Lichtes nur die Stromstärke verändert, d.h. die Zahl der losgelösten „Elektroquanten“ – Elektronen. Lenard konnte Verhaltensregeln der losgelösten Elektronen zwischen zwei Elektroden in einer Photozelle erläutern. Doch brauchte man eine zahlenmäßige Theorie. Hier kam Einstein mit seiner Hypothese voran [1].

Einstein konnte theoretisch zeigen, dass monochromatische Strahlung sich so verhält, als wenn sie aus voneinander unabhängigen Energiequanten von der Größe $h\nu$ besteht. Einstein schuf damit den Begriff des „Lichtquants“. Seine Schlussfolgerung, dass das Licht eine Teilchenstruktur besitzt,

stand der elektromagnetischen Lichttheorie diametral entgegen. Diese Schlussfolgerung besaß keine Rechtfertigung außer der, dass man mit deren Hilfe den lichtelektrischen Effekt und noch einige physikalische Erscheinungen mit den experimentellen Tatsachen in Übereinstimmung bringen konnte [8]. Einstein stellte die Energiebilanz fest, nach der ein Lichtquant seine gesamte Energie an ein Elektron abgibt, so dass das Elektron dadurch die Körperfläche verlassen kann. Da das gelöste Elektron zum Verlassen der Körperfläche eine Austrittsarbeit zu leisten hat, ergibt sich die so genannte Einsteinsche Gleichung für den lichtelektrischen Effekt:

$$m v^2 / 2 - h\nu - P$$

wobei m - die Elektronenmasse, v - die Maximalgeschwindigkeit des freigesetzten Elektrons, h - die Plancksche Konstante, ν - die Frequenz des Lichtes und P - die charakteristische Austrittsarbeit für das entsprechende Metall darstellt. Die links in der Gleichung stehende maximale kinetische Energie des freigesetzten Elektrons zeigt eine lineare Abhängigkeit von der Frequenz des einfallenden Lichtes. Man musste diese lineare Beziehung, die als lichtelektrische oder Einsteinsche Gerade bezeichnet wird, experimentell feststellen, um die Einsteinsche Theorie zu überprüfen bzw. zu bekräftigen. Die entsprechenden Versuche wurden von Robert Millikan (1868–1953) im Jahre 1916 erfolgreich durchgeführt [9].

Es ist ferner wichtig, sich an die historische Situation mit der Erforschung eines der ersten lichtelektrischen Phänomene – des Becquerel-Effektes zu erinnern. Der Effekt wurde von E. Becquerel 1839 entdeckt und von A. Goldmann und J. Brodsky 1914 entsprechend der Stoletovschen Methode untersucht. Den Becquerel-Effekt kann man in folgender Weise beschreiben: „So bezeichnet man die bei Belichtung auftretende Potentialänderung einer Metallelektrode in einem Elektrolyt, wobei entweder die Elektrode mit einer dünnen, festen, lichtempfindlichen Schicht bedeckt ist, oder der Elektrolyt eine lichtempfindliche Substanz enthält ” (nach Ch. Ries, 1909). Die von A. Goldmann geäußerte Erläuterung des Becquerel-Effektes korrelierte mit der Einsteinschen Hypothese [10].

Für die Erforschung der lichtelektrischen Effekte wurden Einstein 1921 und Millikan 1923 mit den Nobelpreisen für Physik geehrt.

Literatur:

- [1] A. Einstein: Über die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. Ann. Phys. 1905, Bd. 17, 6. Heft, S. 132–148.

- [2] H. Hertz: Über einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung. *Ann. Phys. u. Chem.* 1888, Bd. 31, S. 983–1000.
- [3] W. Hallwachs: Die Lichtelektrizität. *Handbuch der Radiologie.* 1916, Bd. 3, S. 245–563, Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft M.b.H.
- [4] П. Г. Борзяк: Начальный период истории внешнего фотоэффекта и значение работ Столетова (к шестидесятилетию со дня смерти А.Г. Столетова). *Успехи физ. наук.* 1956, Том 58, С. 715–747.
- [5] J. Plotnikow: *Allgemeine Photochemie.* 1936, Berlin und Leipzig, Walter De Gruyter & Co.
- [6] P. Lenard: Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht. *Ann. Phys.* 1900, Bd. 2, S. 359–375.
- [7] P. Lenard: Über die lichtelektrische Wirkung. *Ann. Phys.* 1902, Bd. 8, S. 149–198.
- [8] D. Hoffmann, J. Lemmerich: 100 Jahre Quantentheorie: Die Vor- und Frühgeschichte. *Ausstellungskatalog.* 2000, Berlin, Deutsche Physikalische Gesellschaft.
- [9] R. A. Millikan: *The Electron. Its isolation and measurement and the determination of some of its properties.* 1918, Chicago. The University of Chicago Press, Chicago, Illinois.
- [10] P. Görlich: Photoeffekte, Band 1. *Historische Entwicklung Photoemission der Metalle.* 1962, Leipzig. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.