

SEMINÁŘE Z FYZIKY – 2. ročník

3. blok: Několik kroků do mikrosvěta 2 – Fotoelektrický jev

(březen 2005)

17. března tohoto roku uplynulo sto let ode dne, kdy vyšel v německém časopisu *Annalen der Physik* článek Alberta Einsteina (1879–1955) *O jednom heuristickém aspektu týkajícím se vzniku a přeměny světla* [1]. Bez nadsázky lze říci, že šlo o jednu z prací, které otřásly tehdejší fyzikální svět. Šestadvacetiletý technický expert III. třídy Švýcarského úřadu pro ochranu duševního vlastnictví v Bernu v ní zavedl do fyziky ideu *světelného kvanta*, z níž se postupně vyvinul jeden ze základních pojmů moderní fyziky – *foton* (1926).

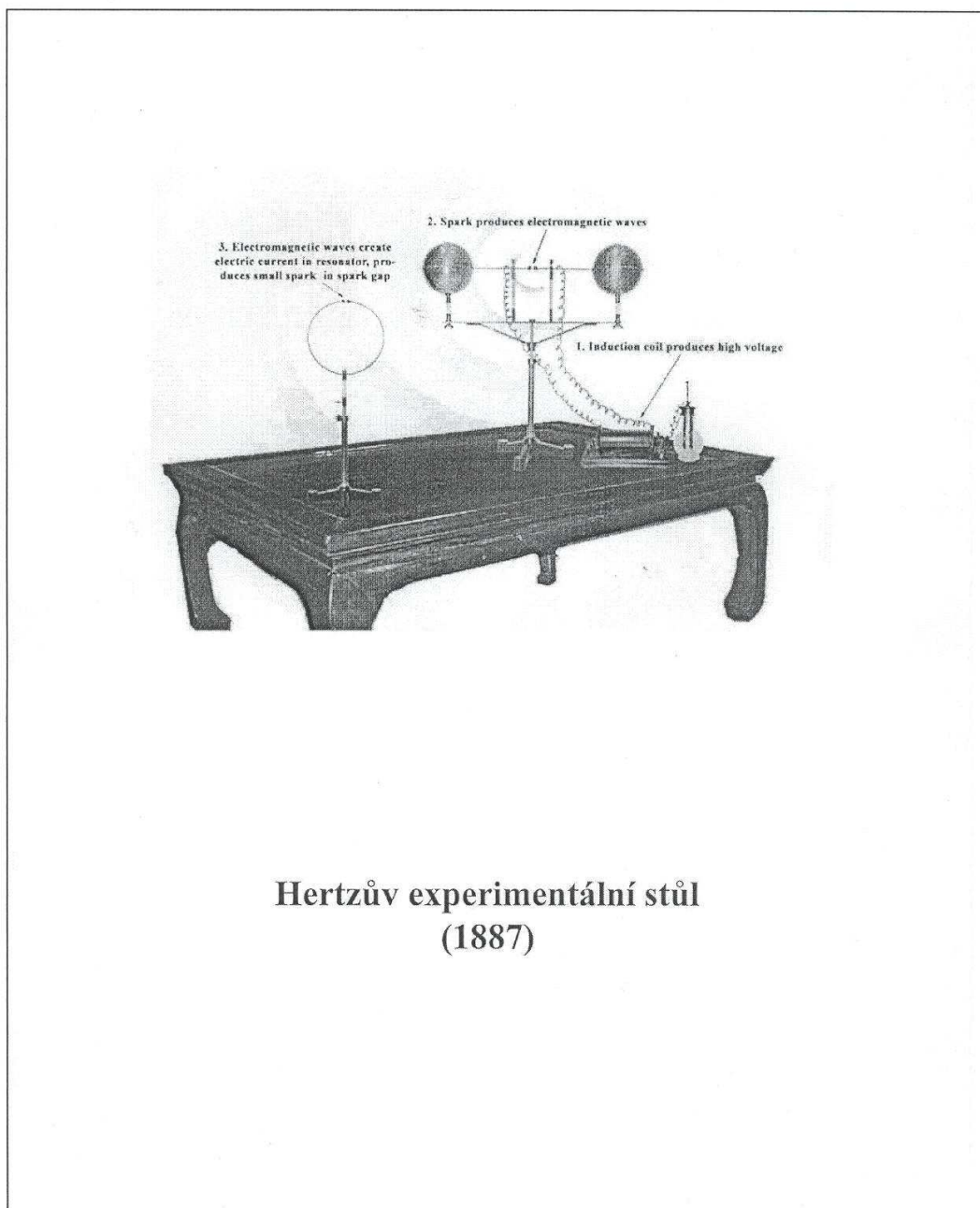
Těžištěm Einsteinova textu byly obecné úvahy o struktuře elektromagnetického záření vrcholící alternativním odvozením tehdy pět let starého, či spíše nového, Planckova výrazu popisujícího rozdělení celkové energie rovnovážného tepelného záření (elektromagnetického pole) mezi jeho jednotlivé spektrální složky (frekvence). Einstein při tom vyslovil přesvědčení, že na tento systém lze pohlížet jako na soubor lokalizovaných objektů – světelných kvant – o energii

$$E = hf$$

($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js je konstanta zavedená Maxem Planckem (1858–1947) roku 1900 a f je frekvence záření) pohybujících se rychlostí světla. Taková představa ovšem vzbudila značný – převážně negativní – ohlas Einsteinových současníků argumentujících především její neslučitelností s existencí interferenčních jevů. Sám Einstein si byl tohoto problému samozřejmě také vědom, nepovažoval jej však za nepřekonatelný [2]. Užitečnost své kacířské myšlenky pak demonstroval ve zbytku zmíněného sdělení na fyzikálním objasnění několika do té doby nevyvětlených jevů. Nejznámějším z nich je tzv. *fotoelektrický jev*, jehož komentáři je věnována zhruba sedmina celkového rozsahu jeho textu.

Plné pochopení Einsteinovy fundamentální práce, která zásadním způsobem ovlivnila další vývoj fyziky, vyžaduje jistou fyzikální i matematickou erudici. Její základní ideu – *kvantový charakter interakce mezi elektromagnetickým zářením a látkou* – lze však přesvědčivě prezentovat i na neprofesionální úrovni: elementárním výkladem fotoelektrického jevu.

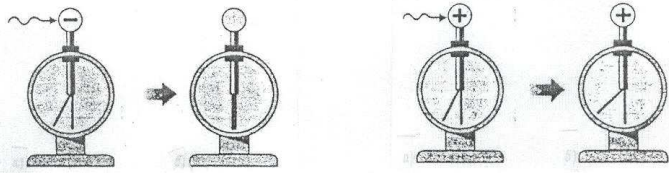
Za objevitele fotoelektrického jevu je považován německý fyzik Heinrich Hertz (1857–1894), jenž si roku 1887 při svých pokusech prokázal existenci Maxwellem předpovězených elektromagnetických vln všiml toho, že osvětlení jiskřiště rezonátoru (3) světlem primární jiskry (2) usnadňuje vznik jiskry sekundární (3) [viz obr. 1].



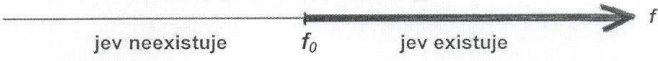
Hertzův experimentální stůl
(1887)

Obr. 1

Podrobnějším studiem tohoto jevu se začali vzápětí zabývat Hertzův krajan Wilhelm Hallwachs (1859–1922) a ruský fyzik Alexandr Stoletov (1839–1896). Systematickými pokusy s ozařováním různých materiálů postupně zjistili, že



- Ozařování vodiče z něj může uvolňovat (uvolňuje) záporný náboj.
- Pro každý ozařovaný materiál existuje určitá – pro něj charakteristická – minimální frekvence f_0 (tzv. červený práh jevu), od níž počínaje dochází k uvolňování záporného náboje

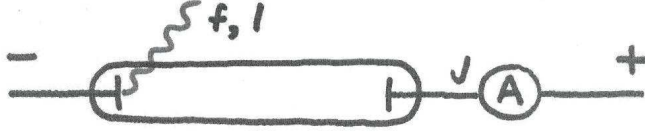


- K uvolňování náboje z ozařovaného vodiče dochází okamžitě po dopadu světla (o frekvenci $f > f_0$).

Tabulka 1

Následujícími pokusy s vyčerpávanými trubicemi tyto předběžné výsledky opakovaně potvrdili, zpřesnili a ukázali, že

EXPERIMENTY S VYČERPÁNÝMI TRUBICEMI

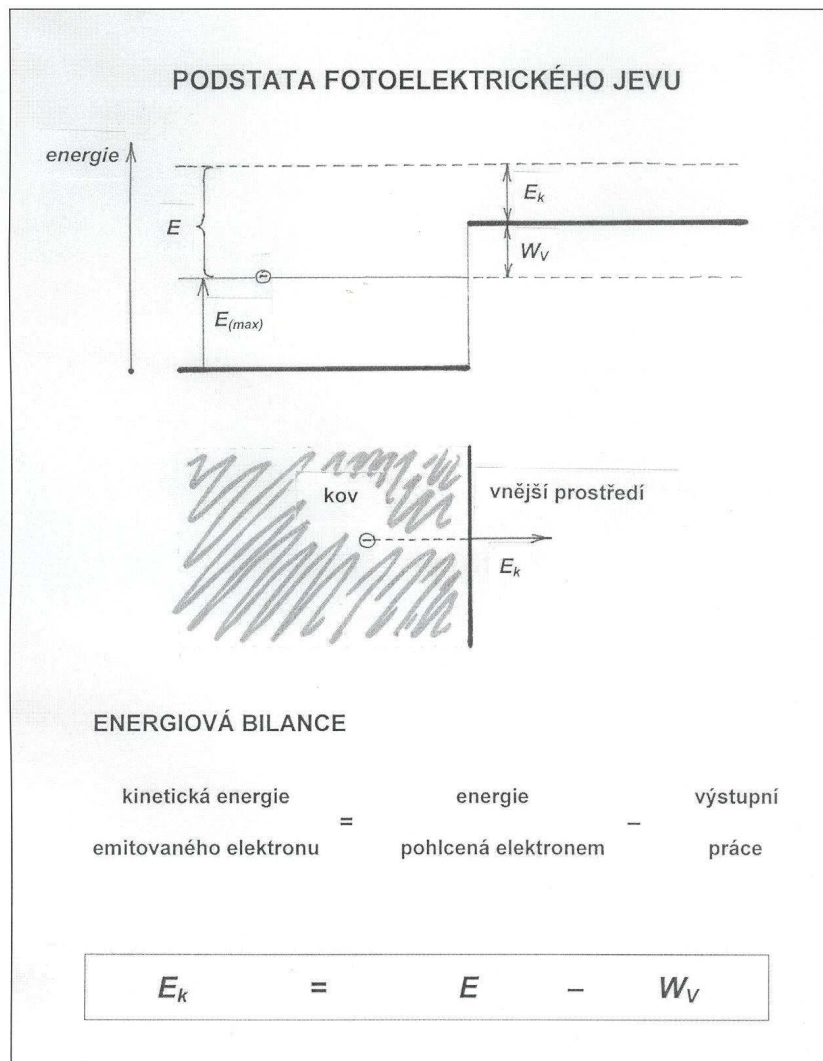


- Pokud v důsledku ozařování vznikne fotoproud, pak jeho velikost J roste s intenzitou ozáření katody I .

Tabulka 2

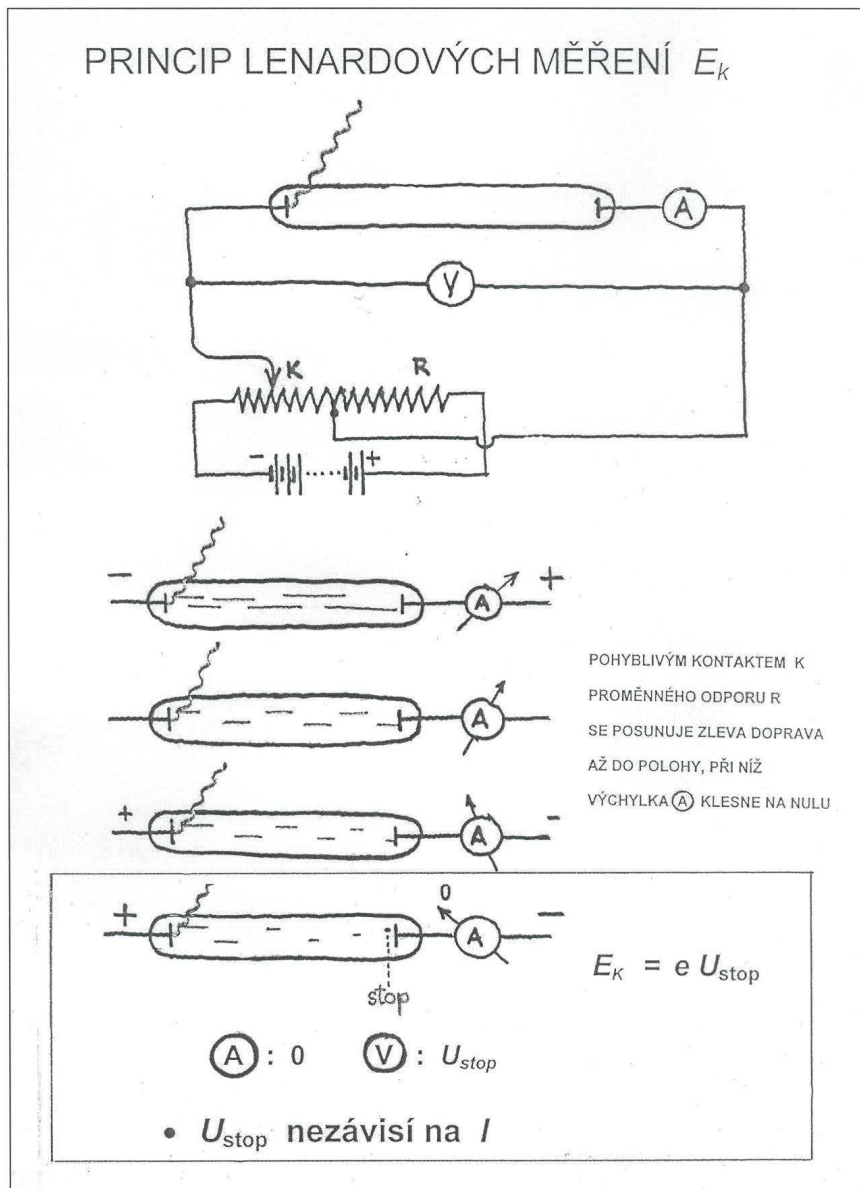
Přestože Hallwachs a Stoletov – nezávisle na sobě – detailně prozkoumali základní vlastnosti fotoelektrického jevu, nikdo z nich se jej nepokusil fyzikálně vyložit.

Rozhodující krok k nalezení jeho podstaty učinil roku 1899 Joseph John Thomson (1856–1940), který experimentálně identifikoval v nositelích záporného náboje unikajících z ozařovaného kovového vzorku elektrony, které sám – o dva roky dříve – objevil [3].



Tabulka 3

První etapu experimentálního studia fotoelektrického jevu završil Hertzův někdejší žák a asistent Philipp Lenard (1862–1947). V řadě prací provedených v letech 1902–1903 jednak nezávislými metodami ověřil některé poznatky svých předchůdců (existence červeného prahu – A. Stoletov, elektronová podstata jevu – J. J. Thomson), zejména však – jako první – provedl měření kinetické energie E_k uvolňovaných elektronů. Při tom dospěl k závěru, že E_k roste s frekvencí f dopadajícího záření [$f \uparrow \rightarrow E_k \uparrow$], zatímco na jeho intenzitě I (při neměnné frekvenci f) nezávisí.



Tabulka 4

Během patnácti let (1888–1903) tak byly vyšetřeny základní vlastnosti fotoelektrického jevu.
Experimentální zjištění

EXPERIMENTÁLNÍ FAKTA	
=====	
1.	ozařování vodiče z něj uvolňuje záporný náboj

2.	existuje mezní frekvence f_0 (tzv. červený práh fotoel. jevu)

3.	neexistuje časová prodleva mezi začátkem ozařování a začátkem uvolňování náboje

4.	$I \uparrow \rightarrow J \uparrow$

5.	E_k nezávisí na I

6.	$f \uparrow \rightarrow E_k \uparrow$

Tabulka 5

však byla natolik nečekaná, že se ani Philipp Lenard, jenž byl nepochybně jedním z nejzasvěcenějších badatelů na tomto poli, nepokusil o jeho teoretické vysvětlení.

POKUS O TEORETICKÝ POPIS JEVU

elektron
= nabitý mikroobjekt
(malá hmotnost, značný náboj)

dopadající záření
= elektromagnetická vlna
(frekvence, amplituda)



PERIODICKY SE MĚNÍ SÍLA $\vec{F} = -e \vec{\mathcal{E}}$
NUTÍ ELEKTRON KMITAT SE STEJNOU FREKVENCÍ

TEORETICKÁ PŘEDPOVĚĎ:

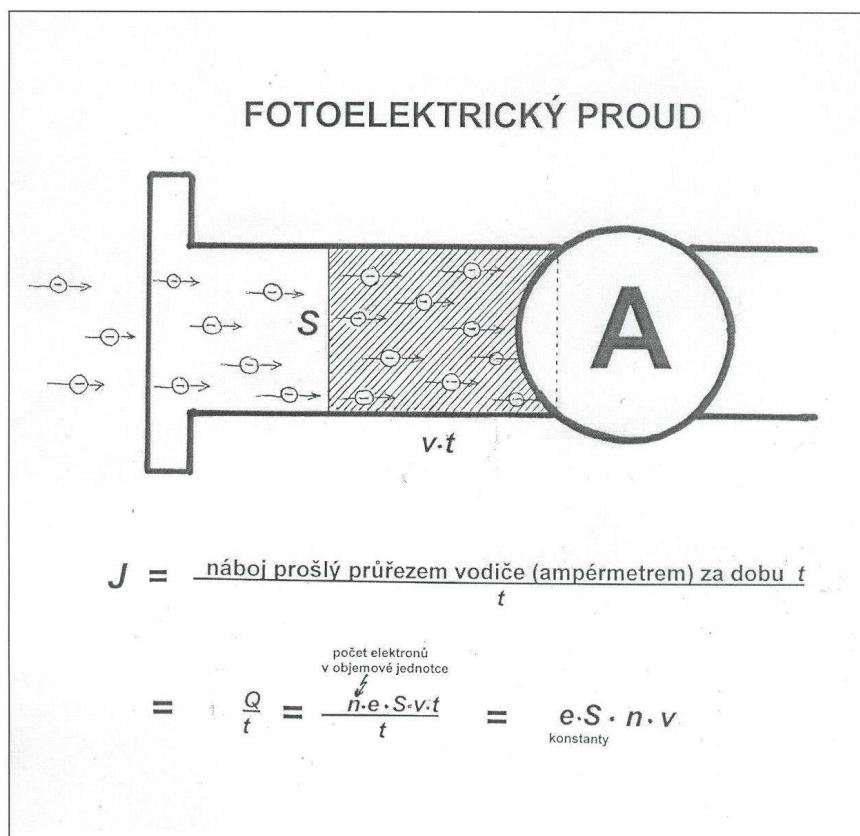
AMPLITUDA VYNUCUJÍCÍ SÍLY (~INTENZITA ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY)

velká – okamžité uvolnění elektronu (při libovolné frekvenci vlny)
s velkou energií ($I \uparrow \rightarrow E_k \uparrow$)

malá {
malé kmity elektronu (při obecné frekvenci vlny)
(k uvolnění elektronu nedojde)
postupný růst amplitudy kmitů elektronu (rezonance)
→ uvolnění elektronu s časovou prodlevou

Tabulka 6

Teoretická předpověď se tedy sice shoduje s experimentálním faktem uvedeným na řádku 1 tabulky 5, s poznatky uvedenými na jejich řádcích 2, 3, 5, 6 se však rozchází. Už to by jistě stačilo k odmítnutí naznačeného teoretického postupu. Podívejme se však pro úplnost, poučení a inspiraci ještě i na řádek 4, t.j. přezkoumejme z mikroskopického hlediska také závislost fotoelektrického proudu J na intenzitě světla I .



Tabulka 7

Na základě představy prezentované v tabulce 6 by s rostoucí intenzitou záření I měla růst kinetická energie E_k (a tedy i rychlost v) uvolňovaných fotoelektronů, což vede ke shodě s experimentálním zjištěním uvedeným na řádku 4 tabulky 5. Tento dodatečný dílčí úspěch je však pouze zdánlivý, neboť se opírá o nesprávnou – experimentem vyvrácenou (viz řádek 5 tabulky 5) – představu o růstu E_k (resp. v) s intenzitou záření I .

Pokus o teoretické vysvětlení vlastností fotoelektrického jevu vycházející z představy o mechanismu absorpce energie elektromagnetického záření elektrony, která je popsána v tabulce 6, tedy zcela ztroskotál.

EXPERIMENTÁLNÍ FAKTA	TEORETICKÁ OČEKÁVÁNÍ/PŘEDPOVĚDI
1. ozařování vodiče z něj uvolňuje záporný náboj	SHODA
2. existuje mezní frekvence f_0 (tzv. červený práh fotoel. jevu)	ROZPOR
3. neexistuje časová prodleva mezi začátkem ozařování a začátkem uvolňování náboje	ROZPOR
4. $I \uparrow \rightarrow J \uparrow$	ZDÁNLIVÁ SHODA
5. E_k nezávisí na I	ROZPOR
6. $f \uparrow \rightarrow E_k \uparrow$	ROZPOR

Tabulka 8

Totéž konstatuje v roce 1905 Albert Einstein jen krátkým odkazem: „Tradiční názor, že energie světla je rozložena spojitě v oblasti tímto světlem ozářené působí při snaze o objasnění fotoelektrických jevů popsaných v Lenardově průkopnickém článku velké potíže“ [1] a stručně dokládá, že použití jeho ideje světelných kvant o energii $E = hf$ [viz úvod tohoto textu] při výkladu fotoelektrického jevu k žádným problémům nevede. Náš elementarizovaný výklad je však koncipován odlišně a proto pokračujeme obsírněji.

Podrobnější úvaha o makroskopických veličinách J (měřeno ampérmetrem) a E_k (měřeno voltmetrem $E_k = eU_{\text{stop}}$) opírající se o jejich mikroskopické vyjádření

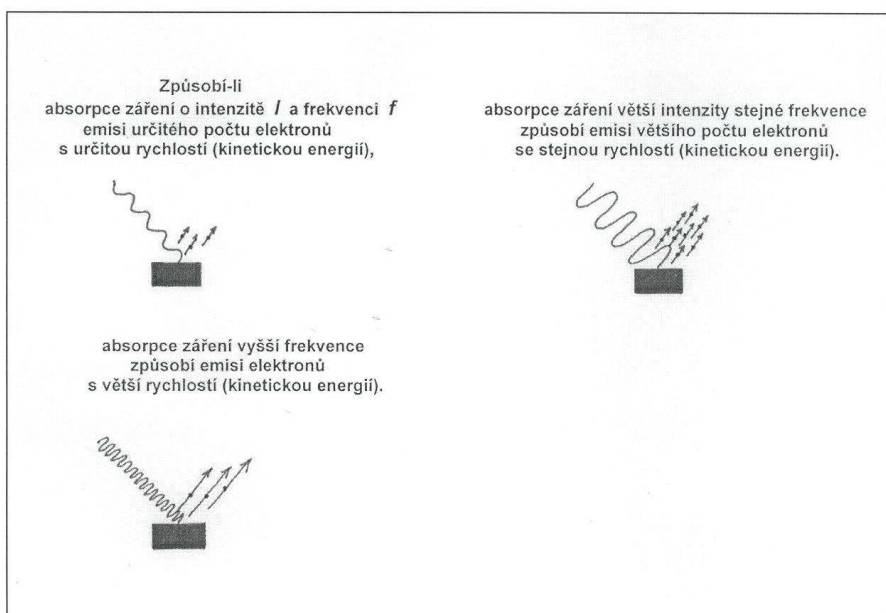
$$J = eS n v, \quad E_k = \frac{1}{2} m v^2,$$

vede k závěrům

$$I \uparrow \longrightarrow v = \text{konst.}, \quad n \uparrow \quad (\text{řádky 5 a 4 tabulky 5}),$$

$$f \uparrow \longrightarrow v \uparrow \quad (\text{řádky 6 a 4 tabulky 5}),$$

z nichž dále vyplývají následující mikroskopické závěry o fotoelektrickém jevu



Tabulka 9

<p>SHRNUTÍ:</p> <p>ZÁŘENÍ S VĚTŠÍ INTENZITOU – VĚTŠÍ POČET ELEKTRONŮ</p> <p>ZÁŘENÍ S VĚTŠÍ FREKVENCÍ – VĚTŠÍ RYCHLOST (KIN. ENERGIE) ELEKTRONŮ</p>

Tabulka 10

Na otázku, jak je to možné, odpověděl – jak již bylo uvedeno – roku 1905 Albert Einstein: elektrony neabsorbují energii tak, jak se dosud myslelo [viz tabulka 6], ale po kvantech, jejichž velikost je úměrná frekvenci záření.

EINSTEINOVA PŘEDSTAVA:

SVĚTLO (ELMAG. ZÁŘENÍ) = SOUBOR SVĚTELNÝCH KVANT

jejich počet	$n \sim I$	
jejich energie	$E \sim f$	*)

PO DOPADU SVĚTLA (ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ) NA VZOREK
KAŽDÉ TAKOVÉ KVANTUM INTERAGUJE S JEDNÍM ELEKTRONEM

ENERGIOVÁ BILANCE TÉTO INTERAKCE:

$$E_k = konst. f - W_V$$

(Einsteinova rovnice fotoelektrického jevu)

*) Einstein stanovuje i hodnotu konstanty v této úměrnosti, když píše $E = hf$.
Námi provedený teoretický rozbor to však neumožňuje.

Tabulka 11

(Sami se přesvědčte o tom, že takový teoretický výklad fotoelektrického jevu vede ke shodě se všemi experimentálními poznatky shrnutými v tabulce 5, resp. 8).

Idea světelných kvant byla natolik provokativní, že již v roce 1906 započal americký fyzik Robert Millikan (1868–1953) s experimenty, které ji měly vyvrátit. Experimentální zjištění, o něž se opírala naše dosavadní argumentace totiž nebyla tak jednoznačná a spolehlivá, jak by se mohlo z předcházejících formulací zdát. Řada konkrétních problémů, které nebyly v tomto textu vůbec zmíněny (elektrony vyletují z ozařovaného materiálu různými směry a mají různé energie, na ozařovaných vzorcích – většinou alkalických kovech – narůstají rychle oxidové vrstvy, což nepříznivě ovlivňuje reprodukovatelnost měření, měřené hodnoty proudů a napětí jsou velmi malé, takže se na nich výrazně projevují efekty spojené s existencí případných přechodových odporů a kontaktních napětí v obvodu, ...) vedla k tomu, že zejména závěry týkající se kinetické energie E_k vyletujících elektronů měly jen víceméně orientační charakter. Millikanovou ctižádostí bylo provést měření E_k tak spolehlivě a přesně, aby to umožnilo ověřit – podle Millikanova přesvědčení vyvrátit – platnost Einsteinovy rovnice fotoelektrického jevu (a tím i koncepci světelných kvant, na základě níž byla tato rovnice vyvozena). Mnohaletou (1906–1916)

pečlivou prací založenou na vlastní experimentální metodice umožňující odstranit, vykompenzovat nebo započítat všechny rušivé vlivy [4] dospěl Millikan k naprosto spolehlivému závěru – potvrzení Einsteinovy rovnice fotoelektrického jevu. Jeho tehdejší pocity klasického fyzika dokumentuje citát z jeho pozdější vzpomínkové přednášky:

„ ... [Einsteinovo vysvětlení fotoelektrického jevu z roku 1905] ignorovalo a dokonce se zdálo protiřečit všem četným projevům interference a tak se zdálo být přímým návratem ke korpuskulární teorii světla, která byla už od dob Youngových a Fresnelových zcela opuštěna.

... Strávil jsem deset let svého života testováním Einsteinovy rovnice a – navzdory všem svým očekáváním – jsem byl v roce 1915 přinucen konstatovat její nepochybné experimentální potvrzení, nehledě na veškerou její nerozumnost, která se zdála být v rozporu se vším, co jsme věděli o interferenci světla.“

[Robert Millikan, 1949]

Tabulka 12

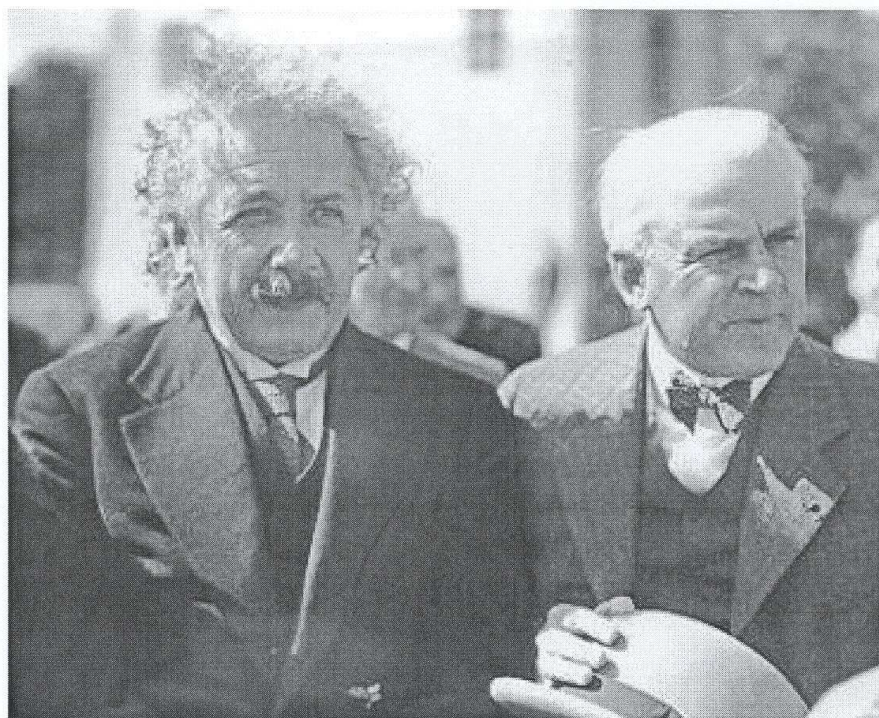
STRUČNÝ PŘEHLED HISTORIE FOTOELEKTRICKÉHO JEVU

- 1887 HERTZ objev jevu
- 1887→HALLWACHS systematické studium jevu
STOLETOV
ozařují: Zn; Na, K, Rb, ...
zjišťují vybíjení/nabíjení izolovaných vodičů,
detekují fotoproud
- 1899 THOMSON objev podstaty jevu:
uvolňování elektronů z ozařovaného vodiče
- 1902 LENARD exper. studium kinetické energie fotoelektronů

ZTROSOTÁNÍ POKUSŮ O TEORETICKÝ POPIS JEVU

- 1905 EINSTEIN výklad jevu na základě předpokladu
o existenci světelných kvant
- 1906→MILLIKAN exp. studium kinetické energie fotoelektronů
s cílem vyvrátit Einsteinův výklad
- 1914 MILLIKAN exp. potvrzení Einsteinova předpokladu
 $E_k \sim f$, resp. $E_k = konst. f$
- 1916 MILLIKAN experimentální potvrzení Einsteinovy rovnice
 $E_k = konst. f - W_V$
a stanovení $konst. = 6.57 \cdot 10^{-34} \text{ J s} = h$

EXPERIMENTÁLNÍ POTVRZENÍ KVANTOVÉHO CHARAKTERU INTERAKCE MEZI SVĚTLEM / / ELEKTROMAGNETICKÝM ZÁŘENÍM A LÁTKOU



Albert Einstein

Robert Millikan

Nobelova cena 1921

**za zásluhy o teoretickou fyziku
se zvláštním přihlédnutím k objevu
zákona fotoelektrického jevu**

Nobelova cena 1923

**za práce týkající se
elementárního elektrického náboje
a fotoelektrického jevu**

Literatura a poznámky:

1. Einstein A.: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. Annalen der Physik **17** (1905) 132.

Podstatně dostupnější než německý originál jsou jeho komentované anglické překlady, např. American Journal of Physics **33** (1965) 367 nebo Boorse H. A., Motz L. (Eds.): *The World of the Atom, vol. I*. Basic Books, Inc., Publisher, New York 1966, příp. Stachel J. (Ed.): *Einsteins Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics*. Princeton University Press 1998.

2. Omezený rozsah tohoto textu nedovoluje Einsteinovu argumentaci vyložit podrobněji. Hlubší zájemce může najít podrobnější informaci např. v Zajac R., Pišút J., Šebesta J.: *Historické pramene súčasnej fyziky 2*. Univerzita Komenského, Bratislava 1997, str. 200.
3. Semináře z fyziky 2003/2004 - 4. blok: *Několik kroků do mikrosvěta 1*.
<http://www.physics.muni.cz/kof/seminare/p14.pdf>
4. Trigg G. L.: *Crucial Experiments in Modern Physics*. Van Nostrand Reinhold Company, New York 1971. Existuje i ruský překlad: *Rešajuščije eksperimenty v sovremennoj fizike*. Mir, Moskva 1974.

Součástí přednášky je m.j. provedení Millikanova experimentu (včetně určení hodnoty Planckovy konstanty h) na komerčním demonstračním zařízení.

Příloha: Jednající osoby

viz pps soubor na téže internetové stránce