



## Výfučení: Fotoelektrický jev

V minulosti a vlastně i v dnešní době si vědci lámou hlavu nad různými experimenty. Mnohdy si na jejich vysvětlení ale musejí třeba půl století počkat. Dnes si něco povíme o jednom takovém experimentu, kdy byl pozorován tzv. *fotoelektrický jev*. Tento experiment provedl již v 19. století Heinrich Hertz. Tehdejší vědci se snažili tento jev vysvětlit, ale marně. Občas to už vypadalo velmi nadějně, avšak vysvětlit ho se povedlo až zhruba o půl století později Albertu Einsteinovi, jenž za vysvětlení tohoto jevu získal roku 1921 Nobelovu cenu.

### Hertzův experiment

Německý fyzik Hertz si ve své laboratoři připravil kovovou destičku a upevnil ji na izolovaný podstavec. Následně ji připojil k elektroskopu.<sup>1</sup> Když poté destičku nabil záporným nábojem, není velkým překvapením, že se ručička elektroskopu vychýlila. V tuto chvíli však začínal samotný experiment. Hertz posvítil na kovovou destičku ultrafialovým světlem a ručička elektroskopu spadla ve znamení, že se aparatura vybila. Takže ultrafialové záření dokázalo uvolnit z destičky záporný náboj! Jelikož byl Hertz velmi zvědavý, rozhodl se tento jev prozkoumat. Destičku tedy opět nabil záporným nábojem, ale namísto ultrafialového záření tentokrát použil záření viditelné, které má delší vlnovou délku.<sup>2</sup> Posvítil na aparaturu, ale ručička elektroskopu se nyní nepohnula ani o kus na znamení, že náboj v destičce se nezměnil. To Hertzovi přišlo zvláštní, a proto se rozhodl experiment zopakovat s intenzivnějším zdrojem světla. Avšak ani tentokrát se nepovedlo destičku vybit. Bylo tedy zřejmé, že s delšími vlnovými délkami světla nelze záporný náboj vybit. Dále se Hertz rozhodl experiment zopakovat, tentokrát ale s kladným nábojem na kovové destičce. Ať na destičku svítil zářením s libovolnou vlnovou délkou a intenzitou, nepodařilo se mu kladně nabitou destičku vybit.

Tento jev, kdy zářením docházelo k vybití záporného náboje z kovů, byl nazván fotoelektrický jev,<sup>3</sup> avšak tento jev se nedařilo fyzikům dlouhá léta vysvětlit.

### Selhání klasické fyziky při vysvětlení fotoefektu

Pojďme se nyní podívat, jak se fyzici pokoušeli tento jev vysvětlit pomocí klasické fyziky, kdy se na světlo koukáme jako na vlnění.

Když nabijeme atom záporným nábojem, přidáme vlastně jeho elektronovému obalu elektrony. Tudíž v celém atomu se nachází víc elektronů než protonů a celkový náboj atomu je tedy záporný. Při nabití kladným nábojem elektrony z elektronového obalu odebíráme, jelikož přidat proton do jádra běžnými způsoby nelze. Nicméně nastává situace, kdy je v atomu méně elektronů než protonů, a proto je celkový náboj kladný. U fotoefektu docházelo pouze k úniku záporného náboje – přebytečné elektrony byly vyraženy z atomového obalu dopadajícím zá-

<sup>1</sup>Elektroskop je přístroj na měření elektrického náboje.

<sup>2</sup>Vlnová délka je jeden z parametrů libovolného záření, tedy i použitého viditelného světla. U něj platí, že čím větší je vlnová délka, tím je světlo červenější a čím menší, tím modřejší.

<sup>3</sup>Častěji používaná kratší verze označení pro tentýž jev je fotoefekt.

řením. Je tedy zřejmé, proč k fotoefektu nedocházelo, byla-li kovová destička nabitá kladně – z elektronového obalu nebylo co vyrazit.<sup>4</sup>

Problém, se kterým si ale fyzici nevěděli rady, byl, proč dochází k vyrazení elektronu jen někdy. Konkrétně byla-li vlnová délka použitého záření menší než nějaká mezní hodnota. Domnívali se, že elektrony by měly být vyraženy zářením s libovolně dlouhou vlnovou délkou, pokud jim dodáme dostatek energie. Dostatek energie se dal vyřešit intenzitou dopadajícího záření, nicméně to problém, jak již víme, neřešilo.

## Vysvětlení fotoefektu pomocí kvantové fyziky

Celou situaci osvětlil až Albert Einstein, který se na celou situaci koukl tak trochu z jiné strany. Doposud se totiž pohlíželo na záření jako na vlnu.<sup>5</sup> Představte si, že se světlo šíří podobně jako vlny na hladině vody, když do ní hodíte kámen. Einstein se však podíval na světlo také jako na soubor částic, tzv. světelná kvanta, která se šíří prostorem. Tato světelná kvanta byla později nazvána fotony. Řekl si tedy, že záření má vlnové vlastnosti (vlnovou délku  $\lambda$  a tedy i frekvenci  $f$ ) a také částicovou povahu, jakou má například elektron. Tato vlastnost světla, které se umí chovat jako vlnění i jako částice, se nazývá vlnově-korpuskulární (též vlnově-částicový) dualismus.

Energie fotonu  $E_f$  totiž závisí na jeho frekvenci  $f$ , která se dá přepsat pomocí vlnové délky fotonu  $\lambda$ , rychlosti světla  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a Planckově konstantě  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ :

$$E_f = h \cdot f = h \frac{c}{\lambda},$$

kde se pro každý foton mění pouze frekvence  $f$ , tudíž vlnová délka  $\lambda$ , protože jakékoliv světlo se pohybuje ve vakuu stejnou rychlostí  $c$ . Dopadne-li foton na kovovou destičku, srazí se s nějakým elektronem a odevzdá mu veškerou svoji energii  $E_f$ . Pokud je tato předaná energie dostatečně velká, část této energie se využije na únik elektronu z elektronového obalu atomu. Energie spotřebovaná na tento únik se nazývá výstupní práce  $W_v$ . Pokud zbude elektronu ještě nějaká energie, spotřebuje ji na svůj pohyb neboli přemění ji na svoji kinetickou energii  $E_k$ . V tuto chvíli můžeme pozorovat fotoefekt. Přeměny energií, jak jsme si je právě popsali, můžeme zapsat pomocí rovnice

$$E_f = W_v + E_k$$

Výstupní práce je dána látkou, ze které elektron vystupuje, zejména její elektronovou strukturou.

Pokud ale nebude energie fotonu aspoň rovna výstupní práci elektronu, nikdy k fotoefektu nedojde, protože elektron neobdrží dostatek energie k tomu, aby z elektronového obalu atomu unikl. Tudíž podmínka na splnění fotoefektu je

$$E_f \geq W_v.$$

Z této rovnice nám plyne vysvětlení, proč na vyrazení elektronů z destičky nestačilo světelné záření. Pro každý kov existuje jistá mezní frekvence  $f_0$  dopadajícího záření, kdy dojde k vyrazení elektronů. Jestliže bude frekvence dopadajícího fotonu nižší než mezní frekvence dané látky  $f_0$ ,

<sup>4</sup>K vyrazení „přebytečného“ protonu nemůže dojít, nicméně důvody, proč tomu tak je, jsou docela složité, takže tuto informaci berme jako fakt.

<sup>5</sup>Konkrétně jako na elektromagnetické vlnění, nicméně chování tohoto vlnění je podobné jako například chování vln na rybníce.

tak tento jev již nebude probíhat. Ani vyšší intenzita nepomůže, neboť to jednoduše znamená, že vyšleme na kov více paprsků najednou. Žádný z nich však nebude mít dostatečnou energii na vyražení elektronu z obalu.

## Druhy fotoefektu

Fotoefekt, jak jsme si jej popsali výše, se nazývá *vnější* fotoefekt. Dále jsme si říkali, že nemá-li dopadající foton dostatečnou energii, nedojde k vyzáření elektronu a k fotoefektu nedojde. To je pravda jen z části. Mluvíme-li o fotoefektu, většinou se tím myslí vnější fotoefekt. K němu doopravdy nedojde. Dojde ale k tomu, že elektron, kterému jsme dodali energii, se uvolní z elektronového obalu, ale v látce zůstane. Stane se z něj tzv. volný elektron, který se může podílet na vedení elektrického proudu. Budeme-li tedy svítit na kovovou destičku zářením s menší energií, než je výstupní práce daného materiálu, budou se elektrony uvolňovat uvnitř destičky, v důsledku čehož se bude snižovat její odpor. Tomuto jevu se říká *vnitřní* fotoefekt, který využívají například fotodiody či solární panely.

## Závěrečné shrnutí

Fotoefekt, jak nám jej vysvětlil Albert Einstein, nechal vzniknout novému odvětví – kvantová fyzika. Ta využívá pohledu na světlo jako na částici (světelné kvantum), ale také neopomíná jeho vlnové vlastnosti. Při fotoefektu může dojít k uvolnění pouze záporného náboje (elektronů), protože fotony nemohou vyrážet kladný náboj (protony). Velmi důležitá je frekvence záření, protože ta nám ovlivňuje energii fotonu. S menší frekvencí nám totiž roste energie fotonu, která musí být vyšší než výstupní práce látky, na níž chceme fotoefekt uskutečnit.

**Marek Božon**  
marek@vyfuk.mff.cuni.cz

**Petra Štefaníková**  
petras@vyfuk.mff.cuni.cz

---

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.  
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.