

Sto let korpuskulárně vlnového dualismu

OLDŘICH LEPIL

Přírodovědecká fakulta UP, Olomouc

Začátek 20. století přinesl několik klíčových objevů a poznatků, které tvoří základní pilíře tzv. moderní fyziky, k jejímž vrcholům patří vznik *kvantové fyziky*. Připomeňme si některé z nich. Především je to *Planckova kvantová teorie* z roku 1900. Německý fyzik *Max Planck* (1858–1947) vyřešil problém spektrálního vyzařování těles a dospěl k závěru, že těleso může vyzařovat svoji energii jen v určitých dávkách – *kvantech*, jejichž velikost je úměrná frekvenci f vysílaného záření. Tak dospěla fyzika k pojmu *foton*. Planck určil hodnotu po něm pojmenované konstanty h a energii E fotonu vyjádřil vztahem

$$E = hf.$$

O několik let později, v roce 1905, *Albert Einstein* (1879–1955) publikoval *speciální teorii relativity*, která zahrnuje vztah vyjadřující ekvivalenci energie E tělesa a jeho relativistické hmotnosti m

$$E = mc^2,$$

kde c je rychlost světla.

Tyto jednoduše formulované zákonitosti umožňují nalézt odpověď na otázku, zda elektromagnetické záření je vlnění nebo proud částic – *korpuskulí*. Odpovědí by byl s definitivní platností rozřešen letitý problém, kterým se fyzika zabývala již od dob Newtonových a Huygensových.

Pokud bychom záření považovali za proud částic, můžeme každému fotonu záření přisoudit hybnost

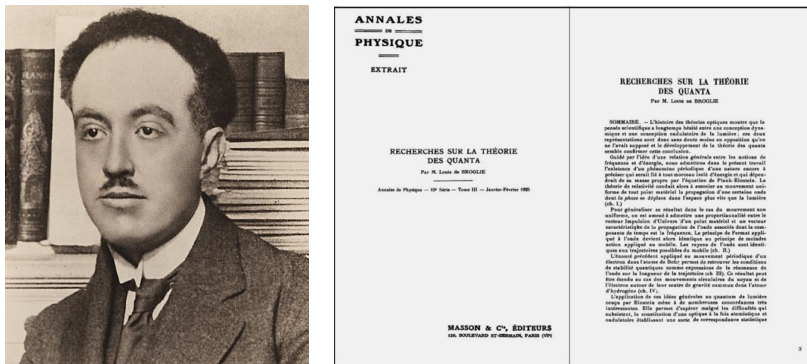
$$p = mc = \frac{E}{c} = h \frac{f}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Mezi hybností částice a vlnovou délkou λ příslušející částici platí tedy vztah

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Praktickým potvrzením správnosti tohoto závěru pro světlo je geniální *Einsteinova teorie fotoelektrického jevu*. Idea tzv. *korpuskulárně vlnového dualismu* byla na světě.

Francouzského fyzika *Louise de Broglieho* (1892–1987), který se zabýval studiem rentgenového záření, napadla v té době těžko pochopitelná myšlenka, zda obdobné duální vlastnosti nemají také další hmotné a prostorově ohraničené objekty. Příkladem takového objektu může být v té době již dobře prostudovaná elementární částice – *elektron*. Tuto revoluční myšlenku de Broglie ve svých 32 letech podrobněji rozpracoval v disertační práci s názvem *Recherches sur la théorie des Quanta* (Výzkum v teorii kvant) [1], kterou obhájil v roce 1924. Práce byla počátkem následujícího roku publikována ve vědeckém časopisu *Annales de Physique* [2] (obr. 1). Před sto lety tak de Broglie formuloval poznatek, který nejprve nebyl vědeckou veřejností s pochopením přijat. Stal se však dalším pilířem, na němž pevně stojí nejdůležitější oblast kvantové fyziky *kvantová mechanika*. De Broglieův objev byl v roce 1929 oceněn Nobelovou cenou za fyziku.



Obr. 1 Práce Louise de Broglieho (zdroj: Wikipedie)

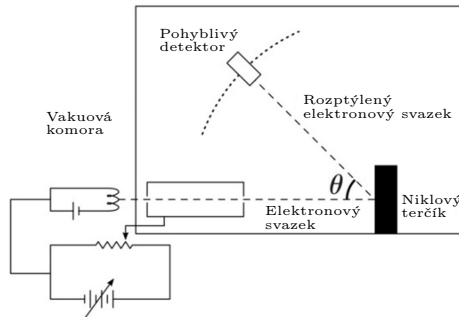
Podle de Broglieho každému tělesu o hmotnosti m , které se pohybuje rychlostí v a má tedy hybnost o velikosti $p = mv$, můžeme přisoudit také

vlnění o vlnové délce

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}.$$

Zásadním problémem de Broglieovy hypotézy však je, jak prokázat existenci toto vlnění, označovaného také jako *de Broglieovy vlny*. Nemají totiž obdobu v žádném dosud známém druhu vlnění a neexistuje zdroj, který by toto vlnění vyzařoval. Je přirozené, že nejhodnější je opřít se o poznatky, k nimž fyzika dospěla při zkoumání interakce fotonů s elektrony. Sem patří např. *Comptonův jev*, který v roce 1923 objevil americký fyzik *Arthur Holly Compton* (1892–1962) při studiu interakce rentgenového záření s relativně volnými elektrony ve struktuře uhlíku. Comptonovy experimenty prokázaly, že interakce fotonů s elektrony probíhá, zjednodušeně řečeno, jako pružný ráz dvou srovnatelných objektů.

Za přímé potvrzení de Broglieho hypotézy je však považován experiment, který v roce 1927 provedli američtí fyzikové *Clinton J. Davisson* (1881–1958) a *Lester Germer* (1896–1971). Experimentálně zkoumali odraz elektronů, které dopadaly kolmo na terčik v podobě monokrystalu niklu (schéma aparatury je na obr. 2).



Obr. 2 Schéma Davissonova–Germerova experimentu (zdroj: Wikipedie)

Podle představ klasické fyziky by se elektrony měly od terčiku odrážet podle zákona odrazu. Ve skutečnosti však elektrony byly zjištěny i v jiných směrech. Nejvíce jich bylo registrováno ve směrech, které odpovídaly interferenčním maximům vznikajícím při difrakci de Broglieových vln na krystalové mřížce niklu. Výsledkem je zjištění, že intenzita proudu elektronů rozptýlených do různých směrů vykazuje periodické kolísání, jaké vzniká např. při odrazu světla na tenké vrstvě. To znamená, že při interakci částic s látkou dochází k typickým jevům charakteristickým pro vlnění, k *interferenci* a *difrakci*.

Měření ukázala, že ostré maximum dosahuje proud elektronů při úhlu rozptylu $\theta = 50^\circ$. Elektrony o hmotnosti $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg byly urychlovány napětím 54,0 V. Měly tedy kinetickou energii

$$E_k = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{p^2}{2m_e} \doteq 54,0 \text{ eV}$$

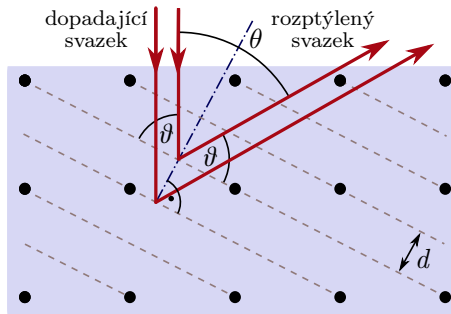
a hybnost

$$p = \sqrt{2mE_k} \doteq \sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 54 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19}} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \doteq 3,97 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Této hybnosti elektronu odpovídá vlnová délka de Broglieovy vlny

$$\lambda = \frac{h}{p} \doteq \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{3,97 \cdot 10^{-24}} \text{ m} \doteq 1,67 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,167 \text{ nm}.$$

K analýze výsledku experimentu byly použity poznatky získané britským fyzikem *W. L. Braggem* (1890–1971) při studiu difrakce rentgenového záření na krystalech (obr. 3).



Obr. 3 K difrakci rentgenového záření na krystalech (podrobněji viz [4])

Interferenční maxima odraženého rentgenového záření lze určit pomocí tzv. *Braggovy rovnice*. Pro analogický případ interakce elektronů s krystalem byla použita ve tvaru

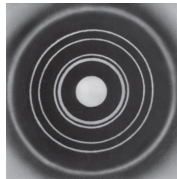
$$n\lambda = 2d \sin \vartheta = 2d \sin(90^\circ - \theta/2).$$

Vzdálenost rovin atomů v krystalové mřížce niklu $d = 9,09 \cdot 10^{-11}$ m, takže pro řád interferenčního maxima $n = 1$ vychází hodnota vlnové délky de Broglieovy vlny

$$\lambda = 2 \cdot 9,09 \cdot 10^{-11} \sin(90^\circ - 25^\circ) \text{ m} = 1,65 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0,165 \text{ nm}.$$

Výsledek Davissonova a Germerova experimentu je tak v dobré shodě s de Broglieovou hypotézou.

Ještě výrazněji prokazuje vlnové vlastnosti elektronu experiment anglického fyzika *G. P. Thomsona* (1892–1975), rovněž z roku 1927. Nechal procházet úzký svazek elektronů tenkou zlatou fólií o tloušťce řádově 10^{-7} m a na fotografické desce postavené kolmo ke směru elektronového paprsku zachytil prošlé elektrony. Po vyvolání desky se ukázalo, že elektrony vytvořily typický difrakční obrazec ve tvaru soustředných kroužků (obr. 4).



Obr. 4 Ohybový obrazec elektronů [3]

Když bylo dalšími experimenty a výpočty prokázáno, že tyto vlnové jevy byly skutečně vytvořeny elektrony, nebylo již o správnosti de Broglieovy myšlenky korpuskulárně vlnových vlastností objektů mikrosvěta pochyb.

Velikostí vlnové délky de Broglieovy vlny lze zdůvodnit, proč byla difrakce pozorována teprve při interakci elektronu s krystalickou strukturou ozařovaného materiálu, a proč projevy korpuskulárně vlnového dualismu tak dlouho unikaly pozornosti fyziků. Když uvážíme makroskopický objekt např. v podobě střely o hmotnosti 20 g, která se pohybuje rychlostí $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, pak mu přísluší vlnová délka de Broglieovy vlny

$$\lambda = \frac{h}{mv} \doteq \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{2 \cdot 10^{-2} \cdot 50} \text{ m} = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ m}.$$

To je však zcela mimo pozorovací možnosti, které má fyzika k dispozici, a pohyb tělesa beze zbytku popíšeme *pohybovou rovnicí* klasické mechaniky. Teprve u mikroobjektů je vlnová délka dosažitelná přístroji a lze ji prokázat. Pro popis jejich pohybu je pak třeba použít prostředky kvantové mechaniky, např. v podobě *Schrödingerovy rovnice*, která je analogií 2. Newtonova pohybového zákona v kvantové mechanice.

Důležitým problémem korpuskulárně vlnového dualismu je jeho interpretace. Poznatky z vlnové optiky vedou k představě, že při interakci vlnění s překážkou vznikne difrakční obrazec prakticky okamžitě, když světlo ozáří stínítko. De Broglieovy vlny však interpretujeme odlišně, jako jev

odpovídaajúci pravdepodobnostnému charakteru dejů v mikrosvĕtĕ. Urĕují pravdepodobnost, s níž se ěástice bude nacházet v urĕitĕm mĕstĕ prostoru, a umoŕňují popsat pohyb ěástice ovlivnĕný vnĕjším působením. Difrakĕní obrazec tak nevytvorĕí jediný elektron, ale velké množství elektronů, které s urĕitou pravdepodobností dopadají na různá mĕsta plochy stĕnĕtky.

Literatura

- [1] *de Broglie, L.*: Recherches sur la thĕorie des Quanta. Physique [physics]. Migration – universitĕ en cours d'affectation, 1924. Dostupné z: <https://theses.hal.science/tel-00006807/document>.
- [2] *de Broglie, L.*: Recherches sur la thĕorie des Quanta. Ann. Phys., roĕ. 10 (1925), ě. 3, 22–128. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/anphys/192510030022>.
- [3] *Svoboda, E. a kol.*: Pĕrehled stĕredoškolské fyziky. Prometheus, Praha, 2024.
- [4] <https://math.stackexchange.com/questions/3595481/davission-germer-experiment-using-braggs-law>

Rozvoj schopnosti ŕtudentov uĕitel'stva fyziky plánovat' vyuĕovaciu hodinu

BARBORA GEJDOŠOVÁ, KLÁRA VELMOVSKÁ

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave, SLOVENSKO

Ak chceme, aby ŕiaci na základných a stredných školách mali záujem o fyziku, aby mali chuť bádať a zaujímať sa o fungovanie sveta, tak je dôležitĕ zamerať sa aj na uĕitel'ov fyziky. Výchovno-vzdelávacie pôsobenie uĕiteľa má na ŕiakov veľký vplyv. Predstaviť danú tému vyuĕovacej hodiny ŕiakom pútavo, zvoliť vhodné metódy, formy, ěi pomôĕky, je potrebnĕ si vopred premyslieť a naplánovať. Rokmi praxe môžu uĕitelia nadobudnúť mnohé zručnosti, vĕďaka ktorým je plánovanie vyuĕovacích hodín pre nich jednoduchšie. Zaĕínajúci uĕitelia, ktorí chcú viesť kvalitné vyuĕovacie hodiny fyziky, si musia vopred dôkladne naplánovať vyuĕovací proces. Teoretické znalosti, ale aj praktické zručnosti ohľadom plánovania vyuĕovacích hodín získavajú budúci uĕitelia už poĕas štúdia na univerzite. Poĕas štúdia si ŕtudenti uĕitel'stva fyziky majú osvojiť základné didaktické poznatky a vedomosti o plánovaní a projektovaní vyuĕovacích hodín, nauĕiť