

Kapitola 1

Úvod

1.1 Cesta ke kvantové fyzice

Devatenácté století bylo dobou, kdy se poznatky existujících fyzikálních teorií ucelovaly a zásadní části fyziky dostávaly svoji zdánlivě finální podobu.

Newtonovská mechanika zůstávala již od svého vzniku myšlenkově neměnná a v první polovině devatenáctého století pouze dostala mocnější matematické nástroje v podobě lagrangeovského a hamiltonovského formalismu. V roce 1873 skotský fyzik James Clerk Maxwell shrnul teorii elektromagnetismu ve slavné sadě rovnic nesoucích jeho jméno. Tyto rovnice popisovaly také optické jevy a světlo bylo skrz ně nahlíženo striktně jako elektromagnetické vlnění bez jakékoli částicové povahy.

Začínalo se tedy zdát, že fyzika je „kompletní“ a svět kolem nás je již fyzikálními zákony zcela a téměř beze zbytku popsán. K dovysvětlení sice zbývalo ještě několik jevů, které odolávaly soudobým teoriím, ale mnoho vědců věřilo, že tento nesoulad bude v následujících letech vyřešen a fyzika se bude moci již plně věnovat pouze svým aplikacím. Mezi tyto „prozatím nevysvětlitelné záhady“ patřily následující jevy:

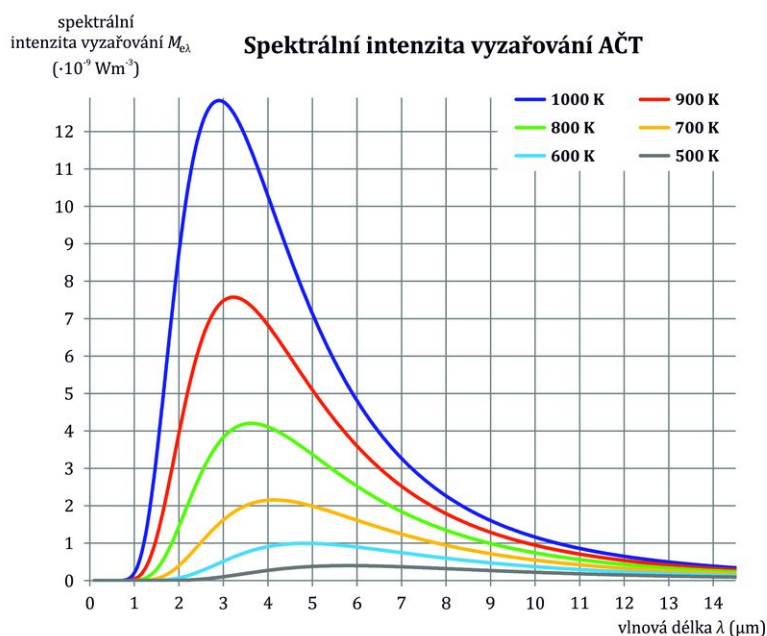
- vysvětlení záření absolutně černého tělesa
- fotoelektrický jev
- existence čárových emisních spekter atomů

Právě hledání vysvětlení těchto jevů se ale počátkem 20. století stalo odrazovým můstkem pro dramatický a v měřítkách vědy velmi rychlý vývoj, který změnil pohled lidstva na svět a dal vzniknout novým teoriím nečekaných rozměrů – mezi nimi i kvantové mechanice.

Stručně proto v této úvodní kapitole shrneme, v čem klasická fyzika při vysvětlení těchto jevů selhala a jaké alternativy nabídl rodící se kvantový pohled na svět.

1.1.1 Záření absolutně černého tělesa

Popis jevu: *Absolutně černé těleso* (AČT) je fyzikálním modelem objektu, který pohlcuje elektromagnetické záření všech vlnových délek a současně je ideálním zářičem, tj. žádné elektromagnetické záření neodráží. Celková energie vyzářená z 1 m^2 povrchu takového tělesa závisí pouze na jeho teplotě T . Závislost spektrální intenzity vyzařování ($M_{e\lambda}$) AČT na vlnové délce λ emitovaného záření byla proměřena na konci 19. století a je zobrazena na obr. 1.1 pro několik různých teplot.



Obrázek 1.1: Naměřené závislosti pro záření AČT

Kde selhává klasická fyzika: Klasická fyzika považující záření výlučně za elektromagnetickou vlnu nabízela dva matematické modely, z nichž žádný nebyl schopen popsat celou proměřenou závislost na obr. 1.1. Tzv. *Rayleigh-Jeansův zákon* uspokojivě předpovídal průběh křivky v oblasti dlouhých vlnových délek, zásadně se ale s experimentem rozcházel v krátkovlnné oblasti, kde vedl k tzv. ultrafialové katastrofě. Když se podle tohoto zákona zintegruje celkový vyzářený výkon, tak vyjde nekonečný, což je nesmyslné.

Kromě tohoto zákona bylo záření popsáno ještě v oblasti krátkých vlnových délek tzv. *Wienovým zákonem*, který naopak selhával v oblasti dlouhovlnné.

Vysvětlení: V r. 1900 přišel německý fyzik Max Planck s myšlenkou, že tělesa nevyzařují energii zcela spojitě, jak předpokládá klasická teorie elektromagnetického pole, ale mohou vyzařovat energii jen v násobcích jakýchsi „balíčků“, kvant.¹ Dalo by se říci, že toto převratné tvrzení (známé dnes jako **kvantová hypotéza**) překračuje rámeček představy elektromagnetického záření jako spojitě elektromagnetické vlny a vrací do hry newtonovský pohled na světlo coby proud částic, korpuskulí.

Energie jednoho kvanta vyzářené energie je přímo úměrná frekvenci záření:

$$E = hf, \quad (1.1)$$

kde konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js dnes nese označení *Planckova konstanta*. S pomocí této myšlenky Planck dokázal odvodit závislost spektrální intenzity $M_{e\lambda}$ na vlnové délce λ matematickým vztahem známým dnes jako *Planckův vyzařovací zákon*:

$$M_{e\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}, \quad (1.2)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, k_B Boltzmannova konstanta a T termodynamická teplota. Tento vztah velmi přesně odpovídal naměřeným datům a přitom zaváděl pouze jedinou novou konstantu, již zmíněnou Planckovu konstantu h .

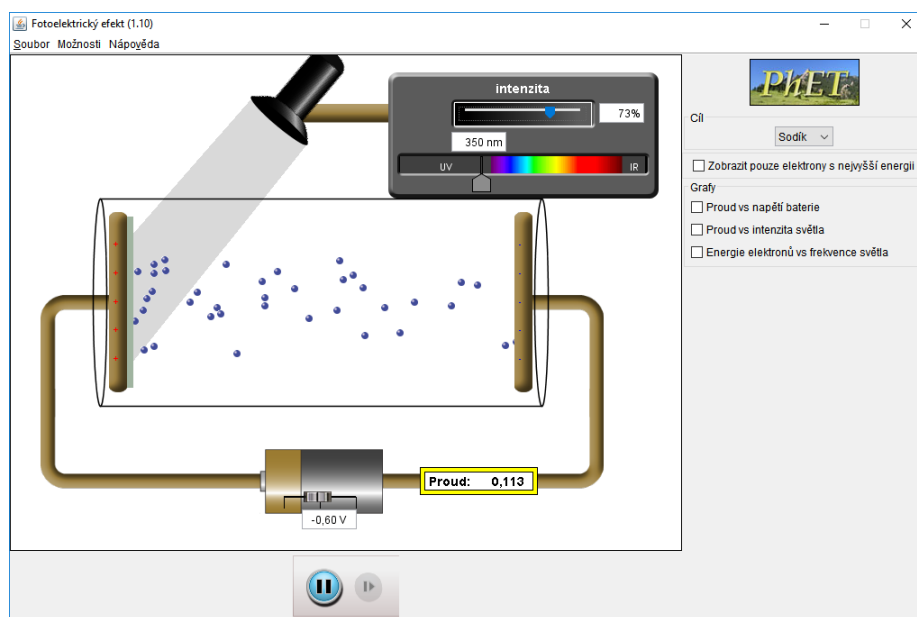
Planck sám v této době nevěřil, že myšlenka kvantování energie při emisi elektromagnetického záření plně postačuje k vysvětlení záření AČT, ačkoliv dávala správné matematické závěry. Považoval ji za pouhou „pomůcku“ umožňující matematicky odvodit správný vztah, ale nikoli za fyzikálně přijatelné vysvětlení. Teprve další roky ukázaly, že tato představa je velmi výhodná i pro vysvětlení dalších jevů a stala se základem zcela nové fyzikální teorie. Za svoji práci týkající se AČT obdržel Max Planck r. 1918 Nobelovu cenu.

1.1.2 Fotoelektrický jev

Popis jevu: Při tzv. *fotoelektrickém jevu* (fotoefektu) dochází k uvolňování elektronů z materiálu, na který dopadá elektromagnetické záření (ať už RTG, UV či viditelné světlo). Tento efekt byl pozorován zejména u kovů, poprvé při ozařování zinkové desky ultrafialovým zářením. Experimenty ukázaly, že se zvyšující se intenzitou dopadajícího záření roste počet uvolněných elektronů, ale ne jejich kinetická energie. Tu naopak ovlivňovala frekvence dopadajícího záření. Navíc při frekvencích nižších než byla určitá *mezní frekvence* dokonce k fotoelektrickému jevu vůbec nedocházelo, byť byla intenzita záření sebevyšší.

Kde selhává klasická fyzika: Představa klasické vlnové optiky byla taková, že dopadající vlna postupně rozkmitá elektron v látce, až nakonec dojde k jeho uvolnění. To vedlo nutně

¹Název fotony je výrazně mladší, až ze 30. let.



Obrázek 1.2: Aplet umožňující studium vlastností fotoelektrického jevu, dostupný na <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/photoelectric>

k závěrům, že intenzita záření by měla ovlivňovat kinetickou energii uvolněných elektronů, protože vyšší intenzita vlnění znamená větší přenášenou energii, elektron je více rozkmitán, a proto kov opouští s vyšší kinetickou energií. Tento teoretický závěr ovšem experimentům neodpovídal.

Stejně tak neuměla představa světla coby elektromagnetické vlny předpovědět existenci mezní frekvence, protože energie přenášená vlněním nezávisí na jeho frekvenci, ale na jeho intenzitě. Pro vlnění jakékoli frekvence by tedy zvyšováním intenzity mělo dojít k tomu, že vlnění má dostatek energie pro uvolnění elektronu.

Třetí nesrovnalost pak spočívala v tom, že elektrony se z materiálů uvolňovaly ihned po dopadu záření, zatímco teorie předpovídala, že mají být nějakou dobu dopadající vlnou rozkmitávány a mezi dopadem vlny a uvolněním elektronu má tedy nastat prodleva (tento efekt měl být patrný zejména při použití světla velmi malé intenzity).

Vysvětlení: V r. 1905, pět let po Planckově kvantové hypotéze, přišel německý fyzik Albert Einstein s teorií, že elektromagnetické záření není po kvantech pouze vyzařováno, ale také pohlcováno.

Elektrony v látce, na kterou záření dopadá, jsou charakterizované tzv. *výstupní prací* W_0 , tj. energií, která jim musí být dodána, aby se z materiálu uvolnily. Pokud má dopadající záření kvanta energie menší než je W_0 , k fotoefektu nedochází – to vysvětluje existenci

mezní frekvence. Teprve při jejím překročení je velikost energetického kvanta $E = hf$ dostatečná na to, aby se mohl elektron z látky uvolnit; tato energie se pak rozdělí mezi W_0 a kinetickou energii elektronu podle tzv. *Einsteinovy rovnice*:

$$hf = W_0 + E_{k,elektron}, \quad (1.3)$$

kde $E_{k,elektron}$ je maximální kinetická energie elektronu, se kterou opouští látku. Ze vztahu 1.3 je zřejmé, že kinetická energie uvolněného elektronu v souladu s experimentem skutečně nezávisí na intenzitě záření, ale na jeho frekvenci f . Podstatné také je, že experimentální data potvrdila, že konstanta úměrnosti mezi frekvencí a energií je stejná jako při odvozování Planckova vyzařovacího zákona.

Představa dopadajícího záření jako proudu „energetických balíčků“ také vyřešila problém časové prodlevy chybějící před uvolněním elektronu. Má-li záření málo energie, neznamená to, že na materiál dopadá málo energie za čas, ale že dopadá jen velmi málo energetických kvant. Pohlcení energetického kvanta elektronem je ale velmi rychlé a vede k okamžitému uvolnění elektronu (pokud je tedy frekvence záření dostatečná).

Albert Einstein obdržel v r. 1921 za své vysvětlení fotoelektrického jevu Nobelovu cenu.

1.1.3 Comptonův rozptyl

Striktně vzato Comptonův rozptyl nepatří mezi jevy, které nebyly na konci 19. století vysvětleny, protože byl pozorován až později. Uvádíme ho zde ale proto, že vhodně doplňuje fotoelektrický jev.

Popis jevu: Při rozptylu rentgenového záření na volných elektronech americký fyzik Arthur Holly Compton v r. 1922 pozoroval, že rozptýlené záření má menší frekvenci než záření dopadající.

Kde selhává klasická fyzika: Vlnová optika předpokládá, že elektron je v atomu rozkmitáván s frekvencí dopadající elektromagnetické vlny a právě tuto frekvenci by tedy měl dále vysílat. Protože se jedná o buzené kmitání, není možné, aby byl rozkmitán na jiné frekvenci, ani aby vyzařoval záření s jinou frekvencí.

Vysvětlení: Podobně jako v případě přecházejících dvou efektů, i vysvětlení Comptonova rozptylu vyžaduje představu záření coby proudu jakýchsi „balíčků“. Pro správné vysvětlení pozorovaného jevu bylo třeba předpokládat, že uvedený „balíček“ nese nejenom energii, ale také hybnost. Při interakci s volným elektronem mu „balíček“ předává jak část své energie, tak hybnosti – tím jeho energie, hybnost a také frekvence poklesne. Skutečnost, že kvantu záření lze přiřadit nejenom energii, ale také hybnost (což jsou veličiny typické pro

popis hmotných bodů) vede k tomu, že se lze na kvantum energie dívat opravdu jako na hmotný bod, tj. připsat elektromagnetickému záření i částicový charakter. Částici záření dnes nazýváme fotonem.

Za toto vysvětlení dostal Arthur Holly Compton v r. 1927 Nobelovu cenu.

1.1.4 Existence čárových emisních spekter atomů

Emisní spektra získaná analýzou záření zahřátých plynů nebyla spojitá, ale obsahovala pouze velmi dobře ohraničené a navzájem i dosti vzdálené diskrétní spektrální čáry. Klasická, v té době známá fyzika nenabízela žádné zdůvodnění, proč by atomy nemohly emitovat záření všech frekvencí.

Na druhou stranu, ve druhé polovině 19. století již bylo velmi dobře popsáno spektrum atomu vodíku, a to nejprve tzv. Balmerovou formulí, dle které bylo možné spočítat frekvence viditelných čar ve spektru vodíku. Později byl formulován i tzv. Ritzův kombinační princip, který umožnil spočítat frekvenci libovolné čáry ve spektru vodíku jako rozdíl dvou členů, tzv. *termů*.

Krátce po objevu atomového jádra Ernestem Rutherfordem v roce 1911 byl představen tzv. planetární model atomu, ve kterém se elektrony pohybují kolem titěrného jádra podobně jako planety kolem Slunce. Tento model ale nebyl v souladu s teorií elektromagnetického pole, podle které by elektricky nabitý elektron pohybující se po zakřivené dráze měl vyzařovat energii, a to s takovou intenzitou, že by za nepatrný zlomek sekundy ztratil veškerou kinetickou energii a „spadl“ do jádra. Planetární model atomu byl tedy nestabilní.

Úpravu planetárního modelu navrhl dánský fyzik Niels Bohr v r. 1913, jednalo se o první model atomu založený na myšlence kvantování. V atomu podle Bohra existují pouze povolené dráhy a s nimi spojené energie, které elektron může mít a na těchto drahách (při těchto energiích) nevyzařuje, jedná se o stabilní dráhy. Přeskoky elektronu z jedné dráhy na jinou jsou spojeny s emisí či absorpcí fotonu příslušné energie. Ve spektru se tedy objevují jen ty frekvence, jimž příslušející fotony mají energii odpovídající rozdílu nějakých dvou povolených energetických hladin. Bohrův model vysvětlil v souladu s experimentem existenci spektrálních čar vodíku, pro těžší prvky však jeho předpovědi nejsou tak přesné. Také je nutno podotknout, že v rámci Bohrova modelu není nijak vysvětleno, proč jsou některé energie v atomu povolené a jiné nikoli.

Přestože Bohrův model atomu vnitřní uspořádání atomu spíše jen popisoval, než aby je vysvětloval, znamenal značný myšlenkový krok směrem k současné kvantové mechanice a Niels Bohr byl v r. 1922 odměněn Nobelovou cenou.

Pořádné vysvětlení jak původu čárových spekter, tak diskrétnosti povolených energií v atomu vodíku přináší až kvantově-mechanický model atomu. Atom vodíku byl propočítán velmi krátce po formulaci kvantové mechaniky Erwinem Schrödingerem v roce 1926. Skutečnost, že tento výpočet dal výsledky ve shodě s experimentem, byl pádným argumentem pro užitečnost nově vznikající kvantové mechaniky, i přes její na danou dobu bizarní podobu.

1.1.5 Korpuskulárně-vlnový dualismus

Čtyři výše rozebrané jevy ukázaly, že k jejich vysvětlení je třeba připsat elektromagnetickému záření částicové vlastnosti – energii a hybnost.

Francouzský fyzik Louis de Broglie pak v r. 1924 tuto myšlenku obrátil – lze-li záření připsat vlastnosti vyhrazené dosud pro částice, proč nepřipsat také částicím vlastnosti typické dosud pro záření – vlnovou délku, frekvenci? De Broglie ve své tzv. *teorii hmotných vln* připisoval vlnovou délku například elektronu, a to vztahem

$$\lambda = \frac{h}{m_e v}, \quad (1.4)$$

kde m_e je (obecně relativistická) hmotnost elektronu a v jeho rychlost. Germer a Davisson v r. 1927 de Broglieho myšlenku experimentálně potvrdili, když pro rentgenové záření a proud elektronů o stejné vlnové délce (předpovězené dle vztahu 1.4) dostali stejné interferenční obrazce (typické dosud pro vlnovou optiku) při difrakci na krystalické mřížce niklu. Jak Davisson, tak de Broglie byli v následujících letech odměněni Nobelovou cenou.

Na konci 20. let 20. století je již zřejmé, že všechny objekty mikrosvěta vykazují jak vlastnosti typické pro hmotné body („kuličky“), tak vlastnosti typické pro vlny – tato dvojakost se označuje jako tzv. *korpuskulárně-vlnový dualismus*.

1.2 V čem je kvantovka „jiná“ než klasická fyzika

Kvantová fyzika je v mnoha aspektech odlišná od těch částí fyziky, které jste doposud studovali. Příčina spočívá v tom, že objekty, které popisuje, se chovají zcela odlišně v porovnání s tím, jak se chová svět našeho každodenního života. Z toho plyne několik těžkostí, se kterými se budeme potýkat.

První a přirozená potíž spočívá v tom, že **nelze použít „selský“ rozum**, resp. intuitivní odhad chování. K tomu nám chybí právě ty zkušenosti, na kterých bychom mohli stavět. V mechanice se pracuje s hmotnými body, které si lze celkem dobře představovat jako malá tělíska (třeba kuličky), z velkého množství materiálů vytvoříme předměty, které se za běžných podmínek chovají jako tuhá tělesa, vzduch v místnosti se svým chováním příliš neodlišuje od ideálního plynu, zvuk lze popsat jako vlnění kontinua,... takto lze pokračovat. I když i v tzv. klasických partiích fyziky pracujeme s různými modely (zjednodušeními) a jejich matematickým popisem, umíme k nim najít něco reálného, co se chová velmi obdobně.

V mikrosvětě je ale chování objektů velmi odlišné, zcela nezvyklé a s jistou mírou nadsázky si dovolím tvrdit, že přesahuje i možnosti naší, klasickým světem svázané, fantazie.² Tím, o co se můžeme bez obav opřít, je logická struktura celé teorie a matematický popis systému. Celá kvantová teorie je velmi pečlivě experimentálně prověřená (právě proto, že dává tak podivné předpovědi), takže se na její platnost můžeme spolehnout.

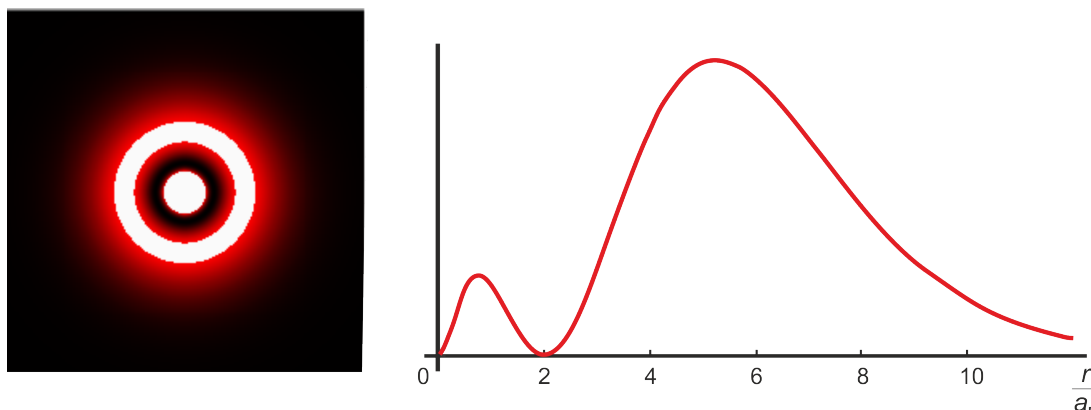
*Musíme si uvědomit, že zatímco chování nejmenších částic
nelze jednoznačně popsat obvyklým jazykem,
řeč matematiky je i nadále postačující. . .*

Werner Karl Heisenberg

S absencí zkušenosti jsou úzce propojeny i velké obtíže, na které narazíme, pokud se **chování objektů v mikrosvětě pokusíme popisovat běžnými slovy**. Uvědomte si, že se jazyk dlouhou dobu vyvíjel, a to na základě potřeby popsat svět kolem nás. Každé slovo má nějaký svůj význam, který se u každého z nás může mírně lišit. A když tato slova použijeme pro popis chování částic v mikrosvětě, tak si naši posluchači či čtenáři přirozeně budou představovat, že se tyto mikročástice chovají stejně jako jim známé makroskopické objekty, které bychom popsali stejnými slovy. A to může být velmi zavádějící. Proto při slovním popisu musíme být velmi opatrní. Uvědomění si těchto potíží je důležité zejména u učitelů na středních školách, kteří budou se základy kvantové fyziky seznamovat svoje žáky, ale nebudou se moci opřít o matematický aparát a budou si muset velmi často vystačit právě jen se slovy.

Za příklad takových obtíží si vezměme elektron v atomu vodíku. Když řekneme, že elektron obíhá atomové jádro, tak si většina lidí představí něco jako obíhání planet kolem Slunce. Můžeme to vylepšit třeba tím, že se pokusíme vnutit jim představu nějakého mnohem složitějšího pohybu, například s prvky chaotičnosti – třeba s představou, že si tam elektron poletuje jako moucha v místnosti. A to tak, aby pravděpodobnost zachycení elektronu odpovídala hustotě pravděpodobnosti jeho nalezení v jednotlivých místech, kterou v rámci

²Celkem trefná se zdá jedna studentská formulace tohoto problému: Pokud „vychází chování mikroobjektu příliš normální“, měli bychom být ostražití, zda jsme někde neudělali chybu.



Obrázek 1.3: Pravděpodobnost nalezení elektronu (v atomu vodíku v 1. excitovaném stavu, přesněji ve 2s stavu) v závislosti na vzdálenosti od jádra. Znáznorněna je dvěma způsoby – vlevo barvou (bílá = velká pravděpodobnost, černá = nulová pravděpodobnost), vpravo napočítaným grafem s vodorovnou osou v násobcích Bohrova poloměru (a_B).

kvantové fyziky umíme spočítat. Stále zde ale pracujeme s představou pohybu po nějaké trajektorii.

Jak se ale v rámci takové představy vypořádat s následující skutečností: Pokud budeme v prvním excitovaném stavu atomu vodíku měřit vzdálenost elektronu od jádra, zjistíme, že je velmi pravděpodobné ho najít ve vzdálenosti rovné $0,76a_B$ a $5,24a_B$, kde $a_B \doteq 0,5$ nm je tzv. Bohrovův poloměr; pravděpodobnost má pro tyto dvě vzdálenosti lokální maxima. Je ale zcela vyloučeno (pravděpodobnost je nulová), že bychom elektron našli ve vzdálenosti $2a_B$. Takže elektron můžeme v tomto příkladě najít ve dvou různých oblastech, které jsou odděleny prostorem, kde jej nenajdeme nikdy. Jak se ale dostane z jedné oblasti do druhé, když nemůže nikdy být ve vzdálenosti $2a_B$ mezi nimi? A není to tak, že by elektron byl celou dobu v jedné z nich a my bychom jenom nevěděli ve které... Divné, že? Z naší klasicky uchopené představy o pohybu či výskytu elektronu vyvstal zřejmý problém.

Uvedený příklad pěkně ilustruje, že kvantová fyzika je tzv. „slabá teorie“. To znamená, že odpovídá jen na otázky typu „co naměřím, když budu měřit“, tj. např. „kde částici najdu, když ji budu hledat“. Ale vůbec nedává odpověď na otázku, kde částice je, když ji zrovna neměřím, případně jak se chová. Když se nad ale tím zamyslíme, tak to není zas až tak velký nedostatek. Pokud nebudeme měřit, stejně nemůžeme výsledky teorie nijak ověřit – a naopak, pokud je chceme ověřit, měřit musíme. Jinými slovy, kvantová fyzika popisuje jen to, co můžeme o světě naměřit, nikoli to, jaký je. Právě tento rys kvantové fyziky vadil některým fyzikům (např. Albertu Einsteinovi) natolik, že ji nepřijali jako platnou teorii. S tím je spojen také jeden z postulátů, který zjednodušeně říká, že měření ve kvantové fyzice ovlivňuje měřený systém a je třeba tedy měření zahrnout do popisu chování systému.

Vraťme se ještě k jazykovým problémům, a to konkrétně ke **slovu** „částice“. Ve fyzice

mikrosvěta se běžně používá ve dvou překrývajících se významech – jako objekt, který popisujeme kvantovou fyzikou, tj. např. elektron, foton. Ale také říkáme, že elektron se chová jako částice a myslíme tím, že se chová jako klasický hmotný bod (tj. jako malá kulička). Je dobré si tento problém v názvosloví uvědomit.³ V tomto textu budeme slovo částice používat výhradně pro objekty mikrosvěta, které popisujeme kvantovými zákony. Stejně tak nebudeme používat ani zažitý termín částicově-vlnový dualismus, ale korpuskulárně-vlnový dualismus.

³Celkem běžná věta, že „elektron je částice, která má částicové i vlnové chování“ v sobě skrývá oba uvedené významy a může to být pro člověka, který se s tím teprve seznamuje, matoucí.