

Fyzika mikrosvěta aktivně

Aleš Trojáněk

Úvod

Je možno vidět atomy? Jak porozumět periodické soustavě prvků? Co je to tunelový jev a jak pracuje tunelový rastrovací mikroskop? Jaký je princip laseru a kde se všude laser používá? Na jakém principu pracují jaderné elektrárny? Co je základem lékařských přístrojů jako PET (pozitronová emisní tomografie) a NMR (jaderná magnetická rezonance)?

Na tyto a řadu dalších otázek se pokusíme odpovědět v předkládaném textu o **fyzice mikrosvěta – o světě atomů, jader, molekul**. Hned na úvod zdůrazníme, že zákonitosti ve světě základních stavebních částic hmoty jsou jiné, než na jaké jsme z běžné zkušenosti (a z klasické fyziky) zvyklí. Postupně se s nimi seznámíme. Jednou z podstatných vlastností atomárních systémů je to, že jejich energie nabývá jen určitých – diskrétních hodnot – je **kvantována**. Proto se používají pro označení této části fyziky názvy **kvantová mechanika, kvantová fyzika či kvantová teorie**.¹

Kvantová teorie svým předmětem zkoumání, hloubkou myšlenek a různorodostí úspěšných předpovědí představuje velký **intelektuální čin lidstva**, který poutá pozornost mnoha přírodovědně založených lidí, ale např. i filosofů. Kvantová fyzika zkoumá, jak již bylo řečeno, **strukturu jader², atomů, molekul, tedy základních částic, z nichž se skládá veškerá látka, a tím se stává základem pro chemii, biologii či medicínu**. Poznatky kvantové fyziky vedly ke zcela novým technologiím, které jsou využity např. **v polovodičových prvcích, a tedy v počítačích a spotřební elektronice, dále v laserech, v mnoha důmyslných lékařských přístrojích, v jaderné energetice apod., jak je naznačeno v úvodních „motivačních“ otázkách**.

Co znamená slovo *aktivně* a jaká je struktura textu?

Není slovní spojení *Fyzika mikrosvěta aktivně* protimluv? Vždyť přece fyzika mikrosvěta pojednává o chování a vlastnostech objektů, které nelze bezprostředně vnímat lidskými smysly, ani pomocí jednoduchých přístrojů. Tímto slovním spojením chceme naznačit, že se budeme celkovým zpracováním textu velmi snažit získat pozornost a zaujetí žáků pro daná témata a (po vzoru současných světových vzdělávacích tendencí) snad i rozvíjet tzv. kompetence³. Časové zařazení ke konci studia na gymnáziu může toto snažení ztížit, ale pevně věřím, že ne překazit. Konkrétní struktura textu je následující: výklad klíčových myšlenek a experimentů kvantové fyziky, řešené příklady (různé obtížnosti a charakteru), kontrolní otázky, úlohy a problémy obsáhlejšího, možná nezvyklého charakteru. A právě tato poslední část má vést k aktivnímu uchopení témat, k rozvoji klíčových kompetencí, jako jsou např. řešení problémů, využívání informací, práce v týmu apod. Zájemci o některá témata si jistě zvolí možnost „poreferovat“ o nich spolužákům. Součástí kurzu (ne již samotného textu) je pro zájemce (maturanty z fyziky) k dispozici i soubor zajímavých laboratorních úloh (tzv. Středoškolské fyzikální exploratorium). V něm se pod odborným vedením

¹ Přesněji řečeno kvantová mechanika, kvantová teorie a kvantová fyzika se svým obsahem trochu liší, ale to není pro nás pro tuto chvíli podstatné.

² Základy kvantové teorie vznikly k vysvětlení vlastností atomů. Později byla kvantová teorie úspěšně použita na atomové jádro, ale i na nukleony, částice tvořící jádro, a na kvarky, ze kterých jsou nukleony složeny. Tím se rozsah použitelnosti rozšířil 10⁹ krát - tolikrát jsou menší objekty, pro které platí, než jsou atomy a tolikrát je větší energie popisovaných objektů.

³ Pod kompetencemi rozumíme vědomosti, schopnosti, dovednosti a postoje, které studenti dovedou používat i v jiných oblastech než v těch, při kterých je získali.

pracovníků z Ústavu technické fyziky FSI VUT v Brně mohou seznámit s klíčovými experimenty kvantové fyziky a podívat se pomocí AFM a STM do „nanosvěta“. Na závěr všichni žáci absolvují test, o jehož obsahu a zaměření budou předem informováni.

Dva citáty na konec Úvodu:

„Kvantová teorie je nepochybně jedním z velkých úspěchů kultury dvacátého století. Je příliš významná na to, aby zůstala hájemstvím a potěšením profesionálních fyziků.“

John Polkinghorne (1930), špičkový teoretický fyzik 50. - 70. let 20. století, později působil jako anglikánský kněz a profesor teologie. Věnuje se také popularizaci fyziky a vztahu vědy a náboženství. Řada myšlenek z jeho populárních knížek⁴ je v tomto textu použita.

Myslím, že mohu s jistotou říci, že kvantové mechanice nerozumí nikdo.



Richard Feynman (1918–1988), americký teoretický fyzik, jeden z nejvýznamnějších vědců 2. poloviny 20. století. Nositel Nobelovy ceny za fyziku z roku 1965. Svými vědeckými výsledky, ale i pedagogickým působením ovlivnil generace fyziků a učitelů fyziky. Světoznámá je jeho učebnice – *Feynmanovy přednášky z fyziky*. Širší veřejnosti je známý díky knížce svých životních příběhů *To snad nemyslíte vážně, pane Feynmane!*⁵. Vřele ji všem žákům doporučuji k přečtení.

⁴ Polkinghorne J.: *Kvantový svět*. Aurora, Praha 2000.

Polkinghorne J.: *Kvantová teorie. Průvodce pro každého*. Dokořán, Praha 2007.

⁵ Feynman R. P.: *To snad nemyslíte vážně, pane Feynmane!* Aurora, Praha 1999.

1. Kvantová fyzika

Stručný historický úvod, fotoelektrický jev, rentgenové záření, o povaze světla, vlnové vlastnosti částic, *princip superpozice a vlnová funkce*, Heisenbergův princip neurčitosti, tunelový jev, cvičení.

1. 1. Stručný historický úvod

Kvantová fyzika představuje takovou změnu v myšlení o povaze fyzikálního světa, že před jejím (byť i elementárním) výkladem je vhodné uvést stručné historické souvislosti. Činíme tak i zde. V dalším textu se budeme k historickým otázkám občas vracet a představíme hlavní aktéry převratných objevů a myšlenek.

Koncem 19. století existovaly dvě základní úspěšné fyzikální teorie: klasická mechanika (se základem v Newtonově díle) a elektromagnetismus (dovršený Maxwellovými rovnicemi). I mnoha „osvíceným hlavám“ se zdálo, že fyzika je již vybudovaná a že stačí „dodělat“ jen několik „drobností“. Jednou z „drobností“ byla skutečnost, že se nedařilo teoreticky popsat zákonitosti záření, které vydávala zahřátá tělesa. Roku 1900 se to podařilo Maxi Planckovi, který učinil předpoklad, že záření se může rovněž chovat tak, jako by přicházelo v diskretních balíčcích, kvantech. I když zavedení balíčků – porcí energie byla pro Plancka spíše jen pomůcka pro výpočty a další krok udělal až v roce 1905 Albert Einstein (viz následující kapitola), kvanta již byla na světě a rok 1900 považujeme za rok vzniku kvantové fyziky.

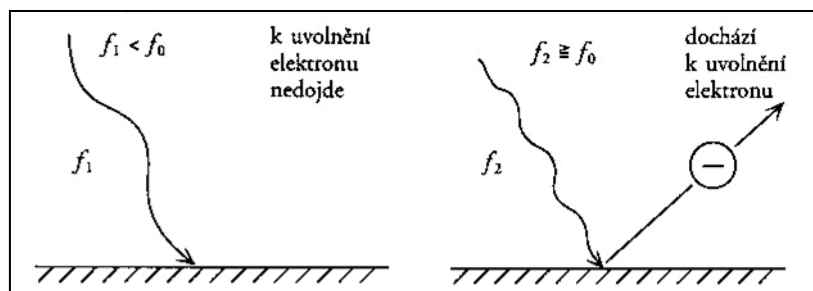


Max Planck (1858 – 1947), německý fyzik. Aby dosáhl při teoretickém popisu zákonitostí záření zahřátých těles souhlasu s experimenty, zavedl představu kvantování energie. Nobelovou cenou byl oceněn v roce 1918.

1. 2. Fotoelektrický jev – vyletí nebo nevyletí elektron?

Fotoelektrický jev (fotoefekt) spočívá v tom, že dopadající elektromagnetické vlnění uvolňuje za jistých podmínek z kovů elektrony. Bylo zjištěno, že pro každý kov existuje jistá **mezní frekvence f_0** (a jí odpovídající **mezní vlnová délka λ_0** dopadajícího vlnění (záření) taková, že elektrony jsou uvolněny jen při frekvenci $f \geq f_0$. Pro $f < f_0$ nedojde k uvolnění elektronů z kovu, i když je intenzita dopadajícího záření velká. Viz obr 1. 1.

Pro $f \geq f_0$ je počet uvolněných elektronů za jednotku času přímo úměrný intenzitě opadajícího záření (tj. energii záření dopadajícího za 1 s kolmo na plochu o obsahu 1 m^2). Kinetická energie uvolněných elektronů však na intenzitě záření nezávisí, závisí na frekvenci.



Obr. 1. 1 Fotoelektrický jev



Albert Einstein (1879 – 1955), jeden z největších vědců všech dob. Autor teorie relativity. Za přínos teoretické fyzice a zvláště za objev zákona fotoelektrického jevu obdržel Nobelovu cenu v roce 1921.

Zákonitosti fotoelektrického jevu vysvětlil v roce 1905 **A. Einstein**. Využil a rozvinul při tom představy **M. Placka** z roku 1900 a předpokládal, že elektromagnetická rovinná vlna o frekvenci f a vlnové délce λ se při interakci s látkou chová jako soubor částic – **světelných kvant**, z nichž každé má energii E a hybnost p . Později byla tato kvanta nazvána **fotony**. Při interakci s jinými fyzikálními objekty, při níž dochází k výměně energie, považujeme fotony za částice, které se ve vakuu pohybují rychlostí světla, a mají tedy nulovou klidovou hmotnost. Energie E a velikost hybnosti p fotonu jsou dány vztahy

$$E = hf \quad \text{energie fotonu} \quad (1.1)$$

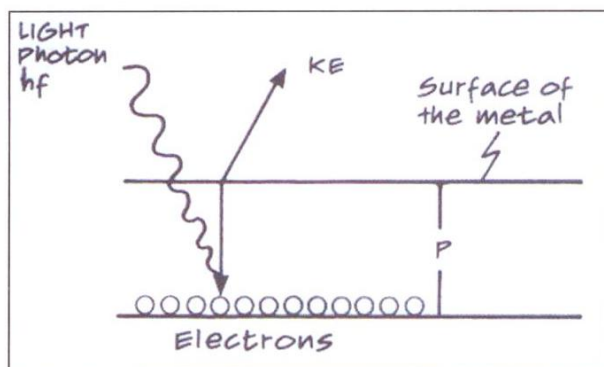
$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad \text{velikost hybnosti fotonu} \quad (1.2)$$

kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ je **Planckova konstanta**. (Vztah (1. 2) je odvozen v příkladu 1. 2.) Směr hybnosti fotonu je dán směrem, ve kterém se šíří rovinná vlna.

Při fotoelektrickém jevu odevzdá vždy každý foton celou svou energii jedinému elektronu v kovu. Část této energie se spotřebuje na uvolnění elektronu z kovu (je to tzv. **výstupní práce W_v**), případný zbytek zůstane elektronu jako jeho kinetická energie:

$$hf = W_v + \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{rovnice fotoelektrického jevu} \quad (1.3)$$

Obr. 1. 2 Jeden foton předá při fotoelektrickém jevu energii jednomu elektronu v kovu.



Obr. 1. 2 Jeden foton předá při fotoelektrickém jevu energii jednomu elektronu v kovu.

Poznámky:

1. Pro frekvenci splňující podmínku $hf < W_v$ je energie fotonu příliš malá a k uvolnění elektronu nedojde. Frekvence, která splňuje vztah $hf_0 = W_v$, se nazývá (jak již bylo řečeno) mezní frekvence a příslušná vlnová délka $\lambda_0 = c / f_0$ se nazývá mezní vlnová délka.

2. Ve fyzice mikrosvětva užíváme často pro energii jednotku **elektronvolt (eV)**. 1 eV je kinetická energie, kterou získá nebo ztratí částice s elementárním nábojem $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ při přechodu mezi místy s potenciálním rozdílem 1 V: $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

3. Zatím jsme hovořili o tzv. **vnějším fotoelektrickém jevu**, kdy elektrony jsou uvolňovány ven z kovu. Jestliže při ozáření např. polovodičů elektrony uvolněné z vazeb zůstávají v materiálu, hovoříme o **vnitřním fotoelektrickém jevu**. Na jeho principu pracují např. expozimetr, ovládací mechanismy výtahů, dveří, ale i solární panely. (Podívejte se na problémy 1. 1. P – 1. 4. P.)

Příklad 1. 1

Na povrch niklu dopadá monofrekvenční záření o vlnové délce 120 nm. Mezní vlnová délka při fotoelektrickém jevu u niklu je 248 nm. Určete: 1. energii dopadajících fotonů, 2. výstupní práci, 3. kinetickou energii uvolněných elektronů.

Řešení:

$$1. E = hf = h \frac{c}{\lambda} = 6,626 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{120 \cdot 10^{-9}} \text{ J} = 1,657 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 10,34 \text{ eV.}$$

$$2. W_v = h \frac{c}{\lambda_0} = 6,626 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{248 \cdot 10^{-9}} \text{ J} = 8,02 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 5,01 \text{ eV}$$

$$3. E_k = E - W_v = 5,33 \text{ eV}$$

Příklad 1. 2

Uvažujte o elektromagnetickém záření s vlnovou délkou 300 nm. Řešte úkoly: 1. O jaký druh záření jde? 2. Určete frekvenci záření. 3. Určete energii jednotlivých fotonů a vyjádřete ji též v jednotkách eV. 4. Odvodte vztah mezi velikostí hybnosti fotonu a jeho energií a velikost hybnosti vypočítejte.

Řešení:

1. Jde o ultrafialové záření.

$$2. f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{-7}} \text{ Hz} = 10^{15} \text{ Hz}$$

$$3. E = h \frac{c}{\lambda} = 6,63 \cdot 10^{-34} \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{-7}} \text{ J} = 6,63 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,14 \text{ eV}$$

4. Vyjdeme z relativistických vztahů pro energii a velikost hybnosti částice s klidovou hmotností m_0 , pohybující se rychlostí o velikosti v :

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Oba vztahy umocníme a dále upravíme:

$$E^2 = \frac{m_0^2 c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}}, p^2 = \frac{m_0^2 v^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\begin{aligned} E^2 - c^2 p^2 &= \frac{m_0^2 c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{m_0^2 v^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \frac{c^4}{c^2} = m_0^2 c^4 \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \frac{v^2}{c^2} \right) = \\ &= m_0^2 c^4 \left(\frac{c^2}{c^2 - v^2} - \frac{v^2}{c^2 - v^2} \right) = m_0^2 c^4 \end{aligned}$$

Tedy platí: $E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4$.

Pro foton položíme $m_0 = 0$ ($v = c$) a získáme hledaný vztah:

$$p = \frac{E}{c} \quad \text{velikost hybnosti fotonu} \quad (1.4)$$

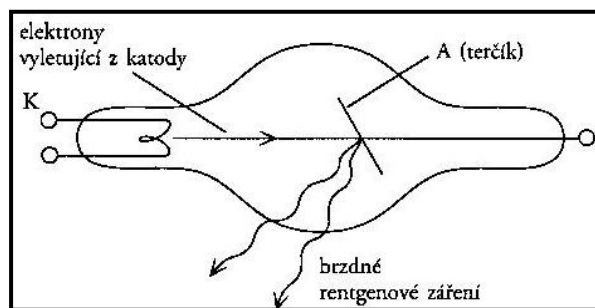
$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{3 \cdot 10^{-7}} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 2,21 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

1. 3. Rentgenové záření

Rentgenovým zářením nazýváme elektromagnetické záření o rozsahu vlnových délek od 10^{-12} m do 10^{-8} m. Rozeznáváme dva druhy rentgenového záření: brzdné a charakteristické.

Brzdné záření vzniká při zabrzdění rychlých elektronů na anodě (terčiku) rentgenky. Obr. 1. 3. (Každá částice s elektrickým nábojem, která se pohybuje se zrychlením, tedy i ta, která je zastavována, vyzářuje elektromagnetické záření.)

Kromě brzdného záření, které má spojité spektrum, existuje ještě **charakteristické** rentgenové záření s čárovým (diskrétním) spektrem. Vzniká tak, že dopadající elektron změní elektronovou strukturu atomu terčiku, ten přejde z jednoho stavu s určitou energií do stavu s vyšší energií a potom „skočí“ zpět (nebo do jiného stavu s nižší energií) a při tom vyzáří foton s určitou vlnovou délkou. Toto čárové spektrum je typické (charakteristické) pro daný materiál terčiku.

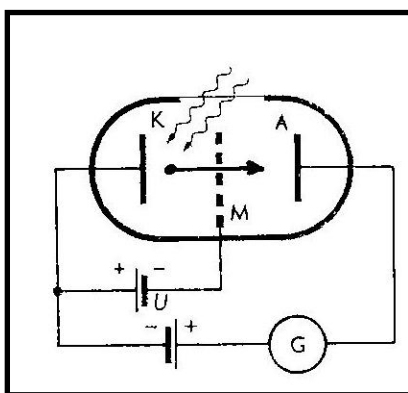


Obr. 1. 3. Schéma rentgenky.

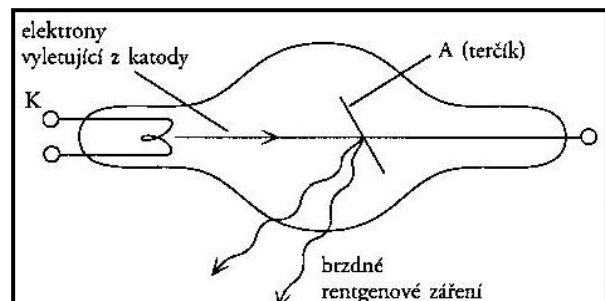


W. C. Röntgen (1845 – 1923) objevil neznámé záření X v roce 1895. Za objev tohoto záření, nazvaného po něm rentgenovým zářením, získal v roce 1901 první Nobelovu cenu.

Brzdné i charakteristické rentgenové záření vzniká (i když různým způsobem) tak, že se přeměňuje energie elektronu na energii fotonu. Proto o vzniku rentgenového záření hovoříme jako o jevu opačném k fotoelektrickému jevu. Vše je shrnuto v následujícím přehledu:



Obr. 1. 4: Schéma experimentu ke studiu fotoelektrického jevu.



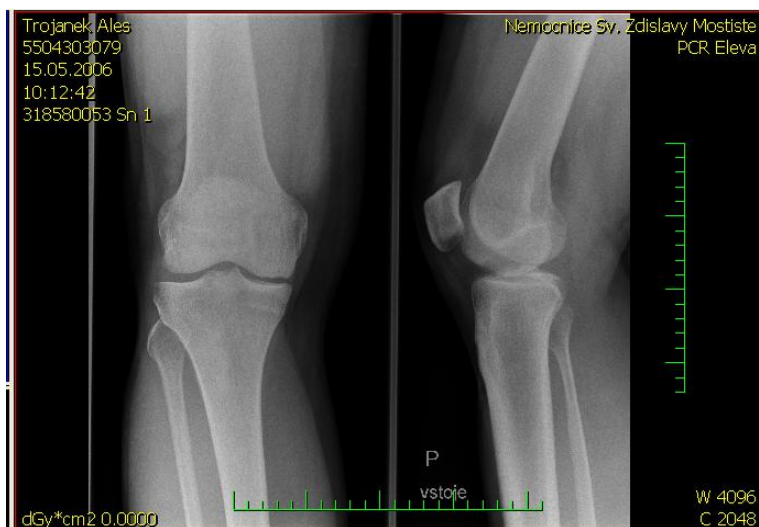
Obr. 1. 5: Schéma rentgenky.

Fotoelektrický jev
Absorpce záření
zánik (anihilace) fotonu

Rentgenové záření
Emise záření
vznik (kreace) fotonu

Rentgenové záření je od svého objevu stále hojně využíváno v různých oborech. Zdůrazněme např., že jeho pohlcování látkou závisí na protonovém čísle prvku, čehož se využívá při „snímkování“ orgánů lidského těla. (Měkké části těla obsahující vodík a uhlík pohlcují rentgenové záření méně než kosti, které obsahují vápník. Viz obr. 1. 6.)

Zájemci se mohou s novými formami této důležité neinvazivní diagnostické metody seznámit např. tím, že si vyberou témata na referáty 1. 5. P, 1. 6. P.



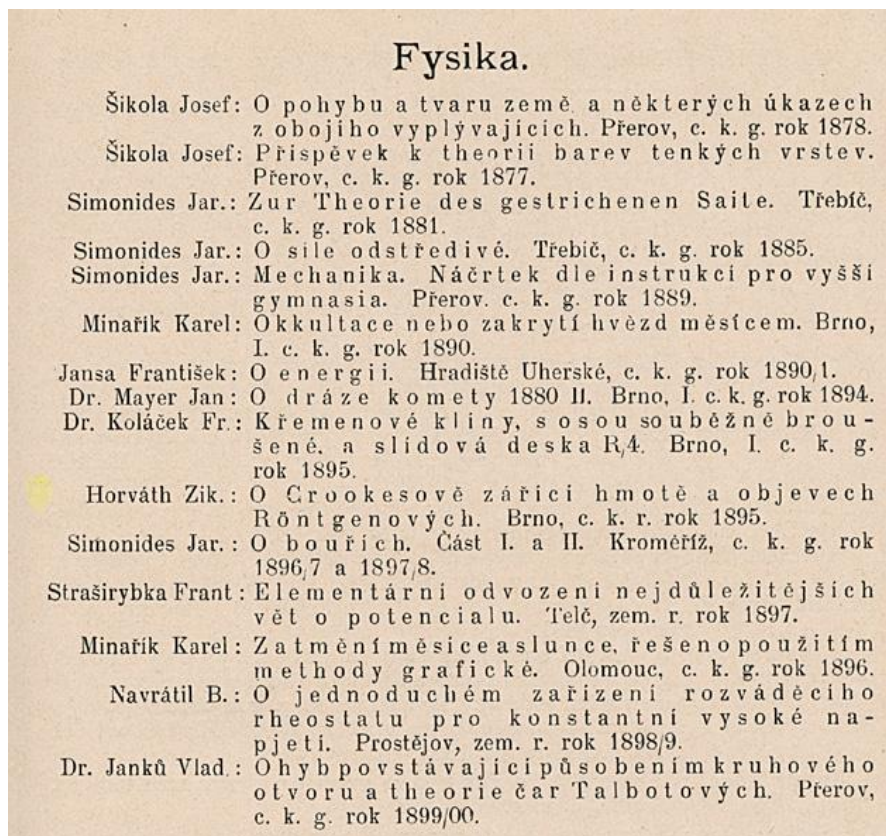
Obr. 1. 6. Rentgenový snímek kolena.

Regionálně historická poznámka

Za pozoruhodný počín v uvádění poznatků aktuální vědy do povědomí kolegů i širší veřejnosti je možno považovat přednášku prvního ředitele Zemské vyšší reálky ve Velkém Meziříčí **Zigmunda Horváta: O Crookesově zářící hmotě a objevech Röntgenových**. Brno, c. k. r. rok 1895. Ve stejném roce byl Röntgenův objev publikován! Informace je převzata z článku: Dolejšek B.: *Programy českých střed. škol na Moravě a ve Slezsku*. Druhá výroční zpráva Zemské vyšší reálky ve Velkém Meziříčí za školní rok 1900 – 1901. Velké Meziříčí, 1901. Kopie části příslušné strany je zde pro zajímavost uvedena.



Zikmund Horvát (1850 -1912), první ředitel Zemské vyšší reálky ve Velkém Meziříčí v letech 1899-1909. Byl též zakladatelem a později i sbormistrem pěveckého spolku Hlahol ve Velkém Meziříčí.



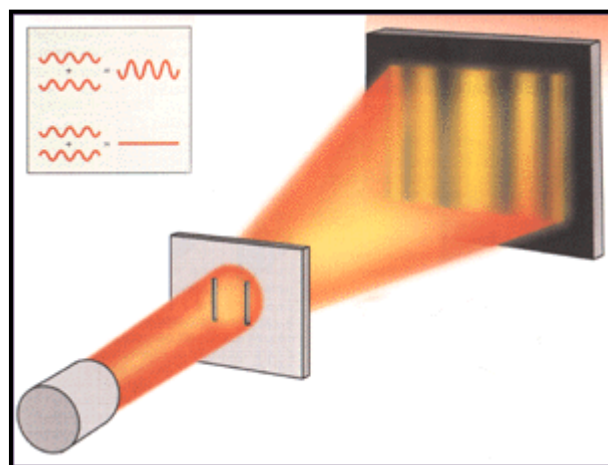
Obr. 1. 7 Kopie části stránky z výroční zprávy za školní rok 1900 -1901.

1. 4. Co je světlo?

Připomeňme si základní pokus z vlnové optiky, poprvé prováděný Thomasem Youngem v roce 1801 (obr. 1. 8). Světlo dopadá na dvě úzké štěrbin. Světelné vlny se díky difrakci na nich rozšíří a v prostoru za štěrbinami interferují, takže na stínítku vzniká obrazec, kde se střídají minima a maxima intenzity. Vysvětlení obrazce na stínítku (interferenčních proužků) jsme si ukázali v učivu o vlnové optice.⁶

Při vysvětlení fotoelektrického jevu jsme zavedli nový pojem – světelné kvantum (foton). Naskýtají se tak přirozeně základní otázky: **Je světlo (obecně elektromagnetické záření) proud fotonů, nebo elektromagnetické vlnění? Je foton částice, nebo vlna?**

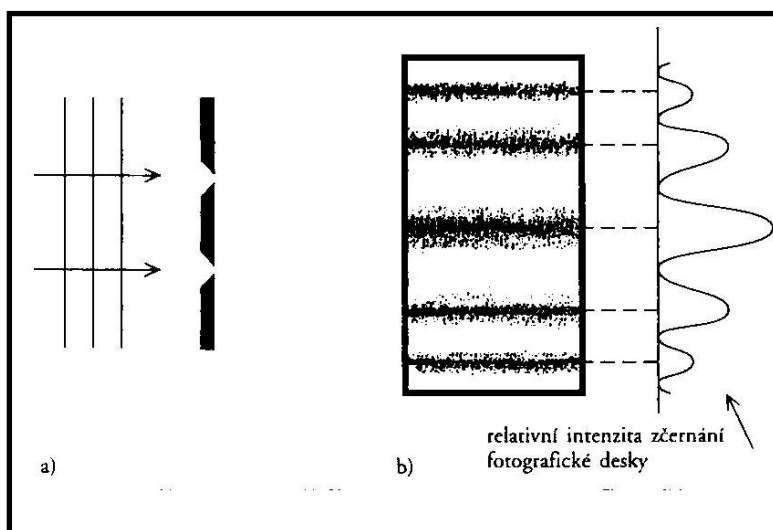
⁶ Terminologická poznámka: V dalším textu budeme často mluvit o difrakci či o interferenci a oba pojmy budeme zaměňovat. Pro upřesnění: pod **difrakci** rozumíme ohyb světelných vln na štěrbinách, které se za nimi rozšíří a v prostoru **interferují**. O výsledném obrazci na stínítku pak můžeme mluvit jako o difrakčním či interferenčním obrazci.



Obr. 1. 8 Schéma Youngova experimentu.

Pokusíme se na tyto otázky odpovědět podrobnějším rozбором **dvojtěrbínového experimentu**⁷: Uvažujme opět difrakci monofrekvenčního světla na dvojtěrbíně (obr. 1. 9). Na stínítku či na fotografické desce uvidíme typický interferenční obrazec, skládající se ze světlých a tmavých proužků (obr. 1. 9 b). Při podrobném zkoumání fotografické desky bychom zjistili, že tmavé oblasti se skládají z malých černých teček, které byly zřejmě vytvořeny absorpcí jednotlivých fotonů. Při difrakci světla na dvojtěrbíně se světlo chová dvojace – vytváří difrakční obrazec (což je typický vlnový projev) a každý foton vytvoří bodové zčernání (chová se jako částice).

Difrakci by bylo možno interpretovat tak, že výsledný obrazec je způsoben “kolektivním chováním” fotonů, které zároveň procházejí stěrbinami a vzájemně se ovlivňují (interferují). Byly však prováděny pokusy při tak malé intenzitě elektromagnetického záření, že v zařízení byl vždy jen jeden foton. Po vyhodnocení fotografické desky (či registračního zařízení) byl získán stejný výsledek – difrakční obrazec. To znamená, že každý jednotlivý foton má vlnové i částicové vlastnosti.



Obr. 1. 9 Nový pohled na dvojtěrbínový experiment.

⁷ Charakteristika dvojtěrbínového experimentu je výstižně uvedena ve slavných *Feynmanových přednáškách z fyziky*: „Budeme zkoumat jev, který nelze vysvětlit žádným klasickým způsobem a který tvoří samu podstatu kvantové mechaniky. Obsahuje vlastně celou a jedinou záhadu. Tuto záhadu nemůžeme vysvětlit. Můžeme si jen říct, jak to funguje, a tím si ozřejmíme základní zvláštnosti kvantové mechaniky“.

Shrnutí:

Světlo je elektromagnetické vlnění, které si např. při interakci s atomy stínítka vyměňuje energii v dávkách – kvantech. O světle pak říkáme, že má částicový (korpuskulární) charakter.

Foton není ani částice, ani vlna. Na rozdíl od vln, které jsou rozprostřeny v prostoru, a na rozdíl od částic, jež jsou lokalizovány, je foton objekt mikrosvěta, který má vlnové i částicové vlastnosti. Vlnová povaha fotonu se uplatňuje při difrakci (foton prochází oběma štěrbinami), částicová vychází najevo při jeho detekci na stínítku.

1. 5. Vlnové vlastnosti částic

Připomeňme si vztahy 1. 1 a 1. 2 pro světlo:

$$E = hf \quad E, p \quad \text{kvantové parametry fotonu}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad f, \lambda \quad \text{parametry pro odpovídající vlnu}$$

O světle jsme nejdříve uvažovali jako o elektromagnetickém vlnění a až později jsme je chápali jako proud fotonů. V roce 1924 vyslovil francouzský fyzik Louis de Broglie odvážnou myšlenku, že s každou volnou částicí⁸ (nejen s fotonem, ale např. i s elektronem apod.) s hybností p souvisí určitá vlna s vlnovou délkou λ :

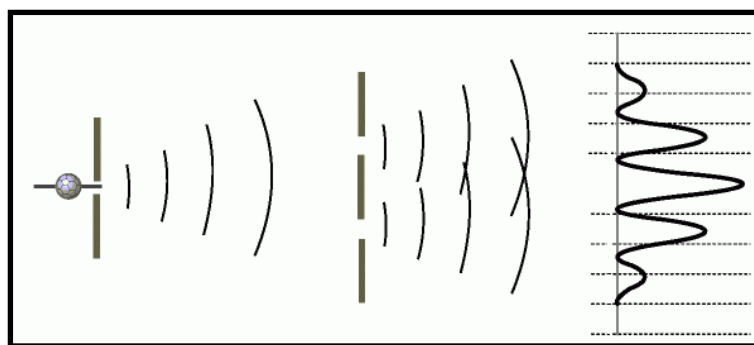
$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{de Broglieova vlnová délka} \quad (1.5)$$



Louis de Broglie (1892 – 1987), francouzský fyzik, nositel Nobelovy ceny za fyziku za rok 1929.

Pro vyložení problematiky opět použijeme rozbor dvojštěrbinového experimentu. Tentokrát budeme mít zdroj např. elektronů (byly však provedeny experimenty i s atomy či dokonce s molekulami, jako je např. fulleren – viz obr. 1. 10). Jestliže tedy svazek elektronů prochází dvěma štěrbinami, na stínítku dostaneme velmi podobný obrazec jako v experimentu s fotony. Výsledný difrakční obrazec se nezmění, i když zdroj elektronů je tak slabý, že v každém okamžiku je mezi dvojštěrbinou a stínítkem nejvýše jeden elektron. (Doba trvání experimentu se samozřejmě prodlouží.) Připomeňme ještě, že elektrony jsou, např. pomocí bodových detektorů, zaregistrovány (stejně jako fotony) vždy v určitém místě. Rozbor tohoto experimentu a mnoha dalších a důmyslnějších vede k závěru, že každý jednotlivý elektron má vlnové i částicové vlastnosti.

⁸ Na kterou nepůsobí síly.



Obr. 1. 10 Dvojštěbinový experiment s fullereny.

Shrnutí:

Elektron není částice, ani vlna. Je to objekt mikrosvěta, který má vlnové i částicové vlastnosti. Vlnové vlastnosti elektronů se projevují např. při difrakci, částicové při detekci jednotlivých elektronů v konkrétních místech stínítka. Stejně tvrzení jsme vyslovili pro fotony. Podobně se však chovají i protony, neutrony, celé atomy či např. molekuly, viz obr. 1. 10. Z toho usuzujeme, že v mikrosvětě platí jiné zákony než zákony klasické fyziky. Právě přijetí této myšlenky činí studentům při seznamování se se zákonitostmi mikrosvěta potíže. Pokusíme se tuto hlavní myšlenku ještě přiblížit v následujících kapitolách.

Obtíže při popisu jevu mikrosvěta pomocí pojmů klasické fyziky si můžeme ilustrovat na následujícím příkladě převzatém z knížky⁹.

Představte si středověkého mnicha, jak se vrací do kláštera ze svého prvního výletu po Africe. Během své cesty se setkal s nosorožci a nyní stojí před úkolem, jak nosorožce popsat svým nedůvěřivým bratrům. Jelikož nikdo z nich nikdy neviděl nic tak podivného, jako je nosorožec, mnich si musí vypomoct analogií. Nosorožec, říká, vyhlíží v určitém ohledu jako drak, ale v jiném zase jako jednorožec. Bratři tak získají vcelku rozumnou představu, jak to zvíře vypadá. Ovšem ani draci ani jednorožci v přírodě neexistují, kdežto nosorožec ano. To samé je s naším kvantovým světem: realitu nepopisují ani ideální vlny, ani ideální částice. Tyto pojmy nám ale dávají jisté tušení o určitých aspektech toho, jak se věci mají ve skutečnosti.

Příklad 1. 3

Určete délku de Broglieovy vlny pro kuličku o hmotnosti 1 g, která se pohybuje rychlostí o velikosti $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Je tato vlnová délka měřitelná? Mohou se vlnové vlastnosti takové částice projevit?

Řešení:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{10^{-3} \cdot 0,1} \text{ m} = 6,63 \cdot 10^{-30} \text{ m}$$

Taková hodnota vlnové délky je nesrovnatelně menší než je rozměr jádra atomu (10^{-15} m) a již z tohoto důvodu můžeme usoudit, že se vlnové vlastnosti kuličky v běžných jevech neprojeví. (Daná hodnota je zřejmě neměřitelná.)

⁹ Coles P.: *Kosmologie. Průvodce pro každého*. Dokořán, Praha 2007, str. 122.

Příklad 1. 4

Elektrony jsou urychlovány napětím 10 kV. Úkoly: 1. Určete jejich de Broglieovu vlnovou délku. 2. Vysvětlete, proč např. k zobrazování jednotlivých atomů v krystalové mřížce se používají elektronové mikroskopy (použijte nerelativistický vztah mezi energií a hybností elektronů).

Řešení:

1. Kinetická energie elektronu se zvýší z nuly na hodnotu

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m} = eU$$

De Broglieova vlnová délka elektronu je

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mvU}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4}} \text{ m} = 1,23 \cdot 10^{-11} \text{ m}.$$

2. Pomocí mikroskopu nemůžeme „vidět“ menší objekty, než je vlnová délka. Vlnová délka viditelného světla je řádově 10^{-7} m, což je o tři řády více, než jsou rozměry atomů. Proto se nepoužívají k zobrazování mikrostruktur optické mikroskopy, ale **elektronové**, v nichž se využívá vlnových vlastností elektronů. Jejich de Broglieova vlnová délka je srovnatelná nebo menší, než jsou rozměry objektů mikrosvěta.

1. 6. Princip superpozice a vlnová funkce¹⁰

„Avšak na samém počátku, když vykládal princip superpozice, rozlomil Dirac¹¹ kus křídly na dvě poloviny. Existuje stav, říká, kdy je křída zde – a položil jeden kousek na stůl. Existuje další stav, kdy je zde – a položil druhý kousek na druhý konec stolu. V kvantové mechanice však existují i stavy dané kombinací těchto dvou možností, kdy křídu nalezneme někdy tady a jindy zase tam. Jinými slovy, s principem superpozice se dostáváme přímo k srdci všech neurčitostí a nejednoznačností spojených s kvantovou mechanikou.“¹²

Citátem z velmi pěkné populární knížky o kvantové fyzice jsme uvedli stručné poznámky o principu superpozice, který má klíčový význam pro pochopení hlavních zákonitostí kvantového světa. Pokusme se ho objasnit ještě následujícím způsobem:

¹⁰ Tuto kapitolu zařazujeme trochu navíc. Je užitečné si ji přečíst, ale rozhodně není určena pro “zkoušení”.



¹¹ Paul Adrien Maurice Dirac (1902 – 1984), jeden z tvůrců kvantové fyziky, Nobelova cena za fyziku za rok 1933.

¹² Polkinghorne J.: *Kvantový svět*. Aurora, Praha 2000, str. 38.

Uvažujme opět o dvojštěrbinovém experimentu tak, že zařízením (dvojštěrbinou) prochází vždy jen jeden elektron. Předpokládejme, že elektron prošel např. horní štěrbinou. Pak pro něj dolní štěrbinou nehrála žádnou roli a mohla být na daný okamžik zakrytá. Když bychom však provedli experiment se zakrytou dolní štěrbinou, žádný difrakční obrazec nedostaneme. Nejvíce elektronů dopadá do míst naproti horní štěrbině. Podobně by situace dopadla, kdyby byla otevřena jen dolní štěrbinou. Difrakční obrazec nemůže proto vzniknout s elektronem, který prochází jen jednou štěrbinou.¹³ To nás vede k (podivnému) závěru, že elektron musel projít oběma štěrbinami. **Princip superpozice** pak můžeme vyslovit takto:

Pohybový stav elektronu je superpozicí stavu, kdy prochází horní štěrbinou, a stavu, kdy prochází dolní štěrbinou.

Tento v klasické fyzice nepřijatelný závěr je v kvantové mechanice nevyhnutelný.

Kvantové počítání

Jednou z možných aplikací kvantové fyziky (principu superpozice) mohou být tzv. **kvantové počítače**. Ty klasické pracují při výpočtech s klasickými bity (základními paměťovými jednotkami či signály), které nabývají jen hodnot 0 nebo 1. Fyzikálně se realizují tak, že např. teče proud, neteče proud, ... **Kvantový bit (qbit)** naproti tomu se může nacházet v **libovolné superpozici dvou základních stavů** $|0\rangle$ a $|1\rangle$. Je zřejmé, že takových kombinací může být více než jen dva základní stavy. To by mohlo vést k urychlení výpočtů. V této oblasti výzkum teprve probíhá. O tom, jak by šlo fyzikálně realizovat kvantové počítače, si něco málo povíme až v kapitole *Atomová fyzika*.

Vlnová funkce

V klasické fyzice je stav částice dán její polohou a rychlostí v daném okamžiku t . V kvantové fyzice se popisuje stav každé částice (nejen volné) tzv. **vlnovou funkcí** $\psi(x, y, z, t)$, která je někdy i velmi složitou funkcí souřadnic a času, přičemž tato funkce sama nepředstavuje žádnou fyzikální veličinu (je to obecně komplexní funkce). Obsahuje však veškeré informace o stavu příslušného mikroobjektu. Interpretace fyzikálního významu vlnové funkce musí být taková, aby neodpovídala žádným experimentálním faktům, např. těm, které jsme rozebírali u dvojštěrbinového experimentu. Taková je právě tzv. **Bornova pravděpodobnostní interpretace**, podle níž vlnová funkce $\psi(\vec{r}, t)$ souvisí s pravděpodobností toho, že částici najdeme v čase t v „malém okolí“ bodu o polohovém vektoru \vec{r} . Přesněji se postuluje:

Pravděpodobnost $\Delta P(\vec{r}, t)$ nalezení částice v elementárním objemu $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ opsaném bodu o polohovém vektoru \vec{r} (např. elektronu na stínítku po průchodu dvojštěrbinou) je dána výrazem

$$\Delta P(\vec{r}, t) = |\psi(\vec{r}, t)|^2 \Delta V.$$

Čtverec absolutní hodnoty vlnové funkce má tedy význam **hustoty pravděpodobnosti** nalezení částice v čase t v „malém okolí“ bodu s polohovým \vec{r} :

$$w(\vec{r}, t) = |\psi(\vec{r}, t)|^2 \quad \text{hustota pravděpodobnosti}$$

¹³ Předchozí text doplníme ještě o tuto úvahu: Kdybychom chtěli nějakým zařízením, umístěným za dvojštěrbinou zjistit, kterou z nich prošel, opravdu projde vždy jen jednou z nich, jenže v takovém případě difrakční obrazec zmizí. Elektrony se chovají jako klasické částice. Problém je v tom, že když elektrony detekčním zařízením osvětlíme, **porušíme jejich stav a donutíme je si vybrat jednu z cest**. Nezáleží dokonce na tom, zda si tuto informaci poznamenáme nebo ji nevyužijeme. Každé pozorování, které by to **mohlo** prozradit, elektron ovlivní a zruší interferenci. K ní dojde jen tehdy, když neexistuje informace, kterou štěrbinou elektron prošel.

V klasické fyzice dovedeme při znalosti polohy a rychlosti částice v daném čase t_0 a výsledné síly na ni působící přesně určit (pomocí 2. pohybového zákona) polohu a rychlost v čase $t > t_0$ i trajektorii, po které se částice pohybuje. V kvantové fyzice můžeme pouze určit pravděpodobnost výskytu např. elektronu na stínítku v daném místě po průchodu dvojštěbinou, ale nedovedeme určit místo, do kterého dopadne. Z předešlého je zřejmé, že např. pojem přesné trajektorie zde nemá smysl.

1. 7. Heisenbergův princip neurčitosti

Při běžných fyzikálních měřeních jsme zvyklí uvažovat tak, že otázka přesnosti je dána dokonalostí měřícího přístroje a zvolené metody. Tedy, že kdybychom měli „dokonalé“ přístroje, tak naměřené hodnoty fyzikálních veličin budou také „dokonale“ přesné. V kvantové fyzice však platí Heisenbergův princip neurčitosti, který nám nedovolí přesně určit např. polohu a rychlost elektronu.

Tento základní princip souvisí s „vlnově-částicovou dualitou“, kterou jsme se zabývali v kapitolách 1. 4 a 1. 5. Pokusíme se ho objasnit pomocí Heisenbergova myšlenkového experimentu¹⁴ s mikroskopem γ -záření a potom se zaměříme na jeho interpretaci a využití.



Werner Heisenberg (1901 – 1976), jeden z hlavních tvůrců kvantové fyziky. V roce 1932 (v 31 letech!) mu byla udělena Nobelova cena za objev principu neurčitosti.

Pokusme se změřit polohu a hybnost¹⁵ elektronu s takovou přesností, jak je to jen možné. Polohu budeme měřit tak, že si na elektron posvítíme a výsledek budeme sledovat mikroskopem. Na elektron tedy musí dopadat světlené záření, které se od něj odrazí a prozradí nám jeho polohu. Tu můžeme určit s přesností, která je dána použitou vlnovou délkou. (Mikroskopem nemůžeme zobrazit menší předměty, než je použitá vlnová délka světla.)

Jestliže tedy osvětlíme elektron, budou na něj narážet fotony. Abychom určili polohu co nejpřesněji, vlnová délka musí být co nejkratší, a tedy frekvence odpovídajícím způsobem vysoká (proto mikroskop γ záření). Pro velikost hybnosti fotonu dostaneme: $p' = \frac{h}{\lambda}$. Zasažení takovým fotonem však naruší pozorovaný systém – elektron. Dopadem fotonu se hybnost elektronu změní o hodnotu $\Delta p \approx p' = \frac{h}{\lambda}$. Přitom poloha elektronu je neurčitá v mezích daných vlnovou délkou: $\Delta x \approx \lambda$.

Dostáváme tak:

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx h.$$

Protože na elektron dopadne více fotonů, předchozí vztah se změní:

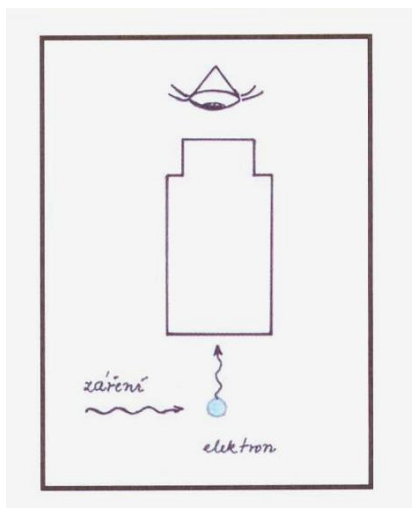
¹⁴ Heisenberg, podobně jako Einstein, používali pro objasnění fyzikálních problémů, jejichž matematická formulace byla mnohdy obtížná, tzv. *myšlenkové experimenty*. Jedná se posloupnost teoreticky možných jednotlivých měření, která je v souladu s pravidly určité teorie. Některé z myšlenkových experimentů se staly, třeba v modifikované podobě, experimenty reálnými.

¹⁵ Mluvíme obecně o poloze a hybnosti. Ale máme na mysli jejich např. x-ové složky.

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h.$$

Součin nepřesnosti v poloze a nepřesnosti hybnosti nemůže být nikdy menší než určitá hodnota¹⁶. Přesný výpočet vede k následujícímu vztahu:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \quad \text{relace neurčitosti} \quad (1.6)$$



Obr. 1. 11 Heisenbergův mikroskop

Stejná relace jako je dána vztahem (6), platí i pro y-ové a z-ové složky polohy a hybnosti, ale i pro jiné dvojice veličin, např. **pro energii a čas**. Využijeme ji při objasnění tzv. tunelového jevu.

Při prvním seznámení se se vztahem (6) se tento často chápe nesprávně. Tedy tak, že např. elektron v atomu má současně přesnou hodnotu hybnosti a polohy a relace neurčitosti určují jen omezení přesnosti, s jakou tyto hodnoty můžeme poznat (měřit). O tom, že nemůžeme úplně aplikovat pojmy klasické fyziky v oblasti mikrosvěta, svědčí tento příklad:

Příklad 1. 5

Předpokládejme, že elektron je v atomu lokalizován v oblasti, která je řádově stejná jako rozměry atomu. Pak připouštíme chybu, která je menší než $\Delta x = 10^{-10}$ m. Určete neurčitost v rychlosti elektronu.

Výsledek: Neurčitost v rychlosti elektronu je $\Delta v \geq 6 \cdot 10^5$ m·s⁻¹. (K výpočtu se můžete vrátit po „probrání“ kapitoly 2. *Atomová fyzika*.) Z výsledku je zřejmé, že kdybychom v nějakém okamžiku určili polohu elektronu uvnitř atomu, bylo by to zbytečné, protože elektron by velmi rychle zmizel. Proto (jak již bylo řečeno) nemůžeme mluvit o určení trajektorie pohybu elektronu.

Relace neurčitosti je třeba chápat jako omezení současné použitelnosti pojmů klasické fyziky v atomárních systémech. Jestliže tedy na přiblížení či zachycení reality v mikrosvětě použijeme model, který využívá veličin klasické fyziky (například polohy a hybnosti), pak každá z nich je přesněji určena jen za cenu zvýšení nepřesnosti druhé.

¹⁶ Ve vztazích kvantové fyziky vystupuje Planckova konstanta a slouží tak jako jistý „převodník“ do světa atomů.

Příklad 1. 6

Poloha kuličky o hmotnosti 6 g je dána s přesností 1 μm . Určete neurčitost rychlosti.

Řešení:

$$\Delta v = \frac{h}{4\pi m \Delta x} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{4\pi \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-6}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 8,8 \cdot 10^{-27} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Neurčitost v určení rychlosti je zanedbatelně malá. Nepřesnost praktického měření je mnohem větší než tato principiální neurčitost. Z toho vidíme, proč se relace neurčitosti neuplatňují v běžných, makroskopických situacích.

Příklad 1. 7 – Energie nulových kmitů

Pomocí relací neurčitosti ukažte, že energie základního stavu nějakého oscilátoru, např. matematického kyvadla, není podle kvantové fyziky nulová.

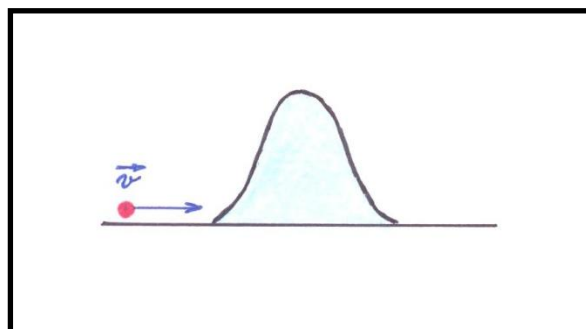
Řešení

Klasický popis (pro připomenutí): Kulička zavěšená na vlákně v tíhovém poli Země (matematické kyvadlo) má při svém kmitavém pohybu dva druhy energie: kinetickou (pohybovou) energii a potenciální energii tíhovou, kterou získává, když stoupá nad nejnižší bod kmitů. Podrobný energetický popis jsme prováděli v mechanice v 1. ročníku. Když je vlákno svislé a kulička nehybně visí v nejnižším bodě, **má kyvadlo nulovou celkovou energii.**

Kvantový popis: Relace neurčitosti (6) neumožňují kuličce být současně v určité poloze a mít přesně danou rychlost. Pokud je kulička dobře lokalizovaná v nejnižší poloze, její potenciální energie je téměř nulová, ale její rychlost bude vykazovat velkou neurčitost, a kulička tak nemůže mít nulovou kinetickou energii. Takže její celková energie pro uvedenou polohu **není** (na rozdíl od klasického případu) **nulová**. Tuto situaci můžeme zobecnit: Všechny kvantové systémy, které mohou kmitat, např. atomy v krystalové mřížce, mají tzv. energii nulových kmitů, která je nenulová.

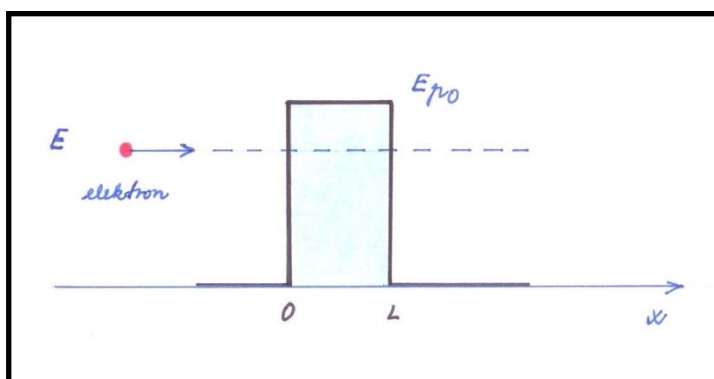
1. 8. Tunelový jev

Představme si, že udělíme kuličce podle obr. 1. 12 určitou rychlost, která však není dostatečná k tomu, aby se dostala přes kopec dané výšky. Na druhou stranu se prostě nedostane. (Jistě dovedeme provést příslušnou energetickou úvahu.) Pro elektrony a jiné částice s malou hmotností takový jev, kterému říkáme **tunelový jev** nebo **tunelování**, nastat může.



Obr. 1. 12 Jestliže nemá kulička dostatek energie, přes kopec se nedostane.

Na obr. 1. 13 je znázorněn elektron o energii E , který se pohybuje ve směru osy x . Jeho potenciální energie je nulová všude kromě oblasti $0 < x < L$, kde má hodnotu E_{p0} . Takové oblasti říkáme **potenciálová bariéra**. Protože $E < E_{p0}$, měl by se podle klasické fyziky elektron, který se k bariéře blíží zleva, od ní odrazit a pohybovat se zpět. V kvantové fyzice je však možné, že elektron s jistou pravděpodobností „prosákne“ bariérou a objeví se na druhé straně.



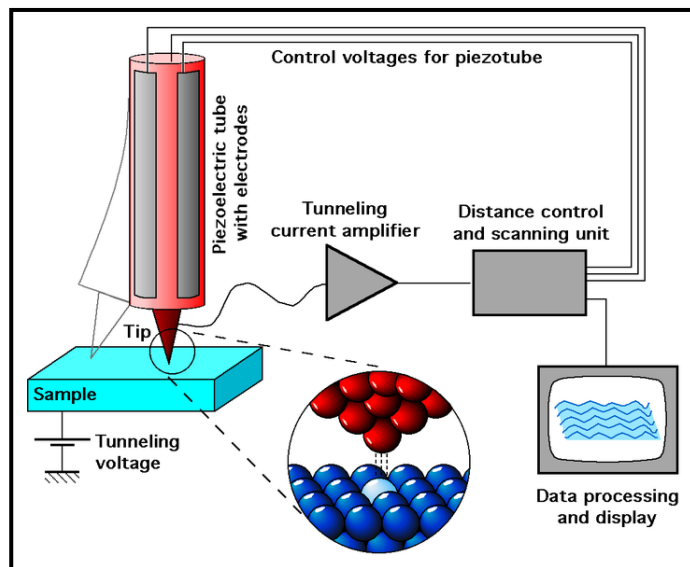
Obr. 1. 13 V kvantové fyzice existuje jistá pravděpodobnost, že elektron projde bariérou.

„Populární“ vysvětlení tunelového jevu je možno podat pomocí Heisenbergových relací neurčitosti mezi energií a časem: $\Delta E \Delta t \geq \hbar/4\pi$. (Tento vztah interpretujeme jako něco, co platí při předávání energie.) Představme si, že jednou dostaneme zprávu, že na druhém konci světa zemřel náš vzdálený příbuzný a odkázal nám fantastické dědictví. Jestliže je chceme získat, musíme je osobně převzít. Jediná potíž je v tom, že nemáme peníze na zakoupení letenky. Nikdo v okolí není schopen či ochoten nám půjčit, i když slíbíme, že mu vše štědře vynahradíme. Až jeden starý přítel nám poradí, že letecká společnost, u které pracuje, má takový bankovní systém, který umožňuje zaplatit letenku do 24 hodin po příletu, aniž kdo zjistí, že letenka nebyla zaplacená už před odletem. Díky tomu se nám podaří získat dědictví. Podobně elektron si může „vypůjčit“ energii a dostat se přes překážku, je-li schopen ji vrátit za dobu určenou relacemi neurčitosti.

Příklad použití tunelového jevu

Jedním z přístrojů, ve kterém je využit tunelový jev, je **rastrovací tunelový mikroskop STM (scanning tunneling microscope)**. Je tvořen velmi ostrým hrotem jehly, která s vysokou přesností mapuje povrch vzorku. Jestliže je mezi tímto povrchem a hrotem jehly vysoké napětí, mohou z hrotu do zkoumaného vzorku **tunelovat elektrony**. Ty tvoří tunelový proud, který je velmi citlivý na vzdálenost jehly od povrchu. V tomto zařízení lze vzdálenost jehly¹⁷ průběžně nastavovat tak, že při pohybu podél povrchu zůstává proud konstantní. Stoupání a klesání jehly tedy podrobně mapuje povrch na atomární úrovni. Tak vznikají (nyní již velmi známé) obrázky, jako je např. obr. 1. 15. STM otevřel zcela nové oblasti výzkumu na atomární úrovni a zobrazuje jednotlivé atomy způsobem, který byl ještě nedávno těžce představitelný. Hrotem sondy STM je možno dokonce jednotlivé atomy posunovat. O významu STM se zmíníme ještě v kapitole 2. *Atomová fyzika*.

¹⁷ Pohyb hrotu jehly lze ovládat pomocí piezoelektrického krystalu, který mění svoje rozměry v závislosti na napětí na jeho koncích. Technické podrobnosti však pro nás nejsou v této chvíli podstatné.

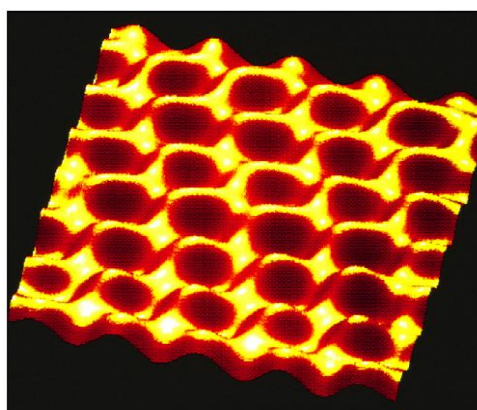


Obr. 1. 14 Schéma STM. (http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:ScanningTunnelingMicroscope_schematic.png)

Gerd Binnig a **Heinrich Rohrer** sestavili první STM v roce 1981 a v roce 1986 za tento objev získali **Nobelovu cenu za fyziku**. Přečtěme si dva krátké texty o tomto objevu z knížky *Nový kvantový vesmír*.¹⁸

To co bylo na STM tak ohromující, byla jeho neuvěřitelná citlivost. Binnig a Rohrer uváděli, že „změna vzdálenosti rovná průměru jediného atomu způsobí, že tunelový proud se změní tisícinásobně“.

O své práci s STM Binnig řekl: „Nedokázal jsem se na ty obrázky vynadívát. Bylo to, jako kdybych vstoupil do nového světa. Zdálo se mi, že jde o nepřekonatelný vrchol mé vědecké kariéry, a tudíž – svým způsobem – o její konec.“



Obr. 1. 15 Povrch grafitu zobrazený pomocí STM. Na obr. „vidíme“ jednotlivé atomy.

Další příklad, kde se uplatňuje tunelový jev (α - rozpad), uvedeme až v kapitole 3. *Jaderná fyzika*.

¹⁸ Hey T., Walter P.: *Nový kvantový vesmír*. Argo, Dokořán, Praha 2005, str. 96.

Cvičení – 1. Kvantová fyzika

„Řešení vhodně formulovaných příkladů a úloh považujeme za součást poznávacího procesu, nikoli jen za procvičování a upevňování poznatků, s nimiž se čtenář seznámil ve výkladové části textu. V mnoha případech si totiž teprve při užití teoretických poznatků při vyšetřování konkrétních situací a dějů a při řešení konkrétních problémů uvědomujeme jejich vlastní fyzikální význam a osvojujeme si je neformálně.“

I. Šantavý¹⁹

Kontrolní otázky:

- 1. 1. K** Vysvětlete význam tvrzení, že světlo má korpuskulární charakter. Vysvětlete, co je vnitřní a vnější fotoelektrický jev.
- 1. 2. K** Vyložte hlavní zákonitosti vnějšího fotoelektrického jevu. Vysvětlete, co je výstupní práce, mezní frekvence a mezní vlnová délka.
- 1. 3. K** Vysvětlete fyzikální podstatu vzniku rentgenového záření a objasněte vznik brzdného a charakteristického záření. Rozhodněte o správnosti tvrzení: Rentgenové záření je a) elektromagnetické záření stejné podstaty jako světlo, b) záření jiného druhu, c) radioaktivní záření.
- 1. 4. K** Vysvětlete, jaký je význam pojmů částice a vlna v klasické fyzice a jaký ve fyzice mikrosvěta (v kvantové fyzice).
- 1. 5. K** Rozeberte dvojštěrbínový experiment s fotony i s elektrony a pokuste se vysvětlit, v čem spočívá obrovský význam tohoto pokusu pro pochopení celé kvantové fyziky.
- 1. 6. K** Mikrovlnná trouba i lékařský rentgen vysílají elektromagnetické vlny. Které z nich mají větší: 1. vlnovou délku, 2. frekvenci, 3. hybnost fotonů, 4. energii fotonů?
- 1. 7. K** Napište relace neurčitosti pro polohu a hybnost a pokuste se vysvětlit jejich fyzikální význam.

Úlohy

- 1. 1. U** He-Ne laser září s výkonem 5 mW na vlnové délce 632,8 nm. Určete: 1. energii a velikost hybnosti fotonů emitovaných atomy pracovní látky; 2. počet fotonů vyzářených atomy za sekundu. [1. $E = 3,14 \cdot 10^{-19}$ J, $p = 1,05 \cdot 10^{-27}$ kg·m·s⁻¹; 2. $N = 1,59 \cdot 10^{16}$]
- 1. 2. U** Dopadá-li na povrch platiny záření o vlnové délce $\lambda < \lambda_0$, kde $\lambda_0 = 197$ nm, uvolňují se elektrony. (Je-li $\lambda > \lambda_0$, elektrony se neuvolňují.) Úkoly: 1. Určete mezní frekvenci a výstupní práci pro platinu. 2. Určete kinetickou energii a rychlost uvolněných elektronů při ozáření platiny ultrafialovým zářením o vlnové délce $\lambda = 150$ nm. [1. $f_0 = 1,52 \cdot 10^{15}$ Hz, $W_v = 1,01 \cdot 10^{-18}$ J = 6,30 eV; 2. $E_k = 3,16 \cdot 10^{-19}$ J, $v = 6,33 \cdot 10^5$ m·s⁻¹]
- 1. 3. U** Určete vlnovou délku de Broglieovy vlny částice, kterou pozorujeme při sledování Brownova pohybu. Její průměr nechť je 1 μ m, hmotnost 10^{-15} kg a střední kinetická energie při pokojové teplotě

¹⁹ Šantavý I., Trojánek A.: Fyzika. Příprava k přijímacím zkouškám na vysoké školy. Prometheus, Praha 2000, str. 3.

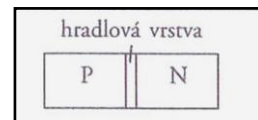
je přibližně 10^{-20} J. Mohou se v tomto případě projevit vlnové vlastnosti částice? [$\lambda = 1,50 \cdot 10^{-16}$ m. Vlnové vlastnosti se neprojevují.]

1. 4. U Určete vlnovou délku de Broglieovy vlny elektronu urychleného napětím 100 V z nulové počáteční rychlosti. Srovnajte tuto hodnotu s rozměry atomů a s meziatomovými vzdálenostmi v krystalech. [$\lambda = 1,23 \cdot 10^{-10}$ m. Vlnová délka je srovnatelná s rozměry atomů a s meziatomovými vzdálenostmi.]

Problémy, témata na diskusi či referát (pro zájemce)

1. 1. P Vnitřní fotoelektrický jev. Navrhněte jednoduché schéma zapojení polovodičové součástky v obvodu tak, aby šlo demonstrovat vnitřní fotoelektrický jev. (Součástky obvodu a radu vám poskytne vyučující fyziky.) V následujícím textu je stručně objasněn fyzikální princip solárních článků. Technické údaje o nich naleznete na internetu a též např. v publikaci Lepil. a kol: *Fyzika aktuálně. Příručka nejen pro učitele*. Prometheus, Praha 2009.

Stručné připomenutí poznatků o polovodičích: Uvažujme polovodičový přechod PN. Polovodič typu P obsahuje kromě neutrálních atomů volné díry (majoritní nosiče nábojů), volné elektrony jako minoritní nosiče nábojů a záporné ionty akceptorů vázané v krystalové mřížce. Podobné poměry jsou se zaměněnými rolami částic i v polovodiči N. Při dotyku polovodičů obou typů pronikají difúzí díry z P do N a elektrony z N do P. V okolí dotyku se setkávají a rekombinací zanikají. V blízkosti dotyku pak převládne v P záporný náboj nepohyblivých akceptorů, takže v okolí dotyku se v P vytvoří tenká záporně nabitá oblast. Podobně vznikne v N tenká kladně nabitá oblast vytvořená kladnými ionty donorů. V oblasti dotyku tak vznikne elektrická dvojvrstva, která vytváří ve svém vnitřku elektrické pole o intenzitě orientované od N k P. Tato dvojvrstva, která se nazývá hradlová vrstva, brání svým elektrickým polem k dalšímu pronikání děr z P do N a elektronů z N do P. Připojením v propustném či závěrném směru ke zdroji se pak vysvětluje princip polovodičové diody ... **Jestliže však na přechod PN dopadnou fotony, tak vyrazí některé spárované elektrony z děr. Tím se vytvoří nosiče nábojů (elektrony a díry), které jsou „tlačeny“ elektrickým polem v opačných směrech a v N vznikne přebytek elektronů a v P přebytek děr. Připojením vnějším obvodem pak teče elektrický proud. Dochází k přeměně energie fotonů na energii elektrického pole.**



1. 2. P Na principu vnitřního fotoelektrického jevu pracují **fotovoltaické (solární) články**. Používají se jako autonomní zdroje elektrické energie na družicích obíhajících kolem Země, např. na těch, které slouží pro navigaci (GPS).²⁰ Sluneční energie, která dopadne za 1 s na plochu o obsahu 1m^2 (intenzita záření) je $1,37\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Předpokládejme, že plocha solárního panelu družice je $2,6\text{ m}^2$ a že paprsky dopadají na panel kolmo. Dále předpokládejme, že sluneční světlo je monochromatické o vlnové délce 550 nm. Řešte úkoly: 1. Kolik fotonů dopadne za 1s na panel družice?, 2. Za jak dlouho dopadne na panel jeden mol fotonů? ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$) [1. $N = 9,85 \cdot 10^{21}$, 2. $t \approx 0,02\text{ s}$]



²⁰ Foto: NASA. O principu GPS i o tom, že se při jejich konstrukci a provozu uplatňují efekty speciální i obecné teorie relativity, si můžete přečíst v článku *Teorie relativity a GPS* na stránkách GVM:

http://www.gvm.cz/images/stories/people/trojanek/TR_GPS.pdf

1. 2. P Fotovoltaické články se v současné době používají nejen na družicích, ale stále více jako zdroje elektrické energie v tzv. **solárních elektrárnách**²¹. Díky dotacím byla stavba a provozování těchto elektráren výhodné. Jsou uváděny jako příklad ekologických zdrojů. Vyhledejte si na internetu informace a pohovořte o problematice budování těchto staveb z různých hledisek. Příklady otázek: Z jakých materiálů se solární články vyrábějí? Jaká je jejich účinnost? Jaký bývá výkon těchto solárních elektráren? Na informačních panelech u nich bývá jejich výkon uveden v jednotkách W_p . Co je to za jednotku? Jsou tyto stavby opravdu ekologické? (Jaký je jejich vliv na tvorbu krajiny? Co s nebezpečným odpadem po skončení provozu?)



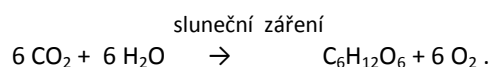
1. 2. P Představte si, že vstoupíte do velkého obchodního domu (nebo tak skutečně udělejte) a vyhledejte zařízení i zboží, kde se uplatňuje fotoelektrický jev. Nápoděda: Automaticky se ovtvřající dveře, spotřební elektronika, zařízení pro sport a turistiku,...

1. 3. P Proč jsou rostliny zelené?²²

Řešení: Jistě víte, že pro základní proces rostlin, fotosyntézu, je nutné, aby rostliny přijímaly světlo (proud fotonů). Energiové spektrum slunečního světla na povrchu Země má maximum v modrozelené, takže je trochu záhadou, proč rostliny zelené světlo odrážejí, a tak vlastně mrhají pro ně nejlepším světlem. Ukázalo se však, že fotosyntéza nezávisí na celkovém množství světelné energie, ale **na energii jednotlivých fotonů a na počtu fotonů**, které tvoří světlo dané barvy. I když „modré“ fotony“ mají více energie než „červené“ fotony, Slunce vyzařuje více červených. Rostliny využívají modré fotony pro jejich kvalitu a červené pro jejich kvantitu. „Zelené“ fotony, které z energiového hlediska leží mezi nimi, nemají ani potřebnou energii, ani počet, takže rostliny se během dlouhého vývoje přizpůsobily tak, že jich absorbují méně. Tedy je nepohlcují.

Doplňující úkoly: 1. Pomocí literatury (či učitele biologie) se zamyslete podrobněji nad mechanismem fotosyntézy.

Stručné připomenutí poznatků o fotosyntéze: Fotosyntéza je základní chemický proces, při kterém zelené rostliny přijímají energii slunečního záření, která je nutná pro přeměnu oxidu uhličitého a vody na glukosu a kyslík. Molekuly glukosy pak rostlina chemicky spojí a uskladní jako škrob, nebo jako celulosu. Sacharidy jsou tedy hlavním zdrojem energie pro organismy, představují meziprodukty, v nichž je uskladněná sluneční energie využita pro zabezpečení života na Zemi. Základní souhrnná rovnice fotosyntézy je následující:

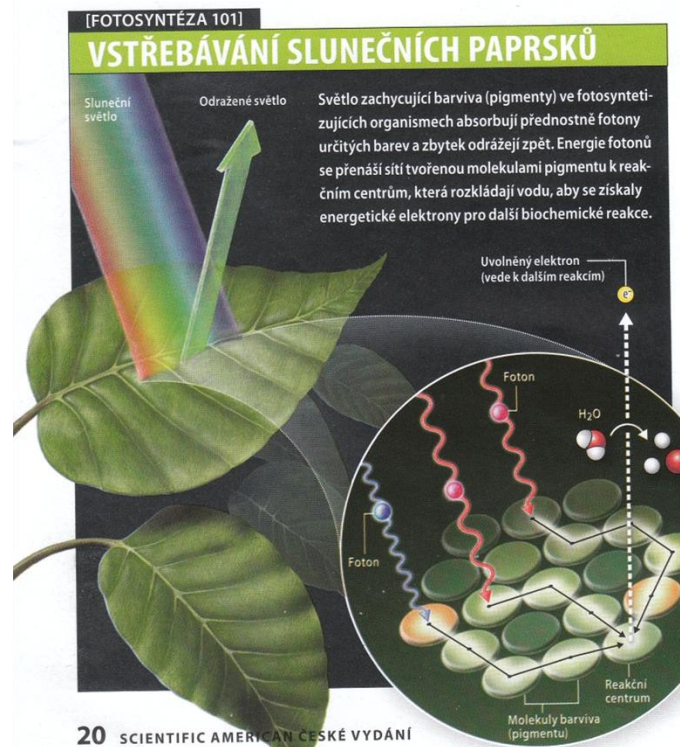


My si podrobněji všimneme jen první části fotosyntézy, při které dochází k absorpci fotonů slunečního záření v chloroplastech zelených rostlin. Energie dopadajícího fotonu je absorbována molekulou pigmentu a ta se dostane do excitovaného stavu. Při přechodu do základního stavu se molekula může zbavit energie několika způsoby. Na obr. 1. 17 je znázorněn případ, kdy se energie fotonů přenáší sítí tvořenou molekulami pigmentu k reakčním centrům, která rozkládají vodu, aby se získaly elektrony pro další biochemické reakce.

²¹ Foto: Profimedia.cz.

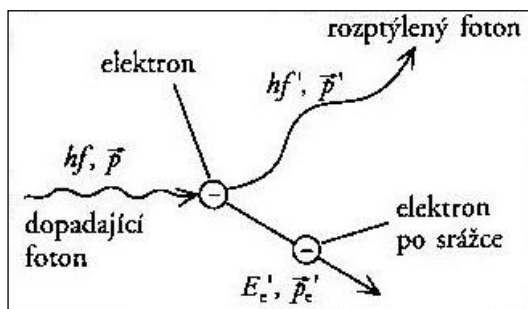
²² Tento problém je inspirován článkem N. Y. Kiang: *Barvy rostlin exotických světů*. Scientific American, české vydání, duben-květen 2008, 18. Také příslušný obrázek je odsud převzat.

2. Šlo by jednoduše zjistit (naměřit), jaké fotony absorbují pigmenty v organismech? 3. Mohly by být (např. na cizích planetách) červené, modré nebo černé rostliny?



Obr. 1. 17 Ilustrace k úloze o fotosyntéze.

1. 4. P Comptonův jev. V roce 1923 zveřejnil A. Compton výsledky svých experimentů s rozptylem rentgenového záření o dané vlnové délce λ na elektronech v uhlíkovém terčíku. V rozptýleném záření našel Compton záření nejen s původní vlnovou délkou λ , ale i záření s vlnovou délkou $\lambda' > \lambda$. Při vysvětlení tohoto výsledku je třeba popisovat interakci rentgenového záření s elektrony jako interakci jednotlivých fotonů s jednotlivými elektrony materiálu. Obr. 1. 18. (Energie fotonu rentgenového záření je velká ve srovnání s vazební energií elektronu v atomu uhlíku, takže srážku můžeme popsat jako srážku fotonu s volným elektronem.) Úkoly: 1. Ukažte, že pomocí fotonové hypotézy a užitím zákona zachování energie lze kvalitativně vysvětlit větší vlnovou délku rozptýleného rentgenového záření. 2. **Jak je možné, že po srážce s elektronem ztratí foton jen část své energie, když přece dochází při interakci světla a látky jen k přenosu energie po částech – kvantech?** (Rozptýlený foton má menší energii než dopadající foton.)

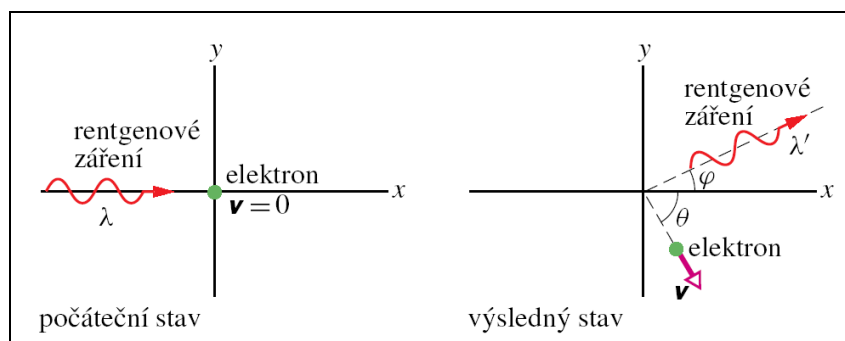


Obr. 1. 18 Obvyklé znázornění Comptonova jevu



Obr. 1. 19 A. H. Compton (1892 -1962)

Řešení úkolu 2: Při interakci fotonu s elektronem dojde k pohlcení dopadajícího fotonu a potom k vyzaření jiného, s menší energií. To je naznačeno na následujícím obrázku 1. 20 tím, že jsou zobrazeny odděleně počáteční a konečný stav.



Obr. 1. 20 Původní foton zhyne, nový se zrodí.

1. 5. P Vyhledejte si informace o nových lékařských diagnostických metodách, kde se využívá rentgenového záření. Jako příklad je možno uvést **digitalizaci snímků** a zaslání z jednoho pracoviště na jiné, ale i prostorové znázornění orgánů lidského těla pomocí **počítačové tomografie** či vyšetření srdce **koronografií**.²³

1. 6. P Porovnejte rentgenovou diagnostiku s ultrazvukovou. V čem jsou obě metody podobné a čím se liší? Pro jaká vyšetření se používá ultrazvukových vln? Někdy se budoucí maminky obávají vyšetření pomocí ultrazvukových vln. Jsou jejich obavy oprávněné?

1. 7. P Poznatky kvantové fyziky, např. Heisenbergovy relace neurčitosti, vedou někdy k představě, že příroda je neurčitá, že není možno dělat žádné předpovědi, že věda nedokáže popsat realitu, že „všechno je možné“ (anything goes). K takovým závěrům docházejí někdy postmoderní filosofové, kteří relativizují pravdivost vědeckých metod a výsledků. Pokuste se vysvětlit, že vědecké (fyzikální) poznávání zákonů přírody (za použití matematiky) je to nejlepší, které máme. (To neznamená, řečeno s Feynmanem, že „není-li něco věda, musí to být špatně, např. láska není věda“.) Zamyslete se nad kritériem vědeckosti – o jakých postupech, tvrzeních a výsledcích můžeme mluvit jako o vědeckých? Do diskuse se můžete pustit i v hodinách ZSV při seznamování se se základy filosofie.

²³ Informace pro řešení problémů 1. 5. P a 1. 6. P je možno najít na internetu či v publikaci „Lepil . a kol: *Fyzika aktuálně. Příručka nejen pro učitele*. Prometheus, Praha 2009.

2. Atomová fyzika

Úvodní poznámky o atomech a molekulách, objev atomového jádra, spektra prvků a kvantování energie atomů, kvantové stavy jako stojaté elektronové vlny, zachycení elektronu v pasti, atom vodíku, atomy s více elektrony, Pauliho princip, periodická soustava prvků, laser, cvičení.

Filosofická

Na světě jsou jen atomy

Vše ostatní jsou ... fantomy

Jen atomy a s prázdňem

A z nich jsou složeny ... blázny

Složený z prázdna ... z atomů

Ve žlutém jedeš antonu

Jan Vodňanský: Důvěrná sdělení

2. 1 Úvodní poznámky o atomech a molekulách

V průběhu studia na ZŠ i na gymnáziu, v chemii i ve fyzice (zejména v molekulové fyzice), se vychází z představy, že veškerá látka se skládá z atomů. Žáci používají veličiny a pojmy jako relativní atomová a molekulová hmotnost, látkové množství, molární objem a hmotnost, atomová hmotnostní konstanta, Avogadrova konstanta N_A apod. Provádějí se i výpočty, jejichž výsledky ukazují typické hodnoty některých veličin ze „světa atomů“. Připomeňme si alespoň jeden typický příklad²⁴:

Příklad 2. 1 Rozměr molekuly vody

Pomocí Avogadrovy konstanty odhadněte např. velikost molekuly vody.

Řešení

Molekula vody (H_2O) má molární hmotnost: $M_m = (2+16) \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Hustota vody je $\rho = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a pro molární objem V_m dostáváme:

$$V_m = \frac{M_m}{\rho} = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{10^3} = \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}.$$

Na jednu molekulu vychází objem

$$V_0 = \frac{V_m}{N_A} \approx \frac{18 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{23}} \text{ m}^3 = 3 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3.$$

Molekuly H_2O jsou ve vodě těsně u sebe a objem připadající na jednu molekulu se přibližně rovná objemu molekuly. Jestliže si představíme molekulu jako krychli, pak pro její hranu a dostaneme

$$a = \sqrt[3]{3 \cdot 10^{-29}} \text{ m} \approx 3,1 \cdot 10^{-10} \text{ m}.$$

Molekula vody patří mezi menší molekuly. **Rozměry atomů jsou tedy řádově 10^{-10} m. Rozměry menších molekul jsou několikrát větší.**

²⁴ Možná si vzpomenete na zajímavou experimentální úlohu: Přibližné určení průměru kyseliny olejové.

I když žáci akceptují, že vše se skládá z atomů, je tento poznatek většinou přijat jako sdělení, kterému je třeba věřit. Nejsou jim podrobně popisovány klíčové experimenty, které vedou k potvrzení jejich existence. Myslím, že to není ani možné. Někteří si možná položí otázky:

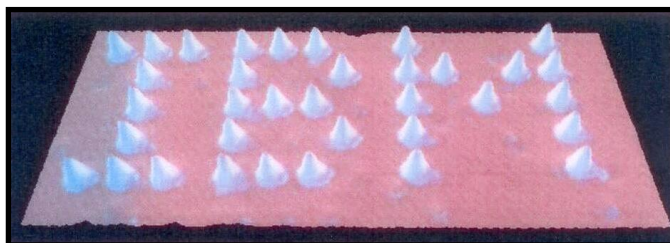
Existují atomy skutečně? Můžeme je vidět?

Podobné otázky si např. kladl na začátku 20. století významný fyzik a filosof, brněnský rodák Ernst Mach, který byl k atomové hypotéze nedůvěřivý, protože jednotlivé atomy nebylo možno vidět. V současné době je však situace jiná: vlastní rozvoj kvantové fyziky umožňuje konstruovat zařízení, pomocí kterých je možno zobrazit – „vidět“ jednotlivé atomy. Podrobněji jsme o jedné takové metodě pojednali v kapitole o tunelovém jevu a mikroskopu STM. Znovu přikládáme ještě dva obrázky 2.1 a 2. 2.

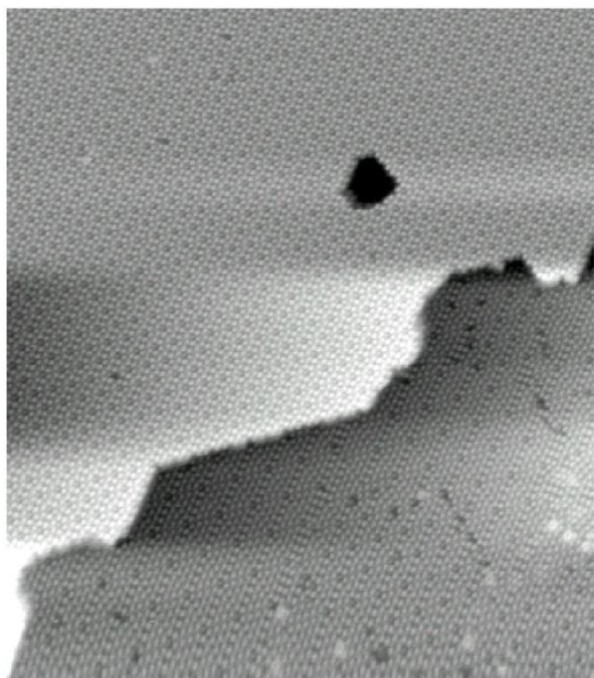


Ernst Mach (1838-1916) se narodil v Chrlících u Brna (dnes součást Brna). V letech 1867-1895 byl profesorem fyziky na Karlově-Ferninandově universitě v Praze. Mach byl významnou osobností experimentální fyziky, byl autorem i řady demonstračních pomůcek a svými úvahami o setrvačnosti inspiroval A. Einsteina při formulaci obecné teorie relativity. Z jeho filosofického postoje, ve kterém je kladem důraz na smyslové vnímání, na zkušenost a názornost (empiriokriticismus) vychází i nedůvěřivý postoj k atomové hypotéze. Podle Macha atomy nikdo neviděl a existují jen v představách.

V následujících kapitolách se velmi stručně seznámíme s některými základními objevy atomové fyziky.



Obr. 2. 1 Slavná atomární verze loga IBM. Tento obrazec vytvořili pracovníci výzkumných laboratoří společnosti IBM v Kalifornii. Do čistého niklového povrchu uloženého ve vysokém vakuu zavedli malé množství xenonu. Systém ochladili na 4 K, aby byl minimalizován tepelný pohyb, a pak hledali jednotlivé atomy xenonu. Jakmile nějaký atom xenonu našli, odtáhli jej pomocí hrotu sondy STM do správné polohy v logu.



Obr. 2. 2 Kontury povrchu křemíku Si (111) zobrazené pomocí STM. Jednotlivé šestiúhelníky jsou tvořeny atomy.