

výpočty fyzikálních úkolů

Milí kamarádi,

po první sérii vám přinášíme druhou sérii, v níž naleznete zadání dalších sedmi úloh a text Výfučení. Tentokrát se v něm dočtete o fotoelektrickém jevu.

Vzorová řešení úloh první série si můžete prohlédnout na našem webu. Rovněž již pilně pracujeme na hodnocení vašich řešení, abychom pro vás mohli zveřejnit první letošní výsledkovou listinu ještě před odesláním této série. Opravená řešení vám pak zašleme spolu se třetí brožurkou Výfuku.

Podzimní setkání

I letos pro naše řešitele organizujeme podzimní setkání, které proběhne od 10. do 12. listopadu v Praze. Pozvánku na setkání s podrobnými informacemi naleznete na webu.¹

Náboj Junior

Soutěžíte-li rádi v týmu, nabízíme vám ještě účast v Náboji Junior. Ten se uskuteční v pátek 24. listopadu na 16 místech v České republice. Počet volných míst se sice rychle zmenšuje, ale stále ještě je možnost registrovat se na webu soutěže.²

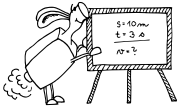
Hodně zábavy při řešení úloh vám přeje

Organizátoři

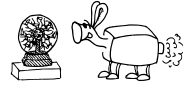
vyfuk@vyfuk.mff.cuni.cz

¹<http://vyfuk.mff.cuni.cz/akce/setkani/podzim2017>

²<http://junior.naboj.org/>



Zadání II. série



Termín odeslání: 4. 12. 2017 20.00

Úloha II.1 ... Opisování knih ⑥ ⑦

5 bodů

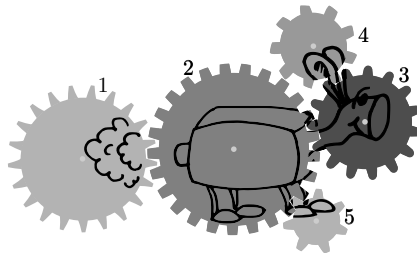
Tři středověcí mniši dostali za úkol opsat 600 stran Bible. Jeden zvládne přepsat za 3 dny 2 strany, druhý za 2 dny 3 strany a třetí za 4 dny 6 stran. S přepisováním začali ve středu a od pondělí se k nim přidal další mladý mnich, který dokáže opsat za 1 den jen 0,5 strany. Vypočítejte, za kolik dnů od středy společně opíší všechny stránky.



Úloha II.2 ... Spojená kolečka ⑥ ⑦ ⑧ ⑨

5 bodů

Na Matfyzu si velmi váží Výfučka, a proto se rozhodli sestavit pohybuji se soustavu ozubených kol s obrázkem Výfučka, která bude zdobit hlavní budovu. První kolečko bude mít 21 zubů, druhé 25 zubů, třetí 15 zakulacených zubů, čtvrté kolečko bude s 9 zuby. Poslední páté kolečko má mít pouhých 7 zubů. Všechna kolečka se mají točit zároveň a zapadat do sebe podle obrázku. Kolikrát se otočí každé z nich, než si budeme moci opět prohlédnout Výfučka jako na začátku?



Úloha II.3 ... Roztavená kulka ⑥ ⑦ ⑧ ⑨

6 bodů

Tom viděl na nedávné pouti podivný magický trik. Zdejší kouzelník naládoval pušku olověnou kulkou, zamířil na obrovský terč a vystřelil. Ačkoliv obecnostvo dosvědčilo, že náboj puška skutečně vystřelila, po nárazu nebylo po kulce ani stopy.

Toma po chvilce přemýšlení napadlo, že by trik mohl být způsoben tím, že se olovená kulka jednoduše roztavila. Pomozte Tomovi vypočítat minimální rychlost kulky v okamžiku nárazu do terče, jestliže zjistil, že kulka váží $0,5\text{ g}$, měrná tepelná kapacita olova je $129\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, měrné skupenské teplo tání olova je $23,2\cdot 10^3\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, teplota tání olova je $328\text{ }^\circ\text{C}$ a okolní teplota je $20\text{ }^\circ\text{C}$. Také pro zjednodušení uvažujte, že terč byl tak pevný, že se s ním nic nestalo, a proto se všechna kinetická energie přeměnila na teplo, které kulku ohřálo.

Úloha II.4 ... Koupelnový bojler ⑥ ⑦ ⑧ ⑨

6 bodů

Peťa se vrátila z procházky celá zmrzlá a ráda by si dala horkou koupel. V koupelně má bojler s účinností $\eta = 80\%$, který je připojen do zásuvky s efektivním napětím $U_{\text{ef}} = 230\text{ V}$ a při svém provozu spotřebovává proud o efektivní hodnotě $I_{\text{ef}} = 10\text{ A}$.³ Peťa si napustí ze studny do bojleru 100 l vody o teplotě $15\text{ }^\circ\text{C}$. Chtěla by koupel o teplotě $40\text{ }^\circ\text{C}$. Za jak dlouho se jí ohřeje voda na napuštění vany, jestliže ji napouští pouze z bojleru? Tepelné ztráty do okolí zanedbejte.

Úloha II.5 ... Vyhazování mincí ⑥ ⑦ ⑧ ⑨

7 bodů

Při čekání na ústní část zkoušky si Simča chtěla zkrátit dlouhou chvíli, a tak si pohazovala mincí vážící $m = 10\text{ g}$. Za chvilku ji napadlo, jak vysoko by musela minci hodit, aby jí po 10 minutách, kdy Simči začíná zkouška, spadla do druhé dlaně.

- Jak vysoko musí mince vyletět, aby Simči spadla za 10 minut do druhé dlaně, která je od házející dlaně vzdálena 15 centimetrů? Uvažujte, že tíhové pole se podél celé dráhy letu mince nebude měnit.
- Jaká bude počáteční rychlost mince ve svislém a ve vodorovném směru?
- Jakou práci Simča hodem vykoná?



Úloha II.E ... Šup, šup! ⑥ ⑦ ⑧ ⑨

8 bodů

V mnoha úlohách se můžete setkat s koeficientem tření a s výpočty třecích sil z normálových sil, které jsou v našich úlohách často ztělesněné silami tíhovými. Často jsou tyto koeficienty zadány, jak se ale vlastně dají změřit?

Klidové koeficienty tření (tj. koeficienty potřebné k výpočtu síly nutné k rozpohybování těles⁴) jsou závislé na materiálech, které se po sobě třou. Proto je potřeba je změřit pro každé dva materiály zvlášť. Změřte tyto klidové koeficienty tření pro alespoň dvě různé dvojice materiálů.

Nezapomeňte popsat všechny důležité kroky svého měření, včetně konstrukce měřicího zařízení, vzorců, které jste použili, a konstant potřebných k výpočtům. Odhadněte či spočítejte nepřesnost svého měření.

³Ve skutečných zásuvkách máme tzv. střídavý proud, kterému se v čase periodicky mění velikost napětí a proudu. Abychom nemuseli počítat s časově proměnnými napětími a proudy, zavádí se efektivní hodnoty napětí a proudu. Tyto efektivní hodnoty nám říkají velikost stejnosměrného napětí, resp. proudu, se stejným průměrným výkonem jako původní časově proměnné napětí, resp. proud. Můžeme tedy uvažovat, že elektřina v zásuvce má konstantní napětí i proud, jejichž velikost odpovídá efektivním hodnotám.

⁴Pokud jste o klidovém tření ještě neslyšeli, můžete si o něm přečíst na webu https://cs.wikipedia.org/wiki/Tření#Klidové_tření.

Úloha II.C ... Makající elektrony ⑥ ⑦ ⑧ ⑨

6 bodů

Kačka dostala novou sodíkovou katodu a rozhodla se, že si ji ozkouší. Posvítla na ni ultrafialovým světlem o vlnové délce 300 nm a pozorovala vyletující elektrony.

- S jakou kinetickou energií vyletují elektrony z povrchu sodíkové katody, je-li výstupní práce elektronů v sodíku $3,7 \cdot 10^{-19}$ J?
- Jaká je rychlost každého z elektronů, je-li známo, že hmotnost jednoho je $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg?
- Jaká je největší vlnová délka světla, kterým může Kačka na sodíkovou katodu svítit, aby byla schopna pozorovat vyletující elektrony?





Výfučtení: 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.⁵ 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.⁶ 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 svítíl 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,⁷ 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-

⁵Elektroskop je přístroj na měření elektrického náboje.

⁶Vlnová 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.

⁷Častěji 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.⁸

Problém, se kterým si ale fyzici nevěděli rady, byl, proč dochází k vyražení 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.⁹ 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 λ 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 λ , 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 λ , 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 vyražení elektronů z destičky nestačilo světelné záření. Pro každý kov existuje jistá mezní frekvence f_0 dopadajícího záření, kdy dojde k vyražení elektronů. Jestliže bude frekvence dopadajícího fotonu nižší než mezní frekvence dané látky f_0 ,

⁸K vyražení „přebytečného“ protonu nemůže dojít, nicméně důvody, proč tomu tak je, jsou docela složité, takže tuto informaci berme jako fakt.

⁹Konkrétně 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
UK, Matematicko-fyzikální fakulta
V Holešovičkách 2
180 00 Praha 8*

www: <http://vyfuk.mff.cuni.cz>
e-mail: vyfuk@vyfuk.mff.cuni.cz

Výfuk je také na Facebooku 
<http://www.facebook.com/ksvyfuk>

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/>.