FYZIKA

Jak daleko je Měsíc aneb od Hipparcha k sondě Hipparcos

VLADIMÍR ŠTEFL – JULIUSZ DOMAŃSKI

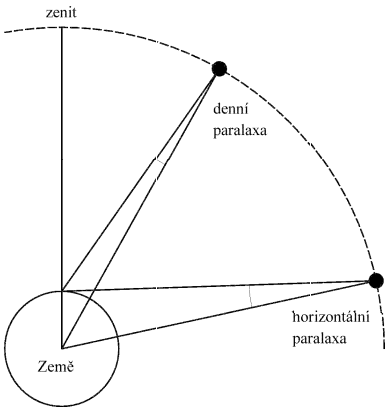
Brno – Toruń, POLSKO

Určování vzdáleností kosmických těles je jednou z nejdůležitějších astronomických metod. Její rozvoj těsně souvisel s historickým vývojem astronomie, připomínáme jména Hipparchos, Cassini, Bessel, Struve, Leavitt a Hubble. Získávání poznatků o kosmických tělesech a stavbě hvězdných soustav které vytvářejí bylo vždy bezprostředně spjato s určováním vzdáleností. Příkladně znalost vzdáleností hvězd a z ní vycházející studium jejich rozložení v prostoru umožnily odhalit stavbu a rotaci Galaxie. Obdobně informace o vzdálenostech vnějších galaxií, kup galaxií a jejich umístění ve vesmíru vytvořily předpoklady k určení parametrů nezbytných pro tvorbu kosmologických modelů.

Astronomové ve starověku a v antice se nejprve pokoušeli stanovit vzdálenosti k nejbližšímu kosmickému tělesu – k Měsíci. Antický astronom *Hipparchos* (190 – 125) v 2. století před naším letopočtem dokázal důvtipně využít jevu zatmění Měsíce a znalosti jeho úhlového poloměru k určení vzdálenosti Země – Měsíc, jak je popsáno v Almagestu [1]. Vycházel z toho, že úhlový poloměr Měsíce je roven $16'$ a poloměr zemského stínu ve vzdálenosti Měsíce je $40'$, tj. zhruba 8/3krát větší. Z geometrických úvah Hipparchos nalezl, že poloměr Měsíce je roven rozdílu poloměrů Země a zemského stínu ve vzdálenosti Měsíce $R_{\mathrm{M}} = R_{\mathrm{Z}} - R_{\mathrm{Zst}}$. Odtud vyplynulo, že $R_{\mathrm{M}} \approx \frac{3}{11} R_{\mathrm{Z}}$. To je prakticky v souladu se současnými údaji o rozměrech Měsíce. Po nalezení lineárního poloměru Měsíce, při znalosti úhlového poloměru a vzhledem k tomu, že úhlový poloměr Měsíce je přibližně ro-

ven úhlovému poloměru Slunce, lze vzdálenost Měsíce od Země vyjádřit $r_{\mathrm{ZM}} = \frac{R_{\mathrm{M}}}{\mathrm{tg}\, 16'} \approx 218 R_{\mathrm{M}} \approx 59 R_{\mathrm{Z}}$, což je přesný výsledek. Připomínáme, že poloměr Země R_{Z} byl stanoven již zhruba o století dříve *Eratosthenem* (276 – 194).

V rámci sluneční soustavy byla ke stanovení vzdáleností používána *metoda denních paralax*. Připomínáme, že denní paralaxa je úhel, pod kterým pozorujeme z daného kosmického tělesa vzdálenost středu Země a pozorovacího místa na povrchu (obr. 1). Denní paralaxa je proměnná, maximální hodnoty dosahuje při poloze kosmického tělesa na horizontu, hovoříme o *horizontální paralaxe*. Při použití metody byla určována poloha kosmického tělesa ze dvou vzdálených bodů na povrchu Země. Ze znalosti rozměrů Země, vzdálenosti obou bodů a úhlů, pod kterými pozorujeme kosmické těleso ve stejném časovém okamžiku, byla stanovena jeho vzdálenost.

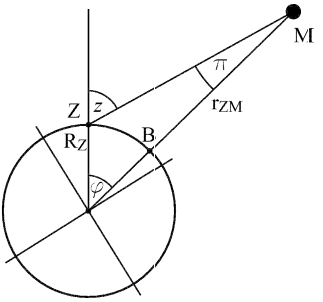


Obr. 1 Denní a horizontální paralaxa

Příklad

Na observatoři v Bogotě ($\lambda_1 = 74°05'$, $\varphi_1 = 4°36'$) bylo v roce 1922 8. srpna v čase $23^{\mathrm{h}}\ 45^{\mathrm{m}}$ zjištěno, že Měsíc se nachází v zenitu. Ve stejném čase na observatoři v Montrealu ($\lambda_2 = 73°35'$, $\varphi_2 = 45°30'$) byla změřena úhlová zenitová vzdálenost Měsíce (obr. 2), která měla hodnotu $z = 41°34'12''$. Jaká byla v daném čase vzdálenost Země – Měsíc r_{ZM}? Rovníkový poloměr Země je $R_{\mathrm{Z}} = 6\,378$ km. Pro zjednodušení jsme vybrali observatoře položené prakticky na stejném poledníku, $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 40°54'$, $\pi = z - \varphi = 40°12'$.

Podle sinusové věty platí $\frac{r_{\mathrm{ZM}}}{\sin(180-z)} = \frac{R_{\mathrm{Z}}}{\sin\pi}$, protože platí $\sin(180-z) = \sin z$, dostaneme $r_{\mathrm{ZM}} = \sin z \frac{R_{\mathrm{Z}}}{\sin\pi} = 361\,460$ km. Měsíc se nacházel v blízkosti perigea, vzdálenost Země – Měsíc se mění v intervalu (356 400 – 406 700) km.



Obr. 2 Metoda horizontálních paralax – stanovení vzdálenosti Měsíce

Od druhé poloviny 20. století byla vzdálenost Měsíce a dalších kosmických těles sluneční soustavy s pevným povrchem určována *radarovou metodou*, v níž stanovujeme čas, který elektromagnetické vlny potřebují k uražení dráhy k sledovanému tělesu a zpět. Měření času s přesností 10^{-10} s umožňuje určovat např. vzdálenost Měsíce s přesností několik centimetrů.

Obdobného principu využívá *metoda laserových paprsků*, které se odrážejí od koutových odražečů, instalovaných na povrchu Měsíce výpravami Apollo 11, Apollo 14, Lunou 17 a Lunou 21. V současnosti laserová měření dovolila upřesnit rychlost vzdalování Měsíce od Země na 38 mm za rok.

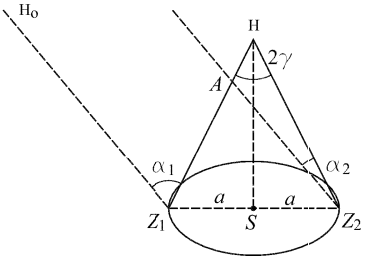
Vraťme se k metodě denních paralax. V roce 1577 ji použil *Tycho Brahe* (1546 – 1601) k určení vzdálenosti sledované komety a dokázal, že se nachází ve větší vzdálenosti než Měsíc. Výsledky pozorování komety shrnul v spise [2]. Brahe významně přispěl k vyvrácení do té doby přijímané představy, že komety jsou jevy v atmosféře Země.

Překážkou používání výše zmiňované metody k určení vzdálenosti Slunce byla nemožnost současného pozorování Slunce i hvězd. Proto astronomové přišli s myšlenkou využití paralaktického posuvu Marsu na pozadí hvězd. Největší posuv bylo možné očekávat při velké opozici Marsu, proto ji v roce 1672 astronomové *G. D. Cassini* (1625 – 1712), a *F. Richer* (1630 – 1696) sledovali ze dvou míst na Zemi. Ze známé polohy pozorovacích míst a dvou úhlů, pod kterými byl Mars pozorován, byla určena paralaxa

Marsu $\pi_M = 6{,}25"$ a pomocí III. Keplerova zákona stanovena paralaxa Slunce $\pi_S = 9{,}5"$. V obou případech jde o tzv. rovníkovou paralaxu, což je úhel, pod kterým bychom viděli z uvažovaných objektů rovníkový poloměr Země. Takto byla poprvé stanovena vzdálenost Země – Slunce s hodnotou 138 milionů km [3], [4].

U vzdáleností vně sluneční soustavy nahrazujeme horizontální paralaxy heliocentrickými. Druhá příčka žebříku vzdáleností je propojená s první, navazuje na znalost vzdálenosti Země – Slunce.

Trigonometrická metoda *roční paralaxy* vycházela z určení úhlu, pod kterým bychom pozorovali z dané hvězdy poloměr dráhy Země kolem Slunce, tedy vzdálenost Země – Slunce. Mezi vzdáleností hvězdy r v parsecích a paralaxou π v obloukových vteřinách platí vztah $r = \frac{1}{\pi}$, nám nejbližší hvězda α Cen C má v současnosti zjištěnou paralaxa $\pi = 0{,}772"$. K určení paralaxy hvězdy H je nutné stanovení úhlových vzdáleností α_1 a α_2 (obr. 3), tedy měření úhlů vykonané po půl roce, H_o je vzdálená srovnávací hvězda, vůči níž posuv zjišťujeme. Z ΔAZ_2H obdržíme paralaxu hvězdy H – velikost úhlu $\gamma = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}$.



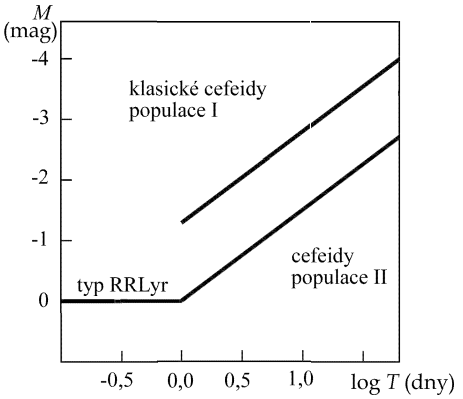
Obr. 3 Metoda roční paralaxy – určení vzdálenosti hvězd

Poprvé metodu roční paralaxy u hvězd použili téměř současně v letech 1837 – 1839 *Vasilij Jakovlevič Struve* (1793 – 1864) [5] u Vegy s výsledek $\pi = (0{,}125 \pm 0{,}055)$, *Friedrich Wilhelm Bessel* (1784 – 1846) [6] pro méně známou dvojhvězdu 61 Cygni – $\pi = (0{,}314 \pm 0{,}014)$ a *Thomas Henderson* (1798 – 1844) [7] u α Cen – $\pi = (1{,}16 \pm 0{,}11")$. Zmiňovaní astronomové si vybrali pro svá měření jasné hvězdy s velkým vlastním pohybem. U zvolených hvězd tak bylo možné předpokládat malou vzdálenost a tudíž velkou paralaxu. Pouze Bessel při výběru pokračoval ve studiu méně jasné hvězdy, která se však vyznačovala velkým vlastním pohybem. Do poloviny devadesátých let minulého století použitelnost metody roční paralaxy činila

několik desítek parsek. Teprve zpracování výsledků astrometrické družice **HIPPARCOS** – **Hi**gh **P**recision **PAR**arallax **CO**llecting **S**atellite, která obíhala na oběžná dráze kolem Země v letech 1989 – 1993, umožnilo stanovení ročních paralax na úrovni 0,001", což odpovídá 10 % chybě vzdálenosti při 100 pc. S touto přesností byly určeny vzdálenosti více než 22 000 hvězd.

K určování ještě větších vzdáleností astronomové používají *metodu cefeid.*

V roce 1912 *Henriett Leavitt* (1868 – 1921) zjistila, že perioda změn jasnosti dvaceti pěti cefeid v Malém Magellanově oblaku je v dobré korelaci s vizuálními jasnostmi [8]. Protože správně předpokládala, že cefeidy se nalézají ve stejné vzdálenosti od nás, získala tak závislost změny zářivého výkonu na periodě. K využití této metody pro určení vzdálenosti je potřebné stanovit nulový bod škály, k čemuž je nezbytná znalost přesné vzdálenosti alespoň jedné cefeidy. V roce 1917 *Harlow Shapley* (1885 – 1972) upřesnil tento bod statistickými metodami. Stanovení se však ukázalo nepřesné a bylo upravené v roce 1952 *Walterem Baadem* (1893 – 1960) [9]. Na základě studia galaxie M 31 cefeidy rozdělil do dvou populací, získal dvě různé křivky závislosti perioda – zářivý výkon obr. 4. Důsledkem byla korekce, zdvojnásobení všech hodnot vzdáleností získaných touto metodou.



Obr. 4 Závislost perioda – zářivý výkon pro cefeidy

Stručně objasníme princip použití metody cefeid. Z pozorování určíme pozorovanou hvězdnou velikost m a periodu pulsace T cefeid. Pomocí

empiricky získané závislosti $M = a + b \log T$ stanovíme absolutní hvězdnou velikosti M. Dosazením do upraveného vztahu pro modul vzdálenosti $m - M = 5 \log r - 5$ obdržíme $r = 10^{1+0,2(m-M)}$, zjistíme tak vzdálenost r cefeidy. Připomínáme, že m je pozorovaná hvězdná velikost v mag, M je absolutní hvězdná velikost v mag a r je vzdálenost je v pc.

Cefeidy používáme pro určení vzdáleností nejen jich samotných, ale především hvězdokup a galaxií, v kterých je pozorujeme. Příčku tohoto žebříku astronomických vzdáleností se dosud nepodařilo optimálně navázat na předcházející. Určení nulového bodu závislosti perioda – zářivý výkon tak stále zůstává základním klíčem k upřesnění metody. V dosahu dalekohledu družice Hipparcos se v naší Galaxii nalézalo přes dvě stě cefeid, ale nacházely se ve větších vzdálenostech, jejich stanovené paralaxy se vyznačovaly příliš velkými chybami.

V rámci jednoho z klíčových projektů HST byly proměřeny periody pulsace cefeid v osmnácti galaxiích o různých vzdálenostech, například v galaxii M 100 [10]. Metoda cefeid je dnes použitelná do vzdálenosti přibližně 20 Mpc.

Další příčkou žebříku vzdáleností je *metoda supernov Ia*. Jde o relativně homogenní astrofyzikální skupinu hvězd, vyznačujících se přibližně stejným zářivý výkonem $\approx 10^9 L_\mathrm{S}$. Tyto supernovy vznikají explozí bílého trpaslíka, jehož hmotnost při přenosu hmoty z druhé složky překročí Chandrasekharovu mez a dojde k destabilizaci a explozi. Jsou ideálními standardními svíčkami ve vesmíru, přesnost metody je odhadována na ≈ 10 %. Typickým jejich rozlišujícím znakem je absence vodíkových čar a přítomnost čar Si II ve spektrech. Vyznačující se v maximu jasnosti absolutními hvězdnými velikostmi ve V barvě $M_\mathrm{v} = -19{,}5$ mag, jsou vhodné k určování vzdálenosti s dostatečnou přesností do zhruba 100 Mpc. U dosud nejvzdálenější supernovy bylo zjištěno $z = 1{,}7$.

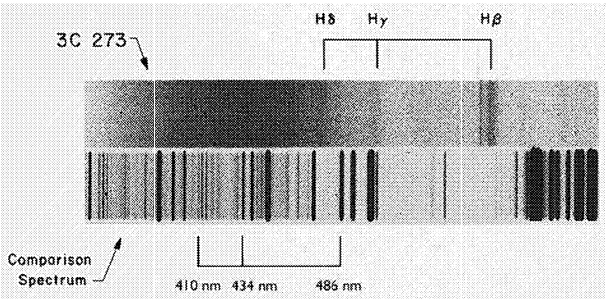
Při vzdálenostech větších než 100 Mpc lze měřit pouze posuvy spektrálních čar a využívat *metodu Hubbleova zákona* [11], který popisuje rozpínání vesmíru. Jeho pomocí určíme vzdálenost ze vztahu $r = \frac{v}{H}$. Rychlost klademe rovnu $v = cz = c\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ při hodnotách $z < 0{,}1$. Pro větší hodnoty z je pro rychlost třeba použít vztah $v = c\frac{(1+z)^2-1}{(1+z)^2+1}$. Velikost Hubbleovy konstanty klademe $H = 71\ \mathrm{km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}}$.

Na obr. 5 je zachycen posuv spektrálních čar u kvasaru 3C 273.

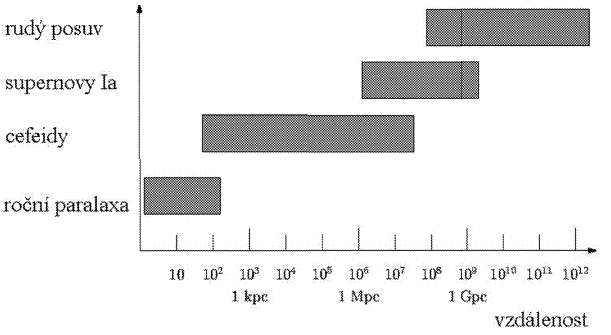
Uvádíme současný příklad. V roce 2002 dalekohledy Keck II a Subaru [12] dokázaly u velmi vzdálené galaxie HCM 6A zjistit posuv čáry L_α

s $\lambda_1 = 121{,}6$ nm na vlnovou délku $\lambda_p = 919{,}3$ nm. Určete hodnotu z. Stanovíme ji úpravou vztahu $\lambda_p = (z+1)\lambda_1$ obdržíme $z = \frac{\lambda_p}{\lambda_1} - 1$, tedy $z = 6{,}56$ nm.

Na obr. 6 je shrnující přehled metod určování vzdáleností. Začíná roční paralaxou, vycházející z *trigonometrického principu*, následují cefeidy, supernovy Ia využívající *fotometrického principu*, pro největší vzdálenosti využíváme Hubbleův zákon, používající *spektroskopický princip*. Z velkého počtu metod určování vzdáleností jsme uvedli takové, které svou použitelností pokrývají rozsah vzdáleností dosud známých kosmických těles a jsou tradičně zařazovány do obsahu výuky středoškolské astrofyziky.



Obr. 5 Posuv čar ve spektru kvasaru 3C 273



Obr. 6 Přehled metod určování vzdáleností

V nejbližším období je plánována celá řada projektů vedoucích ke zvýšení přesnosti určování vzdáleností, příkladně jmenujme projekt SIM (*Space Interferometry Mission*), který má být realizován od roku 2009 [13]. Na družici umístěný optický interferometr má umožnit skládání světla ze dvou i více dalekohledů. Výsledkem bude 1000 násobné zvětšení přesnosti, pro 10 000 hvězd s přesností $4 \cdot 10^{-6}$. U hvězd do vzdálenosti ≈ 3 kpc bude přesnost stanovení vzdálenosti 2 %. Mezi nimi je řada standardních objektů používaných k určování vzdáleností, například hvězdy RR Lyrae a klasické cefeidy, což podstatně upřesní celý astronomický žebřík vzdáleností.

Literatura

[1] *Ptolemaios, K.*: Ptolemy's Almagest. Transl. G. J. Toomer, 2. vyd., Princeton 1998.
[2] *Tycho Brahe*: De mundi asteri recentioribus phaenomens liber secundus. Uraniborg, Praha, 1583 – 1603.
[3] *Cassini, M.*: Recherche de la parallaxe du Soliel par le moyen de celle de Mars observé a meme temps a Paris and en Caiene. Ouvrage D-Astronomie, 1672.
[4] *Štefl, V., Domański, J.*: Bogini po przejsciach, Fizyka w Szkole 2004, vol. 50, no. 4, p. 231.
[5] *Struve, F. G. W.*: Stellarum duplicium et multiplicium mensurae micrometricae. St. Petersburg. 1837.
[6] *Bessel, F. W.*: A letter from Professor Bessel to Sir J. Herschel. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society vol. 4, 1838, p. 152.
[7] *Henderson, T.*: On the Parallax of α Centauri. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society vol. 4, 1839, p. 168.
[8] *Leavitt, H. S.*: Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. Harvard College Observatory, 1912, Circular 173.
[9] *Baade, H.W.*: IAU Trans. VIII. Report to Commission 28. Cambridge University Press, Cambridge 1952, p. 397.
[10] *Ferrarese, L. et al.*: The Extragalactic Distance Scale Key Project. IV. The Discovery of Cepheids and a New Distance to M100 Using the Hubble Space Telescope. The Astrophysical Journal vol. 464, 1996, p. 568.
[11] *Hubble, E. P.*: Relation Between Distance and Radial Velocity Among Extra-galactic Nebulae. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 15, no. 3, p. 168.
[12] *Hu, E. M. et al.*: A Redshift z = 6.56 Galaxy behind the Cluster Abell 370. The Astrophysical Journal, vol. 568, 2002, Issue 2, L 75.
[13] http://www.physics.unc.edu/~cecil/a245/sim.pdf
[14] *Štefl, V., Krtička, J.*: Didaktika astrofyziky. http://www.physics.muni.cz/astrodidaktika/

Jízdní kolo – ústřední prvek dopravní výchovy na ZŠ
Námět pro školní projekt

JOSEF JANÁS

Pedagogická fakulta MU, Brno

Pojetí školního projektu

Je to dlouhodobý úkol, na jehož řešení dostanou žáci jen obecnou instrukci a poté si sami organizují práci tak, aby úkol splnili. Vycházejí z výsledků výuky, doplněné o samostatnou práci s literaturou, internetem a vlastními úvahami. Výsledky projektu prezentují ve třídě, nebo na nástěnce.

Školní projekt „Jízdní kolo“ (JK) může být dlouhodobější, krátkodobější nebo rozčleněn na dílčí části. Je to projekt mezipředmětový a při jeho řešení mají žáci (skupinky žáků) využít poznatky nejen z fyziky a spolu souvisejících předmětů Bi, Ch, M, Z, ale i z D, Tv aj.

Projekt JK můžeme rozčlenit na několik částí pro různé skupiny žáků, které potom celý projekt prezentují ve třídě, popř. jako projekt celoškolní.

1. Význam JK.
2. Historie JK.
3. Jízdní kolo z hlediska fyziky.
4. Jízdní kolo v současných učebnicích fyziky pro ZŠ.
5. Pokusy s JK a řešení úloh s využitím získaných údajů.
6. Pasivní a aktivní bezpečnost jízdy na JK.

1 Význam JK

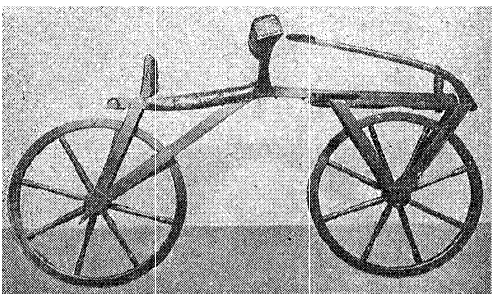
- Jeden z nejlepších vynálezů, v současnosti velmi rozšířený,
- vynález JK urychlil nejen dopravu, ale i kulturní vývoj lidstva,
- rozumět JK zn. pochopit řadu dalších dopravních prostředků,
- ekonomicky a ekologicky výhodný dopravní prostředek,
- univerzální prostředek na udržení zdraví, fyzické i psychické kondice atd.,

– pro učitele fyziky výborný *objekt* pro ilustraci uplatnění fyzikálních poznatků (konstrukce, technika jízdy aj.), *prostředek* k objasnění důležitých fyzikálních pojmů (trajektorie, dráha, rychlost, těžiště, třecí síla, moment síly, práce, výkon, energie aj.), zdrojem získávání číselných hodnot veličin pro řešení úloh.

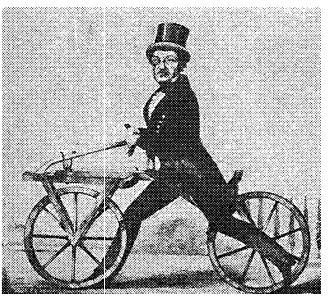
2 Historie JK

Toto téma je vhodné též pro samostatné referáty žáků. Inspiraci můžeme najít i v učebnici fyziky pro měšťanské školy z r. 1937. Je z ní zřejmé, že už před 70 lety bylo jízdní kolo významným prvkem ve výuce [1].

- První dvoukolové vozidlo byla dřevěná koloběžka, kterou sestrojil v r. 1817 bádenský lesník *Karl Ludwig Christian von Drais* (po něm je nazvaná „drezina") – obr. 1a, b. Na obr. 1b je sám von Drais. Přední kolo bylo možno natáčet ve směru jízdy a jezdec se odrážel od země nohama.



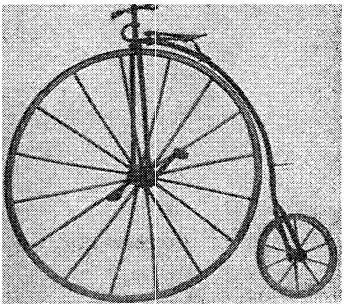
Obr. 1a



Obr. 1b

- Sériovou výrobu JK s klikami a pedály na předním kole, ještě s dřevěným rámem, zahájil v r. 1861 Francouz *Michaux.* Kolo nazval *velocipéd* a úspěšně je předvedl na světové výstavě v Paříži v r. 1867. Od r. 1869 se vyráběly v Paříži velocipédy už s kovovou konstrukcí (*Mayer*).
- Zvětšováním předního kola (až na 2 m) se rychlost velocipédu stále zvyšovala, zadní kolo bylo malé. Takové kolo bylo špatně ovladatelné a málo bezpečné, proto na špatných cestách docházelo často k pádům a úrazům.
- K výraznému zlepšení došlo v Anglii v r. 1880, kdy byl vynalezen kloubový řetěz, kliky umístěny do „středu" rámu, zadní kolo vybaveno ozubeným pastorkem a poháněno řetězem od převodníku, spojeného s klikami. Kolo se nazývalo *rover.*

- Dalším významným zlepšením byl vynález pneumatiky anglickým zvěrolékařem *J. B. Dunlopem* v r. 1888 a tento typ kola se v podstatě zachoval do dnešní doby.
- I když základní fyzikální principy zůstávají stejné, technický pokrok, snaha po stále větší pohodlnosti, účinnosti a bezpečnosti vede ke stálým modifikacím hlavně brzd, převodů, pneumatik a rámů.
- Zakladateli české cyklistiky byli *bratři Kohoutovi*, kteří v Praze kolem r. 1880 vyráběli obdobná kola jako v Anglii (tzv. kohoutovky). V Praze založili smíchovský klub velocipédistů a provozovali jízdu na vysokém bicyklu (přední kolo mělo průměr 2 m, kostra byla železná, obruče z plné pryže) – obr. 2.



Obr. 2

- Pěšky nebo na kole?
  Při chůzi pěšky nohy nesou celou tíhu člověka, při jízdě na JK svalová síla nohou (menší než tíha) překonává sílu třecí. Protože kolo je uloženo v kuličkových ložiskách, je třecí síla, potřebná na otáčení, mnohem menší než při chůzi.
- Srovnání dreziny, původního bicyklu a současného JK – výhody a nevýhody:
  – „krátí“ vzdálenosti, sbližuje lidi,
  – jízda působí pozitivně na psychiku cyklisty,
  – utužuje zdraví,
  – při chůzi namáháme nohy do kopce i z kopce, při jízdě pouze po rovině a do kopce,
  – nutno dodržovat dopravní předpisy aj.
- Popis součásti jednotlivých kol a jejich význam pro jízdu.

3 Jízdní kolo z hlediska fyziky

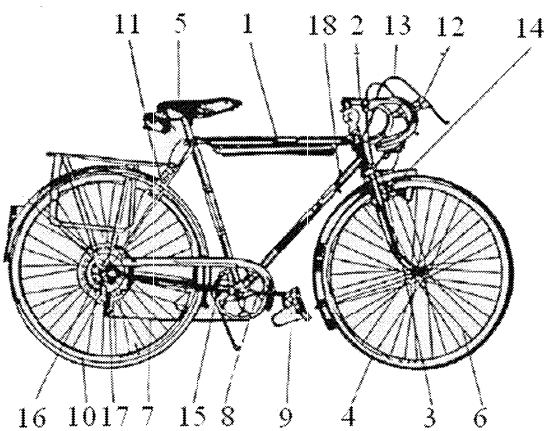
První kola byla ze dřeva (i obruče) – nevýhody? (Malá pružnost, jezdec trpěl nárazy.)

Současné JK: složení (obr. 3), k čemu slouží jednotlivé části a jaký je fyzikální princip jejich činnosti?

Proč jsou dráty, rám, obruče, řidítka, vidlice aj. z kovu? (Velká „pevnost“ při deformacích v tahu (dráty ve vodorovné rovině), v tlaku (ve svislé rovině, v ohybu řidítka), v torzi (hřídel ve středu kola při šlapání).)

Jaký význam mají ložiska a kde je najdete?

Požadavky na pneumatiky (pružnost, snadná stlačitelnost – vzduch a pryž).



Obr. 3 Legenda: 1 – rám, 2 – řídítka, 3 – vidlice, 4 – pneumatika, 5 – sedlo, 6 – výplet (dráty), 7 – řetěz, 8 – kliky, 9 – pedál (šlapadlo), 10 – ráfek, 11 – brzdné špalíky, 12 – brzdové páky, 13 – bowden, 14 – dynamo, 15 – převodník, 16 – pastorek, 17 – měnič převodů, 18 – páčka měniče

Rám

- jeho funkce (spojuje všechny části JK v jeden celek),
- proč je z ušlechtilé oceli a lehkých slitin? (odolnost proti deformacím, velká pevnost a pružnost),
- proč je z trubek a ne z masivních tyčí? (je „lehké“ a přitom pevné).

Ráfky s výpletem (dráty)

- jejich funkce (nesou tíhu cyklisty a kola s příslušenstvím),

– rozdíl mezi původním kolem dřevěným a kolem současným (příčinou tlakové síly kola na zemi byla deformace tlakem, nyní tahem).

Brzdy

– ráfkové čelisťové, princip (síla třecí, malou svalovou silou získáme převodem velkou tlakovou sílu na překonání síly třecí, moment síly),
– bubnové (v náboji kola).

Hnací souprava

– středové ozubené kolo s pedály (moment síly, momentová věta),
– zadní ozubené kolo (konání práce),
– řetěz (přenos síly),
– náboj zadních kol (tření, třecí síla).

4 Jízdní kolo v současných učebnicích fyziky pro ZŠ

Ze šesti existujících řad učebnic jsem vybral reprezentativní učebnice řady:

A Kolářová – Bohuněk z nakladatelství Prometheus,

B Macháček z nakladatelství Prometheus,

C Randa a kol. z nakladatelství Fraus.

Řada A

Explicitně se JK objevuje ze všech 4 učebnic jen v učebnici Fyzika pro 7. ročník základní školy [2].

V čl. *Klid a pohyb těles* má v ú 2/9 žák rozhodnout, v jakém pohybovém stavu je žák vzhledem ke třem různým tělesům na zemi, když sedí na JK a sjíždí z kopce.

Poznámka: Zápis „ú 2/9“ znamená, že je to úloha 2 na straně 9.

V čl. *Rychlost rovnoměrného pohybu* (s. 18) jsou 2 úlohy s vazbou na JK:

– ú 5/20 na příkladu jízdy 2 žáků na kolech mají žáci vypočítat jejich rychlost,
– ú 2/24 z údajů na tachometru JK a doby jízdy mají určit velikost dráhy, obrázek tachometru na JK je na s. 27 (viz obr. 4).

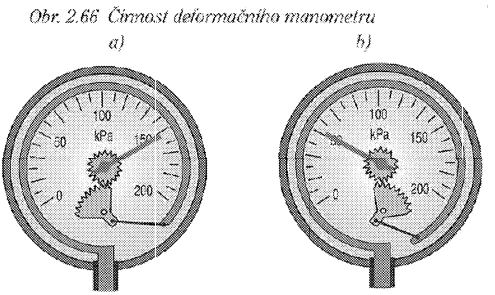
Obr. 4

V čl. *Brzdné účinky síly na těleso* je jako ilustrační příklad uvedena třecí síla působící na JK (s. 58).

V čl. *Třecí síla* je tento pojem objasňován i na funkci přední brzdy JK a je uveden vliv povrchu stýkajících se ploch čelist brzd a ráfků kola na velikost třecí síly (s. 92). Dále je objasněna funkce kuličkových a válečkových ložisek i na JK a vliv vzorku plášťů na velikost třecí síly v místě dotyku kola a vozovky. Je poukázáno i na nebezpečí smyku.

Ú 3/97 požaduje po žácích určit, kde jsou na JK kuličková nebo válečková ložiska, a vysvětlení významu jejich použití.

V čl. *Manometr* je ú 3/147, která vyžaduje rozhodnout, který deformační manometr použít k měření přetlaku v duši JK (manometry jsou na obr. 2.66) – viz obr. 5.



Obr. 5

Dále mají žáci zdůvodnit, jaký tlak by naměřili v duši JK ve vakuu.

V kap. Světelné jevy – odraz světla pro bezpečnost jízdy na JK (s. 162) je zdůrazněn význam odrazek na JK a na patnících. Z platnosti zákona odrazu je též zdůvodněno, proč nestačí jako odrazka rovinné zrcátko, ale proč je odrazka složena z mnoha malých pravoúhlých lesklých koutů.

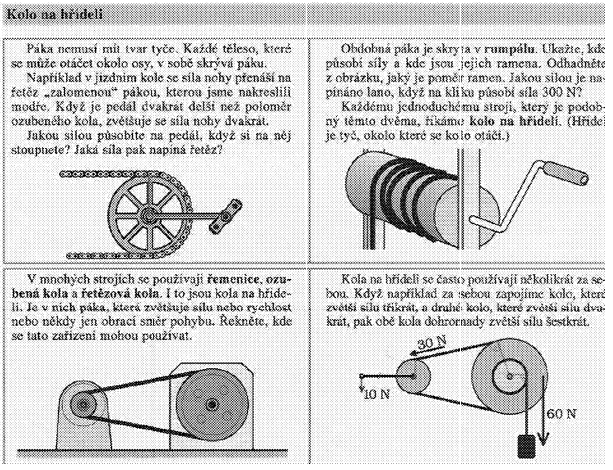
Řada B

V této řadě se explicitně JK vyskytuje jen v učebnicích pro 7 a 8 ročník ZŠ [3], [4].

V 7 ročníku při probírání *rovnoměrného pohybu* (kap. 1., 6/10) je příklad na výpočet rychlosti cyklisty.

V kap. 7. *Tření* je učivo motivováno příkladem jízdy na kole, kdy je nutné šlapat do pedálů i po vodorovné silnici, abychom překonali tření, protože jinak by se kolo zastavilo. Tamtéž se dále uvádí, že kuličková nebo válečková ložiska v JK podstatně tření zmenšují.

Při probírání *páky* (čl. 11) je na příkladu JK objasňováno kolo na hřídeli (viz obr. 6).



Obr. 6

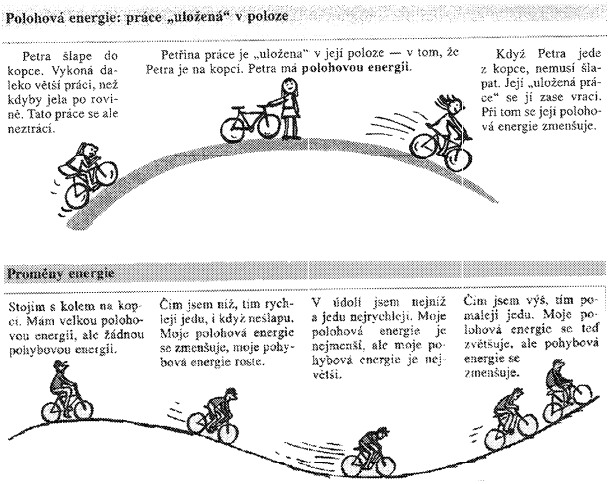
V ú 12/71 mají žáci na svém jízdním kole nalézt všechny jednoduché stroje a *změřením potřebných parametrů* JK vypočítat sílu, kterou působí na pedál JK a sílu, kterou působí pneumatika na vozovku.

V kap. *Atmosférický tlak* je ú 5/12 na měření tlaku v pneumatice.

V kap. *Pascalův zákon* mají žáci v ú 3/114 rozhodnout a zdůvodnit, proč při nafukování duše JK se na některém místě vyboulí.

Dále mají v ú 7/115 zdůvodnit, proč tlak mezi pneumatikami a vozovkou je o něco větší než tlak vzduchu v pneumatice a čím je to způsobeno.

V 8. ročníku je JK uváděno pouze jako prostředek k objasnění pojmů *polohová energie*, *pohybová energie a energie vnitřní* a přeměny energie mechanické (viz obr. 7).



Obr. 7

Řada C

Také v této řadě učebnic je JK explicitně uvedeno v učebnici pro 7. ročník [5], konkrétně:

- na s. 17 je úloha na určení z grafu rychlosti jízdy cyklistky během 5 minut, jak dlouho jela do kopce, po rovině a z kopce,
- na s. 18 je obr. tachometru v automobilu a na kole a úloha na výpočet rychlosti cyklisty na bicyklu,
- na s. 23 je úloha na sestrojení grafu rychlosti cyklisty na čase, který jede z místa bydliště do školy v sousední vesnici,
- na s. 28 je objasněna dráha nerovnoměrného pohybu na příkladu jízdy dvou cyklistů.

5 Pokusy s JK a řešení úloh s využitím získaných údajů

JK a jízda na něm nabízejí možnost racionálního využití při výuce z několika hledisek:

- *motivační* – JK je všem žákům důvěrně známé a dostupné k manipulaci, proto pokusy s ním žáky pozitivně motivují k hlubšímu porozumění nejen fyzice.
- *vzdělávací* – objasnění funkce jednotlivých součástí JK a jízda na něm umožní žákům lépe porozumět důležitým fyzikálním pojmům obecného významu: vztažná soustava, dráha, rychlost, (zrychlení), síla, moment síly, rovnováha těles, práce, výkon, energie.
- *výchovné* – aplikace fyzikálních poznatků v praxi, samotné provádění pokusů, měření fyzikálních veličin a řešení reálných úloh přispívá nenásilným způsobem k rozvíjení klíčových kompetencí.

(*Pokračování*)

Literatura

[1] *Langr, J., Nykl, J.: Pracovní učebnice přírodovědy pro školy měšťanské. díl III. Fysika.* Praha, Česká grafická unie, 1937, dotisk 1948.

[2] *Kolářová, R., Bohuněk, J.: Fyzika pro 7. ročník základní školy.* Praha: Prometheus, 2003, 2. upravené vydání.

[3] *Macháček, M.: Fyzika pro 7. ročník základní školy a víceletá gymnázia.* Praha: Prometheus, 2001, 2. vydání.

[4] *Macháček, M.: Fyzika pro 8. ročník základní školy a víceletá gymnázia.* Praha: Prometheus, 2001, 2. vydání.

[5] *Rauner, K.: Fyzika 7 učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia.* Plzeň: Fraus, 2005, 1. vydání.

[6] *Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání.* Praha: VÚP, 2004.

[7] *Machová, M.: Jízdní kolo ve vyučování fyzice.* Diplomová práce. Brno: PdF MU, 1995.

[8] *Janás, J. – Machová, M.: Jízdní kolo ve vyučování fyzice I.* In Školská fyzika. Plzeň: KOF PeF ZčU, 2/1996-1997, s. 59-65.

[9] *Macchová M. – Janás, J.*: Soubor úloh s tématikou jízdního kola. In *Školská fyzika.* Plzeň: KOF PeF ZčU, 1/1998, s. 59-65.

[10] *Janás, J. – Trna, J.: Konkrétní didaktika fyziky I*, Brno: MU, 1995, s. 6-14.

[11] *Janás, J.*: Inovace výuky fyziky na základní škole a gymnáziu. In *Veletrh nápadů učitelů fyziky* IX. Sborník z konference, sv. 2. Brno: Paido, 2004, s. 38-41.

[12] *Janás, J.*: Fyzika a dopravní výchova na ZŠ. In *Implementace dopravní výchovy do školního vzdělávacího programu na ZŠ.* Metodický sborník k projektu 1 F 44L/058/050 (red. Stojan, M.). Brno: MS Press. 2006, s. 77-79. CD.

Comptonův jev jako základní téma úvodního výkladu kvantových vlastností elektromagnetického záření

HANA MARTINÁSKOVÁ – ALEŠ LACINA

Gymnázium Brno – Řečkovice, Přírodovědecká fakulta MU – Brno

Comptonův jev je natolik přesvědčivým projevem kvantového charakteru interakce mezi elektromagnetickým zářením a látkou, že byl záhy po svém objevu a vysvětlení uznán za průkazné svědectví o reálné existenci fotonů [1]. Jeho obvyklé zařazení v učebnicových výkladech kvantových vlastností záření však neodpovídá ani jeho fyzikálnímu významu, ani jeho pedagogické hodnotě. Pokud je v nich totiž vůbec zmíněn, je zpravidla uveden jen velmi stručně – jako doplňkový příklad ilustrující (a snad i dodatečně podepírající) nezvyklé ideje použité v předcházející prezentaci fotoelektrického jevu. Jeho případný výklad se tedy – v drtivé většině učebnicových textů, které jej obsahují – od samého počátku opírá o v podstatě postulovanou kvantovou koncepci interakce elektromagnetického záření s látkou. Přitom již jeho základní analýzu lze uspořádat jako přímočarý, přehledný, celistvý fyzikální příběh, umožňující nejen velmi jednoduše **demonstrovat nepoužitelnost vlnové koncepce**, ale také snadno a hlavně nezávisle – tj. bez odvolání na dříve či jindy vyslovené předpoklady – **vytvořit jeho adekvátní kvantový popis**. Promyšlenou prezentací Comptonových experimentálních výsledků a navazujících teoretických úvah tak lze **dospět k pojmu světelného kvanta – fotonu** podstatně přesvědčivěji než v případě tradičně preferovaného fotoelektrického jevu.

1. Demonstrace neadekvátnosti vlnové koncepce

Podle klasické elektrodynamiky je elektromagnetické záření rozptýlené látkou superpozicí sekundárních elektromagnetických vln emitovaných elektrony ozařovaného vzorku rozkmitanými vlnou dopadající. A přestože podrobný – fyzikálně zcela korektní – popis takového výkladu vyžaduje značnou odbornou erudici, jeho elementarizovanou verzi lze velmi snadno

zformulovat i na středoškolské úrovni: Periodicky se měnící elektrické pole ($\equiv$ elektrická složka $\vec{\mathcal{E}}$ dopadající elektromagnetické vlny o frekvenci f) nutí každý jednotlivý elektron kmitat se stejnou frekvencí [2]. Náboj kmitající s určitou frekvencí je však zdrojem elektromagnetického vlnění téže frekvence. Obě tato konstatování lze učinit přijatelnými dokonce i úplným laikům odkazem na fungování (a součinnost) přijímací a vysílací antény. Jednoduchost této argumentační linie zpřehledňuje následující heslovitý zápis:

KLASICKÁ PŘEDSTAVA O ROZPTYLU ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ LÁTKOU

rozptýlené vlnění je superpozicí sekundárních vln, jejichž zdroji jsou elektrony rozkmitávané vlnou dopadající

frekvence rozptýleného vlnění
$\|$
frekvenci sekundárních vln emitovaných kmitajícími elektrony
$\|$
frekvenci vynucených kmitů elektronů
$\|$
frekvenci vynucující síly
$\|$
frekvenci dopadající vlny
$\lambda' = \lambda$

Srovnáním tohoto závěru s Comptonovým experimentálním zjištěním, že při rozptylu rentgenového záření na vzorcích obsahujících slabě vázané elektrony dochází ke změně jeho vlnové délky

$$\lambda \to \lambda', \quad (\lambda' \neq \lambda)$$

(resp. frekvence) **se ukazuje, že:**

vlnová koncepce je při popisu tohoto jevu nepoužitelná.

2. Vytvoření kvantové představy*)

Východiskem úvah směřujících k adekvátnímu teoretickému vysvětlení nečekaného jevu je především jeho pečlivé experimentální vyšetření. Systematickým experimentováním Compton našel přesnou souvislost mezi úhlem rozptylu φ a změnou vlnové délky $\Delta\lambda$, k níž v příslušném směru dochází.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2{,}4262 \cdot 10^{-12}(1 - \cos\varphi) \text{ m}.$$

Po označení empiricky získané číselné konstanty $2{,}4262 \cdot 10^{-12}$ m, zpravidla nazývané Comptonova vlnová délka, symbolem λ_C, nabude tento vztah obvyklého tvaru

$$\lambda' - \lambda = \lambda_C(1 - \cos\varphi),$$

popř., po vyjádření vlnových délek rozptýleného a dopadajícího záření pomocí frekvencí,

$$\frac{1}{f'} - \frac{1}{f} = \frac{\lambda_C}{c}(1 - \cos\varphi), \tag{1}$$

kde c je rychlost světla.

Naprosté selhání vlnového pojetí elektromagnetického záření při pokusu o teoretický výklad Comptonova jevu zřejmě vyžaduje zásadní změnu v uvažování o vzájemném působení dopadajícího záření a elektronů. Než budeme formulovat alternativní představu o rozptylu elektromagnetického záření látkou, zdůrazněme, že **další postup** má sice týž obecný směr jako obvyklá vysokoškolská učebnicová zpracování [6–9], na rozdíl od nich však **z fotonové koncepce nevychází, ale postupně k ní dospívá**. Aby byla jeho logická linie co nejpřehlednější, je další výklad záměrně prezentován heslovitě a jen minimálně prokládán spojujícími komentáři. (Jeho podrobnější verzi – rozšířenou i o některé fyzikálně-historické skutečnosti – obsahuje [10, 11].)

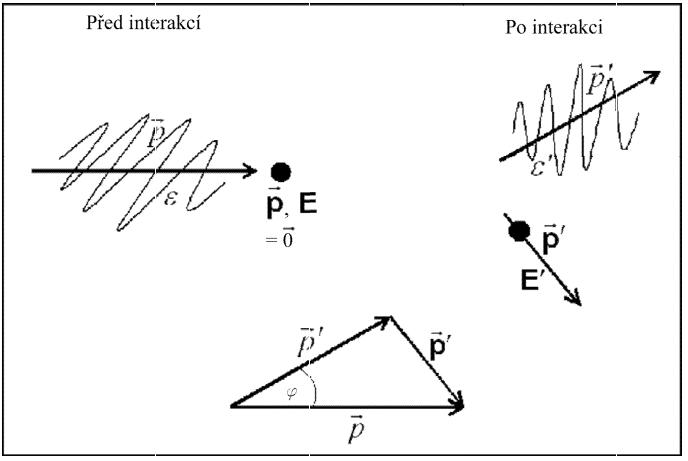
*) Připomeňme znovu, že české gymnaziální učebnice fyziky se – jen s výjimkou [4] a snad [5] (v části cvičení) – Comptonovým jevem nijak podrobně nezabývají. Avšak ani drtivá většina vysokoškolských učebnic (namátkou např. [6–9]) žádnou detailní předběžnou diskusi možnosti jeho výkladu neprovádí a kvantovou představu v souvislosti s ním nevytváří, nýbrž pouze používá. Výklad Comtonova jevu je v nich zpravidla uveden pouhým konstatováním neúspěchu klasické fyziky při jeho popisu (mnohdy však začíná i bez tohoto oznámení), na něž bezprostředně navazuje **informace** o fotonech (s přímo nasevírovanými hotovými vztahy $\varepsilon = hf$, $\vec{p} = \overrightarrow{\left(\frac{hf}{c}\right)}$) následovaná více či méně podrobným odvozením výrazu pro $\Delta\lambda$, které má demonstrovat správnost „této teorie“.

ALTERNATIVNÍ PŘEDSTAVA O ROZPTYLU ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ LÁTKOU

rozptyl = interakce určitých částí dopadajícího vlnového pole (zatím nevíme, jak velkých) s jednotlivými elektrony

z elektrodynamiky (popř. speciální teorie relativity):
elektromagnetická vlna přenáší spolu s energií ε
hybnost $\vec{p}$
(projevuje se mj. tlakem záření)
platí: $\varepsilon = pc$ (ať jde o jakkoli vybranou část pole)

Namísto klasické představy rozkmitání souboru elektronů dopadající elektromagnetickou vlnou a superpozice jimi emitovaných sekundárních vln se tedy uvažuje o interakci jednotlivých elektronů (s počáteční hybností $\vec{\mathbf{p}} = \vec{0}$ a energií $\mathbf{E} = m_0c^2$ – např. [6–9])*) s jistou – **zatím nespecifikovanou** – částí dopadajícího elektromagnetického pole (s počáteční hybností $\vec{p}$ a energií $\varepsilon = pc$ [12]).



*) Tento předpoklad, odpovídající popisu jednotlivé interakce v souřadnicovém systému spojeném s elektronem před ní, je fyzikálně oprávněn nepatrnou hybností termalizovaných elektronů.

Pro tyto elementární interakce platí základní zákony zachování.

ZÁKON ZACHOVÁNÍ HYBNOSTI	ZÁKON ZACHOVÁNÍ ENERGIE
$\vec{p}+\vec{\mathbf{p}}=\vec{p}'+\vec{\mathbf{p}}'$ $=\vec{0}$	$\varepsilon+\mathbf{E}=\varepsilon'+\mathbf{E}'$ $\varepsilon+m_0c^2=\varepsilon'+\mathbf{E}'$

Užitím kosinové věty:

$$p'^2+p^2-2pp'\cos\varphi=\mathbf{p}'^2 \quad /\cdot c^2 \tag{2}$$

$$(\varepsilon-\varepsilon'+m_0c^2)^2=\mathbf{E}'^2 \tag{3}$$

Po provedení naznačených operací,
po dosazení $pc=\varepsilon$, $p'c=\varepsilon'$, $\mathbf{p}'^2c^2=\mathbf{E}'^2-m_0^2c^4$ do (2) [15],
a vzájemném odečtení obou rovnic (2), (3) se dostane

$$\frac{1}{\varepsilon'}-\frac{1}{\varepsilon}=\frac{1}{m_0c^2}(1-\cos\varphi).$$

3. Zavedení pojmu foton

Nápadná podoba tohoto výsledku se vztahem (1) shrnujícím výsledky Comptonova systematického experimentování (zcela stejná – netriviální – závislost na úhlu rozptylu φ na jejich pravých stranách a rozdíl charakteristiky rozptýleného a dopadajícího záření na jejich stranách levých) může být sotva náhodná a vyzývá k jejich srovnání:

Ze srovnání

$$\frac{1}{\varepsilon'}-\frac{1}{\varepsilon}=\frac{1}{m_0c^2}(1-\cos\varphi) \qquad \text{a} \qquad \frac{1}{f'}-\frac{1}{f}=\frac{\lambda_C}{c}(1-\cos\varphi)$$

postupně vychází

$$\frac{1}{\varepsilon'}-\frac{1}{\varepsilon}=\frac{1}{const.}\left(\frac{1}{f'}-\frac{1}{f}\right), \qquad \text{resp.} \qquad \varepsilon'=const.f',\ \varepsilon=const.f,$$

a dále

$$\frac{1}{f'} - \frac{1}{f} = \frac{const.}{m_0 c^2}(1 - \cos\varphi),$$

$$\frac{\lambda_{\mathrm{C}}}{c} = \frac{const.}{m_0 c^2}.$$

Odtud pro konstantu úměrnosti mezi ε a f platí:

$$\begin{aligned} const. &= m_0 \cdot c \cdot \lambda_{\mathrm{C}} \\ &= 9{,}109\,534 \cdot 10^{-31}\ \mathrm{kg} \cdot 2{,}997\,925 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} \cdot 2{,}426\,2 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{m} \\ &= 6{,}625\,879 \cdot 10^{-34} \mathrm{kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}} \end{aligned}$$

(Dnešní tabelovaná hodnota Planckovy konstanty $h = 6.626\,176 \cdot 10^{-34}\mathrm{J \cdot s}$ [16].)

Tento závěr lze chápat nejen jako

- **potvrzení výchozí představy celého postupu (≡ interakce oddělených částí/kvant/elektromagnetického pole s jednotlivými elektrony)**,

ale také jako

- **stanovení velikosti těchto kvant:**

ČÁSTI POLE INTERAGUJÍCÍ S JEDNOTLIVÝMI ELEKTRONY

MAJÍ ENERGII $\varepsilon = hf$ **A HYBNOST** $\vec{p} = \overrightarrow{\left(\frac{\varepsilon}{c}\right)} = \overrightarrow{\left(\frac{hf}{c}\right)}$

(směr shodný se směrem šíření záření).

„BALÍČKY ZÁŘENÍ“ ∼ SVĚTELNÁ KVANTA ∼ FOTONY

Prezentovaný postup je, podle názoru autorů, zvládnutelný a stravitelný i pro gymnaziální studenty. A umožníme-li jim takto zažít a vychutnat jeho fyzikální podstatu a souvislosti, stane se celý příběh kvantových vlastností elektromagnetického záření zajímavějším a pedagogicky účinnějším než pouhé sterilní oznámení, že *interaguje-li elektromagnetické záření s látkou, dochází mezi nimi k výměně energie a hybnosti po kvantech.*

Literatura a poznámky

[1] *Lacina, A. – Martinásková, H.*: Kvantové vlastnosti elektromagnetického záření v gymnaziálním kurzu fyziky. MFI 17 (2008), č. 7, s. 407.

[2] Důvodem pro pominutí běžně mlčky ignorovaného silového účinku magnetické složky je skutečnost, že její amplituda $\mathcal{B}_0 = \mathcal{E}_0/c$ (kde $\mathcal{E}_0$ je amplituda složky elektrické, c je rychlost světla) – viz např. [3]. V důsledku toho je síla $\vec{F}_{\mathrm{mag}} = q(\vec{v} \times \vec{\mathcal{B}})$, kterou působí magnetická složka na libovolný náboj q pohybující se nerelativistickou rychlostí v, zanedbatelná ve srovnání se silou $\vec{F}_{\mathrm{el}} = q\vec{\mathcal{E}}$, jíž na něj působí složka elektrická.

[3] *Alonso, M. – Finn, E. J.*: Fundamental University Physics, vol. II. Addison – Wesley, Reading, Massachusetts 1970.

[4] *Fuka, J.*: Doplněk k učivu fyziky pro IV. ročník gymnasia. SPN, Praha 1974.

[5] *Pišút, J. a kol.*: Fyzika pro IV. ročník gymnázií. SPN, Praha 1987.

[6] *Špolskij, E. V.*: Atomová fyzika. SNTL, Praha 1957.

[7] *Beiser, A.*: Úvod do moderní fyziky. Academia, Praha 1975.

[8] *Ohanian, H. C.*: Physics. W. W. Norton & Company, New York 1989.

[9] *Hallíday, D. – Resnick, R. – Walker, J.*: Fyzika, VUTIUM Brno, Prometheus Praha 2000.

[10] *Martinásková, H.*: Vývoj představ o světle a možnosti jeho využití v gymnaziálním kurzu fyziky. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta MU, Brno 2007.

[11] Comptonův jev – prezentace. http://www.physics.muni.cz/~lacina/compton.ppt

[12] Nejjednodušší cestou k tomuto důležitému vyjádření je kombinace základního relativistického vztahu $\varepsilon = mc^2$ s definičním $p = mv$ na výraz $\varepsilon = \dfrac{p}{v}c^2$ a následné položení $v = c$. Z hlediska elektrodynamického je tento vztah odvozen a podrobně komentován např. v [13], jeho všestrannou diskusi lze najít v [14].

[13] *Grawford, F. S., Jr.*: Waves – Berkeley Physics Course, volume 3. McGraw-Hill Book Company, New York 1967. (Ruský překlad: Volny. Nauka, Moskva 1974.)

[14] *Pišút, J. – Zajac, R.*: O atómoch a kvantovaní. Alfa, Bratislava 1988.

[15] Obecný relativistický vztah $E^2 = m_0^2c^4 + p^2c^2$ mezi energií E a velikostí hybnosti p (objektu o klidové hmotnosti m_0 pohybujícího se rychlostí $\vec{v}$), který gymnaziální učebnice fyziky neuvádí, se snadno získá jednoduchou – „čistě matematickou“ – úpravou výrazu vzniklého dosazením $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ do vztahu $E^2 = m^2c^4$ a využitím $p = mv$.

[16] *Brož, J. a kol.*: Fyzikální a matematické tabulky. SNTL, Praha 1980.