

Pár věcí z tábora 6

LEOŠ DVOŘÁK

Matematicko-fyzikální fakulta UK Praha

Cílem tohoto příspěvku je podělit se o některé náměty a zkušenosti z projektů realizovaných na tradičním soustředění pro budoucí učitele fyziky na Malé Hrašticí v květnu 2003 a na letním matematicko-fyzikálním soustředění pro středoškoláky (červenec 2003, Nekoř). Bližší informace o obou soustředěních lze najít na webu (viz [1]). Hlavním odborným tématem obou soustředění letos byly **Síly a interakce**.

Síly – téměř nevyčerpatelný zdroj námětů na projekty

Většina projektů na obou soustředěních se týkala sil. A již při přípravě se ukázalo, že jde o téma, v němž lze účastníkům nabídnout doslova desítky námětů, co konstruovat a zkoumat.

Na hraštickém soustředění tak třeba účastníci mimo jiné konstruovali vznášedlo z CD, malou Heronovu fontánu či Barlowovo kolečko, měřili pružnost dřeva, pevnost stonků rostlin a dalších biologických materiálů, rychlost broku balistickým kyvadlem i střílením do hranolku, zkoumali tvar řetězovky, ověřovali vztahy pro tření (víte třeba, jaký vztah platí pro tření lana namotaného kolem kůlu?). Já sám jsem zkoušel, jak změřit sílu, jíž je napnuta struna na kytarě a hledal odpověď na otázku, proč Heronova fontána nestříká zdaleka tak vysoko, jak by teoreticky měla. Vedlo to k měření viskozity vody, odchylek od Poiseuilleova zákona apod. – ale o tom blíže až někdy jindy. Navíc jsme vyslechli zajímavou přednášku o tom, proč a jak působí silou naše svaly (a proč se tedy unavíme, i když něco jen držíme a nekonáme práci) – a vůbec to bylo na Hrašticí tradičně zajímavé a pěkné, za což všem zúčastněným patří dík.

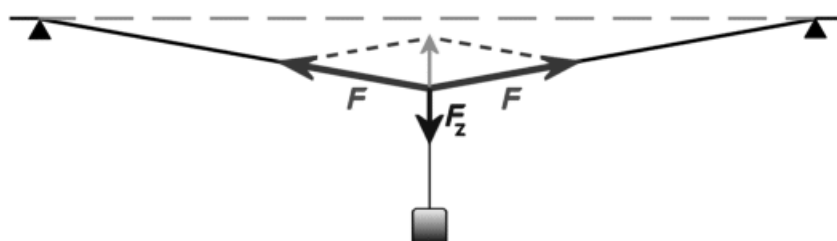
O rozmanitosti nabídky témat svědčí i (neúplný) výčet *realizovaných* projektů na letním soustředění pro středoškoláky: • *Vznášedlo* (řešitelé Dan Balaš, Martin Cetkovský a Jakub Mišek, konzultant projektu Antonín Řehák), • *Diamagnetika* (včetně magnetické levitace, řešitelé Tomáš Javůrek a Ondřej Švec, konzultant Zdeněk Polák), • *Fontány* (řešitelé Petr Polák a Vít Zajac, konzultantka Andrea Marenčáková), • *Pohyb v odporujícím prostředí* (řešitelé Jan Pušman a Miroslav Rypka, konzultant Vojtěch Kapsa), • *Váhy* (řešitelky Marcela Hrdá a Pavlína Teturová, konzultantka Andrea Marenčáková), • „*Stěhování soch*“ (šlo o způsob, jak vyvinout velkou sílu, abyste mohli třeba pohnout sochou na Velikonočním ostrově ☺, řešitel Radek Šachl, konzultant Martin Švec, po jeho odjezdu Mirek Jílek), • *Balistické kyvadlo* (řešitelé Kamil Daněk a Filip Dvořák, konzultantka Andrea Marenčáková), • *Síly ve dřevě* (řešitelé Michael Hapala a Karel Havlíček, konzultant Mirek Jílek), • *Setrvačníky* (řešitelé Kamil Al Jamal a Lukáš Severa, konzultant Mirek Jílek), • *Elektrostatická levitace* (řešitelé Martin Pokorný, David Streibl a Jan Mužík, konzultant Peter Žilavý), • *Heronova fontána* (řešitel Štěpán Šembera, konzultant Leoš Dvořák), • *Rychlost pádu kapek* (řešitelky Ela Bělohávková, Ludmila Kadlecová a Jana Kubincová, konzultantka Věra Koudelková), • *Van de Graafův generátor* (řešitel Daniel Tekverk, konzultant Peter Žilavý) a • *Povrchové napětí* (řešitelé Jiří Dvořák a Jan Pokorný, konzultant Leoš Dvořák). Poděkovat je nutno i konzultantům dalších teoretičtějších a matematických projektů Vojtěchu Kapsovi a Lukáši Poulovi. Díky všem zúčastněným se projekty opravdu vydařily a na závěrečné konferenci bylo na soustředění co zajímavého předvádět. Snad se časem podaří publikovat pro zájemce třeba na webu bližší popis některých řešení a výsledků. V tomto příspěvku bych chtěl stručně popsat tři z projektů, na nichž jsem se podílel.

Jakou silou je napnutá kytarová struna?

Zajímavý projekt může vzniknout i ze zcela jednoduché otázky. Například jakou sílu musí vydržet krk kytary, tedy jak velkou silou jsou na něm napnuty struny. Samozřejmě bychom si to mohli někde přechíst, ale fyzika (fyzikem míním pro tuto oblast zapáleného člověka od deseti do sta let) láká možnost zjistit to vlastním měřením. Ovšem štípat kvůli tomu strunu a vázat na uštípnuté konce siloměr asi není to pravé řešení. Naštěstí to jde i mnohem jednodušeji – a je to přitom dobrá ilustrace rozkladu sil, přístupná snad i žákům, kteří se se silami začínají teprve seznamovat.

Základní princip a možnosti, jak zpřesnit měření

Princip měření je jednoduchý: v polovině její délky táhnout strunu siloměrem nebo závažím do strany, ve směru kolmém ke struně. A změřit, o kolik ji vychýlíme.



Obr. 1. Vychýlení struny tahem do strany – rozklad sil

Obrázky 1. a 2. ukazují, jak se v tomto případě skládají síly a umožňují odvodit pro sílu, jíž je struna napínána, jednoduchý vztah

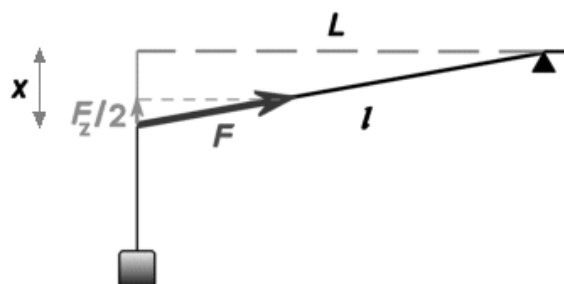
$$F = F_z \frac{L}{2x},$$

kde F_z je tíha závaží táhnoucího strunu do strany (resp. síla, kterou odečteme na siloměru, jímž strunu táhneme), x je výchylka struny a L polovina délky struny. Poznamenejme, že při tomto jednoduchém odvození nerozlišujeme původní délku L a

délku l po protažení. Právě tak zatím nepřihlížíme k tomu, že ve struně, kterou táhneme stranou, se síla poněkud zvýší (právě proto, že se struna protáhla).

Jak měřit? K rychlému orientačnímu měření stačí táhnout strunu siloměrem a výchylku odečítat pravítkem. Snadno tak zjistíme, že kytarové struny jsou napnuty silou přes 50 N. (V konkrétním případě to byly síly v rozmezí 70 až 110 N.) Pro přesnější měření se ukázalo vhodnější táhnout strunu závažím (které může „v polních podmínkách“ zastoupit třeba kelímek s vodou). Při držení siloměru se totiž většině lidí chvěje ruka, neustále je nutno kontrolovat, že táhneme správnou silou a měření není příliš přesné. Se závažím je to pohodlnější a přesnější.

Zpřesnit lze i odečítání výchylky struny. Při tíze závaží do 3 až 5 N (což lze realizovat vodou v půllitrovém pohárku) jsou totiž výchylky struny jen několikamilimetrové (konkrétně při síle 3 N dosahovaly asi 7 mm) a s přesností jejich měření to není slavné. Chybu můžeme odhadnout až asi na dvacet procent. Pro orientační měření to stačí; chceme-li naše výsledky zpřesnit, můžeme vymýšlet, jak na to.



Obr. 2. K odvození vztahu pro sílu, kterou je napnutá struna

Právě tady začíná projekt dál získávat na zajímavosti – žáci a studenti nepochybně mohou přijít na zajímavá řešení, třeba zcela odlišná od dále popsaného. Mě napadlo mít jedno měřítko pevné a jedno pohyblivé, spojené se strunou resp. s nití, která za strunu táhne. Pohyblivou stupnici mít ovšem v poněkud jiném měřítku, aby fungovala jako nónius na běžném posuvném měřítku a umožnila měřit výchylky na desetinu milimetru. (Je to hezká motivace pro to, rozmyslet si podrobně, jak vlastně funguje nónius a proč. Že jsou měřítka obou stupnic jiná a jak pomocí nónia odečítáme, je jasné. Ale máte rozmyšleno, zda má být pohyblivá stupnice roztažena nebo zkrácena oproti té pevné? A jak musí být udělána, chceme-li odečítat s přesností na 0,05 mm? Třeba to všichni všechno znáte; já jsem si na to, přiznávám, musel sednout s tužkou a papírem.) Poznamenejme, že stupnici s protaženým nebo zkráceným měřítkem lehce vyrobíme na xeroxu, na němž jde měnit zvětšení.

Co dalšího lze takto měřit a zkoumat

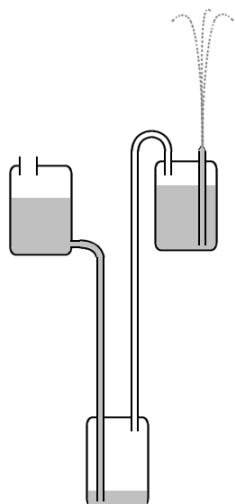
Jak už bylo uvedeno, jednoduché měření velikosti síly ve struně může být úlohou na úrovni ZŠ. Některé z námětů, jak tuto úlohu rozšířit a obohatit, však mohou být zajímavé i pro pokročilejší zájemce. Můžeme například:

- Ověřovat, zda mezi silou táhnoucí strunu stranou a výchylkou platí opravdu přímá úměrnost. (Výchylky při různých silách vynášet do grafu, prokládat přímkou...).
- Ověřovat vztah mezi silou, kterou je napnuta struna, a frekvencí tónu struny. Frekvence má být úměrná druhé odmocnině síly. Při tomto experimentu se obejdeme i bez osciloskopu nebo jiného měřiče frekvence. Stačí využít srovnání tónu s tóny ostatních strun kytary. (Potřebujeme k tomu vědět, že poměr frekvencí dvou sousedních pultónů je v temperovaném ladění roven dvanácté odmocnině ze dvou – a už jsme u hudební akustiky a téměř u hudební výchovy...)
- Zkoumat, jak se na našem měření projeví fakt, že při výchylce se struna prodlouží a tedy roste síla, kterou je napínána. Při tomto zpřesnění se ukáže, že síla, kterou táhneme strunu do strany, nezávisí na výchylce přesně lineárně, ale že se v závislosti projevuje ještě *kubický* člen x^3 . V koeficientu před tímto členem vystupuje Youngův modul pružnosti. Přišli jsme tedy na zajímavou metodu, jak alespoň přibližně měřit modul pružnosti materiálu struny. (Pozn.: Pokud to budete dělat, je výhodné strunu více povolit, kubický člen se pak v závislosti výrazněji projeví a měření má šanci být přesnější.) Pomocí řešiče („solveru“) v Excelu můžeme naměřenou závislosti proložit polynomem třetího stupně a určit tak nejen sílu, ale i modul pružnosti. To už je ale možná námět na poněkud náročnější projekt třeba do výběrového semináře.

Některé z uvedených námětů doufám podrobněji popíšu jinde. Ale i tak je vidět, že od jednoduchého zadání se dá dospět i k projektům na úrovni, která je na pomezí SŠ a VŠ úrovně.

Heronova fontána

Heronova fontána je hezkou ilustrací problematiky hydrostatického tlaku. Dnes se s ní asi sotva setkáme jinak, než jako se zajímavou hříčkou. Přesto však mladší žáky (a možná nejen je) může docela zajímat otázka: „Jak to, že voda stříká výš, než je hladina v kterékoli nádobě, když přitom v celé konstrukci není žádná pumpa nebo čerpadlo, kterým bychom stlačovali vodu nebo vzduch?“



Obr. 3. Princip Heronovy fontány.

Snad nejjednodušší je ukázat, že k tomu, aby fontána stříkala, stačí do horní nádrže foukat stlačený vzduch. (Stačí ho tam opravdu foukat ústy.) A pak zdůvodnit, čím je v Heronově fontáně vzduch stlačován: je to vodou klesající do dolní nádoby – viz obrázek 3.

Samozřejmě, že mnohem lepší, než ukazovat náčrt, je ukázat Heronovu fontánu reálně v činnosti. Ovšem při praktické realizaci můžeme narazit na problém: fontána sice stříká, ale ne tak vysoko, jak bychom očekávali a jak bychom chtěli. Bylo by pěkné a působivé mít fontánu, která by stříkala co nejvýše. Jak toho dosáhnout?

K praktickým i zásadnějším problémům při konstrukci fontány se ještě za chvíli vrátíme. Nejdříve ale popíšeme nápad, který byl motivací projektu pro letní soustředění pro středoškoláky:

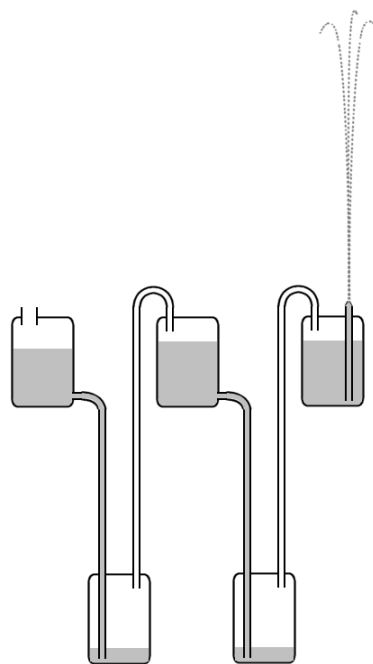
přidat k Heronově fontáně ještě (nejméně) jeden stupeň.

Dvoustupňová fontána

Obrázek 4 je zřejmě výmluvnější než dlouhé popisy.

V „prvním stupni“ klesající voda stlačuje vzduch v dolní nádrži, ten tlačí na vodu v prostřední horní nádrži, k jeho tlaku se přidává tlak dalšího sloupce vody... Výsledný přetlak v poslední nádobě, z níž vede tryska, by měl být *součtem* hydrostatických tlaků daných rozdíly výšek v horních a dolních nádobách. Teoreticky by tedy voda měla stříkat do dvojnásobné výšky, než je tomu u „klasické“ Heronovy fontány.

V praxi samozřejmě vinou různých ztrát tak velké výšky nedosáhneme. Pokud uděláme „malou“ verzi fontány např. z plastových lahví, tenkých hadiček a trysky z jehly injekční stříkačky, může se stát, že ani druhý stupeň fontány příliš výšku našeho vodotrysku nezvýší. Pojďme si proto trochu „posvítit“ na zmíněné ztráty.



Obr. 4. Dvoustupňová Heronova fontána.

Problémy a jak je řešit

Úvahy týkající se tlakových ztrát by nás přivedly k Poiseuillově zákonu. Ten udává rozdíl tlaku na začátku a na konci trubky (tlakový spád) v závislosti na parametrech trubky, viskozitě tekutiny a na tom, kolik jí proteče trubkou za sekundu. Bližší rozbor necháme na jindy, podstatné ale je, že rozdíl tlaků závisí na *čtvrté* mocnině průměru trubice. Použijeme-li hadici o polovičním průměru, vzroste tlakový spád (tedy „tlakové ztráty“) šestnáctkrát! Při průtoku vody tenkými hadičkami se pak snadno hydrostatický tlak „spotřebuje“ na překonání

těchto tlakových ztrát daných třením, místo aby hnal vodotrysk co nejvýše. (Doufám, že mi čtenáři na tomto i jiných místech odpustí spíše barvitější vyjadřování vhodné pro názorný výklad a prominou, že zde šetřím přesnějšími formulacemi a vzorci.)

Poučení je jasné: nepoužívat tenké hadičky, ale hadice o dostatečně velkém průměru. „Cestou do pekel“ je také jehla z injekční stříkačky použita jako tryska: její tenká část je příliš dlouhá! Je třeba použít trysku, která má zúženou část co nejkratší.

Musím přiznat, že v projektu na letním soustředění jsme použili trysku, kterou předem zhotovil mechanik naší katedry. Hadicemi byly běžné půlcoullové zahradní hadice, nádobami pětilitrové plastové kanystry. Problémem u podobných konstrukcí je vždy těsnost „vstupů a výstupů“ hadic do nádob. Osvědčilo se řešení, u jehož zrodu stála dobrá rada Petera Žilavého: použít elektrikářské průchodky na kabely. Dají se zašroubovat do děr ve stěnách kanystrů a dotáhnout maticemi, takže kolem nich neproniká vzduch ani voda. „Utáhnout“ do nich bylo potřeba něco pevnějšího než hadice. Naštěstí jsme měli kousky měděné trubky vhodného průměru, které dobře „pasovaly“ do elektrikářských průchodek (daly se těmito průchodkami utáhnout, takže také dobře těsnily). Zvenku na ně šly dostatečně ztuhla nasadit ony zahradní hadice.

Výsledkem je fungující (přenosná a rozebíratelná) konstrukce Heronovy fontány, která stříká vodu do výšky téměř tří čtvrtin výšky dané rozdílem hladin v dolní a „nalévací“ nádobě. Dobře funguje i v sestavě dvoustupňové fontány, kdy horní kanistry stojí např. na stole a spodní na zemi. Celá sestava je dostatečně flexibilní a při předvádění na Veletrhu nápadů (v sestavě „klasické“ jednostupňové fontány) s delšími hadicemi a výškovým rozdílem kanystrů mezi prvním patrem a přízemím stříkala fontána do zhruba třímetrové výše.

Praktické provedení si asi každý zájemce přizpůsobí svým možnostem (nezapomeňte přitom na výše uvedené úvahy o tloušťce hadic a trysky). Podstatné je, že jde opět o projekt, s nímž si mohou „vyhrát“ i mladší zájemci, ale který zdaleka není omezen jen na ně.

Poděkování

Na tomto projektu na letním soustředění intenzivně a značně samostatně pracoval jeho řešitel Štěpán Šembera; velice mu prospěly i rady a technická pomoc jednoho z dalších konzultantů Antonína Řeháka.

„Projekt vodoměrka“ aneb hrátky s povrchovým napětím

K poslednímu projektu jen velmi stručně. Byl motivován snahou proměřit i v „táborových podmínkách“ povrchové napětí vody a zkusit, co vše voda díky němu unese (zda by unesla třeba i desetikorunu).

Klasická měření jednoduchými prostředky

Většina z nás asi někdy měřila povrchové napětí vody ve fyzikálních praktikách odtrhací metodou (popsanou např. v [2]). Dá se při tom obejít bez torzních vah a dalšího laboratorního vybavení? Řešitelé projektu na letním MF soustředění si k tomu postavili vlastní vážky a při odtrhávání drátěného rámečku nebo kovového kroužku jim pro hodnotu povrchového napětí vycházely hodnoty lišící se od tabulkových o méně než deset procent.

Podobně lze jednoduše měřit povrchové napětí kapkovou metodou. Ideální pomůckou pro to je malá plastiková injekční stříkačka.

Z jak široké hadice ještě nevyteče voda a další zajímavé otázky

Zkoumání povrchového napětí s sebou nese i další zajímavé teoretické i praktické otázky. Blíže je někdy popíšeme v samostatném příspěvku. Za všechny snad jen jednu:

Mějme svislou nahoře ucpanou trubici nebo hadici naplněnou vodou. (Příkladem je brčko, které nahoře ucpeme prstem.) Z tenké trubičky, například ze zmíněného brčka, voda dole nevyteče. V tlusté hadici se ale samozřejmě voda takto sama neudrží. Otázka je tedy jasná: v jak tlusté trubici se ještě udrží a nevyteče?

Dá se to zkoumat teoreticky nebo experimentálně. Musím přiznat, že mě překvapilo, když hrubý teoretický odhad naznačil, že voda by se mohla udržet i v trubici s vnitřním průměrem přes jeden centimetr. Následující pokusničení ukázalo, že vodu lze skutečně takto udržet i v půlcoulkové hadici! (Je to tak na hranici toho, co jsem dokázal, nevyšlo to zdaleka na každý pokus a chtělo to skutečně v okolí téměř ani nedýchat.) Pro pokusy je lepší hadici nedržet v ruce, ale dát ji do nějakého držáku a nahoře uzavřít zátkou. Výrazně snáze se experimentuje s plastickou injekční stříkačkou, již opatrně odřízneme část dna, aby vznikla díra požadovaného průměru.

A jak udržet na vodě desetikorunu? Tenké kovové sítko (nejlépe potřené mastnotou, aby voda drátky nesmácela) o rozměrech asi pět krát pět centimetrů ji uneslo docela snadno...

Závěrem: malé vybídnutí a pozvánka

Věřím, že na výše popsané aktivity a jejich výsledky se nebudete dívat jako na završené a dokonalé projekty či experimenty, ale vezmete je spíše jako inspiraci pro to, čím vším lze oživit činnost jak ve „standarních“ hodinách fyziky (od ZŠ až po VŠ), tak v různých volitelných seminářích a případně při mimoškolní práci s mládeží. Je zajímavé (ale vlastně asi přirozené), že při práci na takovýchto projektech je tomu podobně jako ve „velké“ fyzice (tedy „fyzice coby vědě“): každý výsledek, každá dokončená série pokusů či výpočtů s sebou přináší další otázky, další náměty co zkoumat, další zajímavé problémy. Takže: budete-li mít chuť, zkuste náměty z tohoto příspěvku využít – a až budete mít další výsledky, podněty a třeba i kritické připomínky, dejte mi vědět.

Zakončil bych **pozváním**. Snažím se na naše jarní hraštická soustředění *pro posluchače učitelství fyziky a spřízněné duše* dostat kromě posluchačů i učitele fyziky z praxe. Letos již pár jednotlivců přijelo – a myslím, že to bylo plus pro všechny zúčastněné. Pokud vám nevadí bydlet pár dnů v maličko „polních podmínkách“ (ale například jídlo bývá tradičně vynikající, ostatně na čerstvém vzduchu chutná) a máte chuť si trochu hrát s fyzikou a nejen s ní, jste zváni. Přijet by bylo možno i jen na víkend. Představu o našich soustředěních můžete získat z [1], zájem (i nezávazný) můžete projevit třeba mailem na adresu Leos.Dvorak@mff.cuni.cz. Budu se těšit na shledanou.

Literatura

[1] odkazy z webové adresy <http://kdf.mff.cuni.cz>

[2] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření. SPN, Praha 1967

Aktivity zmiňované v tomto příspěvku byly zčásti podpořeny grantem FRVŠ B2722/2003 „Rozvoj aktivizujících forem práce a kreativity ve vzdělávání učitelů fyziky“ a rozvojovým projektem MŠMT „Heuréka II“.