

## **Experimenty z Interaktivní fyzikální laboratoře - rotující soustavy**

*ZDENĚK ŠABATKA*

*Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova; Gymnázium Nový Porg, Praha*

Tento článek popisuje čtyři experimenty spadající do oblasti rotujících soustav, tedy do jednoho z témat, se kterými se mohli studenti ve školním roce 2013/2014 setkat v rámci návštěv Interaktivní fyzikální laboratoře (<http://kdf.mff.cuni.cz/ifl/>) na MFF UK v Praze. Současně je krátce popsán princip fungování samotné laboratoře.

### **Koncepce laboratoře**

Interaktivní fyzikální laboratoř (dále IFL) je zřizována MFF UK v Praze. Laboratoř je využívána i při výuce studentů učitelství fyziky na MFF. Primárně však je určena studentům středních škol. Ti zde mají možnost vyzkoušet si množství experimentů, které buď přímo souvisí s tématy probíranými na střední škole, nebo na ně navazujícími. Vše se odehrává formou praktických cvičení, při kterých studenti pracují v týmech. Pro jednu maximálně šestnáctičlennou skupinu studentů jsou v laboratoři vyhrazeny dvě hodiny čistého času. Připravena jsou vždy čtyři různá stanoviště, která spadají do jednoho tematického celku. U některých témat se jedná o experimenty složitější a časově náročnější. V takovém případě stráví tým maximálně čtyř studentů celou dobu na jednom stanovišti. V této situaci hrají důležitou roli závěrečné prezentace týmů. Studenti v nich mají za úkol pro ostatní shrnout, čemu se během času stráveného v laboratoři věnovali a jakých výsledků dosáhli. V IFL však nabízíme i jednodušší experimenty, resp. ne tak časově náročné. V takovém případě jsou aktivity sestaveny tak, aby tým prošel všechna stanoviště. I v této situaci však dbáme na závěrečné prezentace, které nyní hrají roli drobného závěrečného opakování. Studenti tak mají navíc možnost porovnat své výsledky s výsledky kolegů.

Další informace k fungování laboratoře, popis tematických celků, kontakty i postup pro přihlášení se studenty jsou k nalezení na webových stránkách IFL [1].

### **Experimenty v rotujících soustavách**

Tento článek se dále zabývá popisem jednoho z experimentálních celků, které v IFL nabízíme. Jedná se o pokusy, jichž společný jmenovatel je otáčivý/rotační pohyb. Jedná se o experimenty kratší a méně náročné. Studenti tedy mohou projít všemi experimenty.

#### **Dostředivá síla**

Pro téma dostředivá síla byly vybrány následující dva experimentální úkoly:

1. Ověřit závislost velikosti dostředivé síly na periodě otáčení.

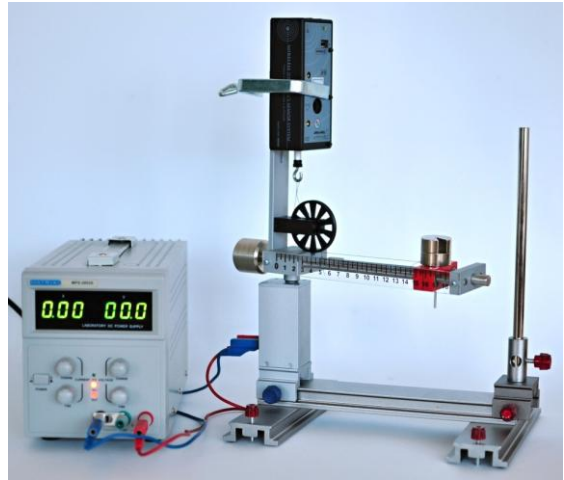
2. Pomocí rovnice pro dostředivou sílu určit hmotnost neznámého tělesa v rotující soustavě.

Toto téma je běžně na středních školách probíráno a studenti již znají rovnici

$$F_d = 4\pi^2 mr \cdot \frac{1}{T^2} \quad (1)$$

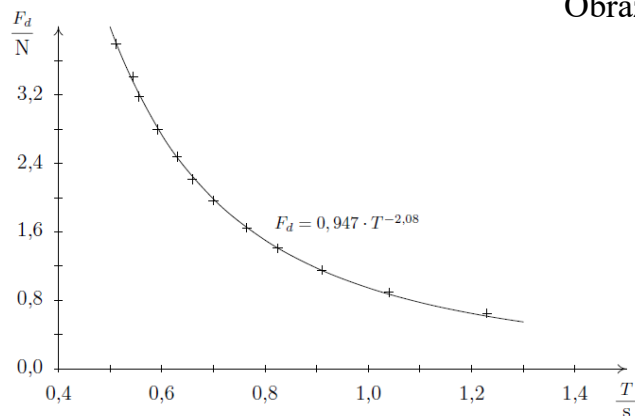
popisující závislost velikosti dostředivé síly  $F_d$  na hmotnosti tělesa  $m$ , poloměru otáčení tělesa  $r$  a periodě otáčení  $T$ .

K tomuto měření v IFL využíváme originální soupravu (obrázek 1) pro měření velikosti dostředivé síly firmy NTL, kterou tvoří otočné rameno poháněné elektromotorem. Na rameni je pohyblivý jezdec, který lze přes kladku s nízkým třením připojit k siloměru. Aparatura dále obsahuje dvě padesátigramová závaží, regulovatelný zdroj střídavého napětí, stopky a bezdrátový siloměr firmy Vernier, který je připojen k počítači. Studenti tak snadno zaznamenávají data ze siloměru a přidávají k nim údaje naměřené na stopkách.



Obrázek 1.

Výsledkem snažení studentů pak je získání závislosti, kterou ukazuje např. graf na obrázku 2. Jak je patrné, křivka proložená vyneseny body velice dobře odpovídá očekávané závislosti



Obrázek 2. Graf závislosti velikosti dostředivé síly na velikosti periody otáčení.

Rovnici, kterou studenti získají při proložení vnesených bodů, pak porovnají s rovnicí (1), kterou dává teorie. Se znalostí poloměru otáčení tělesa ( $r = 15,7$  cm) pak vypočítají hmotnost tělesa, na něž dostředivá síla působila.

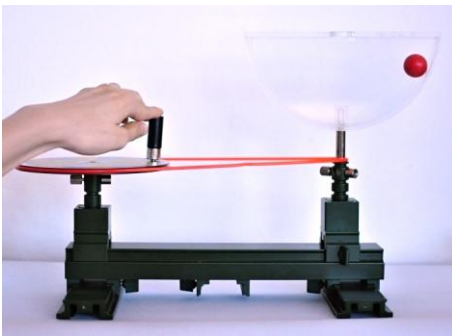
$$4\pi^2 mr \cdot T^{-2} \doteq 0,947 \cdot T^{-2,08}$$

$$m \doteq \frac{0,947}{4\pi^2 \cdot 0,157} \text{ kg} \doteq 153 \text{ g}$$

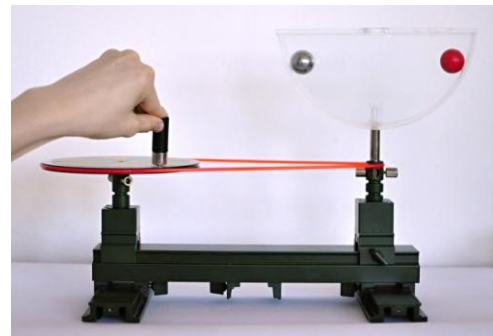
Tento údaj pak velice dobře odpovídá skutečné hodnotě, tedy 150 g.

### Kuličky v kyvetě

Druhé stanoviště, na které se studenti v rámci tématu rotační pohyb v IFL dostanou, nejprve cílí na jejich odhad a dovednost aplikovat poznatky získané ve škole na jednoduchou praktickou situaci. Do kyvety je nejprve vložena jedna kulička (plastová, červená). Studenti si vyzkouší, co se stane při roztočení kyvety (obrázek 3). Poté dožívají za úkol do stejné kyvety vložit kuličku (ocelová) a jsou dotázáni, v jaké výšce se při konstantní rychlosti otáčení kuličky ustálí – která bude výš? Tato otázka je pro studenty velmi obtížná a řešení většinou překvapující (obrázek 4).



Obrázek 3.



Obrázek 4.

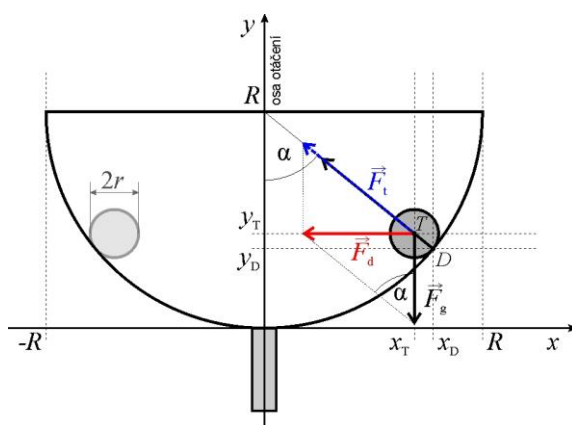
$$\tan \alpha = \frac{F_d}{F_g} = \frac{m\omega^2 x_T}{mg}$$

$$\tan \alpha = \frac{\omega^2 x_T}{g}$$

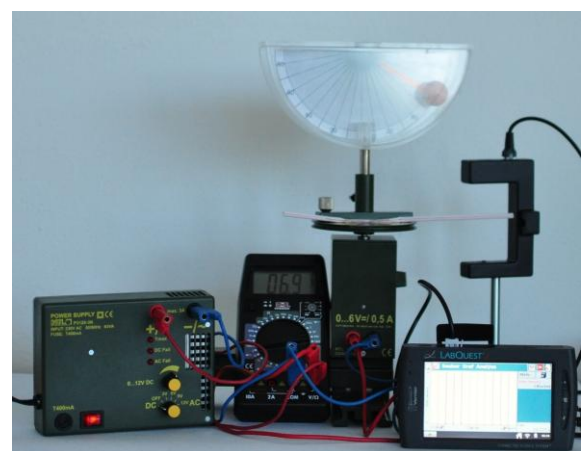
$$\tan \alpha = \frac{4\pi^2}{g} \cdot \frac{x_T}{T^2}$$

Pracovní list je dále provede teoretickým odvozením závěru, který pozorovali ve zmíněném experimentu, tedy že pozice kuličky uvnitř kyvety nezávisí na její hmotnosti (rovnice (2), obrázek 5).

Závěrečný experiment v této části je již kvantitativní a ověřuje studenty odvozenou závislost  $\alpha(T)$ . V této části studenti přebudují aparaturu (tak, aby kyveta již nebyla poháněna ručně, ale pomocí elektromotorku (obrázek 6). Studenti na jednu stranu kyvety nalepí úhloměr, na kterém vyznačí pozici (úhel), na které se má kulička ustálit.



Obrázek 5.

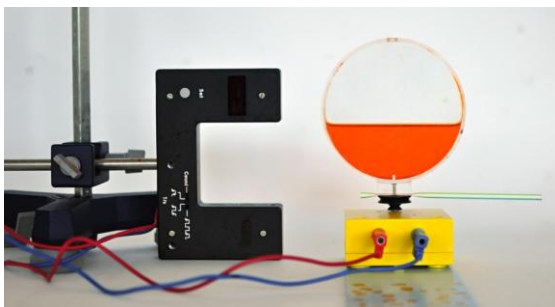


Obrázek 6.

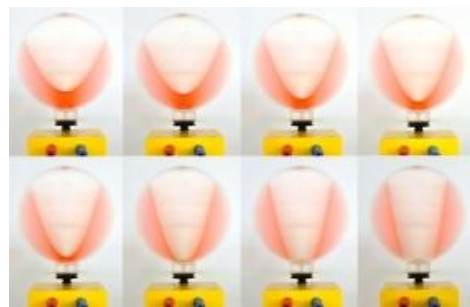
Poté zvyšují napětí přiložené na motorek, tím roste i frekvence otáčení a kulička stoupá. Po dosažení vyznačené pozice studenti změří pomocí optické závory připojené k dataloggeru délku periody otáčení. Toto měření vychází až překvapivě přesně. Při výpočtu úhlu z naměřené periody se relativní odchylky pohybují řádově okolo 1 – 2 %.

### Kapalina v rotující nádobě

Na dalším stanovišti studenti určují, jaký je tvar hladiny v rotující nádobě. Jeden ze způsobů možného určení jsem již společně s doc. L. Dvořákem popsal v článku [2]. Studenti pracují s aparaturou (obrázek 7), kterou tvoří kyveta připojená k elektromotorku, který je připojen ke zdroji regulovatelného napětí. Kyveta je naplněna vodou obarvenou potravinářskou barvou.



Obrázek 7.

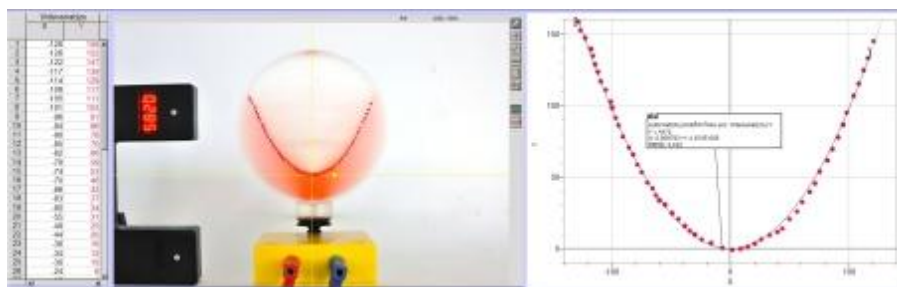


Obrázek 8.

Studenti jsou ještě před samotným experimentem požádáni, aby odhadli tvar hladiny. Většina se svým odhadem blíží správnému řešení, nicméně objevuje se i množství nesprávných tipů.

Studenti dále prozkoumají tvar hladiny a to nejprve kvalitativně. Zvyšují rychlost motorku a pozorují, jak se mění tvar hladiny. Tvary hladiny pro různé postupně se zvyšující rychlosti byly vyfotografovány a jsou zachyceny na obrázku 8.

Studenti poté vyberou jednu periodu otáčení. Hladinu vyfotografují s dlouhou expozicí (cca 5 s). Pracovní list pak studenty provede analýzou pořízeného obrázku zakřiveného tvaru hladiny. Analýza se děje pomocí programu Logger Pro. Studenti vyberou několik bodů na hladině, které jsou programem vyneseny do kartézské soustavy souřadnic a následně nechají program proložit skrze body křivku, jejíž předpis je dán mocninnou funkcí. Takovou situaci zachycuje obrázek 9.



Obrázek 9.

Další diskuzí závislosti na jiných možných veličinách se tak studenti s drobnou pomocí pracovního listu a lektorů dostávají k rovnici hladiny kapaliny v rotující nádobě

$$h = \frac{\omega^2}{2g} R,$$

kde  $h$  je výška daného bodu hladiny nad jejím nejnižším bodem,  $\omega$  je úhlová rychlost otáčení kapaliny a  $R$  je vzdálenost vybraného bodu hladiny od osy otáčení.

### Chování lodičky na rotující hladině

Hlavním cílem posledního stanoviště je ukázat, jak se chová malé tělíčko na zakřivené hladině rotující kapaliny. Studentům je tento problém předložen v souvislosti s básní od E. A. Poe Pád do Maelstromu, ve které hrdina řeší, jak se dostat z obrovského vodního víru a povšimne si, že některá tělesa jsou tažena vzhůru a jiná naopak klesají směrem dolů.

Studenti mají nejprve za úkol prozkoumat různé druhy víru – vodní vír vytvořený v lahvi (klasický experiment – viz např. [3]) a ohnivý vír (obrázek 10). Aparatura pro ohnivý vír sestává z otočného jídelního podnosu, na který je připevněn drátěný děrovaný koš, ve kterém je vložena kovová miska. Do misky se následně neleje technický líh a pomocí špejle zapálí. Po roztočení vzniká ohnivý vír. Pokud není miska s hořícím lihem vložena v koši, tak i přes její rotační pohyb vír nevzniká.



Obrázek 10. Oheň v nerotujícím koši. Oheň na rotující točně. Oheň na rotující točně v koši.

Jak již bylo zmíněno, v druhé části studenti zkoumají pohyb těles na rotující hladině a snaží se nalézt obecná pravidla, která tento pohyb ovlivňují – která tělesa stoupají vzhůru, která se naopak „propadají“ níže do vrcholu paraboloidu. Tento experiment jsem již blíže popsal v článcích [2] a [4].

### Literatura

- [1] <http://kdf.mff.cuni.cz/ifl> [citováno 27.8.2014]
- [2] Šabatka, Z.; Dvořák, L. Vodní paraboloid. In Dvořák L. (ed.) *Veletrh nápadů učitelů fyziky 12, sborník z konference*. Prometheus Praha 2007. s. 197-201. ISBN 978-80-7196-352-3. Dostupné z <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/12-20-Sabatka.html>. [citováno 27.8.2014]
- [3] Ondrušek, V. Pokusy s jednoduchými pomůckami. In *Veletrh nápadů učitelů fyziky 2, sborník z konference*. Plzeň 1997. Dostupné z <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/02-17-Ondrusek.html>. [citováno 27.8.2014]
- [4] Šabatka, Z., Dvořák, L. Simple verification of the parabolic shape of a rotating liquid and a boat on its surface 2010 *Physics Education* **45** 462-8.