

Bohuslav Mašek

Užití křemene při fyzikálních přístrojích

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 22 (1893), No. 5, 325--334

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/108838>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1893

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Užití křemene při fyzikálních přístrojích.

Referuje

Boh. Mašek,

asistent fys. ústavu české univ.

V posledních létech uveřejnil známý anglický časopis přírodovědecký „Nature“ řadu různých článků, které podávají velmi zajímavé zprávy o nadepsaném thematu, s nímž se již po dlouhou dobu prof. *C. Vernon Boys* v Londýně zabývá. Chceme v následujících řádcích seznámiti čtenáře své s nejdůležitějšími výsledky dosavadními, které mezi fysiky vzbuzují pochopitelnou pozornost a veliký zájem.

1. Vlákna křemenová.

Fysika experimentální stanoví síly obyčejně methodou statickou, která záleží v tom, že k neznámé soustavě sil připojí se soustava známých sil tak upravených, aby nastala rovnováha. Toho docílí se na př. při vahách tím, že jedna miska zatíží se hmotou, kterou určujeme, druhá miska hmotami známými — závažím; při studiu hydromechanických a aeromechanických otázek známá soustava sil dána bývá tlakem sloupce kapaliny na př. rtuti atd. Konečně možný jest ještě ten způsob, že místo dvou výsledných sil jednoduchých užije se dvou dvojic sil momentu stejného, ale protivně označeného; na této myšlence spočívají všechny stroje, kdy jedná se o to, stanoviti síly velmi nepatrné, které methodami jinými sotva by bylo lze měřiti. Zde možno vytknouti dvě přední modifikace této metody; buď srovnávají se dvojice téhož druhu, aneb dvojice různorodé, z nichž v tomto případě jedna bývá dvojice sil torsních.

Případ první — srovnávání dvou dvojic stejnorodých — vyskytuje se nejčastěji a shledáváme jej skoro při všech měřicích strojích magnetických a elektrických, u magnetometrů, galvanometrů, elektrometrů, dynamometrů atd. Poměr obou momentů udává se z pravidla — aspoň v první aproximaci — funkcí úhlu, o který zrcátko s přístrojem pohyblivým spojené se otočí ze své původní rovnovážné „nulové“ polohy. Ježto

však pohyblivá část přístroje jest zavěšena na vlákne, které samo dává při otočení vznik dvojici sil torsních, jest při přesných pracích třeba k této dvojici míti zření, což stává se zavedením korekční veličiny θ , zvané koeficient torsní, která udává poměr mezi torsní dvojicí vlákna a momentem dvojice známé. Moment torsní, jak pochopitelně, nesmí přesahovati jisté meze, aby nepřestal míti ráz veličiny malé druhého řádu vůči dvojicím, které srovnáváme; z toho důvodu volí se závěsné vlákno velmi jemné a dlouhé, takže koeficient torsní θ nabývá sotva několik málo setin procenta momentu dvojic hlavních.

Druhý případ, kdy neznámou dvojici přímo měříme dvojicí sil torsních, není tak častý jako dřívější, ale proto přece velice důležitý, poněvadž jím dána jest jediné možnost určovati síly velmi nepatrné. Kdežto methodami o princip vážení se opti-

rajícími lze nanejvýše ještě $\frac{1}{100}$ dyny měřiti, možno torsní me-

thodou stanoviti síly, které jsou mnohem menší než 0.00001 dyny. Přesnost metody této záleží na četných okolnostech, o nichž třeba stručně se zmíniti. Jedná-li se o síly velmi nepatrné, musí moment torsních sil býti rovněž velmi malý, což stane se tehdy, je-li vlákno, jehož užíváme, co možno dlouhé a tenké, neboť dvojice torsních sil souvisí nepřímě s délkou (l) vlákna a přímo se čtvrtou mocninou jeho poloměru r , takže lze moment dvojice torsní při otočení dolejšího konce o 1 radian to jest úhel $= \frac{360^\circ}{2\pi}$ (t. zv. moment direkční) vyjádřiti

výrazem $D = \frac{\pi}{2} \cdot n \cdot \frac{r^4}{l}$, kdež n sluje *koeficientem rigidity* na

rozdíl od jiných koeficientů v nauce o pružnosti.

Jest tedy na př. pro vlákno 10krátě tenší moment sil torsních 10.000krát menší a tím ve stejném poměru i přístroj citlivější. Mimo to nesmí jeviti vlákno, má-li býti vůbec vhodným pro přesná měření, t. zv. dopružování, t. j. musí vždy do téže polohy se vrátiti, ve které před působením sil vnějších se nalezalo; konečně nesmí býti moment torsní dvojice nepravidelně proměnný s teplotou, vlivy atmosferickými atd. Všem těmto požadavkům vyhověti bylo a jest snahou experimentatorů, kteří měli příležitost metody torsní užívati. V materialu, jenž by dal

se spracovati v jemné vlákno válcovité, nebyl nesnadným výběr. Nejprve užívalo se tenounkých drátů kovových; jest známo na př., že Wollaston ovinul drát platinový vrstvou stříbra, a pak tento drát stříbrný vytáhl ve drátek nad míru jemný, jenž choval v sobě vlákno platinové 0·018 mm v průměru; když vrstva stříbrná v kyselině dusičné se rozpustila, zbylo pouze toto platinové vlákno. Obyčejnou cestou v novější době podařilo se vyrobiti vlákna měděná v průměru až 0·05 mm. Kov nelze, ač jest materiálem jinak velmi vhodným, přeci v tak jemný drátek vytáhnouti, jak by si bylo přáti. Proto zdálo se, že nejvýhodnější jsou vlákna skleněná, která lze snadno i ve tloušťce 0·03 mm zhotoviti ve značné délce při stále stejném průřezu. Ukázaly se však tak značné nepravidelnosti v torsí, že užívání vláken skleněných pro přesné přístroje brzy zaniklo. Nyní užívá se vesměs vláken kokonových ovšem částečně preparovaných, nebarvených. Kokonové vlákno přirozené skládá se ze dvou vláken k sobě po délce slepených, z nichž každé má průměr asi 0·01 mm, tedy ještě menší než v obou dřívějších případech. Mimo to vlákna tato jeví značnou únosnost; udává se 2000 až 5000 $\frac{\text{megadyn}}{\text{cm}^2}$; rovněž koeficient rigidity (n) jejich jeví se v míře dostatečné stálým. Jedna nevýhoda zbývá přeci však, totiž závislost torse na vlivech atmosferických, hlavně na teplotuře a vlhkosti, což z organického původu a struktury vlákna snadno jest pochopitelno. Vláken kokonových buď jednoduchých aneb složených užívá se nyní obecně jako závěsu při zmíněných strojích založených na srovnávání dvou stejnorodých dvojic, kdež ovšem se výborně osvědčují, ježto koeficient torsní Θ jest při nich skutečně velmi malý, aniž snad malé nepravidelnosti uvedené rozhodují. Tam však, kde torsí samou mají se měřiti síly velmi nepatrné, vláken kokonových nelze naprosto užiti.

Jest znamením velikého pokroku v tomto směru měření fysikálního, že podařilo se zhotoviti vlákna v těch rozměrech a takových vlastností, že podmínkám žádaným nejen plnou měrou vyhovují, ale i nade vše očekávání způsobem překvapujícím je překonávají. Materiál k účelům těmto vhodný našel prof. C. Vernon Boys v Londýně; jest to křemen krystalový (křišťál). Způsobem velmi snadným, jak dále bude také uči-

něna zmínka, lze zjednati si vlákno o průměru 0·005 *mm*; obyčejně užíval B. vláken tenších v průměru 0·0025 *mm*, z nichž teprve sto dohromady činilo by jediný jednoduchý kokon. Tato vlákna lze již jen mikroskopem poznati; avšak ani tím není mez v jemnosti uzavřena, neboť možno zjednati si vlákna desetkrát i stokrát tenší, tedy tloušťky 0·0003—0·00003 *mm*; tyto rozměry jsou již téhož řádu jako délky vln světelných. Vlákna taková nelze ovšem ani nejlepším mikroskopem poznati, o existenci jejich svědčí jen překrásné ohybové úkazy kolem nich v prostoru vytvořené, které připomínají podobné známé úkazy při nejjemnějších pavučinách jistého malého zahradního pavouka. Úkazů těchto lze s prospěchem užiti při měření a posouzení stejnosti průměru. O neobyčejné jemnosti těchto vláken svědčí tato čísla: Válec křemenový o výšce i průměru 1 angl. palce (= 2·54 *cm*) dá se vytáhnouti ve vlákno tak dlouhé, že by celá zeměkoule na rovníku dala se 658krát obtočiti, což odpovídá celkem délce 2·64 millionů *km*.

Vlákna křemenová mají všechny vlastnosti, které má mít dobré vlákno. Nejen že moment torsní jejich — *ceteris paribus* — jest menší než u vláken kokonových, takže stejnou silou se vlákno křemenové více skroutí než vlákno jiné, ale jeví i nad to podivuhodnou stejnoměrnost průměru. Mimo to pružnost vláken těchto jest úplně nezávislá na vlivech atmosférických.

Bližším studiem vlastnosti — hlavně pružnosti — těchto vláken zabýval se mimo Boyse prof. Richard Threlfall.*)

Vlákno křemenové 10—20 *cm* dlouhé v průměru 0·015 *mm* unese asi 10 *g*; čím vlákno jest jemnější, tím více možno je poměrně zatížit, což souvisí asi se způsobem jeho chlazení. Únosnost vláken udává se na na 8000—11.500 $\frac{\text{megadyn}}{\text{cm}^2}$, tedy jest mnohem větší než u hedvábí. U vláken velmi jemných pod průměrem 0·005 *mm* nezdá se jednoduchá nepřímá úměrnost s průřezem již platiti. Vlákno tenší má větší ještě únosnost, která též na délce vlákna záleží.

*) F. R. Threlfall, Sydney, The elastic Constants of Quartz Threads; Phil. Mag. XXX. 1890. p. 99.—116.

Koefficient rigidity, závislý ovšem poněkud na spracování a materiálu samém, byl nalezen mezi

$$n = 2.119 - 3.4205 \times 10^{11} \text{ cm-g-sec},$$

takže střední hodnota jest $2.882 \cdot 10^{11} \text{ cm-g-sec}$.

Z tohoto čísla lze určit moment direkční D pro dané rozměry vlákna. Pro vlákno $r = 0.0001 \text{ cm}$, délky 30 cm , nalezne se snadným výpočtem pro D hodnota přibližná

$$D = 0.000003 \left[\frac{g \cdot \text{cm}^2}{\text{sec}^2} \right]$$

t. j. k otočení tohoto vlákna o jeden radian jest třeba síly na obvodu působící rovné 0.03 dyny ; z toho učiniti si jest možno úsudek, jak malých sil jest potřebí, aby se vlákno otočilo o několik stupňů aneb minut. Temperaturní koefficient veličiny n činí 0.00013 t. j. při jednom stupni teploty se změní direkční síla D o něco více než o 0.01% ; temp. lineární koefficient α pak jest jen 0.0000017 , tedy veličina velmi malá vzhledem ke známým látkám jiným, na př. kovům atd.

Jak nepatrným jest u vláken křemenových dopružování, svědčí tato čísla: Vlákno 30 cm dl. poměrně velmi silné 0.102 mm v průměru, jeví nepravidelnost v pružnosti teprvé, když jeho dolejší konec byl 15krát do kola o 360° v tomže směru otočen a ponechán v této poloze $16\frac{2}{3}$ hodiny. Z podobných pokusů udal Threlfall pravidlo, že lze bez obavy dolejší konec vlákna stočiti na každý cm délky tolikrát, kolik činí výraz

$$\frac{0.01}{2r \text{ cm}} \cdot \frac{1}{3},$$

takže při vlákně již zmíněném dříve činí při 30 cm počet těchto možných otáček asi 500!

Jak z čísel právě uvedených vysvítá, dosáhl *Boys* užitím křemenových vláken dvojí výhody: jednak lze měřiti síly daleko menší než dosud a přístroje, které dříve vyžadovaly značných rozměrů, zvláště délky vlákna atd., mohly se nyní daleko zmenšiti, aniž tím citlivost se umenšila.

Výroba vláken takových jest celkem jednoduchá. Dvě křemenové tyčinky vloží se do plamene třaskavého plynu, v němž konce k sobě sblížené poněkud se roztaví, tak že zůstávají vazkými. Do roztavené hmoty vloží se stéblo slámy na konci jehlou zatížené, které jako šíp vystřelí se lukem a tím za sebou vytáhne vlákno značné délky a dle změny rychlosti i různé tloušťky. Vlákno takové vznáší se volně ve vzduchu a jest třeba zvláštních opatření — hlavně optických — aby poloha jeho byla nalezena, načež jako obyčejná nit se navine na vhodný předmět.

2. Opakování pokusů Cavendishových.

Dle zákona Newtonova přitahují se dvě sférické hmoty $m_1 m_2$ ve vzdálenosti těžišť r silou vyjádřenou vzorcem

$$f = \varepsilon \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Pokud volíme pro jednotku síly dynu, pro jednotku hmoty *gramm* a pro jednotku délky *cm*, má ε , jež sluje konstantou gravitační, hodnotu velmi malou, vyjádřenou numericky

$$\varepsilon = 66 \cdot 10^{-9}, \quad (L^3 M^{-1} T^{-2}),$$

jejíž fyzikální význam jest tento: dvě koule, každá o hmotě 1 *g* ve vzdálenosti středů rovné 1 *cm* se přitahují v prostoru vzduchoprázdném silou $66 \cdot 10^{-9}$ dyn, která odpovídá váze menší než $\frac{1}{10,000,000}$ *mg*. I když hmoty jsou velmi značné, síla tato proti tlaku tíží způsobenému, jest vždy nesmírně malá, takže přímý důkaz o existenci gravitačních sil podal teprve *Cavendish* (1798) použitím hmot velmi značných a uspořádání velmi pečlivě sestaveného. K vůli srovnání udáváme číselně rozměry apparatusu Cavendishova. Na obou koncích tyče — délky 183 *cm* — zavěšené na několik metrů dlouhém jemném drátě umístěny koule olovené v průměru 2 angl. palců t. j. 5.08 *cm*, vážící tedy asi 1.75 angl. libry, t. j. 800 *g*, měnila se úchylka jejich z rovnovážné polohy, když vhodným způsobem přiblížily se koule velké rovněž olovené, v průměru mající 1 stopu (= 30.48 *cm*) každá o hmotě 158 *kg*. Malý výpočet ukáže, že ve vzdálenosti

středů 30 cm činná přitažná síla sotva 0·01 dyny, která rovnovážnou polohu velmi nepatrně jen změnila.

Aby mohl i tak nepatrné síly měřiti, učinil dobu kyvu přístroje svého 5—15 minut! Pak totiž, jak ze známého vztahu, platícího pro fyzické kyvadlo

$$t = \pi \sqrt{\frac{K}{D}},$$

kdež D jest t. zv. dvojice direkční a K moment setrvačnosti, plyne, jest veličina D tím menší, čím větší jest doba t .

Další opravy na tomto zařízení, ale v celku na podstatě nic neměníci zavedli *Reich* (1837), *Baily* (1842), a nejnověji *Cornu* a *Baille*, kteří sice rozměry vesměs o $\frac{1}{4}$ zmenšili, přes to však přístroj celý byl ještě velmi nepohodlný, a což hlavní závadou, velmi závislý na vyrovnání teploty, takže nebylo lze úplného klidu indexu pro stálé vzdušné proudy docílit.

Proti těmto velmi nákladným a nanejvýš nepohodlným strojům stojí nový přístroj *Boysův*, který není o nic větší než obyčejné galvanometry zrcadlové.

Nemohouce podrobný popis podati bez výkresu, připomínáme pouze, že s volným koncem vlákna křemenového 1 stopu angl. (= 30·48 cm) dlouhého jest ve spojení lehounká rourka vertikální skleněná, která nese ve vzdálenosti 50·8 mm nad sebou na zvláštních bronzových držadlech vodorovných, 6·5 cm od tyčinky skleněné vzdálených, hmoty odpovídající ve dřívějších pokusech malým koulím, ve tvaru olověných válečků o polo-měru 3 mm a výšce 11·3 mm. Jest tedy délka vahadla v tomto případě jen 13 mm proti dřívějším 185 cm. Na tyčince skleněné přilepeno velmi dobré zrcadlo, kterým na skálu se světelné paprsky odrážejí, takže buď subjektivně dalekohledem aneb objektivně na skále lze úchytku zrcadla měřiti.

Hmoty pevné, odpovídající velikým koulím Cavendishovým, zastupují zde rovnostranné válce o výšce 5·08 cm nad sebou po obou stranách vlákna umístěné, které naplňují se rtutí, hmoty 800 g čili právě tolik, co vážily malé koule u Cavendishova přístroje. Vlákno křemenové, ač má tloušťku jen 0·0025 mm

snese přece celý velmi jemně pracovaný pohyblivý přístroj, jenž váží asi 6 g.

Doba jedné oscillace při tomto uspořádání jest 160 sekund, tedy pro demonstrování velmi pohodlná. O účinku tohoto přístroje svědčí čísla, která *B.* udává. Kdyby Cavendishův přístroj měl jevití stejnou úchytku, pak by bylo třeba koulí olověných o průměru 7 metrů! Přenosný tento přístroj, příslušně chráněný před zevnějšími náhlými vlivy, na př. proudy vzdušnými, nikterak není závislým na malých změnách teplotních, takže ani přítomnost pozorovatelova a posluchačstva, ani volné oteplování vzduchu projekční lampou na pohybech zrcadla se nejeví.

Pokusy, které dosud *B.* provedl, ukazují, že i na stroji zmíněných rozměrů, který není nejzazší mezi v citlivosti, lze s jistotou měřiti síly $\frac{1}{200.000}$ dyny a vynálezce soudí, že není jen myšlenkou illusorní chtítí ukázati přitažnou sílu mezi dvěma broky č. 5 aneb dokonce mezi dvěma broky ptačími. Měření dosavadní vesměs byla relativná, a měla ukázati jen stupeň citlivosti přístroje. Pro absolutní určení síly přitažlivé mezi dvěma koulemi, sestrojil *B.* přístroj rozměrů o málo různých, kde vahadlo má délku 1·2 cm a perioda jednoho kyvu 5 minut.

3. Již z výsledků právě popsanych lze poznati značný pokrok při měření malých sil. Budiž učiněna ještě zmínka o některých jiných přístrojích, které jemnost a velké přednosti vláken křemenových způsobem rovněž tak překvapujícím ukazují.

Na schůzi British Association v Leedsu (Nat. 42 p. 602) demonstroval *B.* nový přístroj — radiomikrometr — jenž má měřiti intensitu záření tepelného. *Melloni* byl první, jenž thermoelektrickým sloupem a astatickým galvanometrem *Nobiliho* provedl známé své pokusy o zákonech tepelného zařízení, které, ač nyní daleko co do jemnosti předstiženy jsou bolometrickou metodou Langleyovou, svého času vzbudily značný vzruch ve světě vědeckém. *Boysův* přístroj, jenž vyrovná se úplně bolometru, zařízení je na principu thermoelektrickém. Podstatnou jeho částí jest kruh vodivý, složený ze tří různých kovů navzájem spájených a zavěšených na vlákně křemenové v poli magnetu ocelového podkovovitého analogicky jako u galvano-

metru Deprez-d'Arsonvalova. Zahřeje-li se jedno z míst spájených, jde kruhem proud thermoelektrický, jenž dle známých zákonů se orientuje v magnetickém poli. Velikost úchyly, jež se na skále pozoruje, závisí na intenzitě dopadajícího záření; k tomu nutno jest připomenouti, že stroj zařízen jest tak, aby diffusní teplo okolních předmětů atd. nemělo účinku na stroj. O jemnosti tohoto přístroje svědčí pokus se svíčkou, která ve vzdálenosti 25 m proti citlivému místu postavená, úchytku zrcadla přes 90° způsobí, ba i ze vzdálenosti 240 m. mohl se zcela patrně vliv svíčky konstatovati.

Z těchto ukázek některých přístrojů lze poznati výhody vláken křemenových pro jemné stroje fysikální, jichž řada ovšem není tímto ukončena. *Boys* sám sestrojil ještě jiné podobné přístroje, na př. elektrometr, jakož i jiný přístroj nad míru jemný, jenž reaguje na vlny zvukové; u všech však při značně redukováných rozměrech citlivost nepoměrně se zvýšila.

Od té doby, co první pokusy B. konal o tomto předmětu, rozšířilo se všeobecně užívání vláken křemenových a při nejnovějších strojích (na př. astat. galvanometru du Bois-Rubens-ově cf. Wied. Ann. 1893. 2.) vytlačuje křemenové vlákno vlákno kokonové.

Cena vláken křemenových není příliš značná, 1 m prodává se za 1 M.*)

4. Při elektrostatických pracích, zvláště při elektroskopech a elektrometrech činí značnou obtíž izolace některých částí. Sklo atd. stačí sice pro hrubší účely, ale některé druhy jeho se naprosto nehodí, jsouce i v atmosféře dosti suché na povrchu vodivými.**)

Boys shledal, že křemen jest izolátorem mnohem dokonalejším než všechny druhy skla. Na konec tyčinky křemenové

*) F. Keiser a Schmidt v Berlíně.

***) Souvisí tato známá vlastnost s tím, zdali tyč skleněná, ponořená do vody, se úplně smočí aneb částečně, chovajíc se jako předmět tukem a t. p. natřený. V posledním případě jest sklo dobrým materiálem k izolaci i k elektrisaci, a jest možno takovou tyč skleněnou, ponořenou do vody, jen zhruba osušiti šatem, aby opět a to velmi silně se elektrovala. Podobně chová se někdy i ebonit.

zavěsil dvě pozlátka a pověsil do skleněné vhodné nádoby a rovněž tak sestrojil druhý jednoduchý elektroskop s tyčinkou skleněnou.

Ukázalo se, že elektroskop s křemenovou izolací ani tehdy náboje svého neztrácel, když nalézal se v atmosféře úplně prosycené vodními parami, kdežto elektroskop druhý v tomto případě v několika vteřinách úplně svůj náboj ztratil. Tato vlastnost, že podržuje křemen velmi houževnatě stav elektrický, jest příčinou, proč nyní neuzívá se křemene při hotovení závaží jemných, ač by to byl material nad jiné vhodný.

5. Ke konci poukázati dlužno ještě k jedné vlastnosti křemenu. *Boysovi* podařilo se zpracovati tento material i pro chemické potřeby ve tvar rour, malých nádob a t. d., které mají všechny význačné vlastnosti nádob skleněných, tak že je lze stejným způsobem spracovati. Předností jejich však jest, jak aspoň udává *B.*, že nepůsobí na stěny jejich rušivě ani nejmocnější sloučeniny chemické a že snesou temperaturu tak značnou, při níž i platina počíná se tavit, aniž by snad při tom svůj tvar měnily. Mimo to vyloučena jest zde téměř možnost, aby při náhlém zahřátí nebo ochlazení takové nádoby praskly.

Řešení úloh.

Úloha 23.

Sestrojiti rovnoramenný trojúhelník, dán-li poloměr r kružnice opsané i poloměr ρ kružnice vepsané. Který z těchto trojúhelníků má při daném r největší ρ , který při daném ρ nejmenší r ?

Řešení. (Zaslal p. *Jos. Hdjíček*, učitel v Grygově u Olomouce.)

Buď ABC žádaný trojúhelník, $CD = v$ výška jeho. Je-li O střed kružnice opsané, S střed kružnice vepsané, jest

$$OA = OB = OC = r,$$