

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky

Alois Zátopek

Dva nezávislé důkazy rotace zemské při pokusu s Foucaultovým kyvadlem

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 61 (1932), No. 3, R44--R49

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/124115>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1932

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>

lepší se číslo Hipparchovo, jež se končilo 80, na 64. Má arci vyjít 61. Toho však nedosáhneme pro zanedbání nutných korektur, jež taková jemnost vyžaduje.

Podobná kontrola je možná pro synodický oběh Luny. Podle Hipparcha čítá 126007 dnů 1^a dohromady 4267 lunací. Na jednu případně tedy

$$126007 \cdot 04 : 4267 = 29 \cdot 530593.$$

Dělicí náš interval lunací Hipparchovou, získáme přibližné číslo

$$812437 \cdot 030 : 29 \cdot 530593 = 27511 \cdot 707.$$

Toto nebude celistvé, protože Timocharis pozoroval po úplňku, my před prvou čtvrtí. Timocharisův fázový úhel byl 186.3°, náš je 83.7°. Chybí nám tedy k návratu do fáse Timocharisovy ještě 102.6°, čili

$$102 \cdot 6^\circ : 360 = 0 \cdot 285\text{-tý}.$$

díl lunace. Přičteme-li jej ke zlomku 0.707, dostaneme 0.992, čímž jsme se celistvosti na 1% přiblížili. Hipparchova hodnota lunace je právě již velmi dobrá. Valouch, 131, čís. 6 udává 29.530588.

Nevyplatí se takové pozorování bohatě se stanoviska pedagogického? — Konstanta precese a čísla Lunární na 7 decimálek, prostředky tak jednoduchými, že jsou na každé vesnici přístupny.

Dva nezávislé důkazy rotace zemské při pokusu s Foucaultovým kyvadlem.

A. Zátopek.

V letošním ročníku německého časopisu „Naturwissenschaften“ je článek, kde se popisuje zajímavý zjev při pokusu se známým kyvadlem, jímž r. 1851 ukázal Foucault rotaci zemskou.

Pokus se zakládá na faktu, že volné kyvadlo zachovává směr svých kyvů v absolutním Newtonově prostoru, jež si můžeme představit definován třemi osami navzájem kolmými, které jsou v klidu vůči stálícím. Budeme-li tedy pracovat s takovým volným kyvadlem na otáčející se Zemi, můžeme očekávat, že rovina kyvu našeho kyvadla se jistým způsobem změní.

Všimněme si blíže pokusu. Země jest koule, jež se kolem své osy rovnoměrně otáčí tak, že za 24 hodiny vykoná právě jedno otočení. Tak se jeví pohyb naší Země pozorovateli, který je vzhledem k Newtonovu absolutnímu prostoru, t. j. k stálícím, v klidu, při čemž neuvažujeme oběh Země kolem Slunce. Tento pohyb ve

skutečnosti eliptický trvá poměrně velmi dlouho k době, jež je věnována našemu pokusu. Můžeme tedy říci, že to jest pohyb v době pokusu přímočarý. Můžeme také říci, že je rovnoměrný, jednak vzhledem ke krátkému trvání pokusu, jednak vzhledem k tomu, že dráha naší planety jest elipsa málo od kruhu rozdílná, takže Keplerův zákon ploch jest velmi přibližně splněn i za našich předpokladů. Avšak víme, že pohyb rovnoměrný a přímočarý nemá vlivu na průběh mechanických dějů.

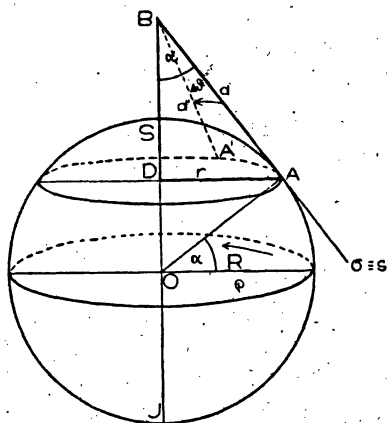
Pohyb Země kolem Slunce nebude tedy působiti při našem pokusu pozorovatelných změn. Skutečně přes to, že bylo vykonáno mnoho pokusů, a to velmi přesných, nepodařilo se nikdy mechanicky dokázati oběh Země kolem Slunce. Všechny mechanické děje probíhaly tak, jako by Země kol Slunce neobíhala.

Tedy postupný pohyb naší zeměkoule vůbec uvažovati nemusíme.

Mysleme si tedy Zemi jako kouli, jež se sice otáčí, ale zůstává v absolutním prostoru na svém místě. Mysleme si, že na určitém místě konáme pokus s kyvadlem volným. Budiž to třeba v místě A . (Obr. 1.) Kyvadlo kýve v rovině vodorovné, která je v průřezu označena σ , a necht' kývá směrem severojižním v přímce s . Tento pevný směr snaží se kyvadlo zachovati v absolutním prostoru. Rotační osu zemskou označme koncovými body SJ , kolmo na ni jeví se v průřezu rovina rovníková ρ . Zeměpisná šířka místa A budiž dána úhlem α . Počítejme, o jaký úhel se odchýlí přímka s od svého směru nynějšího za 24 hodin. Značí-li r vzdálenost bodu A od osy SJ , pak jest $l = 2\pi r$ délka rovnoběžky příslušné bodu A . Přímka s protne osu SJ v bodě B , body ADB vytvoří pravoúhlý trojúhelník, který má při vrcholu B úhel α a z toho plyne, označíme-li délku AB písmenem d , že $d = r \cdot \sin \alpha$. Hledaný úhel si označme ϑ a dostaneme jej ze vzorce

$$\vartheta = \frac{2\pi r}{r} \sin \alpha = 2\pi \sin \alpha.$$

Jak vznikne úhel ϑ při otáčení, jest viděti na obrázku, kde jest zakreslen úhel $\Delta\theta$.



Obr. 1.

Vznik úhlu ϑ . Označena část úhlu $\Delta\theta$. Směr rotace zemské ukazuje šipka.

Připomínám, že zde měříme úhly v tak zvané míře obloukové, t. j. poměrem oblouku k příslušnému poloměru. Úhlu 360° odpovídá v míře obloukové úhel 2π . Částem plného úhlu odpovídají úměrné části 2π .

Všimněme si úhlu ϑ . Největší jest, když $\sin \alpha = 1$, nejmenší jest pro $\sin \alpha = 0$. Prvý případ nastává na pólu, druhý na rovníku.

Kdybychom tedy experimentovali na pólu, uchýlí se přímka s , a tedy také rovina kyvu kyvadla volného, o plných 360° čili 2π za 24 hodin. Na rovníku by kyvadlo kývalo neustále v téže rovině, žádné úchytky roviny kyvu bychom nepozorovali. Mezi rovníkem a pólem musí se objeviti změna ve směru kyvu, ležící mezi 0° a 360° za 24 hodiny, tedy mezi 0° a 15° za hodinu. U nás by činila ona úchytky (na 50° sev. šířky) asi $11^\circ 29\frac{1}{2}'$.

Musíme si ještě stanoviti smysl, v němž úchytky přibývá, čili smysl úhlu ϑ .

Země se otáčí od západu na východ, t. j. proti směru ručiček hodinových. Pevná rovina kyvu musí zdánlivě postupovati opačně, tedy ve směru ručiček hodinových. Je patrné, že se tato úvaha vztahuje na severní polokouli. Pozorovatel na jižní polokouli by viděl smysl opačný.

Foucault provedl skutečně pokus, jehož princip byl právě nastíněn, v Panthéonu pařížském a tím podal klasický experimentální důkaz, že se země otáčí. Pokus byl mnohokrát na různých místech opakován a různým způsobem zdokonalován.

Zdokonaleno bylo nejen samotné kyvadlo, kde původně hrot na kouli zapisoval kyvy kyvadla v jemném popelu nebo mramorovém prášku, ale zvláště závěs kyvadla, na němž při pokusu velmi mnoho záleží. Dnes se děje registrace kyvů cestou fotografickou. V tomto směru vykonal velikou práci Pigot a jeho fotografie vzbudily živý zájem mezi fysiky a byly podrobně studovány. Pigot pracoval na Riverview College v Sidneji, tedy na jižní polokouli. Proto se jeví na jeho fotografiích úchytky roviny kyvu ve směru opačném, než je tomu u nás. A na těchto fotografiích se dá zcela dobře sledovati úkaz, o němž se nyní chci zmíniti.

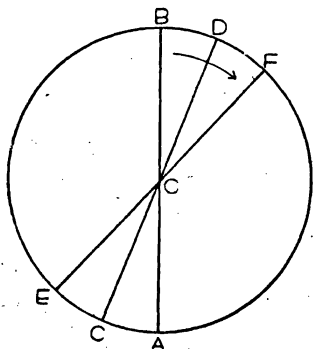
Na fotografiích je viděti zřetelně, že jen několik prvních kyvů se děje v rovině. Potom však přecházejí původní rovinné kyvy v kyvy oválné, které se víc a více podobají kružnicím, v něž ovšem nepřejdou, neboť třením v závěsu a odporem vzduchu se rozkyvy zmenšují, kyvadlo se tlumí. Důležité je, že po jisté době není možno stanoviti směr kyvů, poněvadž původní přímka, v níž se pohyb dál na počátku pokusu, přešla zatím v oválnou křivku. Je na snadě otázka, jak vznikne oválný pohyb místo očekávaného stálého pohybu v téže přímce. Odpověď na tuto otázku ukáže nám, že tento zjev je druhým důkazem rotace zemské, a to na prvním původním Foucaultově důkazu naprosto nezávislým.

Pozorování odchylky roviny kyvu i vzniku oválného pohybu při pokusech s volným kyvadlem jsou starého data.

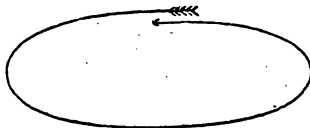
Již 200 let před Foucaultem konal ve Florencii pokusy s volným kyvadlem Viviani, chtěje pokusně ověřiti Galileim nedávno objevené zákony kyvadla. Napsal o tom zprávu, jež záležela ve třech poznámkách:

a) Bylo pozorováno, že unifilárně zavěšené kyvadlo **kývající** uchyluje se od pevné vertikální roviny, a to vždy v téměř směru.

Viviani nakreslil také obrázek, kde naznačil směr odchylky od (zdánlivě) pevné vertikální roviny. (Obr. 2.) Z něho je viděti, že odchylka se děje směrem, jímž se otáčejí ručičky u hodiněk, tedy směrem BDF na obr. 2. To však není nic jiného než klasický Foucaultův pokus, jehož podstata ovšem Vivianimu nebyla známa.



Obr. 2.
Zdánlivá úchylka roviny kyvu.
Úchylky přibývá směrem šipky.



Obr. 3.
„Spirale ovata“.

b) Volné kyvadlo nejen že se vychyluje z pevné roviny, nýbrž jeho dráha přestane probíhati ve vertikální rovině vůbec a stane se jakousi spirálou, již nazývá Viviani „spirale ovata“. Není možno po jisté době rozeznávati směr kyvů a „spirale ovata“ se blíží tím více kružnici, čím více se kyvy kyvadla tlumí.

c) Třetí poznámka týká se podrobnějšího popisu spirály: Viviani praví, že spirála kreslená hrotem kyvadla v mramorovém prášku se stává stále oblejší a zúžuje se koľ středu.

Viviani sice nezanechal nákresu spirály, ale popsal ji tak dobře, že si můžeme podle jeho popisu snadno zhotoviti nákres. (Obr. 3.)

Udal také, že smysl obíhání spirály jest opačný směr, ve kterém přibývá úchylky kyvů od pevného směru. Spirála Vivianiho obíhána tedy proti smyslu ručiček hodinových, t. j. doleva, zatím co rovina kyvu uchyluje se doprava. O nějakých výjimkách se

nezmiňuje. Z toho je možno souditi, že Viviani zjev pozoroval pravidelně. Považoval ovšem úkaz za anomálii působenou závěsem kyvadla, a poněvadž mu šlo o rovinné kyvy, zavedl závěs bifilární, kterým byly skutečně stále rovinné kyvy zaručeny, a Viviani se dále o úkaz nestaral. Později se na jeho pokusy zapomnělo.

Vznik spirálních kyvů byl později, když byl opakován Foucaultův pokus, sice konstantován, ale vysvětlován stále nedokonalostí závěsu a pokus sám byl obyčejně přerušen, když spirální kyvy se staly patrnými.

Poncelet byl asi první, který poukázal na to, že tento zdánlivě anomální zjev je důležitým důsledkem rotace zemské, a že může sloužiti jako důkaz na původním Foucaultově pokuse naprosto nezávislý.

Také spisovatel shora uvedeného článku v „Naturwissenschaften“ J. G. Hagen, pozoroval spirální kyvy volného kyvadla již r. 1886 a snažil se o jejich vysvětlení.

Je škoda, že Pigot nezhotovil fotografický obraz Vivianioho spirály. Byl by to vděčný předmět pro bližší studium spirálních kyvů a také by snad mohl přinésti některé nové poznatky o pohybu naší Země.

Pokusím se vysvětliti tento na pohled zvláštní pohyb.

Ve svých úvahách považujeme za kyvadlo hmotný bod, zavěšený na nehmotné, neproduzitelné a absolutně neohebné niti. Uvedeme-li takové kyvadlo do pohybu tak, aby vykonávalo rovinné kyvy, bude zachovávatí směr kyvů v absolutním Newtonově prostoru.

Pozorovateli na naší zeměkouli se bude zdáti, že směr kyvů se mění způsobem, jak jej ukazuje klasický Foucaultův pokus.

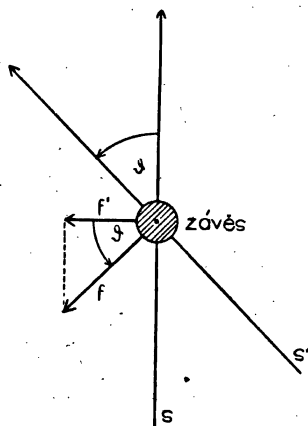
Avšak naše kyvadla nejsou taková kyvadla matematická; vždyť na př. Foucaultův „hmotný bod“ byla těžká kovová koule opatřená hrotem a „nehmotná nit“ byl hmotný ocelový drát. Závěs také není upraven tak dokonale, aby kyvadlo bylo naprosto vybaveno z vlivu vlastního pohybu Země.

Závěs kyvadla tedy souvisí vždy s otáčející se Zemí. Není tedy v klidu, ani v rovnoměrném a přímočarém pohybu vůči stálícím. Země působí na závěs kyvadla a prostřednictvím hmotně realizovaného „vlákna“ i na vlastní kývající těleso, jež je realizací hypotetického hmotného bodu.

Celkem vidíme: Naše skutečná kyvadla nejsou systémy na rotaci zemské nezávislé, nýbrž působení rotací zemské musí se na nich jistým způsobem projevit. A shora popsany spirální pohyb jest právě projevem rotace zemské.

Závěs kyvadla otáčí se se Zemí proti směru ručiček hodinových. (Obr. 4.) Tím vzniká síla f působící na „vlákno“, která má směr rotace zemské a tudíž složku f kolmou k pevnému směru kyvu.

Tato složka působí, že kyvadlo konající původně kyvy v přímce, počne kývati tak, že opisuje Vivianiho spirálu. Postupem času se rozkyvy zmenšují, jak již byla učiněna zmínka, a počne se víc a více uplatňovati ona kolmá složka, kterou závěs na kyvadlo působí. Klesl-li rozkyv na polovinu původní hodnoty, dá se již „spirála ovata“ krásně pozorovati a postupem pokusu se stále více rozšiřuje, až konečně nelze vůbec mluvit o kyvech, neboť konec kyvadla opisuje křivku velmi blízkou kružnici, ač ne uzavřenou. Spirála jest obíhána ve směru rotace zemské, neboť zmíněná kolmá složka je namířena ve směru otáčení zeměkoule.



Obr. 4. Znázornění síly působící vznik spirálních kyvů (s směr v prostoru stálý, s' přímka se Zemí se stáčeující, f síla ve směru rotace zemské působící na kyvadlo, f' kolmá její složka k pevnému směru s).

Je tedy vznik „spirály ovaty“ přímým důsledkem působení rotace zemské na hmotně realizované kyvadlo a může sloužiti za bezprostřední důkaz, že se Země vzhledem ke klidnému prostoru otáčí kolem své osy.

Důkaz tento má přednost, že nejen ukazuje, že se Země otáčí, ale také, jak se otáčí, t. j. ukazuje přímo směr zemské rotace, což u Foucaultova pokusu není.

Že oba pokusy jsou navzájem nezávislé, plyne z toho, že na počátku Foucaultova pokusu je patrný jen první, na konci pokusu jen druhý; uprostřed ovšem vystupují oba zjevy současně.

Druhý důkaz byl po prvé proveden v slavnostním zasedání Akademie N. Lincei v prosinci r. 1929 v Římě.

Doplňuje klasický důkaz Foucaultův a je po stránce fyzikální jistě velmi poučný i názorný.

Z II. oddělení fyzikálního ústavu Karlovy university v Praze.