

Marie Volcová

Měření rychlosti světla pomocí Kerrova elektrooptického zjevu

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 61 (1932), No. 1, R10--R16

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/121708>

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>

Měření rychlosti světla pomocí Kerrova elektrooptického zjevu.

Marie Volcová.

Starší metody pro měření rychlosti světla. Již Galilei se domníval, že rychlost světla jest konečná, a navrhl pro její změření metodu světelných signálů. Měření se nezdařilo, poněvadž vzdálenosti pozemské jsou v tomto případě příliš krátké, a výsledek se může dostaviti jen při užití vzdáleností meziplanetárních.

Pomocí jich změnil po prvé rychlost světla r. 1675 O. Römer ze zpoždování emersí a zrychlování imersí měsíců Jupiterových, jež úhrnem činilo 1000 sekund; při tom zároveň odlehlost země a Jupitera se změnila o průměr dráhy zemské, t. j. o 300,000,000 km. Odtud rychlost světla $c = 300.000 \text{ km/sec}$.

O 50 let později Bradley při hledání paralaxy hvězd objevil aberaci světla. Z konstanty aberační dá se pak vypočísti rychlost světla, známe-li střední rychlost oběhu zemského v . Rychlost světla $c = \frac{v}{\sin 20\cdot5''} = 299.490 \text{ km/sec}$, kdež $20\cdot5''$ jest aberační konstanta.

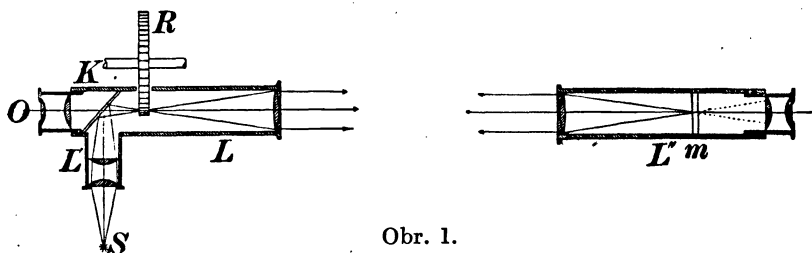
Obě uvedené metody pro měření rychlosti světla jsou astronomické. Metody fysikální udali v polovici 19. století J. B. Foucault a H. Fizeau.

Metoda Foucaultova spočívá v tom, že paprsek prošedší štěrbinou odrazí se na otáčivém zrcátku a po několikanásobném odrazu dopadne na ně zpět a čočkou vytvoří obraz štěrbiny. Otáčeli-li se zrcátko, posune se obraz štěrbiny a z posunutí toho, rychlosti zrcadla a dráhy paprsku lze vypočísti rychlost světla. Výsledek Foucaultův dává pro rychlost světla $c = 298.000 \text{ km/sec}$. Jeho měření opakovali Michelson a Newcomb.

Druhá fysikální metoda jest Fizeauova. Její princip vyložíme zde podrobněji, poněvadž je totožný s principem metody Karolus-Mittelstaedtovy, jež jest předmětem tohoto článku.

Schema pokusu Fizeauova podává obraz 1. Světlo silného zdroje, odrážející se od planparalelní deštičky K , postavené v úhlu 45° k ose dalekohledu L , dopadne na jeho ohniskovou rovinu právě tam, kde do dalekohledu zasahuje ozubené kolo, které se může otáčeti různou rychlostí a tak světelnému paprsku cestu střídavě zakrývati a otvírati. Odtud postupuje paprsek dále a ve vzdálenosti $\frac{1}{2}l$ dopadá kolmo na postříbřené zrcátko Z , postavené v ohniskové rovině dalekohledu L' , odrazí se od něho zpět do dalekohledu L a planparalelní deskou K prostupuje do okuláru. Otáčeli-li se ozubené kolo malou rychlostí, vidíme v okuláru malou jasnou hvězdičku, jež střídavě mizí a zasvitne. Stupňujeme-li

otáčecí rychlost kola, splývají světelné dojmy v jeden, vidíme hvězdičku stále, ale jasnost její klesá, až nastane při určité frekvenci okamžik, kdy se zorné pole zatemní. Stoupá-li rychlost kola dále, pak se opět vyjasňuje až k maximu světlosti pro rychlost dvojnásobnou, pak se opět zatemňuje až k minimu při rychlosti trojnásobné atd. Jestliže m jest počet zubů kola a n jeho frekvence v kritickém okamžiku, kdy po první hvězdička zmizela, pak $\frac{1}{2} mn$ jest doba, za níž světlo proběhlo dráhu od štěrbiny k zrcátku Z a zpět a narazilo na zub, jenž se tam místo štěrbiny zatím dostal. Je tedy rychlost světla $= l : \frac{1}{2} mn = 2mnl$. Další minima při stoupající frekvenci znamenají, že paprsek při svém návratu nenarazil právě na ten zub, který sousedí se štěrbinou, z níž vyšel, nýbrž na jiný, od ní vzdálenější, druhý, třetí, atd. To znamená,



Obr. 1.

že světlo v případě světelného minima potřebovalo k proběhnutí své dráhy času

$$\tau = \frac{1}{2mn}, \frac{3}{2mn}, \dots \text{obecně } \tau = \frac{2k-1}{2mn} \text{ sec.}$$

k nazýváme řadovým číslem a mluvíme o minimu k -tého řádu.

Fizeau sám dostal pro rychlost světla číslo poněkud velké, $c = 313.274 \text{ km/sec}$. Měření jeho opakovali Cornu (1875) a Perrotin (1900); jejich průměrné výsledky spolu velmi dobře souhlasí a dávají pro c hodnotu 299.900 km/sec .

Při metodě Fizeauově působí velké obtíže přesné stanovení dráhy paprsku (až 40 km) a přesné určení počtu otček kola, který musí býti k tomu ještě proměnlivý, abychom mohli získati minima vyšších řádů. Zvýšení řádu se dalo docílití buď zvýšením frekvence kola na hodnotu velmi velikou, nebo prodloužením cesty světelného paprsku.

Metoda Karolus-Mittelstaedtova. Aby se tyto obtíže aspoň částečně odstranily, navrhl Karolus r. 1925, aby mechanické přerušování světla ozubeným kolem bylo nahrazeno přerušováním elektrickým, jež nemá setrvačnosti. Vhodným takovým přerušovačem jest Kerrův kondensátor, jímž se může přerušiti

světelný signál až 10^7 krát za vteřinu. Tím zároveň může se cesta, již nutno světelnému paprsku k minimu prvního řádu proběhnouti, zkrátiti až na 15 *m*.

Princip metody. Kerrova cella je založena na t. zv. Kerrově efektu, který jest elektrickou analogií magnetooptického zjevu Faradayova, že totiž průhledné látky mění v magnetickém poli své optické vlastnosti, jinak řečeno, že magnetické pole otáčí polarisační rovinu světla polarisovaného. Již Faraday zkoumal optické působení elektrického pole na různé látky pevné, kapalné i plynné, ale s výsledkem záporným. Též s neúspěchem konali podobné pokusy i Brewster, Quinke a Röntgen. Teprve r. 1875 obdržel první kladné výsledky Kerr a proto každou změnu optických vlastností průhledné a isotropické látky v elektrickém poli nazýváme elektrooptickým zjevem Kerrovým.

Kerr vyšetřoval nejdříve skleněný rovnoběžnostěn, v jehož vyhloubených koncích vězely dráty vedoucí k pólům induktoru a oddělené od sebe jen několik *mm* silnou skleněnou vrstvou. Tato vrstvička byla mezi zkříženými nikoly, jejichž polarisační roviny svíraly se směrem siločar elektrického pole úhly $\pm 45^\circ$. Světlo dopadalo na deštičku kolmo. Po zapojení induktoru nastalo vyjasnění zorného pole a nedalo se zhasnouti otáčením analyzátoru, což ukazovalo na eliptickou polarisaci prošedšího světla. Kerr ukázal, že sklo mezi elektrodami se stává působením elektrického pole dvojlomným ve smyslu negativního jednoosého krystalu. Dvojlom rostl současně s intenzitou pole a byl nezávislý na jejím znamení.

Při tomto uspořádání nebylo elektrického pole, v němž se sklo nacházelo, homogenní; proto Mackenzie a Quinke vyslovili pochybnost, zda se při pokusech Kerrových jedná o přímé působení elektrického pole na optické vlastnosti skla, nebo zda snad dvojlom nebyl způsoben sekundárními mechanickými napětími, která mohla povstati v nehomogenním poli nerovnoměrným vývojem Jouleova tepla. Kerr ovšem mohl později dokázati existenci dvojlomu i v homogenním poli; užil totiž skleněné deštičky, jejíž 2 rovnoběžné stěny byly polepeny staniolem a sloužily jako desky kondensátoru. Avšak opět nedalo se s jistotou rozhodnouti, zda snad dvojlom nemá svůj původ ve vzájemném elektrostatickém přitahování se polepů a tím vzniklém mechanickém tlaku na skleněnou deštičku.

Proto byly v pozorování zahrnuty též kapaliny, o nichž Röntgen a Brewster dokázali, že u nich sekundární mechanické a tepelné zjevy nemají vlivu na dvojlom. Vzájemné přitahování desek nemůže totiž u kapalin vzbuditi jednostranného tlaku, nýbrž nanejvýše změnití hustotu kapaliny a tím index lomu. Elektrické pole bylo vyvoláno dvěma okrouhlými elektrodami,

jež byly spojeny s póly induktoru a byly ponořeny ve skleněné nádobce, jež byla naplněna zkoumanou kapalinou. Optické změny pole byly pozorovány opět mezi dvěma zkrříženými nikoly, jejichž polarisační roviny svíraly úhel $\pm 45^\circ$ se směrem siločar elektrického pole. Byl pozorován týž zjev jako u skla, totiž vyjasňování pole při stoupajícím napětí. Tím bylo dokázáno, že elektrooptické zjevy aspoň z velké části jsou způsobeny přímým účinkem elektrického pole.

Při průchodu paprsku elektrickým polem dělí se tedy dvojlomem paprsek ve dva a kvantitativní měření ukázalo, že dráhový rozdíl Δ obou složek, z nichž jedna jest polarisována kolmo ke směru siločar elektrického pole a druhá s nimi rovnoběžně, jest přímo úměrný kvadrátu potenciální diference na deskách kondensátoru a dráze světelného paprsku v elektrickém poli, nepřímou úměrný kvadrátu vzdálenosti desek. Můžeme tedy psáti

$$\Delta = BK^2,$$

kdež l jest dráha světla, $K = V/a$ intenzita pole; B jest konstanta úměrnosti charakteristická pro užitou látku; jest kladná pro látky opticky pozitivní, záporná pro opticky negativní, a nazýváme ji Kerrovou konstantou. Z kapalin největší konstantu má nitrobenzol, $B_{\text{nitrob.}} = 256 \cdot 10^{-7}$.

A právě nitrobenzolu jest užito jako dielektrika v Kerrově kondensátoru, jinak Kerrově nebo Karolusově celle. Cella tato byla již podrobně popsána p. Drem Štěpánkem¹⁾ a proto omezím se jen na stručnou rekapitulaci věcí nejdůležitějších.

Kerrova cella jest kovová nádobka, naplněná nitrobenzolem a opatřená dvěma skleněnými proti sobě ležícími okénky,¹⁾ mezi nimiž jsou desky kondensátoru. Oba zkrřížené nikoly dávají se těsně ke skleněným okénkům. Dvojlom podle Kerra jest

$$\varphi = \frac{f' V^2}{a^2}, \text{ kdež } f' = \frac{2\pi B l}{300^2}.$$

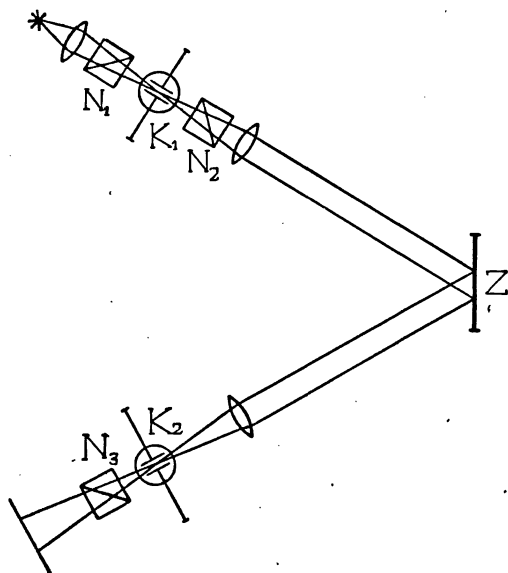
při tom φ znamená dvojlom v míře úhlové, V napětí ve voltech, l délku desek kondensátoru a a jejich vzájemnou vzdálenost v *cm*. Na desky kondensátoru přivádíme pozitivní předpětí, jímž se nitrobenzol uvádí do stavu elektrochemické polarisace, při níž jsou nejmenší ztráty dielektrické a isolační. Přes toto předpětí překládá se napětí střídavé; má-li toto napětí frekvenci ν , pak platí:

$$\varphi = \frac{f'}{a^2} l_0^2 \sin^2 (2\pi \nu t). \quad (1)$$

¹⁾ Dr. Štěpánek: Jak se telegrafují obrazy, *Rozhledy* roč. VII., seš. 4., str. 136 (1928).

Za dobu jedné periody dostaneme dva maximální světelné impulsy, a to pro $2\pi\nu t = 90^\circ$ resp. 270° .

Experimentální uspořádání. Karolus-Mittelstaedtova metoda měření rychlosti světla Kerrovým kondensátorem navazuje vlastně na návrh Des Coudresův z r. 1893, podle něhož měla se určití frekvence Hertzových vln z Kerrova efektu a ze známé rychlosti světla. Poněvadž však dovedeme již přesně určití frekvenci i velmi rychlých kmitů, nemůže nám nic brániti, abychom si celou věc neobrátili a nepoužili daného uspořádání k měření rychlosti světla.



Schema uspořádání pokusu je dáno obrazem 2. Světlo, jež prošlo nikolem N_1 (polarisátor), Kerrovou cellou K_1 , na jejíchž deskách je střídavé napětí frekvence ν , a nikolem N_2 (analysátor), vystupuje odtud při zkřížených nikolech jako světlo přerušované, při čemž frekvence přerušování je 2ν ; to je důsledek kvadratické závislosti mezi napětím a dvojlomem (rovnice (1)). Tento periodicky přerušovaný paprsek pokračuje dále ve své cestě, uraziv dráhu $\frac{1}{2}l$ se odráží na rovinném zrcadle Z a prochází druhým Kerrovým systémem K_2 , N_3 . Je to opět světelný přerušovač, ale bez polarisátoru, neboť světlo do něho přicházející jest již polarisováno. Obě cely K_1 i K_2 jsou připojeny paralelně ke kapacitě oscilačního kruhu lampového generátoru a přívody k nim jsou co možná symetrické, takže elektrická pole v K_1 i K_2 jsou ve fázi. Nikoly N_1 a N_3 jsou zkříženy. Udržujeme-li dráhu paprsku kon-

stantní a měníme-li frekvenci, dostáváme v dalekohledu L světelná minima, obdobná minimům Fizeauova pokusu.

Kdyby totiž rychlost světla byla nekonečná, paprsek vyšedší z K_1 v době maxima elektrického pole, a tudíž v maximu intenzity světla, přišel by do K_2 také v době jeho maxima a vyšel by z něho v nezměněné jasnosti. Ve skutečnosti, poněvadž rychlost světla je konečná, nedopadne paprsek na K_2 v době světelného maxima, nýbrž v době, kdy již intenzita pole je daleko menší. Vhodnou volbou frekvence ν můžeme dosáhnouti, že paprsek dopadne na K_2 tehdy, kdy okamžitá hodnota napětí se rovná nule, t. j. kdy doba, kterou potřebuje paprsek, aby proběhl dráhu l , se rovná fázovému zpoždění $\frac{1}{2}\pi$. Pak paprsek cellou K_2 vůbec neprochází, nastane světelné minimum. Toto minimum nazýváme minimem 1. řádu. Zvyšujeme-li ν , dostaneme analogicky jako při pokusu Fizeauově minima vyšších řádů.

Při předběžných pokusech při minimu 1. řádu byla střední chyba jednotlivého měření $\pm 1\%$. Při této metodě ovšem předpokládáme, že amplituda střídavého napětí se změnou frekvence se nemění a že intenzita světelného zdroje je během měření stálá.

Chceme-li zvýšiti přesnost měření a zároveň zbaviti se uvedených předpokladů, užijeme metody kompenzační. Změníme uspořádání tím způsobem, že Kerrův kondensátor K_2 otočíme o 90° proti K_1 . Elektrická pole v K_1 a K_2 budou státi k sobě kolmo a dvojlom světelného paprsku v K_2 bude právě opačného znamení než v K_1 . Jestliže nyní světlo při průchodu Kerrovou cellou K_2 zastihne tam střídavé napětí v téže fázi jako v K_1 , pak se budou oba dvojlomy v K_1 a K_2 kompensovati, neboť obě cely mají tytéž rozměry a v témž okamžiku totéž napětí. To znamená, že z K_2 vyjde opět světlo lineárně polarisované a následkem toho neprojde analysátorem N_3 , zorné pole zůstane tmavé. Světlo zastihne K_2 v téže fázi jako K_1 buď tehdy, když by byla dráha jeho $l = 0$; také však po každé, když potřebuje k proběhnutí dráhy l doby τ , která se rovná celistvému násobku půlperrody daného střídavého napětí. Tedy

$$\tau = \frac{l}{c} = \frac{1}{2\nu}, \text{ obecně} = \frac{k}{2\nu} \text{ sec.}$$

Pouze v těchto případech při frekvencích vyhovujících právě napsaným výrazům tedy analysátor světla nepropouští, při každé jiné frekvenci světlo jím projde:

Poněvadž jsme však nuceni z důvodů již shora uvedených klásti na elektrody předpětí, platí hořejší vzorec pro celistvé násobky celé periody, takže

$$\tau = \frac{s}{c} = \frac{k}{\nu}.$$

Měření rychlosti světla spočívá tedy na přesném určení frekvence, při níž intenzita světelného paprsku jest minimální, a dále na přesném určení dráhy paprsku. Frekvenci měníme kapacitou lampového vysilače.

Karolus a Mittelstaedt užili k pokusu lampového vysilače s cizím buzením, jenž mohl vysílati vlny v délce 30—100 *m* při 3000 voltech anodového napětí a 1·5 *kW* výkonu. Předpětí na kondensátorech bylo 6000 *V*, střídavé 2000 *V*. Vzdálenost desek v Kerrově kondensátoru byla 2·5 *mm*, jejich délka 20 *mm*. Dielektrikem byl nitrobenzol.

Měření frekvence bylo prováděno známými svrchními kmity elektromagnetické ladičky nebo piezoelektrického krystalu. Interferencí těchto kmitů s frekvencí lampového generátoru povstaly rázy, jejichž frekvence (3000 až 10.000 za *sec*) byla určována buď akusticky nebo rezonančními kruhy, jejichž frekvence byla předem cejchována. Tím bylo umožněno stanovit frekvenci lampového generátoru na 0·02 ‰ přesně.

Měření cesty světla. Celá aparatura byla postavena na chodbě fysikálního ústavu, jež měla 40 *m* délky. Několikanásobným odrazem na zrcadlech mohli autoři dosáti největší délky 332 *m*. Tato byla určena tím, že byla přesně změřena vzdálenost jednoho Kerrova kondensátoru a zrcadla, a všechny ostatní vzdálenosti měřeny pak v poměru k této základní délce. Délka celé dráhy dala se určití jen s přesností 0·04 ‰.

Výsledky. Poněvadž cesta světla byla určena přesně na 0·04 ‰ a frekvence generátoru na 0·02 ‰, je střední chyba výsledku 0·06 ‰, t. j. ± 20 *km/sec*. Numerické výsledky jsou udány v tabulce.

Dráha světla	Řád	Střední frekvence	Počet pozor.	<i>c</i>
I. 250·053 <i>m</i> \pm 10 <i>mm</i>	3	3 596 570 za <i>sec</i>	108	299 778 <i>km/sec</i>
II. 250·044 <i>m</i> \pm 10 <i>mm</i>	4	4 795 700 za <i>sec</i>	295	299 784 <i>km/sec</i>
III. 332·813 <i>m</i> \pm 12 <i>mm</i>	4	3 603 130 za <i>sec</i>	130	299 791 <i>km/sec</i>
IV. 332·813 <i>m</i> \pm 12 <i>mm</i>	5	4 503 436 za <i>sec</i>	117	299 761 <i>km/sec</i>
V. 332·813 <i>m</i> \pm 12 <i>mm</i>	8	7 205 614 za <i>sec</i>	125	299 760 <i>km/sec</i>

Střed 755 měření dává pro rychlost světla veličinu

$$c = 299.778 \text{ km/sec} \pm 20 \text{ km/sec.}$$

Dosud nejpresnější měření rychlosti světla, které vykonal Michelson, udává pro ni 299·796 *km/sec* \pm 4 *km/sec*, což jest střed ze 3000 pozorování.

Karolus a Mittelstaedt budou v měření pokračovati a doufají, že zvýší přesnost měření až na 0·01 ‰ tím, že prodlouží dráhu světla na 3 *km* a nahradí subjektivní pozorování světelného minima v dalekohledu metodou objektivní.

Z II. oddělení fysikálního ústavu Karlovy university v Praze.