

Zdeněk Kopal

Ohyb světla v gravitačním poli Slunce

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 62 (1933), No. 4-5, 171--177

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/123900>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1933

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>

Ohyb světla v gravitačním poli Slunce.

Referuje Zdeněk Kopal.

(Došlo 20. prosince 1932.)

Ohyb světla v gravitačním poli Slunce vyplývá jako důsledek obecného principu relativity. V blízkosti hmot ztrácí prostor euklidovské vlastnosti, geodetická čára není již přímkou a na světlo účinkuje gravitace blízké hmoty — světelný paprsek se šíří po hyperbole. Nám se toto jeho zakřivení projevuje zdánlivým rozestoupením hvězd kolem slunečního disku o určitou hodnotu, závislou na hmotě gravitačního středu M , a na krajním přiblížení R paprsku k rušivé hmotě. Einstein našel pro ně výraz

$$E = \frac{4gM}{c^2R},$$

kde g a c jsou konstanty, značící gravitační konstantu a světelnou rychlost. Zavedeme-li za M sluneční hmotu $1,94 \cdot 10^{33}$ g, za R poloměr Slunce $6,955 \cdot 10^{10}$ cm, dále za c $3 \cdot 10^{10}$ cm \cdot sec $^{-1}$ a za g $6,68 \cdot 10^{-8}$ cm $^3 \cdot$ g $^{-8} \cdot$ sec $^{-2}$, dostaneme pro paprsek světelný nad slunečním okrajem ohyb o $1,75''$. Znázorníme-li si velikost hodnoty E jako funkci R , dostaneme hyperbolu; největší pozorovatelnou hodnotu E udává výše citované číslo, nulové hodnoty nabývá pak E teoreticky v nekonečnu, prakticky ve vzdálenosti asi deseti poloměrů slunečních.

Teorie tohoto ohybu spočívá na samých základech obecného principu relativity, proto byl věnován neobyčejný zřetel jeho experimentálnímu potvrzení. Ohyb je možno měřit jen během úplných zatmění slunečních, kdy je možno fotografovat stálice v blízkém okolí Slunce. Velikost ohybu je dostatečná, aby ji bylo možno moderními měřicími prostředky stanovit. Po prvé byla tato měření zařaděna na program slunečních expedicí při zatmění dne 29. května 1919. Dvěma anglickým výpravám, jedná v Sobralu (Brasílie), druhé na ostrově Principe u západoafrického pobřeží, se podařilo zhotovit příslušné snímky, které sice ukazovaly posuv, blízký očekávané hodnotě, bezpečného řešení však nepřinesly: neshodovaly se spolu příliš dobře a proti redukci bylo vzneseno několik vážných námitek, jmenovitě vliv deformace teplotou zrcadla celostatu, kterým byl obraz Slunce vrhán do vodorovně montované komory. Při příštím úplném zatmění dne 21. září 1922 bylo měření ohybu na programu mnoha výprav, ale nepříznivé počasí dopřálo pouze americkým expedicím ve Wallalu (Australie).

a anglické v Cordillo-Downs (Australie) získat uspokojivých výsledků. Měření desek, získaných zejména výpravou Lickovy observatoře v čele s prof. W. W. Campbellem a R. Trumplerem, dala hodnoty velmi blízké teoretickému číslu, předpověděnému Einsteinem. Znamé jest mínění Campbellovo, který pokládal tehda otázku za rozřešenu ve prospěch relativity.

K úplnému zatmění dne 9. května 1929 se však vypravila přes to expedice Einsteinova ústavu a astrofysikální observatoře v Potsdamu do Takengonu na Sumatru, aby přezkoumala tento zjev. Výpravu vedli prof. E. F. Freundlich, který se též účastnil německo-holandské výpravy pro pozorování ohybu světla při zatmění v r. 1922, ale počasí jí znemožnilo tehda veškerou práci — H. v. Klüber a A. v. Brunn. Tato výprava byla co do přístrojů vybavena dokonaleji, než expedice minulé. Pro měření ohybu světla měla dvojitý Zeissův refraktor, vodorovně montovaný, s osmipalcovými objektivy o 8,5 m ohniskové vzdálenosti. Obraz Slunce byl do něho vrhán celostatem poháněným přesným hodinovým strojem. Na desce 1" měřila 0,04 mm — tedy měřítko značně větší, než měly dosud užívané přístroje.*) Na fotografiích, které se zhotoví během trvání úplného zatmění, jest nutno posice zachycených stálic proměřit a srovnat s normálními polohami, měřenými na obloze za noci. Při přesnosti, která jest nutna, nelze vyjmouti údaje o hvězdných posicích z katalogů, nýbrž se musí tatáž krajina fotografovat stejným přístrojem ještě jednou v noci, to jest asi půl roku po zatmění, a tuto desku proměřit se stejnou pečlivostí. Desky německé expedice měly však rozměr 45 × 45 cm, čímž proměrování obvyklými metodami by bylo velmi ztíženo. Bylo proto nutno zhotovit v noci také jeden snímek tak, že byla deska vložena do kasety obráceně, emulsi dovnitř, tedy hvězdy byly fotografovány skrze sklo. Tuto desku možno položit emulsi na emulsi na desku zhotovenou při slunečním zatmění tak, aby se (přibližně) obrazy hvězd kryly. Krytí není ovšem úplné, neboť hvězdy na desce exponované během zatmění jeví proti druhé rozestoupení, které se pak může velmi pohodlně proměřit. Zda-li posice stálic na desce exponované skrze sklo nejsou poněkud změněny, ku př. lomem ve sklu desky, se zjistí, přiložíme-li opět emulsi této desky na desku exponovanou ve stejnou dobu normálně. Expedici přálo štěstí. Ač počasí ještě v den zatmění bylo beznadějně, těsně před úplným zatměním se vyjasnilo a program byl v celém rozsahu proveden. Freundlich odjel do Evropy, Klüber zůstal na Sumatře ještě půl roku a zhotovil stejným postupem srovnávací snímky.

*) Na zdařilých deskách jest možno měřiti až s přesností 0,002—0,004 mm.

Redukce pozorování trvala déle než rok a bylo nutno provést přes 100.000 měření. Při redukci se musí vzhledem k přesnosti, kterou žádáme, přihlížet k mnoha okolnostem a chybám, které mohou mít na výsledek vliv. Je samozřejmě nutno odstranit refrakci a aberraci, potom jest také možno, že deska během doby šesti měsíců, která uplynula mezi expozicí obou snímků, změnila o něco svůj sklon k optické ose dalekohledu, nebo se mohla změnit o něco ohnisková vzdálenost objektivu (vlivem teploty). Refrakci a aberraci jest možno odstranit snadno, ostatní eventuelní vlivy jest nutno zjistiti přímo z pozorování. Je-li Δx a Δy měřený posuv jedné dvojice hvězd, pak platí rovnice:

$$\Delta x = a + bx + cy + dx^2 + fxy + \frac{E}{r},$$

$$\Delta y = g - cx + by + fy^2 + dxy + \frac{E}{r},$$

kde a a g udávají náhodné relativní posunutí obou desek v měřicím přístroji, c závisí na možném stočení obou desek v měřicím přístroji, d a f závisí na rozdílech v sklonu desek k optické ose dalekohledu, b jest rozdíl měřítka u obou desek, způsobený změnou ohniskové vzdálenosti objektivu, E jest pak hledaný Einsteinův efekt. Každá hvězdná dvojice nám dává takový systém rovnic a metodou nejmenších čtverců se nalezne velikost jednotlivých koeficientů. Zvláště nebezpečný jest koeficient b : jeví totiž tentýž charakter jako hledaná hodnota E . Einsteinův efekt se jeví na desce jako posuv radiální, totéž však působí i prodloužení ohniskové vzdálenosti. Musí zde být proto věnována zvláštní péče odloučení obou hodnot. Potsdamští astronomové se v zájmu přesnosti svých pozorování rozhodli získat tuto hodnotu nezávisle. K tomu použili druhého tubusu svého dvojitého dalekohledu. Když bylo prvním fotografováno okolí zakrytého Slunce, druhým se exponovala současně krajina vzdálená, kde Einsteinův efekt nemohl mít již znatelného vlivu.

Výsledek redukce přinesl nečekané překvapení. Pro ohyb světla vyšla hodnota $2,24'' \pm 0,10''$, tedy značně větší, než teoreticky předpověděné číslo. Freundlich, Klüber a Brunn proložili svým hodnotám rovněž hyperbolu (ač ne příliš přesvědčivě, jak ukázal Courvoisier), její průběh však nebylo možno blíže určití, neboť vzestupná větev křivky (v blízkosti Slunce) jest doložena velmi málo body, takže jest téměř extrapolována. Osu x protíná pak o půl sekundy výše než teoretická křivka Einsteinova. V odporu s tímto výsledkem byla dřívější měření, zvláště Campbellova a Trumplerova z r. 1922, jejichž výsledky se velmi dobře shodovaly s teorií. Podrobili tato pozorování nové redukci a získali hodnoty

mnohem více se blížíci jejich výsledku: $2,1''$ — $2,2''$, oproti původně udávaným $1,7''$ — $1,8''$.

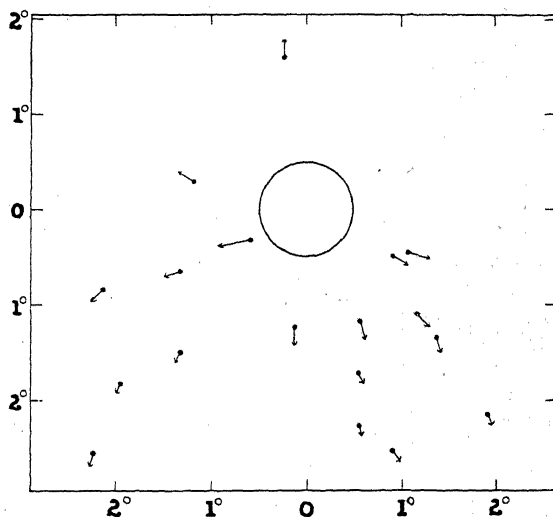
Fysikální výklad tohoto zjevu byl problémem. L. Courvoisier¹⁾ nedávno upozornil na jeho možnou souvislost s roční refrakcí. Roční refrakce, jím objevená, jest ohyb paprsků hvězd, záviselý na její vzdálenosti od Slunce. Byla pozorována na nebeských tělesech od 90° až k 5° vzdálenosti od Slunce (konjunkce Venuše) a jest vyjádřena empirickým vzorcem $r = \varrho (1 - \sqrt{\sin \frac{1}{2}\alpha})$, kde $\varrho = 0,532'' \pm 0,017''$ a α je vzdálenost od Slunce. Tento vzorec spočívá na pozorováních, konaných pro $\alpha = 90^\circ$ — 5° a postrádá dosud, jako celý zjev, přesného fysikálního výkladu. Courvoisier uvažuje nejprve, zda by se nedala zjednat lepší shoda mezi pozorováním a výpočtem tím, že by se předpokládala superposice Einsteinova efektu s roční refrakcí. Roční refrakce byla dosud pozorována do $\alpha = 5^\circ$, kde dosáhla hodnoty $0,43''$. Není jisto, zdali i dále stoupá lineárně až k okraji Slunce, jak se domníval Harzer, či po dosažení určité mezni hodnoty opět klesá. Courvoisier uvažoval překládání Einsteinova efektu s oběma možnostmi, ale nedošel k uspokojivé shodě s hyperbolou, odvozenou Freundlichem a jeho spolupracovníky. Zavrhl proto hyperbolu, která ostatně nevyhovuje pozorováním příliš dobře, vybral z pozorování z let 1919, 1922 a 1929 hodnoty nejspolehlivější a graficky jimi proložil křivku, která velmi přibližně vyhovuje vzorci $\varrho \sqrt{\cotg \frac{1}{2}\alpha}$, kde $\varrho = 0,070''$. Rovněž zavrhl vliv Einsteinova efektu vůbec a domnívá se vidět v celém pozorovaném ohybu pouze pokračování roční refrakce až k okraji Slunce, kde však již nevyhovuje vzorec $\varrho (1 - \sqrt{\sin \frac{1}{2}\alpha})$ a jest nutno jej nahradit druhým výrazem. Celý Courvoisierův výklad postrádá ovšem teoretického zdůvodnění.

Proti výsledkům potsdamské expedice se ozvaly zatím hlasy z celého světa. Zejména to byl ředitel astrofysikální observatoře v Potsdamu, prof. H. Ludendorff,²⁾ který podrobil jejich výsledky ostré kritice. Již J. Jackson³⁾ upozornil, že rozdíly mezi pozorovanými hodnotami a čísly teoreticky plynoucími ze vzorce $E = 1,75''/r$ nemají systematického charakteru, nýbrž mají v průměru hodnotu $0,17''$. Empiricky možno tedy ohyb světla v gravitačním poli Slunce vyjádřit vzorcem:

$$E = \frac{1,75''}{r} + 0,17''.$$

Ludendorff věnoval pozornost tangenciálním složkám posuvů. Teoreticky mají být veškeré tangenciální složky nulové (Einsteinův efekt jest radiální), prakticky tomu tak není vlivem nahodilých chyb. Ludendorff upozornil, že odchylky těchto vektorů od nuly mají systematický charakter. V jihovýchodním a severozápadním

kvadrantu desky mají všechny odchylky kladné znamení, v severovýchodním (až na jednu, nejistou) záporné. Zajímavou jest, že Freundlich, Klüber a Brunn tento důležitý zjev míjejí ve svém pojednání poznámkou: „Úhly ... ukazují ráz, který vzhledem k jejich charakteru jest očekavatelný jako účinek nahodilých chyb.“⁴⁾ Ludendorff počítal výsledný efekt E za domněnky, že ve východním areálu veškeré radiální vektory Δx jsou nepřesné o dx , zatím co Δy jsou podrobeny jen nahodilým chybám — na což ukazují různá znamení v jednotlivých kvadrantech. — a zjistil,



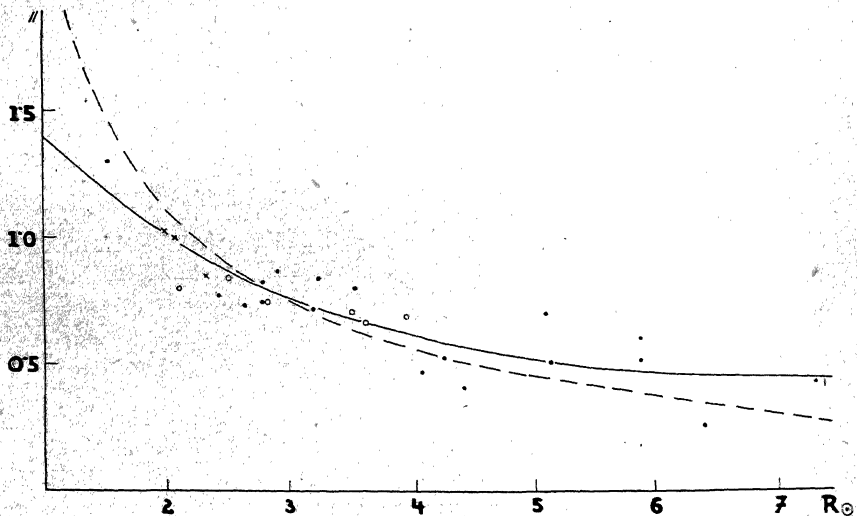
Obr. 1.

že 13 hvězd tohoto východního areálu ukazuje posuv $E = 1,90'' \pm 0,15''$, tedy značně bližší teoretické hodnotě. Ludendorff zdůrazňuje, že právě těchto 13 hvězd bez korekce, jím uvažované, dává posuv $2,44''$! Ukazuje to, jak veliký vliv na konečné výsledky mohou mít i nepatrné rušivé vlivy a hodnota ohybu nebude přesně známa tak dlouho, pokud nebudou všechny bezpečně eliminovány. Odpověď Freundlichova⁵⁾ a jeho spolupracovníků i Ludendorffova replika⁶⁾ nových myšlenek do sporu nepřinesla.

Rovněž Trumpler⁷⁾ se staví proti výsledkům potsdamských astronomů a uvádí zejména, že hvězdné pole kolem Slunce při zatmění v r. 1929 bylo nepříhodné. Dále optické vlastnosti druhého dalekohledu, kterým byly konány srovnávací snímky pro přesné zjištění změny ohniskové vzdálenosti, nebyly právě nejlepší; při redukci pozorování byla předpokládána nepřímá úměrnost ohybu

na vzdálenosti od slunečního středu, což jejich výsledky nepotvrdily. Trumpler odmítá Freundlichovu redukci svých pozorování z r. 1922, naopak, sám zpracoval znovu potsdamská pozorování a dospěl k číslu $1,75'' \pm 0,13''$, tedy dokonale se shodující s teorií. Jako nejpravděpodobnější hodnotu ohybu pokládá Trumpler průměr ze všech dosud vykonaných měření $1,79'' \pm 0,06''$.

To jest asi vše, co možno o měřeních konaných pro experimentální potvrzení Einsteinova efektu dnes říci. Toliko budoucí pozorování mohou na tento problém vrhnouti více světla; experi-



Obr. 2.

mentální potvrzení tohoto důsledku obecné teorie relativity není však tak bezpečné, jak se za to mělo, a není vyloučeno, že povede k objevu nových fakt.

Z připojených obrázků první ukazuje zdánlivý rozstup hvězd kolem Slunce při zatmění v r. 1929. Kolem slunečního disku jsou zakresleny jasnější z hvězd, použitých k redukci. Šipky naznačují velikost i směr posuvu, v měřítku ovšem značně zvětšeném; 1 mm šipky značí posuv $0,15''$.

Druhý obrazec graficky znázorňuje pozorovaný ohyb světla v okolí Slunce. Na osu úseček jest nanášena vzdálenost hvězdy od slunečního středu v jeho poloměrech, na osu pořadnic pak velikost ohybu v sekundách. Zanesena jsou pouze nejspolehlivější měření hvězd při zatmění z r. 1919 (křížky), 1922 (kroužky) i 1929 (plné kroužky). Křivka čárkovaná jest hyperbola Freundlichova

(2,24'' $\cdot \gamma^{-1}$); křivka nepřetržitá graficky znázorňuje interpolační vzorec Courvoisierův: $\rho \sqrt{\cotg \frac{1}{2}\alpha}$.

Níže uvedená tabulka udává konečně celkový přehled dosažených výsledků. Jednotlivé sloupce udávají: (1) datum zatmění, (2) pozorovací místo, (3) a (4) průměr objektivu (v palcích) a ohnisková vzdálenost (v metrech) použitého dalekohledu, (5) počet exponovaných desek, (6) počet proměřovaných stálic, (7) hodnotu ohybu, (8) její střední průměrnou chybu, (9) pozorovatele.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
29. května 1919	Sobral	4	6,3	7	7	1,98''	$\pm 0,12$	Davidson
	"	8	3,4	16	6—12	0,93	$\pm 0,1$	
	Principe	8	3,4	2	5	1,61	$\pm 0,3$	Eddington
21. září 1922	Wallal	5	5,0	4	62—85	1,72	$\pm 0,11$	
	"	4	1,7	6	134—143	1,82	$\pm 0,15$	Campbell
	"	6	3,6	2	18	1,74	$\pm 0,3$	
	Cordillo-Downs	3	1,6	2	14	1,77	$\pm 0,3$	Davidson, Dodwell ¹¹⁾
9. května 1929	Takengon	8	8,5	4	17—18	2,24	$\pm 0,10^{12}$	Brunn Freundlich Klüber

Literatura.

1. Astr. Nachr. Bd. 244, 279 (1932). — 2. Astr. Nachr. Bd. 244, 321 (1932). — 3. The Observatory, 1931, s. 292. — 4. Abhandl. der Preuss. Akad. der Wissensch. 1931, Nr. 1, s. 37 (1931). — 5. Astr. Nachr. Bd. 244, 415 (1932). — 6. Tamtéž. — 7. Publ. A. S. P. vol. 44, 167 (1932). — 8. Mem. Royal Astr. Soc. Appendix 62 (1920). — 9. Lick Bull. Nr. 346 (1923); 397 (1923). — 10. Publ. Dominion Obs. Victoria, Vol. II, p. 275 (1924). — 11. Monthly Notices 84, p. 150 (1924). — 12. Citováno pod 4, viz též Zeitschrift für Astrophysik, Bd. 3, S. 171 (1931).