

# Měření gravitačního ohybu světla při slunečním zatmění

David Ondřich, Michael Prouza

Pozorování ohybu světla v gravitačním poli Slunce při zatmění v roce 1919 bylo spolu se správnou předpovědí stáčení perihelu Merkuru přijímáno jako definitivní potvrzení správnosti obecné teorie relativity Alberta Einsteina. Přestože, jak se později ukázalo, toto potvrzení nebylo zcela jednoznačné, souhlas (v rámci chyby měření) teorie s experimentem a prezentace výsledků samotným sirem Arthurem Eddingtonem umožnily přijetí obecné teorie relativity.

## Historie...

Tak jako s myšlenkou, že světlo by se v gravitačním poli hmotného tělesa nemuselo pohybovat po přímce a jeho dráha by se mohla zakřivovat, nepřišel první Einstein, tak pozorování expedice sira A. Eddingtona v roce 1919 nebylo prvním pokusem o změření ohybu světla v gravitačním poli Slunce při slunečním zatmění. Již v roce 1801 publikoval Johannes Soldner práci, v níž odvodil úhlovou odchylku světelného paprsku chybným postupem, avšak došel ke správnému výsledku. Albert Einstein se tomuto problému věnoval nejprve v roce 1908 a došel k výsledku, ke kterému měl správně při svém výpočtu Soldner. Později si uvědomil, že se zakřivuje sám prostor a ne jen trajektorie paprsku a s touto korekcí dospěl ke konečnému vztahu, který na okraji slunečního kotouče předpovídá hodnotu úhlové odchylky přibližně  $1,75''$ . V roce 1916 Einstein publikoval obecnou teorii relativity a v jejím rámci i vztah pro ohyb světla v gravitačním poli. Tento vztah začal být přijímán jako určitý test teorie relativity, protože však nebylo možno jej ověřit v žádné pozemské laboratoři, hledal se způsob ověření astronomickými pozorováními.

Protože ohyb světla je i těsně při slunečním okraji jen velmi malý, je potřeba získat mnoho obrazů hvězd co nejtěsněji promítnutých ke slunečnímu kotouči. Aby světlo hvězd mohlo být tak blízko Slunce detekováno, je nutné, aby jejich světlo nebylo přezářeno rozptýleným slunečním světlem v atmosféře. Taková situace nastává při úplném slunečním zatmění, sice jen na několik minut, ale i ty mohou postačit k pořízení snímků hvězdného pole deformovaného gravitačním polem Slunce. Ke zjištění ohybu světla při průchodu gravitačním polem je nutné vědět také jak vypadá hvězdné pole, které není deformované gravitačním polem; proto se pořizovaly jednak srovnávací snímky stejného místa na obloze v době, kdy v něm není Slunce – v ideálním případě o půl roku dříve či později –, jednak srovnávací snímky jiných polí při zatmění. Porovnáním snímků stejného hvězdného pole při zatmění a o půl roku později (dříve) pak dostaneme posuny hvězd v okolí Slunce – je zvykem hodnoty ohybu přepočítávat na okraj slunečního kotouče.

První pokusy ověřit předpovídaný jev pomocí studia archivních dat byly neúspěšné, stejně jako první experiment plánovaný na zatmění Slunce v roce 1912 – ten byl neúspěšný kvůli nepřízni počasí. Další expedice za zatměním se měla konat v roce 1914, ale protože vypukla 1. světová válka, byla zrušena. První expedice, která se konala po roce 1916 (kdy Einstein publikoval svou obecnou teorii relativity) s cílem změřit ohyb světla v gravitačním poli Slunce při zatmění, byla expedice Lickovy observatoře v roce 1918. Pořídila sice snímky asi 50 hvězd při slunečním zatmění, ale nedošla k žádnému přijatelnému výsledku – ukázalo se, že takový experiment je velmi náročný na zpracování získaných dat. A tak lze za první úspěšný pokus o změření ohybu světla považovat až expedici Greenwichské observatoře v roce 1919.

Tato expedice, která byla ve srovnání se všemi předchozími bezesporu nejlépe připravena a vybavena, přinesla nakonec konečný důkaz platnosti teorie relativity. Čtenář možná něco ví o historickém kontextu této expedice, uvedu zde stručný souhrn faktů. (Zájemce o bližší seznámení s historií expedice odkáže např. na článek J. Grygara ve Vesmíru č. 7/1999, str. 387-389.) Expedice byla rozdělena na dvě na sobě nezávislé skupiny, jedna cestovala na sever Brazílie, druhá na ostrov Principe (?Princůf?) v Guinejském zálivu. Expedice Sobral (Brazílie) vezla astrograf z Greenwiche (průměr 33 cm zacloněný na 20 cm, ohnisková délka 3,43 m) a dlouhoohniskový astrograf (průměr 10 cm, ohnisková délka 5,70 m), zatímco ostrovní expedice vezla astrograf identický se sobralským kratším. Všechny tři přístroje byly instalovány ve stálé horizontální poloze a ke sledování oblohy byly použity celostaty.\*) K pořízení obrazů hvězdného pole v okolí Slunce byly ve všech třech dalekohledech použity skleněné fotografické desky. Celkem bylo v obou skupinách expedice pořízeno

---

\*) Celostat je soustava dvou rovinných zrcadel uspořádaných tak, že jedno zrcadlo je pevné v prostoru a odráží paprsky do dalekohledu, druhé se otáčí kolem osy zemské rotace a umožňuje odraz světla z nebeských objektů na první zrcadlo a přes něj do dalekohledu.

asi pětáctyřicet snímků, sobralské skupině se podařilo o necelé dva měsíce později poříditi i srovnávací noční snímky identického hvězdného pole.

Závěr expedice byl ovšem zklamáním. Na mnoha snímcích nebyly hvězdy vidět vůbec, na několika jich bylo málo, pouze malé množství z celkového počtu snímků obsahovalo obrazy předpokládaného počtu hvězd. Srovnávací snímky z ostrova nebyly k dispozici, byly použity snímky pořízené před odjezdem v Greenwichi. Zpracování desek bylo proto mnohem náročnější, než se původně předpokládalo, nakonec však byly závěry experimentu prezentovány jako potvrzení relativistického ohybu světla v gravitačním poli s relativní chybou 19% (6%). Protože expedici organizoval, jednu její část vedl a nepochybně i zpracovával část výsledků sir Arthur Eddington, který také prezentoval její výsledky na zasedání Královské astronomické společnosti, byly nakonec závěry experimentu přijaty jako potvrzení platnosti teorie relativity. Při pozdějším kritickém přehodnocení získaných dat se ukázalo, že přesnost byla o něco menší, než udávali autoři, především však bylo těžké prokázat hyperbolickou závislost ohybu na vzdálenosti od Slunce. Námitky se objevovaly hlavně proti zpracování dat, při němž nebyly dodrženy některé metodické postupy.

Protože přesnost určení ohybu světla při zatmění nebyla nijak velká, a také proto, že ze získaných dat nebylo možno ověřit hyperbolickou závislost velikosti ohybu světla na vzdálenosti od Slunce, konalo se do poloviny 50. let ještě nejméně 10 dalších pokusů o změření ohybu světla při zatmění. Přesto se chyby těchto měření nedostaly pod 10% a hyperbolická závislost ohybu světla taktéž nebyla prověřena uspokojivě.

V roce 1973 se konala expedice Texaské univerzity do Mauretánie a ačkoliv expedice byla připravená velmi pečlivě (dalekohled stál v poušti ve svém vlastním klimatizovaném stanu, zůstal na místě i po zatmění po dobu šesti měsíců, kdy jej hlídala ozbrojená stráž poskytnutá mauretánskou vládou), nakonec ani ona se nesečkala s výrazným úspěchem – z předpokládaného tisíce hvězd jich bylo vyfotografováno zhruba 150 (podrobná mikrodensitometrická zkoumání desek ukázala, že v důsledku špatných atmosférických podmínek při zatmění je na deskách zachyceno daleko větší množství světelného šumu než se předpokládalo), polohy hvězd se nepodařilo proměřit s dostatečnou přesností v důsledku nedefinovatelné deformace způsobené špatným konstrukčním řešením držáku fotografických desek.

Expedice se od roku 1912 do současnosti konalo nejméně 15, celkem se podařilo vyfotografovati asi 500 obrazů hvězd, lze říci, že ohyb světla a jeho hyperbolická závislost *při slunečních zatměních* nebyly ověřeny s takovou přesností, aby mohly posloužit jako důkaz platnosti teorie relativity proti konkurenčním teoriím. Neznamena to, že by teorie relativity nebyla prověřena jinak, právě naopak – od sedmdesátých let prováděná radarová měření zpoždění signálu v gravitačním poli, měření ohybu světla (elektromagnetických vln) v radiové oblasti a v posledních letech i velmi přesná (vizuální) astrometrická pozorování sondy HIPPARCOS potvrdila platnost teorie relativity více než dostatečně. K tomu samozřejmě ještě přistupují pozorování stáčení perihelu Merkuru, stáčení pericentra binárních pulsarů a jejich postupné přibližování v důsledku vyzařování energie v podobě gravitačních vln a (pozemská) pozorování zpomalení času rychle se pohybujících hodin, což jsou jevy teorií relativity poměrně velmi přesně předpovězené.

### ... a současnost

Protože v roce 1999 měli střeoevropané po dlouhé době (a na velmi dlouhou dobu) jedinečnou příležitost spatřit úplné sluneční zatmění, i když někteří z nich museli popojet ke svým jižním sousedům, pokusili jsme se v rámci jedné skupiny expedice pořádané Západočeskou pobočkou České astronomické společnosti změřit relativistický ohyb světla v gravitačním poli Slunce. Dalekohled o průměru 15 cm a ohniskové délce 225 cm nám laskavě zapůjčila Hvězdárna a Planetárium hl. m. Prahy, na přípravě experimentu s námi též spolupracovali pracovníci Astronomického ústavu UK a Astronomického ústavu AV v Ondřejově. K fotografování jsme použili upravenou leteckou snímkovací komoru na planfilm šíře 188 mm, film AGFA AVIACON 200, citlivost ASA 200. Dalekohled poháněl mechanický gravitační hodinový stroj, který bylo možné malým posunem dvou odstředivých závaží velmi přesně seřizovat.

Cílem naší expedice bylo město Râmnicu-Vâlcea ve středním Rumunsku ležící téměř v místě maximálního zatmění. Přes počáteční obavy proběhla cesta téměř bez problémů a v neděli 8. srpna byla celá expedice nedaleko Râmnicu-Vâlcea v nadmořské výšce asi 500 m. n. m. Dva následující dny byly velmi horké (teplota ve stínu neklesla pod 30 °C), sestavování dalekohledu na plném slunci bylo proto náročné. V průběhu obou nocí jsme se snažili co nejpřesněji seříditi hodinový stroj, v noci před zatměním jsme navíc pořídili co možná nejvíce kontrolních snímků nejrůznějších hvězdných polí. Po ránu nás zaskočilo oblačné počasí, ještě při částečné fázi přecházely po obloze mraky, před totalitou (úplným zatměním) se však vyjasnilo a podařilo se nám poříditi dva třicetisekundové a jeden čtyřicetisekundový snímek okolí Slunce. Po skončení úplné fáze se opět počasí začalo horšit a před čtvrtým kontaktem (konec částečné fáze zatmění a konec zatmění) opět přecházely přes sluneční kotouč mraky.

Po vyvolání snímků se ukázalo, že na obloze i při totalitě přece jen zůstala řídká oblačnost (cirry) a že jasnost koróny a tedy i přesvětlení oblohy v okolí Slunce bylo poměrně vysoké. Bohužel se také ukázalo, že požadované přesnosti hodinového stroje se nám nepodařilo dosáhnout, což bylo způsobeno zejména velmi obtížnou kontrolou polohy dalekohledu (optická pozorování dalekohledem jsme mohli provádět pouze přes matnici, nikoli přes okulár – přesnost nočního pozorování pak značně klesá). V důsledku vyššího jasů koróny je nižší počet pozorovaných hvězd (slabší hvězdy koróna přezáří i ve větší vzdálenosti od Slunce), ověření hyperbolické závislosti ohybu světla proto s největší pravděpodobností nebude možné.