

Měření gravitačního ohybu světla, zejména při zatměních Slunce

Michael Prouza

Mezi tři základní testy obecné teorie relativity patří měření „nadbytečného“ stáčení perihela Merkura, měření gravitačního rudého posuvu spektrálních čar a měření gravitačního ohybu světla. Zatímco stáčení perihela vysvětlila teorie relativity téměř dokonale, měření rudého posuvu spektrálních dopadlo zpočátku dosti rozpačitě - rušivých vlivů bylo mnoho a chyba byla velká. Není proto divu, že na třetí test - měření gravitačního ohybu - byla hned po zveřejnění obecné teorie relativity upřena velká pozornost.

Ohyb a historie jeho fyzikálního popisu

Einsteinova myšlenka, že světlo mění v gravitačním poli svůj směr, podobně jako mění svůj směr ostatní hmotná tělesa, není nijak nová. Již sám Newton ve své Optice z roku 1704 se vlivem gravitace na světlo zabývá a v souladu s tehdy uznávanou korpuskulární (částicovou) teorií světla dochází k závěru, že tento vliv existuje. A představa, že gravitace má na světelné paprsky vliv, dále přetrvává - John Michell v roce 1783 a Pierre Simon Laplace v roce 1796 předpovídají „černou hvězdu“ - tedy předchůdce dnešní černé díry - hvězdu tak hmotnou, že z ní světlo nemůže uniknout.

V roce 1804 publikuje v německé astronomické ročence mnichovský astronom Johann Soldner práci s dlouhým, ale výstižným názvem „O odchylce světelného paprsku od jeho přímočarého pohybu v důsledku přitažlivosti tělesa, kolem něhož blízko prochází“. Zaobíral se tedy přesně tím, čím se o sto let později zabýval Einstein a oč se chceme v dalším zabývat i my. Dle pravidel klasické mechaniky lze totiž foton prolétající okolo hvězdy považovat za těleso pohybující se rychlostí světla po hyperbolické dráze v poli centrální síly. Známe-li pak navíc tzv. srážkový parametr, tedy nejmenší vzdálenost průletu fotonu od těžiště gravitujícího tělesa - hvězdy, můžeme snadno odvodit velikost úhlu ohybu. Vyjde nám, že tato velikost je přímo úměrná hmotnosti centrálního tělesa a nepřímo úměrná srážkovému parametru.

Zajímavé je, že kdybychom do Soldnerem vypočteného vztahu dosadili dnes platné konstanty, došli bychom pro

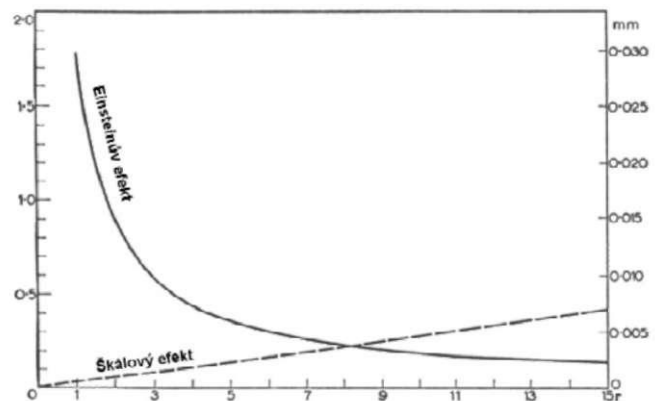
úhlový ohyb na slunečním okraji ke správné hodnotě - 1,75 úhlové vteřiny. Soldner se totiž při odvození dopustil chyby a výsledná hodnota je tak dvakrát větší, než by dle klasické newtonovské mechaniky měla být. Možná ještě pozoruhodnější je, že i Albert Einstein se napoprvé, v roce 1911, dopustil chyby při odvozování velikosti úhlové odchylky. Ta mu pak vyšla naopak jen poloviční, tedy 0,87". Jak si však sám Einstein v průběhu dalších čtyř let správně uvědomil a v roce 1915 pak publikoval, správná hodnota ohybu musí být dvakrát větší, tedy 1,75", poněvadž v jeho teorii není obecně zakřivována pouze dráha fotonu, ale je rovněž zakřiven již sám prostor, kterým se paprsek pohybuje.

Jak si povšiml Einstein již ve svojí první práci v roce 1911, je pro měření ohybu světla nejhodnější příležitost při slunečních zatměních. Slunce svým gravitačním polem deformuje vzájemně úhlové vzdálenosti jednotlivých hvězd z hvězdného pozadí. Oproti „normální“ - nezdeformované poloze jsou při zatmění hvězdy posunuty radiálně směrem od středu Slunce. Kvůli nepřímé úměře ohybu a vzdálenosti hvězdy od středu Slunce činí na okraji slunečního disku toto posunutí 1,75", ve vzdálenosti tří slunečních poloměrů už jen 0,5" a ve vzdálenosti osmi slunečních poloměrů už pouhé 0,2".

Slunce tedy funguje jako achromatická čočka (velikost ohybu nezávisí na barvě ohýbaného světla). Znamé gravitační čočky jsou založeny na stejném efektu - gravitačním ohybu světla. Jejich projevy jsou ale známy nikoli ze sluneční soustavy, ale z větších vzdáleností - buď jako vzájemné „čočkování“ galaxií, anebo jakožto „mikročočky“, kdy tělesa řádově s hmotností Jupitera způsobují dočasné zjasnění hvězd s typickým, dobře rozpoznatelným průběhem.

Ohyb a historie jeho měření

Einsteinův první článek z roku 1911 zaujal německého astronoma Erwina Freundlicha, který se nejprve snažil nalézt hvězdné obrazy na starších deskách z předchozích zatmění. Žádné hvězdy však nenalezl, neboť se setkal s jednou z velkých obtíží tohoto měření - s velkým jasnem koróny. Ta do vzdálenosti zhruba dvou až tří poloměrů



Srovnání velikostí gravitačního ohybu a škálového efektu o velikosti 0,1 mm pro „normální astrograf“ (ohnisková vzdálenost 3,43 m).

Vlevo škála v úhlových vteřinách, vpravo v milimetrech. Na vodorovné ose jsou sluneční poloměry.

Slunce spolehlivě přezařovala hvězdy, které by měly mít největší posuv. Rozhodl se proto uspořádat expedici na Krym, kde chtěl v roce 1914 pozorovat sluneční zatmění. Rusko však vstoupilo počátkem srpna s Německem do války a Freundlich byl zatčen. Po čase byl vyměněn za zajaté ruské důstojníky a propuštěn, ale zatmění pozorovat nestačil. Bylo to však možná dobře, neboť kdyby změřil hodnotu ohybu dvojnásobnou oproti tehdejší Einsteinově předpovědi, mohlo to pozici rodící se teorie vážně ohrozit. A tak prvenství při pozorování gravitačního ohybu získala expedice jiná - Eddingtonova.

Michael Prouza (*1978) - studuje fyziku na MFF UK, obor astronomie a astrofyzika.

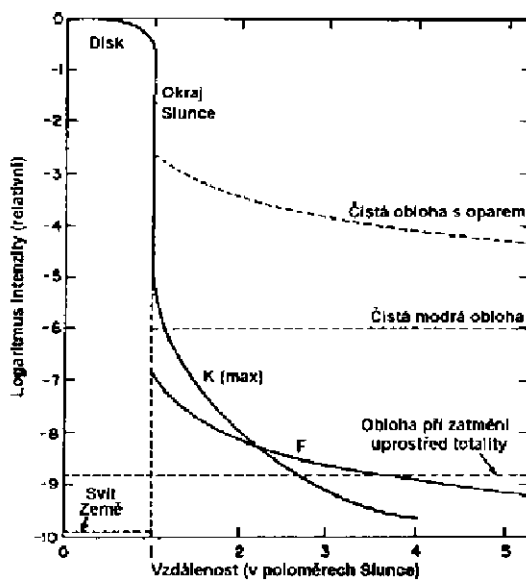
Eddingtonova expedice za zatměním 29. 5. 1919

Slavný britský astronom Artur Stanley Eddington byl vedoucím expedice, která vyrazila pozorovat zatmění 29. května 1919. Expedice se rozdělila na dvě pozorovací stanoviště - A. C. D. Crommelin s asistentem C. Davidsonem odjeli na sever Brazílie k městu Sobral, A. S. Eddington s asistentem E. T. Cottinghamem se vydali na Princův ostrov v Guinejském zálivu u pobřeží Afriky. Obě expedice byly nakonec úspěšné - zatmění se jim podařilo pozorovat, ačkoli ještě několik desítek minut před jeho začátkem bylo počasí na obou místech nevalné. Na deskách z Princova ostrova bylo nakonec zachyceno 5 hvězd vhodných pro zpracování a na snímcích ze Sobralu bylo pak takových hvězd 7.

O šest týdnů později byly na Sobralu pořízeny snímky téhož hvězdného pole, tentokrát již normálně v noci ve velké úhlové vzdálenosti od Slunce, kdy vliv gravitačního ohybu byl již zanedbatelný. Eddingtonovi a Crommelinovi se srovnávací snímky vůbec zhotovit nepodařilo, neboť museli Princův ostrov urychleně opustit kvůli obavám ze stávkových paroplavební společnosti. Srovnávací snímky zhotovili až po návratu v Oxfordu. V obou skupinách tak byly porušeny základní (ale až později vypracované) metodické pokyny pro pozorování. Jelikož změny poloh hvězd v řádu desetin úhlové vteřiny odpovídají změnám poloh hvězd na desce o velikosti zhruba setiny milimetru, je potřeba zajistit, aby podmínky při zatmění a při zhotovování srovnávacích polí byly stejné. Hvězdné pole by mělo být na stejném místě na obloze (alespoň v deklinaci) jako při zatmění, aby docházelo ke stejným deformacím optické soustavy dalekohledu - mělo by se tedy fotografovat zhruba půl roku po či před zatměním. Dalekohled by se neměl v mezičase rozebírat a při obou pozorováních by měla být stejná teplota (kvůli tepelné roztažnosti), aby na výsledek neměl vliv takzvaný škálový efekt. Ten je způsoben změnou vzdálenosti objektivu a fotografické desky, což způsobuje kvalitativně stejný efekt, jako vliv gravitace - hvězdy se posouvají radiálně od (resp. ke) Slunci. Například pro tzv. „normální astrograf“ s ohniskovou vzdáleností 3430 mm

a velikost změny vzdálenosti objektivu a desky o 0,1 mm je škálový efekt ve vzdálenosti 8 poloměrů Slunce stejný jako vliv gravitačního ohybu. Mělo by se tedy fotografovat na stejném místě a přístroje nepřepřevazovat ani nerozebírat.

Navzdory výše uvedeným nesnázím byly desky v průběhu tří měsíců po zatmění



Závislost intenzity koróny na vzdálenosti od Slunce (K a F označují jednotlivé složky koróny).

proměřeny a výsledek byl překvapující a potěšující - Eddingtonem vypočtená odchylka pro okraj slunečního disku vyšla 1,61" s asi 19% chybou - čili mnohem blíže předpovědi Einsteinově než předpovědi Newtonově. Eddington zprávu o výsledcích svojí expedice přednesl. 6. listopadu 1919 na schůzi Královské astronomické společnosti a cesta všeobecného přijetí Einsteinovy teorie byla otevřena. Někteří očití svědkové Eddingtonova projevu s nadsázkou uváděli, že při jeho slovech o výsledcích expedice se jim zdálo, že Newtonův obraz na stěně se povážlivě zatřásl a nahnul, což mělo být symbolem jedné epochy končící a nové počínající.

Další pozorování ohybu světla

Eddingtonova expedice pochopitelně nebyla expedicí poslední, ačkoli výsledky dalších expedic nebyly zejména kvůli výše zmíněným obtížím (jasu koróny a škálovému efektu) o mnoho lepší - chyba všech provedených měření byla vždy alespoň 10%. A to byla do úvahy brána jen velikost

odchyly a nikoli její směr, který se často výrazně lišil od předpokládaného radiálního posuvu. Celkem ohyb světla pozorovalo od roku 1919 do roku 1973 čtrnáct vědeckých expedic a byly změřeny úhlové posuvy asi 540 hvězd. Počátkem sedmdesátých let však začala při přesném prověřování tohoto efektu obecně teorie relativity dominovat radioastronomie, o níž se ještě zmíníme níže.

Naposledy bylo optické pozorování ohybu paprsků světla provedeno v roce 1973 v Mauretánii expedicí Texaské univerzity. I přes obrovskou pečlivost, s níž byla tato expedice připravována, se vyskytlo několik nedostatků. Dle původního předpokladu měla být expedice schopna proměřit polohu 1 500 hvězd do 10,5 magnitudy, ale ačkoli expedice měla svůj dalekohled umístěn v klimatizovaném stanu, který byl po celých šest měsíců mezi zatměním a pořizováním srovnávacích snímků hlídán ozbrojenou stráží mauretánského šejka, podařilo se změřit jen 150 hvězd. Počasí při zatmění totiž nebylo ideální, výslednou 10% chybu měření navíc ovlivnila závada na držáku desek, díky které docházelo k nedefinovatelné deformaci desek při jejich expozici.

Jak navíc poprvé upozornil koncem padesátých let A. A. Michajlov, kvůli vysoké intenzitě koróny u slunečního limbu dosud neexistují prakticky žádná pozorování hvězd, které by ležely blíže než dva sluneční poloměry od okraje Slunce, a tedy dosud není z pozorování ve vizuální oblasti potvrzena hyperbolická závislost ohybu světla. Naměřená úhlové posuvy hvězd by tedy bylo možné se stejnou či menší chybou proložit i přímkou namísto hyperboly.

Tuto situaci nezlepší ani výsledek měření družice HIPPARCOS z roku 1998, která při proměřování poloh 100 000 nejjasnějších hvězd oblohy ověřila velikost Einsteinova ohybu s přesností na pouhé dvě desetiny procenta. Ta totiž (pochopitelně) měřila pouze hvězdy ve velké úhlové vzdálenosti od Slunce, kde již hyperbolický tvar závislosti (nepřímá úměra na vzdálenosti od Slunce) není dobře patrná.

Radiová měření ohybu

Roku 1964 navrhl I. Shapiro radiová měření ohybu světla, přičemž je dle některých autorů překvapivé, že trvalo dvacet let od vzniku radioastronomie, než si této

možnosti někdo povšiml. Jeho návrh má tu výhodu, že koróna je pro rádiové vlny prakticky volně propustná a ty tedy mohou být pozorovány kdykoli (nejen při zatmění) a navíc až k samému okraji Slunce. Měření je založeno na radiointerferometrii a proměřuje se obvykle změna vzájemné úhlové vzdálenosti dvou intenzivních rádiových zdrojů (obvykle kvazarů) v průběhu několika dní. První měření bylo provedeno v roce 1969 a dosud poslední v roce 1995 s užitím VLBI (Very Long Baseline Interferometer), tedy s interferometrem o délce základny (vzdálenosti jednotlivých radioteleskopů) přes 5 000 km. V tomto posledně zmiňovaném měření bylo dosaženo vynikající přesnosti 0,17%.

Jistým problémem je, že dosud není přesně znám vliv koróny na rádiové záření, proto se obvykle měří na více různých rádiových frekvencích. Jednoznačně jsou však dosud provedená rádiová měření mnohem přesnější než optická (s výjimkou měření Hipparca) a navíc je díky nim spolehlivě prověřen i výše zmiňovaný hyperbolický tvar závislosti velikosti ohybu na vzdálenosti od Slunce.

Za 80 let od Eddingtonovy expedice se tak stalo měření velikosti gravitačního ohybu světla jedním z nejlépe ověřených efektů obecné teorie relativity. Pro jiné testy situace tak růžová není - například velikosti rudého gravitačního posuvu na hvězdách jsou dosud změřeny jen s přesností zhruba stokrát menší.

Poznámka

David Ondřích a autor článku se letos v létě v rámci studentské expedice Astronomického ústavu UK pokusili v Rumunsku o další fotografické měření gravitačního ohybu ve vizuální oblasti spektra. V nesnadných polních podmínkách se podařilo zapůjčeným dalekohledem pražské Štefánikovy hvězdárny s 15 cm AS objektivem zhotovit 5 fotografií úplného zatmění na letecký, 188 mm široký film Agfa Aviacon 200. Měření nebylo dosud zpracováno (hlavně pro dlouhotrvající problémy s vyvoláním filmu), avšak při předběžné analýze byly na fotografiích v okolí Slunce spolehlivě identifikovány nejméně tři nejjasnější hvězdy. Až budou výsledky známy, budeme vás o nich pocho-pitelně informovat.

První měření - 29. května 1919

10. listopadu 1917 rozhodl britský Stálý výbor pro sluneční zatmění, že uspořádá dvě expedice do pásma totality. K tomu cíli stanovil organizační podvýbor, vedený královským astronomem F. W. Dysonem. Jeho dalšími členy byli A. S. Eddington, W. A. Fowler a H. H. Turner.

Ze tří meteorologicky příznivých lokalit byla vybrána stanoviště v Sobralu (2h 47m 25s záp. délky; -3° 41' 33" již. šířky, 71 m. n. m.) na severu Brazílie a na Princově ostrově (0h 29m 32s v.d.; +1° 40', 150 m. n. m.) v Guinejském zálivu u západního pobřeží Afriky.

Pro expedice byly zapůjčeny tři přístroje: dva identické astrografy s průměrem objektivů 0,33 m a ohniskovou vzdáleností 3,4 m, zacloněné na 0,2 m (jeden z Greenwichské observatoře a druhý z Oxfordské univerzitní observatoře), a kromě toho astrograf s průměrem objektivu 0,1 m a ohniskem 5,85 m, zapůjčený Královskou irskou akademií.

Obě expedice vyrazily společně na palubě parníku Anselm v sobotu 8. března 1919 z Liverpoolu směrem na Madeiru. A. S. Eddington a jeho asistent E. T. Cottingham nastoupili 9. dubna na parník Portugal, jímž se plavili do přístavu San Antonio na Princově ostrově.

Pozorovatelé si vybrali místo Roca Sundy na severozápadě ostrova, kde instalovali oxfordský astrograf, rovněž zacloněný na průměr objektivu 0,2 m. První kontrolní snímky pořídili 16. května a kalibrační snímky (pro srovnání s oxfordskými) ve dnech 22. a 25. května. Nacvičili si také, co přesně budou při zatmění dělat - Cottingham exponoval snímky a hlídal chod hodinového stroje, zatímco Eddington vyměňoval kazety s deskami. Pětiminutová totalita měla nastat kolem 14 h 45 min místního času ve výši 44° nad obzorem, ale ještě půl hodiny předtím bylo víceméně zataženo a Slunce stěží prosvítalo mraky. Teplota se ustálila na 25 °C a i během totality bylo Slunce zakryto jemnými mraky.

Celkem se podařilo získat 16 snímků s expozicemi od 2 do 20 s. Hvězdy však byly jen na posledních 7 deskách a i zde byla mezní hvězdná velikost 6 mag. Na dvou deskách byly pouze 4 hvězdy, na čtyřech 5 hvězd a na jediném snímku 6 hvězd.

V závěru práce vychází odchylka pro okraj slunečního disku z měření na Princově ostrově $dP = (1,61'' \pm 0,30'')$, tj. relativní chyba 19 %.

Na slavnostní schůzi londýnské Královské společnosti a Královské astronomické společnosti ve čtvrtek 6. listopadu 1919 A. S. Eddington přednesl výsledky obou expedic.

Poslední měření - 11. srpna 1999

V průběhu roku 1995 se rozhodli členové Západočeské pobočky ČAS, že uspořádají více menších expedic podél pásu totality. V letech 1996 - 1999 se tři studenti Astronomického ústavu UK rozhodli zúčastnit v tomto rámci expedice do Rumunska. Ohyb světla si usmysleli změřit D. Ondřích a M. Prouza.

Pro rumunskou část expedice bylo vybráno místo poblíž města Pitești, těsně před odjezdem však bylo vytipováno méně vzdálené místo poblíž Rimnicu Vilcea, u obce Milcoiu (45°03'17" s.š.; 24°28'16" v.d.; 500 m.n.m.).

Pro expedici byl zapůjčen refraktor Štefánikovy hvězdárny v Praze s 0,15 m AS objektivem a ohniskovou vzdáleností 2,25 m, s připojenou fotokomorou na letecký film šíře 188 mm.

Expedice vyrazila již ve čtvrtek 3. srpna 1999 z Rokycan terénním automobilem zn. ARO, r.v. 1973 směrem na Budapešť. Cesta proběhla bez vážnějších potíží až do cílového města Rimnicu Vilcea jižně od Karpatkého oblouku.

Pozorovatelé si vybrali louku asi 1 km od obce Milcoiu, poblíž mezinárodní silnice na Pitești a Bukurešť. Instalovali zde dalekohled, největší obtíže byly s hodinovým strojem, který převozem utrpěl a musel být rozebrán, promazán a znovu sestaven. V průběhu dvou nocí před zatměním byly zhotoveny snímky kontrolních hvězdných polí v okolí Vegy a v okolí Plejád. Nacvičili si také, co přesně budou při zatmění dělat - Ondřích převíjel film a hlídal chod hodinového stroje, Prouza exponoval snímky. Dvou a půl minutová totalita nastala v 14h 02m místního času ve výši asi 60° nad obzorem, ještě tři čtvrtě hodiny před ní však stále přecházely mraky. Asi půl hodiny před a po totalitě bylo docela jasno, jen s jemným oparem. Teplota poklesla asi na 27 °C.

Celkem se podařilo získat 5 snímků s expozicemi od 0,1 do 40 s. Kvůli problémům s vyvoláním filmu byl tento zatím jen předběžně prohlédnut. Při této zběžné prohlídce byly na filmu identifikovány tři nejjasnější hvězdy.

Práce tedy zatím není hotova.

A tak ani slavnostní schůze nebyla...