

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Martin Šolc

Gravitační čočky, Einstein a Praha

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 44 (1999), No. 3, 233--248

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141000>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1999

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>

Gravitační čočky, Einstein a Praha

Martin Šolc, Praha

Úvod

Podnětem ke vzniku tohoto spíše historického přehledu je skutečnost, že v letošním roce 1999 uplynulo od Einsteinova narození 120 let, zároveň však také 80 let od úspěšného testu obecné teorie relativity při zatmění Slunce v roce 1919 a 20 let od observačního důkazu první gravitační čočky v roce 1979. Gravitační čočky na počátku představovaly čistě teoretický, akademický příklad na výpočet ohybu světla v gravitačním poli pomocí obecné teorie relativity. Mezi nepočatými příznivci obecné teorie relativity panovalo přesvědčení, že nalezení gravitačních čoček ve vesmíru je naprosto nepravděpodobné vzhledem k požadavku skoro přesného přímkového seřazení vzdáleného zdroje, pozorovatele a mezilehlého objektu způsobujícího svým gravitačním polem efekt čočky. Dnes jsou gravitační čočky ve středu pozornosti hned několika oblastí astrofyziky a kosmologie, například studia rádiových, infračervených, optických a ultrafialových obrazů vícenásobných kvazarů, studia světelných oblouků a obloučků, pátrání po skryté hmotě v galaxiích, určování Hubbleovy konstanty anebo hledání planet u hvězd naší Galaxie.

První úvahy o gravitačních čočkách byly pozoruhodně spojeny s českým prostředím; řadu z těchto souvislostí odhalil Petr Hadrava [1] a k mnohým směrům hledání dával podněty Zdeněk Horský, předčasně zesnulý vynikající historik astronomie (oba z Astronomického ústavu AV ČR). Bez jejich přispění by následující text nemohl mít svou podobu.

1. Světlo a gravitace v době předrelativistické

Problém působení gravitačního pole na světlo vzrušoval fyziky i filosofy už nejméně před dvěma stoletími. Dnes je přirozeným prostředkem pro zkoumání těchto otázek Einsteinova obecná teorie relativity. Ohyb světla v gravitačním poli hrál ostatně v začátcích obecné relativity jak roli motivace jejího rozvoje, tak také roli jednoho z prvních observačních testů. Předtím však byla k dispozici pouze Newtonova teorie gravitace a tu tedy využili badatelé, kteří výpočet šíření světla v gravitačním poli považovali za zajímavý problém. V prvním vydání Newtonovy *Optiky* z roku 1704 je vztahu světla a gravitace věnována hned první pojednávaná otázka: „*Nepůsobí*

Doc. RNDr. MARTIN ŠOLC, CSc. (1949), Astronomický ústav UK, Matematicko-fyzikální fakulta UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: solc@mbx.troja.mff.cuni.cz

tělesa na dálku také na světlo a neohýbají jeho paprsky; a není toto působení (caeteris paribus) silnější při menší vzdálenosti?“

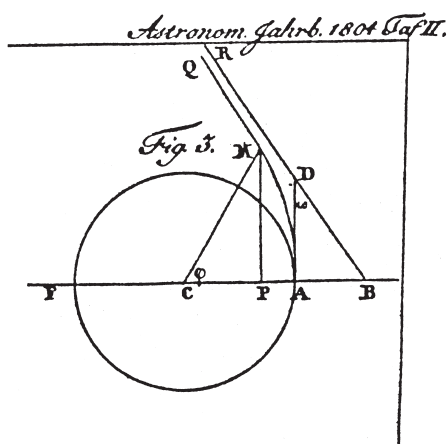
V podobné souvislosti se historické úvody monografií o gravitačních čočkách zmiňují také o dvou raných úvahách, porovnávajících únikovou rychlost z nějakého tělesa s rychlostí světla. První z nich je součástí dopisu anglického astronoma a geologa Johna Michella z roku 1783, který píše Henrymu Cavendishovi: „... jestliže by poloměr koule o stejné hustotě, jako má Slunce, byl v poměru 500 : 1 k poloměru slunečnímu, pak těleso padající na tuto kouli z nekonečna by dosáhlo jejího povrchu s rychlostí vyšší než je rychlost světla, a za předpokladu, že světlo je přitahováno toutéž silou úměrnou vis inertiae koule jako jiná tělesa, pak všechno světlo vyslané touto koulí bude nuceno se k ní navracet, totiž působením její vlastní gravitace...“ [2]. S podobnou myšlenkou přišel patrně nezávisle Pierre Simon Laplace v roce 1796, „že přitažlivá síla nebeského tělesa může být tak velká, že světlo ho nebude moci opustit“ [3]. Takový objekt by musil být naprosto černý, uzavřeli oba, a dospěli tak k nerelativistické představě černé díry.

Nerelativistický vztah pro ohyb světla odvodil mnichovský astronom Johann von Soldner v práci *O odchylce světelného paprsku od jeho přímočarého pohybu v důsledku přitažlivosti tělesa, kolem něhož blízko prochází*, otištěné v berlínské ročence na rok 1804 [4]. Podle klasické mechaniky má těleso přilétající s rychlostí v a srážkovým parametrem r hyperbickou dráhu a jeho směr letu se přítomností tělesa hmotnosti M odchýlí o úhel α daný vztahem

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{GM}{v^2 r},$$

kde G je gravitační konstanta, což při malé hodnotě argumentu — v celé této problematice jde o vteřiny nebo ještě řádově menší úhly — přejde ve vztah

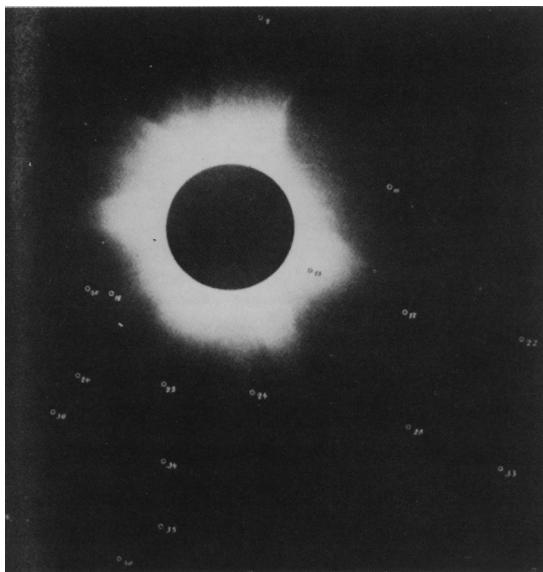
$$\alpha \simeq 2 \frac{GM}{v^2 r}.$$



Obr. 1. Změna směru světelného paprsku v gravitačním poli podle J. Soldnera [4].

(Na obrázku 1 je Soldnerův náčrtek, polovina odchylky je zde označena jako ω a $r = CA$, resp. CB , protože odchylka α je velmi malý úhel.) V případě světla dostaneme „newtonovskou“ hodnotu ohybu dosazením $v = c$. Pro paprsky procházející těsně kolem povrchu Slunce tak vyjde hodnota $0,85''$. Soldner proto v závěru práce připomíná, že odchylka je tak malá, že „při současném stavu praktické astronomie nevzniká potřeba brát v úvahu perturbace světelných paprsků v důsledku přitažlivosti nebeských těles“, a doufá, že mu nikdo nebude mít za zlé, že zacházel se světlem jako s hmotným objektem.

V době pražského pobytu Albert Einstein, bez znalosti Soldnerovy práce, odvodil pro odchytku paprsku tentýž vzorec. Předpokládal platnost principu ekvivalence a plochého Eukleidova prostoru, nezakřiveného gravitací. Práce *O vlivu tíže na šíření světla* vyšla v časopisu *Annalen der Physik* v roce 1911 [5]. Výsledek zaujal berlínského astronoma Erwina Freundlicha natolik, že uspořádal v roce 1914 expedici na Krym s cílem pořídit fotografie hvězdné oblohy poblíž Slunce při úplném zatmění. V okolí zakrytého Slunce se měly pozorovat obrazy hvězd zdánlivě nepatrně posunuté směrem od Slunce, přitom u hvězd promítajících se nedaleko Slunce měl být posuv větší než u hvězd vzdálenějších. Einstein o tomto posunutí napsal v úvodu pražské práce [5]: „*Na otázku, zda tíže má vliv na šíření světla, jsem hledal odpověď již v práci publikované před třemi lety. Vracím se znovu k tomuto tématu, protože mě tehdejší výklad neuspokojuje, a navíc také proto, že jsem teprve nyní zjistil, že jeden z nejdůležitějších důsledků uvedené práce lze prověřit experimentálně. Ukazuje se totiž, že podle dále vyložené teorie se paprsky procházející v blízkosti Slunce vlivem jeho gravitačního pole odkloní, takže musí vzniknout zdánlivé zvětšení úhlové vzdálenosti mezi stálící viditelnou poblíž Slunce a Sluncem samotným, a to téměř o jednu obloukovou vteřinu.*“ (Obrazy hvězdy pozorované ve směru kolmém ke směru ke Slunci jsou posunuty gravitací Slunce zhruba o jednu obloukovou milivteřinu, tedy o dnes už téměř měřitelnou hodnotu.)



Obr. 2. Snímek okolí Slunce při úplném zatmění 29. května 1919, pořízený expedicí v brazilském Sobralu. Obraz nejbližší z 5 měřených hvězd se následkem relativistického ohybu světla v gravitačním poli Slunce posunul o $1''$ směrem od středu Slunce; pro srovnání, úhlový průměr Slunce je cca $1800''$ [7].

Dne 1. srpna 1914, několik týdnů po příjezdu berlínské výpravy na vybrané místo u Černého moře, vstoupilo Rusko do 1. světové války a Freundlich se dostal do zajetí. I když byl později vyměněn za zajaté ruské důstojníky, zatmění 21. srpna pozorovat nestihl.

Einstein zatím zjistil na základě úplné sady rovnic obecné teorie relativity, že newtonovský vzorec odpovídá vlivu gravitačního pole na chod hodin, tj. „zpomalení“ šíření světla jako v opticky hustším prostředí, zatímco druhá polovina relativistického vzorce je způsobena zakřivením prostoru v okolí gravitujícího tělesa. Úhlová odchylka paprsku je tedy dvakrát větší než v „newtonovském“ vzorci, takže hodnota odchylky bude [6]

$$\alpha \simeq 4 \frac{GM}{c^2 r}.$$

To zvyšovalo naději, že se změny poloh hvězd při zatmění Slunce podaří změřit, ale vhodná doba pro ověření nastala až po válce. Do pásu totality při zatmění 29. května 1919 se vypravily dvě anglické expedice. K tomuto projektu dal podnět a také se ho účastnil Arthur Stanley Eddington, profesor na univerzitě v Cambridge, ředitel tamní hvězdárny a zanícený propagátor Einsteinovy obecné teorie relativity. Pozorování v brazilském Sobralu a na Principově ostrovu u pobřeží rovníkové Afriky navzdory počasí přineslo výsledky [7], [8]. I přes značnou nepřesnost (30 %) v měřených polohách hvězd na snímcích při zatmění (obr. 2) a mimo zatmění zněl celkový závěr ve prospěch relativistického Einsteinova vzorce a tím i ve prospěch celé obecné teorie relativity. Einstein sám neskrýval radost nad tímto potvrzením, třebaže o pozitivním výsledku byl naprosto přesvědčen už předem: „Milá matko! Dnes radostná zpráva! H. A. Lorentz mi telegrafoval, že anglické expedice opravdu potvrdily ohyb světla v blízkosti Slunce... Se srdečným pozdravem, Tvůj Albert“ (obr. 3).

29. V. 19

Liebe Mutter!

Heute eine freudige Nachricht. H. A. Lorentz hat mir telegraphiert, dass die englischen Expeditionen die Lichtablenkung in der Sonne wirklich bewiesen haben.

Obr. 3. Einsteinova zpráva matce o úspěšném pozorování ohybu světla při zatmění 29. 5. 1919.

2. Gravitační čočky zatím jen teoreticky

O gravitačních čočkách začalo přemýšlet nezávisle na sobě několik badatelů, kteří si uvědomili možnost vzniku „čočkového efektu“, tedy zjasnění obrazu v důsledku soustředění paprsků ohybem světla v gravitačním poli, jestliže paprsky od vzdáleného

zdroje budou na cestě k pozorovateli procházet dostatečně blízko kolem nějakého dostatečně hmotného objektu. Eddington například v roce 1920 ukázal [9], že v případě vhodného geometrického uspořádání zdroje záření, mezilehlého objektu způsobujícího gravitační čočku a místa pozorovatele může dojít k tomu, že pozorovatel kromě primárního obrazu vzdáleného zdroje zaregistruje ještě slabší obraz sekundární, položený na opačné straně od obrazu mezilehlého objektu než obraz primární. Zdůraznil rovněž, že jasnosti obou obrazů budou záviset na dokonalosti uspořádání všech tří objektů, což bylo později označováno jako *fotometrický projev* gravitační čočky; Eddingtonův výpočet zjasnění obrazů však nebyl správný. Jako první však termín „čočka“ použil O. J. Lodge již o rok dříve, i když zdůraznil, že ve striktním slova smyslu nelze mluvit o čočce, protože zde není žádná ohnisková vzdálenost [10].

V roce 1924 petřburský fyzik Orest Danilovič Chwolson zveřejnil krátké sdělení *O jedné možné formě fiktivních dvojhvězd* [11]. Maximální možnou odchylku paprsku způsobenou gravitací mezilehlé hvězdy označme jako α_0 , takový paprsek půjde teoreticky tečně k povrchu hvězdy. Bude-li zadní hvězda od mezilehlé v menší úhlové vzdálenosti než α_0 , pak velmi blízko obrazu mezilehlé hvězdy se objeví ještě jeden, sekundární obraz zadní hvězdy. Ten spolu s primárním obrazem může tvořit dvojici podobnou jakési fiktivní dvojhvězdě. Chwolson neuvažoval o tom, že sekundární obraz by v tomto případě musel být velmi slabý, ale zdůraznil, že při dokonalém uspořádání zadní hvězdy, mezilehlé hvězdy a pozorovatele do přímky se zadní hvězda zobrazí jako světelný prstenec kolem hvězdy mezilehlé. Tento prstenec bývá nazýván obvykle *Einsteinův prstenec*, i když první Einsteinova publikace o čočkách vyšla až o 12 let později než článek Chwolsonův. V závěru své krátké zprávy Chwolson píše, že nemůže posoudit, zda případ jeho fiktivních dvojhvězd může skutečně nastat.

Jako první a průkopnická práce bývá citován krátký Einsteinův dopis zveřejněný v prosincovém čísle *Science* (4. 12.) z roku 1936 pod názvem *Čočky podobné působení hvězdy v důsledku ohybu světla v (jejím) gravitačním poli* [12]. Einsteinův text začíná slovy: „Nedávno mne navštívil R. W. Mandl a požádal mne, abych publikoval výsledky drobného výpočtu, který jsem provedl na jeho žádost. Touto poznámkou vyhovuji jeho přání.“ Dále je propočten případ, kdy k pozorovateli dospějí dva paprsky ze vzdálené hvězdy, každý po jedné straně mezilehlé hvězdy, a odvozen vztah pro poměr zesílení světla paprsků. Einstein končí slovy, že „není velká šance tento jev pozorovat“.

Einstein tak usuzoval v případě hvězd, kdy úhlové odchylky jsou skutečně příliš malé na to, aby se v optickém dalekohledu oba obrazy vzdálené hvězdy rozlišily. Na druhé straně švýcarský astronom Fritz Zwicky, který se zabýval hlavně studiem galaxií, si uvědomil, že právě v případě galaxií čočkový jev je nejen pozorovatelný, ale docela pravděpodobný a že bude asi brzy objeven pozorováním. V práci [13] *Mlhoviny jako gravitační čočky* z roku 1937 píše: „Minulé léto se mi zmínil Dr. V. K. Zworykin (kterému tuto myšlenku navrhl Mr. Mandl), že působením gravitačního pole vzniká možnost zobrazení. V důsledku toho jsem provedl určité výpočty ukazující, že pro extragalaktické mlhoviny se nabízí mnohem lepší možnost pozorování jevu gravitační čočky než pro hvězdy.“ V další práci píše, že za předpokladu, že odhady hmotností galaxií v kupách galaxií na základě věty o viriálu jsou reálné (do té doby se uvažovalo o hmotnostech galaxií v řádu miliard hmotností Slunce, Zwickyho aplikace věty o vi-

riálu na kupu galaxií v souhvězdí Panny dávala hmotnosti asi čtyřístakrát vyšší), pak pravděpodobnost objevu, že nějaká galaxie působí jako gravitační čočka, je prakticky stoprocentní. Očekával dokonce, že prstencový útvar (Einsteinův prsteneček) by mohl být nalezen kolem každé řádově sté galaxie.

Zwicky popisuje počátky myšlenky gravitačních čoček ještě jednou v monografii [14] z roku 1957: „V roce 1935 napsal český elektroinženýr Mr. R. W. Mandl profesoru Albertu Einsteinovi, že hvězda mezi vzdálenou hvězdou a pozorovatelem může působit jako gravitační čočka...“ a dodává, že „Mr. Mandl o této myšlence mluvil také s Dr. V. K. Zworykinem, který mi ji pak sdělil“.

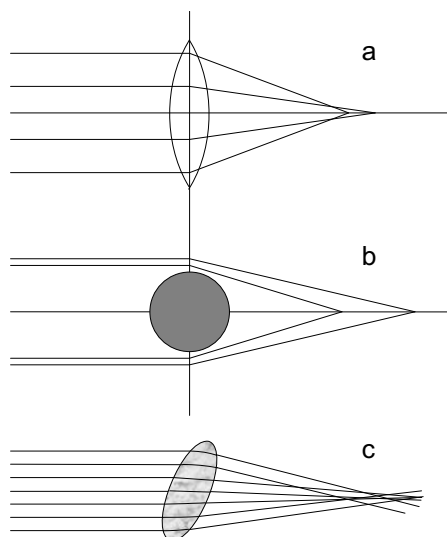
Kromě záhadného pana Mandla zde byl ještě další Čech, který se ve stejné době či ještě dříve zabýval myšlenkou gravitačních čoček. Astronom František Link provedl výpočet poloh dvou obrazů zdroje a odvodil i vztah pro zesílení jasu zdroje čočkou. Výsledky publikoval ve francouzských časopisech v roce 1936 [15] a 1937 [16]. Linkovým hlavním zaměřením však byla zatmění a zákryty [17], a projevy gravitačního ohybu světla při zákrytu jedné hvězdy druhou pro něho představovaly sice zajímavý, ale přece jen okrajový problém. Ze studia optických efektů v atmosféře Země při zatměních Měsíce měl vypracovaný postup pro výpočet fotometrických efektů při obecné závislosti úhlu ohybu na vzdálenosti paprsku od středu zakrývajícího tělesa, takže mu stačilo aplikovat tento postup na relativistický ohyb světla. Výsledek pak jako zprávu prezentoval na shromáždění 16. března 1936 francouzský fyzik Charles Fabry, tedy ještě před vydáním Einsteinova článku [12]. Nezávisle na něm se stejné problematice věnoval také Tichov na observatoři Pulkovo [18], [19].

Když rozlišovací schopnost radioteleskopů překonala rozlišení optických dalekohledů a když byly objeveny kvazary, naděje na nalezení gravitačních čoček postupně stoupala a po usilovném hledání na mnoha observatořích byl konečně v roce 1979 oznámen první objev — optické složky A a B kvazaru 0957+561 měly shodné spektrum, shodný červený posuv 1,41 a představovaly tak dva obrazy jediného vzdáleného kvazaru, způsobené gravitací mezilehlé galaxie s červeným posuvem 0,36. Objev se podařil týmu ve složení D. Walsh z univerzity Manchester a rádiové observatoře Jodrell Bank, R. F. Carswell z univerzity v Cambridge a R. J. Weymann ze Stewardovy observatoře arizonské univerzity. Základem úspěchu bylo systematické vyhledávání vhodných rádiových zdrojů radioteleskopem Mark IA (Jodrell Bank) na frekvenci 966 MHz, doplněné z dalších přehlídek oblohy např. radioteleskopem o průměru 100 m Národní radioastronomické observatoře USA (Green Bank) na vlnových délkách 6 a 11 cm [20].

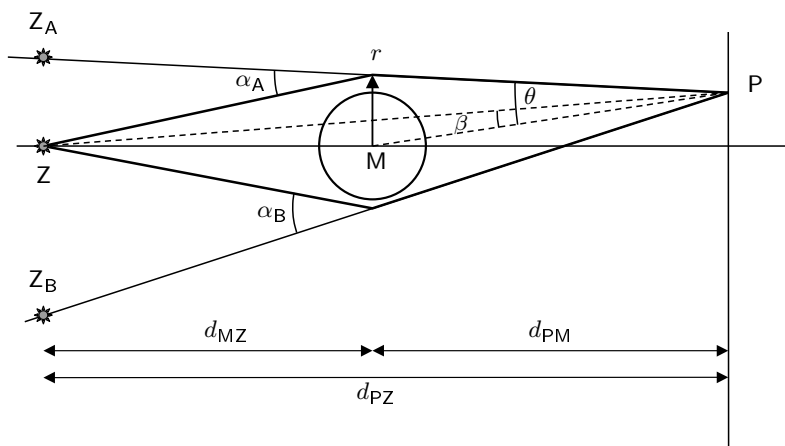
3. Jak pracuje gravitační čočka

Název gravitační čočka sice poukazuje na souvislost s optikou, ale nejběžnější příklad — spojná čočka — situaci kosmických čoček nevystihuje dobře. U gravitačních čoček totiž záleží na prostorovém rozložení hmoty, přesněji řečeno na průběhu gravitačního potenciálu. Sférická spojná čočka láme svazek paprsků rovnoběžných s optickou osou tak, že paprsky vzdálené od osy mají ohnisko blíže k čočce než paprsky běžící blízko osy, což je známý projev sférické vady. Gravitační pole neprůhledné koule se sféricky

symetrickým rozložením hustoty uvnitř ohýbá nejvíce paprsky procházející těsně po okraji koule, vzdálenější paprsky protínají optickou osu dále od koule, tedy právě naopak než u spojky (obr. 4). Při analogii s optikou nutno zdůraznit, že gravitační čočky nemají barevnou vadu, obrazy zdroje v různých vlnových délkách jsou na stejném místě.



Obr. 4. Odlišnosti v postupu paprsků spojnou optickou čočkou (a), gravitačním polem kolem koule (b) a gravitačním polem galaxie (c).



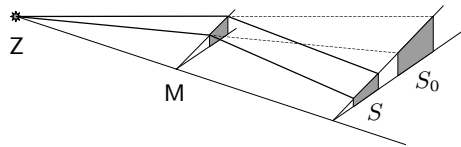
Obr. 5. Vznik hlavního (Z_A) a vedlejšího (Z_B) obrazu vzdáleného zdroje Z v důsledku přítomnosti mezilehlého tělesa (deflektoru) o hmotnosti M . Rovinu náčrtu definují středy zdroje Z , deflektoru M a pozorovatel P .

Pokud bude gravitační čočku způsobovat hmotný bod nebo koule M , odchýlený paprsek bude ležet v rovině náčrtu (obr. 5). V případě gravitační čočky bez sférické

symetrie nahradíme úhly α , β , θ dvourozměrnými směrovými vektory mířícími na příslušné body nebeské sféry a pro každý z obrazů zdroje pak musí platit rovnice

$$\vec{\alpha} d_{MZ} = (\vec{\theta} - \vec{\beta}) d_{PZ},$$

kde označení vyplývá z obrázku 5. Zesílení jasu obrazu zdroje v důsledku koncentrace odchýlených paprsků do plochy o menším obsahu S představuje obrázek 6; číselná hodnota je dána poměrem S_0/S , který závisí na hmotnosti mezilehlého objektu a na vzdálenostech od něho ke zdroji a k pozorovateli. V případě nesymetrických čoček je zjasnění obrazu dáno derivací transformace $\vec{\beta}$ na $\vec{\theta}$.

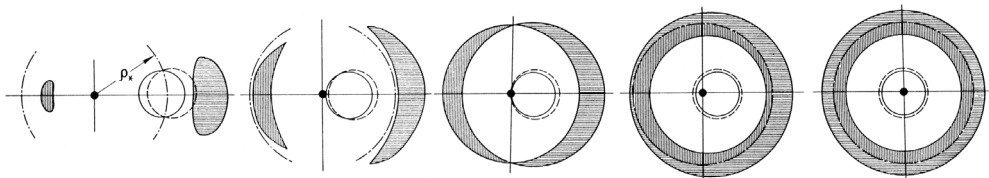


Obr. 6. Fotometrický jev u gravitačních čoček, zesílení jasu obrazu je dáno poměrem S_0/S . Podobný obrázek uvádí G. A. Tichov v pracích z let 1937 [18] a 1938 [19].

Dvojice obrazů v případě gravitační čočky vytvářené neprůhledným tělesem M vznikne způsobem naznačeným na obr. 5. Hlavní obraz A poskytuje paprsek odchýlený o menší úhel α_A , vedlejší obraz B dává paprsek, který prochází dále od tělesa M a je tedy odchýlen více, o úhel α_B . Budeme-li zdroj Z přibližovat k optické ose P–M, budou se úhly α_A a α_B k sobě blížit a v případě srovnání bodů Z, M, P do přímky nastane rovnost $\alpha_A = \alpha_B$ a v celé situaci vznikne rotační symetrie podle optické osy. Vzdálený zdroj v přesném zákrytu s M se zobrazí na Einsteinův prstenec, jehož úhlový poloměr α_E vyjadřuje vztah

$$\alpha_E^2 \simeq 4 \frac{GM}{c^2 R},$$

kde jsme dosadili za $r = \alpha_E \cdot R$ a R je vzdálenost pozorovatel P–těleso M. Poloměr Einsteinova prstence tedy závisí na hmotnosti mezilehlého tělesa, tloušťka prstence pak na úhlovém rozměru zdroje Z. Obrázek 7 ukazuje přechod od situace se dvěma obrazy zdroje k situaci vytvářející Einsteinův prstenec.



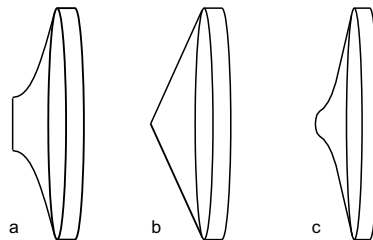
Obr. 7. Čočkový jev při zákrytu dvou hvězd (zakrývající, mezilehlou hvězdu znázorňuje čárkovaná kružnice, vzdálenou hvězdu kružnice kreslená plnou čarou). Vedlejší, slabší obraz je vlevo, jeho plošný obsah je menší a úhlová odchylka je větší. Poloměr Einsteinova prstence je označen ϱ_* [17].

V případě kvazarů a dalekých galaxií dává představu o vzdálenosti červený posuv čar měřený v jejich spektrech. Červený posuv $z = 1$ odpovídá vzdálenosti kolem 10 miliard světelných let (s nejistotou asi 50 %, v důsledku nejistoty hodnoty Hubbleovy konstanty). Vzdáleným zdrojem bývá kvazar nebo galaxie, mezilehlým objektem velmi hmotná galaxie. Už první pohled na obrázek 5 ukazuje, že délka hlavního a vedlejšího paprsku se poněkud liší. Pro hodnotu červeného posuvu není tento rozdíl podstatný, v hlavním i vedlejším obrazu kvazaru se naměří prakticky tentýž posuv. Skutečnou dobu, kterou světlu potrvá cesta podle každého paprsku, je nutno počítat na základě obecné relativity. Pokud však vzdálený zdroj mění svůj zářivý výkon, informace o změně přijde ve vedlejším, delším paprsku o něco později, a takové zpoždění bylo už skutečně pozorováno, například u kvazaru 0957+561 A, B. Určení doby postupu světla od zdroje k pozorovateli nabízí možnost využít Fermatův princip. Jestliže je pole gravitační čočky slabé, může se za index lomu považovat výraz $n = 1 - 2\varphi/c^2$, kde φ je newtonovský gravitační potenciál. Dráha paprsku má být taková, aby extrém měla optická dráha, resp. doba τ postupu světla od zdroje k pozorovateli

$$\tau = \frac{1}{c} \int n(x) dx = \frac{1}{c} \int dx - \frac{2}{c^3} \int \varphi dx,$$

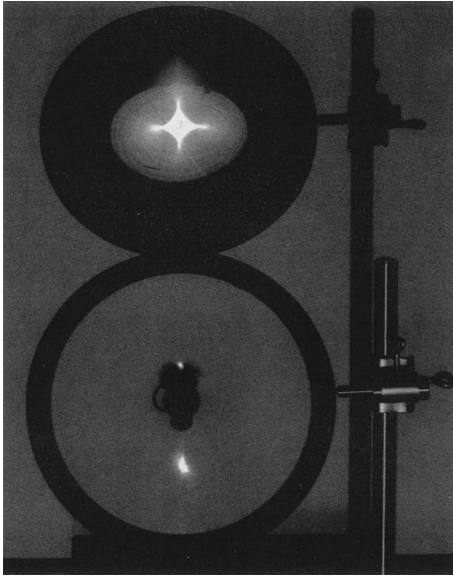
kde se integruje podél paprsku. První člen je geometrický, dráha dělená rychlostí, druhý člen představuje „zdržení“ světla v gravitačním poli.

V obecném případě u gravitačních čoček není žádná ohnisková vzdálenost. Přesto se paprsky z původně rovnoběžného svazku po průchodu čočkou mohou koncentrovat do některých oblastí prostoru více než do jiných. Má proto smysl mluvit o *kaustice* ve stejném významu jako v optice (z řeckého *καίειν* — hořet, pálit). Taková kaustika se vytváří teprve v určité vzdálenosti od mezilehlého objektu a při dalším vzdalování se zase vytrácí.



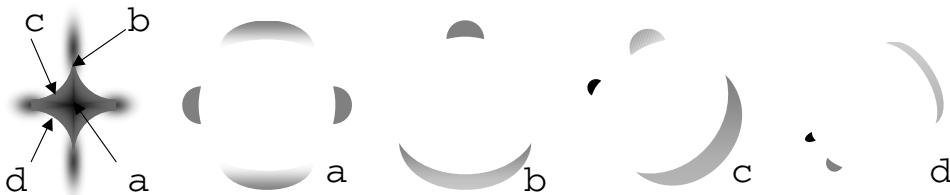
Obr. 8. Příklady optických čoček s ekvivalentním účinkem jako gravitační čočky způsobené kompaktní galaxií (a), eliptickou galaxií (b) a spirální galaxií s vyvinutým jádrem a slabšími rameny (c) (podle [21]).

Za kosmické gravitační čočky jsou zodpovědné galaxie v obecné poloze vzhledem ke spojnicí vzdálený zdroj–pozorovatel. Náklon galaxie spolu s rozložením hmoty v ní určuje charakter zobrazení zdroje. Obraz zdroje kreslí nejen paprsky jdoucí vně galaxie, ale také paprsky galaxií procházející. Podle rozložení hmoty v mezilehlé galaxii může vzniknout několikanásobný obraz zdroje, jak se pozoruje v mnoha případech

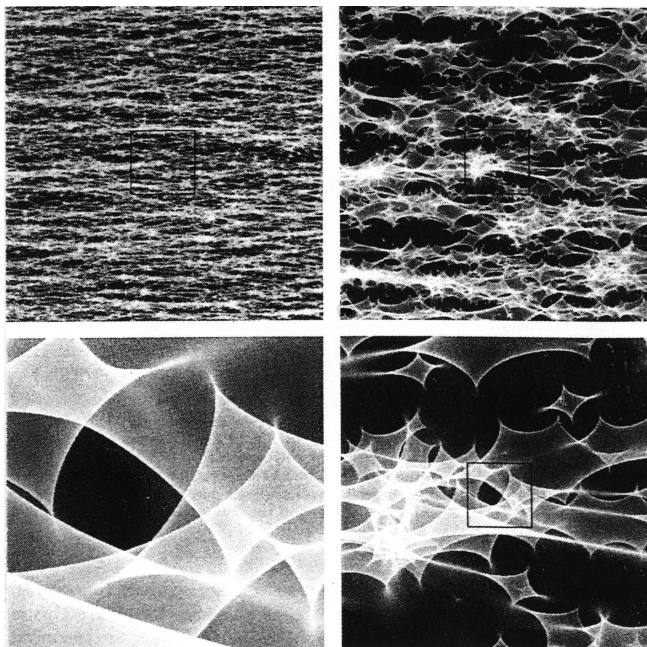


Obr. 9. Obraz na stínítku představuje řez kaustikou vzniklou zobrazením bodového zdroje čočkou (a) z obrázku 8 (kompaktní galaxie). Čočka je nakloněna vzhledem k optické ose otočením kolem vodorovné přímky. Nejvíce světla je koncentrováno v různých řezu kaustikou (angl. cusps) [22].

a jak se dá simulovat na počítačovém modelu. Na základě numerických modelů lze dokonce s jistou tolerancí najít tvary optických čoček, které by dávaly stejné zobrazení jako galaxie. Tři příklady jsou na obrázku 8. Takové čočky je možno vyrobit např. z plexiskla a experimentovat s nimi lze na optické lavici (viz [21], [22]). Pokud jsou čočky kolmé k optické ose, mají řezy kaustikami rovinami kolnými k ose tvary kružnic, resp. mezikruží. Při určitém náklonu čočky vzhledem k ose, což je vzhledem k náhodné orientaci galaxií v prostoru nutno očekávat téměř ve všech případech, vznikne kaustika tvaru kříže, kde nejjasnější místa jsou růžky (obr. 9). Co pozorovatel uvidí, záleží na jeho poloze v prostoru vzhledem ke kaustice (obr. 10). Na ose uvidí 4 obrazy, tzv. Einsteinův kříž (obr. 10 a) anebo čtyřlístek, na ose růžku jsou to jen dva obrazy (10 b), jeden tvaru světelného oblouku. Uvnitř kaustiky, ale blízko okraje (10 c) spatří pozorovatel trojitý obraz, při přesunu ven z kaustiky se dva malé obrazy přibližují k sobě a posléze se spojí (10 d). Nenakloněná čočka dá pro pozorovatele na ose Einsteinův prstenec (obr. 7).



Obr. 10. Vznik vícenásobných obrazů kvazarů závisí na poloze pozorovatele vzhledem ke kaustice.

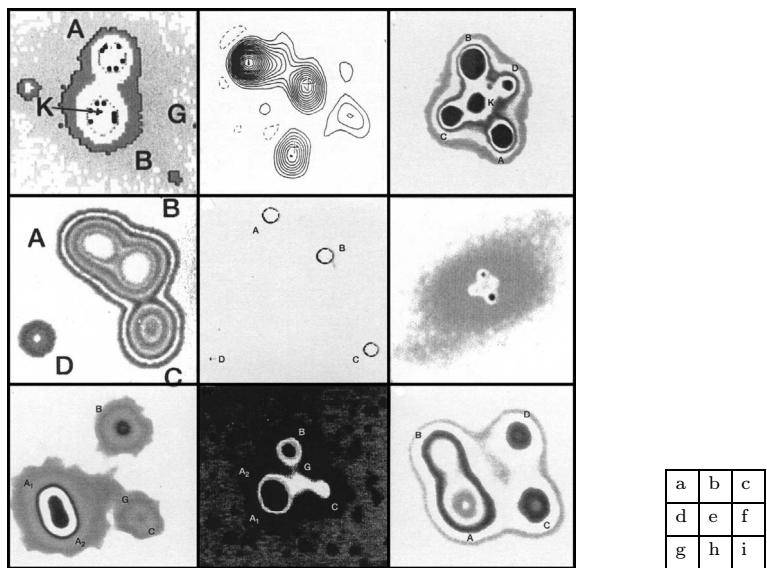


Obr. 11. Numerická simulace kaustik pro případ obrazu kvazaru 2237+0305A [23]. Obrázky následují za sebou ve směru hodinových ručiček. Struktura představuje vlastně mapu zesílení jasu obrazu, tmavá místa odpovídají zeslabení jasu, nejsvětlejší místa představují asi stonásobek nominálního jasu.

Při dostatečné úhlové rozlišovací schopnosti se projeví i to, že potenciál galaxie nemá hladký a plynulý průběh, ale že se skládá z příspěvků velkého množství jednotlivých hvězd, z nichž každá vytváří svou kaustiku. Na obrázku 11 je výsledek numerické simulace příkladu s parametry obrazu kvazaru 2237+0305A podle [23]. Pokud vzdálený zdroj bude skoro bodový, pak změna konfigurace v důsledku pohybu všech zúčastněných objektů povede ke kolísání jasnosti obrazu zdroje; při pohybu směrem svisle budou změny jasnosti kvaziperiodické a výraznější než při pohybu ve vodorovném směru. Faktor zesílení může dosáhnout i několik desítek, typická časová změna by trvala při pohybu pozorovatele rychlostí 600 km/s desítky až tisíce dnů. V případě vzdáleného zdroje s větším úhlovým rozměrem se detaily struktury zprůměrují a změny jasnosti budou menší, povlnnější a dlouhodobější. V posledních letech se objevuje řada prací, které vysvětlují pozorovanou proměnnost záření mnoha kvazarů právě tímto způsobem.

4. Čočky, světelné oblouky a mikročočky

První případ gravitační čočky, rozpoznáný v roce 1979, byl dvojitý kvazar 0957+561 A, B [20]. Jeho složky A, B mají úhlovou vzdálenost $5,7''$ (obr. 12 a) a červený posuv 1,4136. Vizualní magnitudy (17 mag) i spektra obou složek jsou prakticky

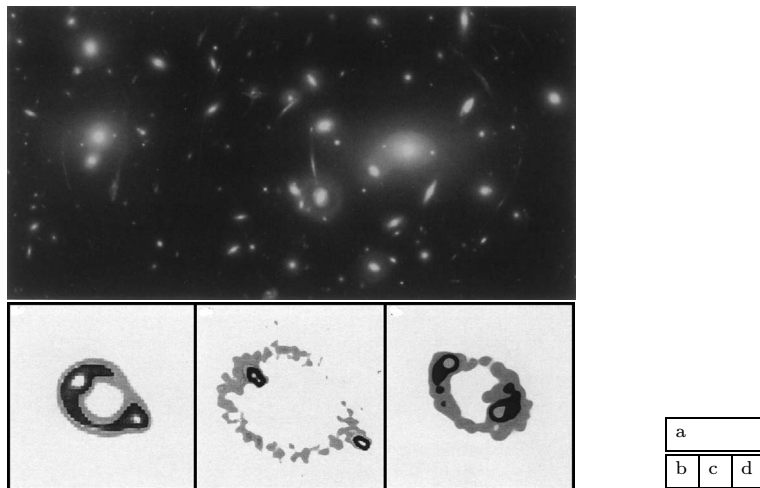


Obr. 12. Vícenásobné obrazy kvazarů: 0957+561 A,B v optickém oboru (a) a na 5 GHz (b), Cambridge [20]; (c) Einsteinův kříž 2237+0305, Canada-France-Hawaii telescope [21]; čtyřnásobný obraz kvazaru B1422+231 (d) optický (ESO) a rádiový (e) (A. Patnaik, Merlin); Einsteinův kříž 2237+0305 na pozadí spirální galaxie (f); PG1115+080 (g) Canada-France-Hawaii telescope [21]; MG0414+055 (h) Canada-France-Hawaii telescope + NTT [21]; čtyřlístek H1413+117 (i) Canada-France-Hawaii telescope [21].

identické a posuv čar složek se neliší o víc než 10 km/s. Gravitační čočku způsobuje kupa galaxií s červeným posuvem 0,39, pozorovaná 0,75'' od složky B směrem ke složce A, s magnitudou 18 v červeném oboru. Paprsek složky B prochází skrze největší galaxii této mezilehlé kupy galaxií a vzhledem k rozložení hmoty v ní představuje obraz B několik spojených vedlejších obrazů. Jádru této galaxie je označeno K, okraj je někde v místech G. Obrázek 12 b ukazuje tento kvazar v rádiovém oboru na frekvenci 5 GHz. Čtyřnásobný kvazar B1422+231 je v optickém oboru na obr. 12 d, v rádiovém na 12 e. Obrázky 12 c a 12 f jsou Einsteinovy kříže, 10 i je čtyřlístek, kde není známka objektu způsobujícího čočku, takže střed zůstává prázdný. Obrázky 12 g, h představují případ, kdy jsme blízko hranice kaustiky a dva ze čtyřnásobných obrazů se nám skoro spojují podobně jako na obrázku 10 c, d.

V případě kvazarů šlo o bodové zdroje. Pokud však zdrojem je galaxie, pak se čočkou její obraz zdeformuje do oblouku. Světelné oblouky a obloučky (luminous arcs, arclets) byly nalezeny v kompaktních a velmi hmotných kupách galaxií, jejichž příkladem je Abell 2218 na obrázku 13 a s červeným posuvem 0,175 ve vzdálenosti asi 1 až 2 miliardy světelných let. Snímek byl pořízen z HST v červeném světle. Je zde minimálně desítky oblouků a přes 100 obloučků. Jejich magnitudy leží mezi 23 a 27, zdroje jsou v různých vzdálenostech s červenými posuvy až do pětinašobku posuvu kupy tvořící čočku.

Einsteinův prstenec MG1654+1346 na obrázku 13 b, c vznikl zobrazením jádra aktivní galaxie; na frekvenci 15 GHz (13 c) je rozlišení lepší než na 5 GHz (13 b).



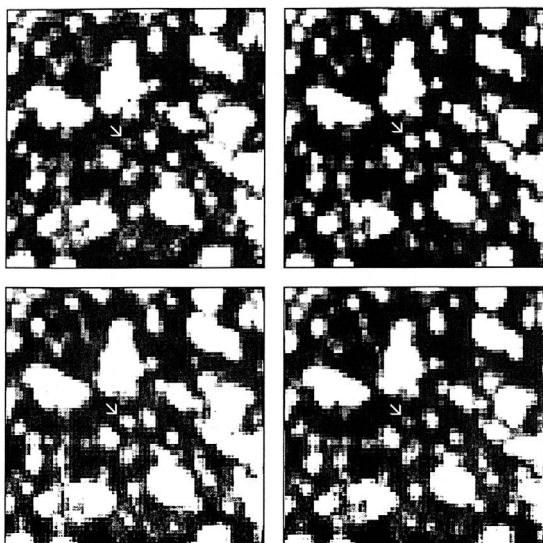
Obr. 13. (a) Kupa galaxií Abell 2218 v souhvězdí Draka (snímek HST, Warren Couch, Richard Ellis, NASA 1995). Einsteinovy prstence: MG1654+1346, J. N. Hewitt, Very Large Array; snímek na 5 GHz (b) a na 15 GHz (c); PKS1830–211, A. Patnaik, Merlin (d).

Jako uzlíky se zobrazil výtrysk z jádra galaxie. Einsteinův prsteneček PKS1830–211 na rádiové mapě 13 d má podobnou strukturu.

Dne 20. září 1994, současně na dvou konferencích v Itálii, dva týmy, francouzský a australsko-americký, oznámily nalezení gravitační mikročocky. Zatím bezejmenná hvězda ve Velkém Magellanově mračnu se zjasnila o více než dvě magnitudy a posléze opět pohasla na původní úroveň. Mikročocky způsobují velmi malé hvězdy anebo obří planety, které se při pohybu prostorem dostanou na omezenou dobu skoro přesně do přímky mezi nějakou hvězdou a Zemí. Obraz hvězdy se na tuto dobu zjasní a prozradí tak přítomnost čočkového tělesa, o jehož existenci bychom se jinak nemohli dozvědět. Na řadě observatoří se proto pravidelně snímají oblasti oblohy nejhustěji zaplněné hvězdami, jako jsou Velké a Malé Magellanovo mračno (LMC a SMC) anebo centrum naší Galaxie (BLG). Na rozdíl od proměnných hvězd jeví mikročocka plynulý a velmi symetrický nárůst a pokles jasnosti, identický na všech vlnových délkách. Protože četnost objevů mikročockek (zatím je jich známo do padesáti) je relativně vysoká, mohlo by jít o dosud stále chybějící baryonovou hmotu ve vesmíru. Původci mikročockových jevů dostali příznačný název MACHO (MASSive Compact Halo Object). Příklad gravitační mikročocky v LMC je na obrázku 14.

V lednu 1999 vzrušil světovou veřejnost jeden z dalších objevů tělesa o hmotnosti planety, jev dostal jméno MACHO-98-BLG-35. Z nesymetrie nárůstu a poklesu jasnosti usoudil mezinárodní tým na přítomnost rušivého gravitačního pole planety vyskytující se u hvězdy způsobující mikročocku; planeta podle modelu měla mít hmotnost asi dvou stotisícin hmotnosti hvězdy, tedy hmotnost srovnatelnou se Zemí.

A tak paradoxně gravitační čočky dovolují probádat podrobněji právě ta místa ve vesmíru, kde nám ve výhledu něco překáží.



Obr. 14. Hvězda BW71 117281 v souhvězdí Střelce, která má v levém horním poli magnitudu 20,4, se přechodně zjasnila v důsledku jevu mikročochky o 1 magnitudu a po cca 100 dnech pohasla opět na původní jasnost (OGLE — Optical Gravitational Lensing Experiment, obs. Las Campanas, Chile, září – říjen 1993).

5. Závěr — kdo byl opravdu první?

Na přímou otázku, kdo se jako první zabýval gravitačními čočkami s použitím obecné relativity, se vnucuje zdánlivě samozřejmá odpověď — no přece Albert Einstein! Je to kupodivu odpověď správná, i když vezmeme v úvahu veškeré nápady pánů Eddingtona, Chwolsona, Mandla, Zwickyho, Linka a dalších, které se vyskytly ještě před zveřejněním Einsteinovy práce v *Science* z roku 1936 [12]. Einstein byl skutečně první, a to už v roce 1912. V době pražského pobytu si poznamenal odvození vztahů pro čočky do zápisníku. Problém dokonce pokládal za tak zajímavý, že využil cestu do Berlína ke konzultaci s astronomem Erwinem Freundlichem. Ten však poukázal na mizivou pravděpodobnost, že by se v Galaxii tři hvězdy seřadily téměř přesně do přímky, a gravitační čočky posoudil jako jev naprosto nepravděpodobný. Einstein proto svůj výpočet vypustil z hlavy, zapomněl na něj a v roce 1936 jej na Mandlův popud provedl znovu. Čtenář se může přesvědčit na obrázcích 15 a, b, že až na označení veličin jsou oba výpočty velmi podobné.

V Einsteinově deníku z let 1910 až 1914 zabírá tematika gravitačních čoček osm stran a text je proložen různými poznámkami o schůzkách a adresách během pobytu v Berlíně, mezi daty 15. až 22. dubna 1912. (V Praze Einstein bydlel od dubna 1911 do července 1912.) Poznámky jsou přehledné a týkají se jak odvození vzorce pro dvojici obrazů zdroje, tak i zesílení jasu jejich obrazu. Za pražského pobytu Einstein čerpal astronomické poznatky nejen z literatury, ale také (a možná hlavně) z diskusí s kolegy. Astronomy zastupoval Václav Heinrich, pozdější ředitel Astronomického ústavu Karlovy univerzity, s nímž se Einstein scházel v kavárně Louvre na Národní třídě a diskutoval s ním i o relativitě. (Václav Heinrich také později patřil mezi zastávce obecné teorie relativity.) Dlouhým obloukem jsme se tedy vrátili opět do Prahy Einsteinových dnů, kde historie gravitačních čoček asi opravdu začala.

Alle Dorechte sind gleichbedeutend.

Heckersteinberg
Berlin-Bulevar
Machin Friedrichstr. 33.

$$r = s \frac{R+R'}{R} - \frac{R_0}{s}$$

$$r_0 = s_0 - \frac{1}{s_0} \dots (1)$$

$$s_0^2 = \frac{R+R'}{R R_0}$$

$$r = -\frac{R_0}{s} = -\frac{R_0}{s} \sqrt{\frac{R+R'}{R R_0}}$$

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= r \sqrt{\frac{R+R'}{R R_0}} \\ s_0 &= s \sqrt{\frac{R+R'}{R R_0}} \end{aligned} \right\} (2)$$

1) geht zum Winkel $\varphi = 90^\circ$
Von hier an Indizes weggelassen.
 $2 + r^2 = s^2 + \frac{1}{s^2}$
 $f = \varphi + \frac{r^2}{\varphi}$
 $df = (1 - \frac{r^2}{\varphi^2}) d\varphi = (1 - \frac{r^2}{\varphi^2}) d\varphi$
 $R df = \pm H d\varphi$
 $dR = \pm \frac{H}{1 - \frac{r^2}{\varphi^2}}$
 $R_{\text{tot}} = H \left\{ \frac{1}{1 - \frac{r^2}{\varphi^2}} + \frac{1}{\frac{r^2}{\varphi^2} - 1} \right\} \dots (3)$
 Klammer ergibt relative Relativität.
 $r = \frac{1}{x} - x$
 $\left. \begin{aligned} \frac{1}{x} - x \\ \frac{1}{x} - x \end{aligned} \right\} = \frac{1}{1-x^2} + \frac{1}{x^2-1}$

a)

2. V. 36.

Reif an Herrn Maxwell.

$$i = \frac{\xi \Delta_0}{\Delta} = \frac{\Delta}{b} + \frac{\Delta - x}{a}$$

Gleichung für Δ

$$\Delta^2 - \frac{x+b}{a+b} \Delta - \frac{\xi_0 \Delta_0 \alpha b}{a+b} = 0 \quad (\text{Wurzeln } \Delta_1 (> 0) \quad \Delta_2 (< 0))$$

$$\text{für } a=0 \quad \Delta = \sqrt{\frac{\xi_0 \Delta_0 \alpha}{1 + \frac{a}{b}}} \quad \text{Schrittweite } \frac{\Delta}{a} = \sqrt{\frac{\xi_0 \Delta_0}{a(1 + \frac{a}{b})}}$$

$$\Delta_1 + \Delta_2 = -\xi \quad \Delta_1 \Delta_2 = -A$$

$$\Delta_1 + \Delta_2 = \sqrt{\xi^2 + 4A}$$

Verhältnis der Flächen $\frac{a(\Delta_1^2 - \Delta_2^2)}{d(x^2)}$

$$V = \left(1 + \frac{a}{b}\right)^2 \frac{a(\Delta_1^2 - \Delta_2^2)}{d(x^2)^2} = \frac{d(\Delta_1^2 - \Delta_2^2)}{d(x^2)} = \frac{a}{d(x^2)} \sqrt{(\xi^2)^2 + 4A\xi^2}$$

$$= \frac{2\xi \sqrt{\xi^2 + 4A}}{\xi \sqrt{\xi^2 + 4A}} = \frac{\sqrt{A}}{\xi} \frac{1 + \frac{\xi^2}{4A}}{\sqrt{1 + \frac{\xi^2}{4A}}} = \frac{\sqrt{A}}{\xi}$$

Für große V

$$V = \frac{\sqrt{A}}{\xi} = \sqrt{\xi_0 \Delta_0 \alpha} \frac{a+b}{\xi}$$

b)

Obr. 15. Stránky z pražského Einsteinova zápisníku (a) a zápisníku z roku 1936 (b) [24].

L i t e r a t u r a

- [1] HADRAVA, P.: *Historie gravitačních čoček*. Ondřejovská hvězdárna 1898–1998. Sborník o české a moravské astronomii uspořádaný ke 100. výročí ondřejovské hvězdárny a 650. výročí univerzity Karlovy. Vesmír, Praha 1998, str. 136–137; též *Kozmos 13* (1979), str. 183.
- [2] MICHELL, J.: *On the means of discovering the distance, magnitude, etc. of the fixed stars* ... Transactions of the Royal Soc. London *74* (1784), str. 35; také v knize *Black holes: Selected reprints*, DETWEILER, S. (ed.), Amer. Assoc. of Physics Teachers, Stony Brook, NY 1982.
- [3] LAPLACE, P. S.: *Exposition du système du monde* (1795); také v knize HAWKING, S. W., ELLIS, G. F. R.: *The large scale structure of space-time*, Cambridge University Press, Cambridge 1973.
- [4] SOLDNER, J.: *Über die Ablenkung eines Lichtstrahls von seiner geradlinigen Bewegung durch die Attraktion eines Weltkörpers, an welchem er nahe vorbeigeht*. Berliner Astron. Jahrbuch (1804), str. 161.
- [5] EINSTEIN, A.: *Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes*. Ann. d. Phys. *35* (1911), 898–908.
- [6] EINSTEIN, A.: *Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsberichte Preuss. Akad. Wissensch., erster Halbband, 1915, str. 831.
- [7] DYSON, F. W., EDDINGTON, S. A., DAVIDSON, C.: *A determination of the deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919*. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, *220* (1920), 291–333.
- [8] HAVRÁNEK, J., ŠOLC, M., GRYGAR, J.: *V Praze o Einsteinovi a o Einsteinovi v Praze*. Vesmír *58* (1979), 178–183.
- [9] EDDINGTON, A. S.: *Space, time and gravitation*. Cambridge Univ. Press, Cambridge 1920.
- [10] LODGE, O. J.: *Gravitation and light*. Nature *104* (1919), str. 354.
- [11] CHWOLSON, O. D.: *Über eine mögliche Form fiktiver Doppelsterne*. Astronomische Nachrichten *221* (1924), str. 329.
- [12] EINSTEIN, A.: *Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field*. Science *84* (1936), 506–507.
- [13] ZWICKY, F.: *Nebulae as Gravitational Lenses*. Phys. Rev. *51* (1937), str. 290.
- [14] ZWICKY, F.: *Morphological astronomy*. Springer 1957, 215–216.
- [15] LINK, F.: *Sur les conséquences photométriques de la déviation d'Einstein*. Compt. rend. *202* (1936), str. 917.
- [16] LINK, F.: *Sur les conséquences photométriques de la déviation d'Einstein*. Bull. Astronomique *10* (1937), 73–90.
- [17] LINK, F.: *Eclipse Phenomena in Astronomy*. Springer Berlin-Heidelberg-New York 1969, str. 258.
- [18] TICHOV, G. A.: C. R. Acad. Sci. Moscow, *16* (1937), 199.
- [19] TICHOV, G. A.: Bulletin Pulkovo Obs. *16* (1938), No. 130.
- [20] WALSH, D., CARSWELL, R. F., WEYMANN, R. J.: *0957+561 A,B: Twin quastellar object or gravitational lens?* Nature *279* (1979), 381–384.
- [21] REFSDAL, S., SURDEJ, J.: *Gravitational Lenses*. Reports on Progress in Physics *56* (1994), str. 117.
- [22] BORGEEST, U., SCHRAMM, K.-J.: *Bilder von Gravitationslinsen*. Sterne und Weltraum *34* (1995), 24.
- [23] WAMBSGANSS, J., PACZYNSKI, B., KATZ, N.: *A microlensing model for QSO 2237+0305A*. Astrophys. Jour. *352* (1990), 407.
- [24] RENN, J., SAUER, T., STACHEL, J.: *The origin of gravitational lensing: A postscript to Einstein's 1936 Science paper*. Science *275* (1997), 184–186.