

Posudek oponenta na disertační práci Jana Schee

Disertační práce *Optical phenomena in curved spacetimes* Jana Schee je věnována pohybu testovacích fotonů v určitých astrofyzikálně zajímavých typech prostoročasů a observačním důsledkům jeho vlastností. V kapitole 1 jsou shrnuty základní údaje o uvažovaných prostoročasech a nastíněny optické efekty, kterým bude dále věnována pozornost. Studium těchto efektů je pak náplní kapitol 2 a 3, které již přinášejí i původní výsledky.

V kapitole 2 autor uvažuje pole „bránové“ Kerrovy černé díry, t.j. izolované rotující černé díry, která „žije“ na prostoročasové nadploše v určité pětirozměrné varietě. Všechna fyzikální pole působí v rámci této představy jen na čtyřrozměrné bráně, gravitace však ve všech pěti dimenzích. Díky tomu se čtyřrozměrná část odpovídajícího řešení Einsteinových rovnic liší od obvyklého řešení Kerrova; vliv extra rozměru je efektivně popsán tzv. slapovým parametrem, který v metrice zaujímá stejné místo jako čtverec elektrického náboje v geometrii Kerrově-Newmanově (na rozdíl od toho však může nabývat záporných hodnot). Hlavní otázkou kapitoly 2 je vliv dodatečného, slapového parametru na šíření světla, konkrétně na tvar únikových fotonových kuželů příslušejících různým pozorovatelům a jejich doplňků (představujících oblast, kterou v zorném poli těchto pozorovatelů zabírá černá díra), dále na ohyb a frekvenční posun záření vysílaného akrečním diskem kolem černé díry, speciálně pak na tvar spektrální čáry záření jeho jednotlivé orbity, na světelnou křivku bodového zdroje na takové orbitě a na časové zpoždění mezi přímým a prvním „vyšším“ obrazem zdroje nacházejícího se „za“ černou dírou.

Kapitola 3 je věnována úvahám kosmologickým. Konkrétně je studován tzv. Reesův-Sciamův efekt, tedy vliv velkoškálových nehomogenit ve vesmíru na pozorované rozložení teploty reliktního mikrovlnného záření. Autor uvažuje případ s „vakuolou“ popsanou Schwarzschildovou-de Sitterovou metrikou (v rámci plochého Friedmannova-Lemaîtreova vesmíru s kladnou kosmologickou konstantou a s nulovým tlakem) a zvláště upozorňuje na lom paprsků na hranici vakuoly, který v literatuře nebyl náležitě započítán. Vliv lomu pak posuzuje v závislosti na vzájemné poloze pozorovatele a vakuoly a na kosmologické době, kdy záření vakuolou prochází. Hlavním výsledkem této části je zjištění, že na rozdíl od standardních Friedmannových vesmírů může mít v případě kladné kosmologické konstanty lom na povrchu vakuoly podstatný význam, a to hlavně v případě vakuoly vyskytující se „na malém z “ – tedy nedaleko od pozorovatele.

Hodnotící část posudku začnu u méně zdařilé stránky práce, a tou je stránka výkladová. V disertaci se snad nevyskytují vysloveně chybná tvrzení, ale některé výroky či celé úseky textu jsou na hranici správnosti / úplnosti, nebo jsou minimálně zavádějící. Týká se to zejména úvodních partií kapitol. Většina nedostatků tohoto typu vyplyne až při přečtení větší části textu, ale některé přesto uvedu. V samotném úvodu práce je např. věta „Když se Einsteinovy rovnice aplikují na vesmír jako celek, naleznou se Friedmannovy rovnice, které nám říkají, že vesmír expanduje.“ – což není nutně pravda. Hned ob větu dále je (jako *první* informace o rozložení látky) uvedeno „Vesmír není dokonale homogenní a izotropní.“ Podobně působí trochu vytrženě výroky o strunových teoriích jako „několika pokusech, které se zdají vést k teorii, která funguje na Planckových škálách“ (kvantová gravitace zmiňována není), a hned nato o Randallově-Sundrumově modelu (*jednom z řady* bránových modelů) jako „dalším přístupu, jak zacházet s dodatečnými rozměry“ (nutno ovšem uznat, že sám původní článek R&S má vlastně podobný název). Těžko pochopitelná je poslední věta 1. odst. kapitoly 2 či druhá část 2. věty 2. odstavce tamtéž. Na str. 19-20 není jasné, zda se věta „v současnosti není známo žádné přesné 5D řešení“ nevyklučuje s tím, že hned vzápětí jsou popisována (a

poté studována) speciální řešení, která na bráně indukují statickou či rotující černou díru. (Není mimochodem řečeno, proč se uvažuje právě 5D varieta. V literatuře jsou často studovány 6D případy, tedy se *dvěma* dodatečnými rozměry.)

Vyskytuje se také řada výroků, které jsou zcela správné, ale těžko je může pochopit čtenář, který není v dané úzké oblasti odborník. Je to způsobeno i tím, že text je někdy málo „provázaný“ – občas jako by se ve výkladu začínalo znovu, zatímco některé výroky přicházejí naopak „zčistajasna“. V druhé větě za rovnicí (2.37) je např. náhle v závorce poznamenáno „t.j. existenci horizontů“ (v této kapitole přitom dříve o horizontech vůbec zmínka nebyla). Velmi nevhodně je koncipována kap. 2.4: těžko jí věcně porozumí někdo, kdo se (na rozdíl ode mne) sám přepisem Carterových rovnic na eliptické integrály aktivně nezabýval, už proto, že se zde průběžně odkazuje na partie, které teprve přijdou (viz hned první větu kapitoly).

Řada nedostatků se vyskytuje průběžně v angličtině, hlavně povahy formulační a pravopisné, ale i dost prohrěšků typografických a překlepů (to se týká i seznamu literatury). Z překlepů uvedu jen některé, které se vícekrát opakují: ve jméně Schwarzschild chybí všude až na několik výjimek písmeno „s“, na vícero místech je „killing“ místo „Killing“, několikrát „keplerian“, někde i „kerr“, nesprávně jsou také „silhouette“ a „vakuola“. V úvodu jsou u některých pojmů – myslím nevhodně – používána velká písmena (Electromagnetic Radiation, The General relativity, The Universe, The String Theories).

Po faktické stránce jsem práci podrobně nekontroloval, uvedu jen stručně některé drobnější připomínky. V rovnici (1) je špatně znaménko u kosmologického členu. Za rovnicí (1.8) má být horizont na $r=2M$ (přesněji mělo by být udáno bezrozměrné $r=2$); o kousek dál by mělo být řečeno, že ζ^{μ} je časupodobný jen nad horizontem, a že s existencí Killingových vektorů (zde) souvisejí konstanty *geodetického* (ne jakéhokoli) pohybu; za rovnicí (1.16) by se mělo uvést, jak je definováno L ; před rovnicí (1.18) by se mělo dodat, že rovina pohybu se nastavuje BÚNO na $\theta=\pi/2$, což vede k $p^{\theta}=0$ a $L=L_z$... Na str. 10 dole není správně, že „there is only one motion constant“ – viz hned o pár řádků dále. Obrázek 1.1 je těžké pochopit, navíc vznikl nesprávně kopií obr. 3.3 a popisku k obr. 3.1 (nejsou na něm *tři* fotony; obrázky 3.1 a 3.3 už jsou v pořádku). Proč „covariant energy“ na str. 12 dole? V metrice (1.37) chybí v azimutálním elementu $\sin^2\theta$ a v posledním členu a . V rovnicích (1.41) a (1.42) by bylo vhodnější značit hybnosti p_{μ} . Rovnice (1.53) má znít $Q=K-(\Phi-aE)^2$ (bylo by ovšem lepší značit konstantu p_{ϕ} stejně jako jinde L_z , popř. naopak). Brána je střídavě zmiňována jako 3D a 4D objekt. Na str. 29 je druhý obrázek o dost menší než oblast vyznačená jako „2“ na obr. 2.2 (a ani další zoom pod tím není dobře vymezen). V rovnici (2.42) není zrušeno M ; odkazy nad (2.45) nedopadly dobře. Pod rovnicí (2.50) by se mělo říci, že uvažování jsou RFF, kteří v nekonečnu přesně stojí a mají nulový azimutální moment hybnosti. V rovnici (2.48) má být ve φ -složce výraz $(r^2\pm aY)$ *mimo* odmocninu. Bylo by vhodné uvést odvození výsledku (2.80). Vztah (2.81) není správně – má mít v čitateli Σ a ve jmenovateli $\Sigma-2Mr+b+2a\Omega(2Mr-b)\sin^2\theta-A\Omega^2\sin^2\theta$ (uvádím v normálních geometrizovaných jednotkách, protože v bezrozměrných se nedá dobře provádět rozměrová kontrola – ta by právě u (2.81) chybu odhalila); každopádně pro LNRF se výraz redukuje na $(u^t)^2=A/(\Sigma A)$ – viz (2.40); chyba se patrně přenáší i do rovnice (2.83) níže. Proč se někde hovoří o „Keplerian ring“, kdežto jinde o „isoradial geodesics“? Obr. 66 není ilustrací vlivu parametru b , ale prostě schematem chodu přímého a 1. nepřímého paprsku.

Vývoj oblastí, které jsou předmětem disertace, soustavně nesledují, ale v přehledu literatury mi chyběly některé práce – např. optickými efekty kolem černých děr se zabývaly (také) články Cunningham C. T., Phys. Rev. D 12 (1975) 323; Luminet J.-P., Astron. Astrophys. 75

(1979) 228; Bao G., Hadrava P., Østgaard E., *Astrophys. J.* 425 (1994) 63 a 435 (1994) 55; Müller T., *Gen. Rel. Grav.* 40 (2008) 2185 (a odkazy tam uvedené); a rovněž práce kolegů z AsÚ AV ČR (zejména M. Dovčiaka a M. Bursy). Speciálně u vyšetřování „stínu“ černé díry bych doporučil pozornosti články Falcke H., Melia F., Agol E., *Astrophys. J.* 528 (2000) L13; Takahashi R., *Astrophys. J.* 611 (2004) 996; Huang L., Cai M., Shen Z.-Q., Yuan F., *MNRAS* 379 (2007) 833.

Uvedené kritické připomínky by ovšem neměly zakrýt vědecký přínos teze. Práce Mgr. Jana Schee nesporně přináší nové a původní výsledky v oblasti, která se rychle rozvíjí a která bude jistě poskytovat řadu teoretických i observačních podnětů i v budoucnosti. Otázka pohybu fotonů je sice v zásadě jednoduchá, ale doladění výsledků integrování většího množství světočar do podoby, která by byla porovnatelná s pozorováním, vyžaduje velkou pečlivost při rozmyšlení, programování i vykreslování. Týká se to zejména šíření světla v polích černých děr, v jejichž blízkosti jsou optické efekty extrémně silné a výsledné aspekty vzhledu sledovaných zdrojů mohou být velmi složité (včetně výskytu iregularit typu kaustik apod.). Kladnou stránkou práce je také to, že o efektech se jen obecně nehovoří, ale studium všech je dovedeno až po konkrétní výpočty (a zdařilé obrázky), jejichž výsledky jsou pak kvantitativně porovnány s observačními možnostmi. Mám v této souvislosti tři interpretační poznámky: (i) Efektivní význam parametru b je nejlépe vidět již na samotné metrice, konkrétně z jeho pozice ve funkcích $\Delta = r^2 - 2Mr + a^2 + b$, $\omega = (a/A)(2Mr - b)$ (úhlová rychlost draggingu). Bylo by dobré věnovat tomu pár vět hned v místě, kde se metrika poprvé objeví, a ne až při hodnocení obrázků (viz i poznámky v tom směru učiněné na str. 59 dole). (ii) Je realistické změření „shiftu“ stínu černé díry ve středu Galaxie? Vyžadovalo by to nejen absenci různých rušivých vlivů látky přítomné kolem díry a velkou rozlišovací schopnost, ale hlavně spolehlivou a velmi přesnou znalost aktuální polohy černé díry. (Pozn.: Některé úvahy v odst. 2.6.7 – speciálně „time delay“ – jsou také založeny na geometrických předpokladech, které nemusí reálně platit, především že zdroj se nachází přesně v ekvatoriální rovině černé díry a že tato rovina je totožná s ekvatoriální rovinou Galaxie.) (iii) Při popisování poměrů v blízkosti černých děr je třeba zvláštní opatrnosti u délkových (a samozřejmě i časových) údajů. Souřadnicové výroky je vždy dobré kontrolovat také nějakou invariantní mírou typu vlastní radiální vzdálenosti či obvodového poloměru. – Jedná se o poznámku k posuzování „vzdálenosti od horizontu“, viz např. text na str. 37 a příslušné obrázky nebo text na str. 61. Některé obrázky (např. 2.27) je těžké vůbec přímočaře interpretovat, poněvadž se změnou parametru b se mění celý prostoročas, zejména pak poloha horizontu, a tedy efektivně i poloha zdroje. (To ovšem nemusí snižovat „praktickou“ hodnotu obrázků, zvláště, pokud by se podařilo nezávisle určit parametry M , a .)

Předložená práce Mgr. Jana Schee podle mého názoru prokazuje předpoklady autora k samostatné vědecké práci. Doporučuji proto, aby byla uznána jako práce disertační a po úspěšné obhajobě byl jejímu autorovi udělen titul PhD.

Praha, 27. února 2009

Doc. RNDr. Oldřich Semerák, Dr.

Ústav teoretické fyziky
Matematicko-fyzikální fakulta
Univerzita Karlova v Praze