

## Oponentský posudek na disertační práci Mgr. Pavla Bakaly

Za 3 roky uplyne 50 let od objevu kvasarů a Kerrovy metriky, původně téměř „ortogonálních“ výsledků, mezi nimiž se však rychle rozvinul zajímavý obor astrofyziky kompaktních objektů. Argumenty ve prospěch přítomnosti takových objektů v galaktických jádrech a rentgenových dvojhvězdách byly zprvu založeny hlavně na škálových odhadech. Vzhledem ke kvalitě současných pozorování je však dnes už nutno modelovat fyzikální procesy v okolí černých děr a neutronových hvězd přesně, se započtením relativistických efektů. Názory na to, zda již „byla zpozorována geometrie Kerrova typu“, sahají od jasně kladné odpovědi po přesvědčení, že jasně to vůbec není a nejspíš nikdy nebude. Neshody, které se nezdá vyskytují, jsou však projevem komplexnosti a života oboru, který se dnes hlavně díky observačnímu pokroku dále rychle rozvíjí.

Disertační práce Mgr. Pavla Bakaly se řadí právě do této oblasti mezi teorii, modelováním a observačními daty. Je věnována vybraným pozorovatelným projevům chování látky a záření v okolí velmi kompaktních objektů. Po stručném úvodu je v 1. kapitole simulován vzhled oblohy pro pozorovatele nacházejícího se v poli černé díry. Jedná se spíše o teoretickou a „estetickou“ kapitolu, avšak případ, kdy je pozorovatel od díry vzdálen 8 kpc, je v současné době předmětem intenzivního zájmu experimentálních projektů. Kromě obvyklých parametrů rotující černé díry je v práci uvažována i nenulová kosmologická konstanta, případně i tzv. slapový náboj, plynoucí z bránových kosmologických modelů. V 2. kapitole se autor zabývá zpracováním a interpretací kvaziperiodických oscilací, pozorovaných ve spektru rentgenových světelných křivek některých binárních systémů s černou dírou či neutronovou hvězdou. Speciálně se soustřeďuje na tzv. orbitální modely vzniku oscilací, které interpretují pozorovaná maxima jako charakteristické frekvence spojené s orbitálním pohybem kolem příslušného kompaktního centra. 3. kapitola obsahuje teoretický rozbor vlastností perturbovaného kruhového pohybu nabitých testovacích částic v testovacím dipólovém magnetickém poli uvažovaném okolo Schwarzschildovy černé díry a pomalu rotující neutronové hvězdy. Zvláště je – v návaznosti na 2. kapitolu – ukázáno, že interakce částic s magnetickým polem může pozměnit parametry jejich orbit tak, že by mohly lépe odpovídat pozorovaným vlastnostem kvaziperiodických oscilací (než modely vycházející z přesně geodetického pohybu).

Kromě vlastního textu obsahuje disertace také soubor osmi odborných prací, které autor se svým školitelem a spolupracovníky sepsali a publikovali v recenzovaných časopisech a v konferenčním sborníku. Disertace je sepsána srozumitelně a pěkně, po formální stránce standardně, jazykových chyb či překlepů je málo; text je vhodně doplněn grafy, speciálně první kapitola velmi pěknými obrázky. Narazil jsem jen na jednu „ostudnou“ chybu, totiž v poloměru kruhové fotonové orbity (1.9). Zdá se však, že se jedná o přepis bez následků, neboť v příložených člancích je (schwarzschildovská) hodnota správně. Dále, na str. 21 dole je uvažována neutronová hvězda rotující s frekvencí 2000 Hz. Je v tomto případě ještě na místě zanedbávat vliv „draggingu“? Nyní několik laických poznámek k 2. kapitole. Není fitování pomocí konvexních křivek vyjadřujících poměr epicyklických oscilací (obr. 2.8) poněkud násilné, když naměřené hodnoty leží docela přesně na přímce, přinejmenším pro každý *jednotlivý* zdroj (viz též obr. 2.3, 3.3)? Na str. 30 autor i sám uvádí lineární aproximaci (2.2) pro vztah mezi frekvencemi pozorovaných dvojitých oscilací, avšak uvedená formule ( $\nu_U \sim 0.7 \nu_L + 520$  Hz) mi nepřipadá adekvátní, spíš mi vychází  $\nu_U \sim 0.93 \nu_L + 360$  Hz. Na str. 36 dole pak autor píše: „I přes překvapující kvalitativní i kvantitativní shodu observačních dat s výše uvedenými frekvenčními relacemi, ilustrovanou obrázkem 2.7...“, ačkoli křivky vedené tímto obrázkem na mě vůbec nepůsobí přesvědčivě – myslím, že vyneseními daty by

bylo možno proložit „téměř cokoli“ (zejména pak těmi pro jeden určitý zdroj). A ještě několik drobností: ve vztahu (2.8) zřejmě nemá být za  $(\Omega_K)^2$  čárka. V rovnici (2.7) výše je uvedeno  $M$ , ačkoli jinde je položeno rovno jedné. (V tomto ohledu je práce nejednotná. Sám preferuji ponechat  $M$  jeho geometrizovanou hodnotu, neboť zestručnění umožněné položením  $M=1$  zdaleka nevyvážá to, že se u většiny vzorců ztratí možnost rozměrové kontroly „na první pohled“.) V odstavci pod zmíněnými rovnicemi je uvedeno, že na mezní stabilní orbitě „již jakákoli radiální perturbace vede k pádu testovací částice na centrální hvězdný objekt“. Myslím, že ne úplně nutně – perturbace může vést k vytvoření mělkého „údolí“ v efektivním potenciálu a částice se do něj může usadit. (Záleží ovšem na tom, co je míněno *radiální* perturbací – pokud je to speciální perturbace, při níž se nemění moment hybnosti částice, pak je to v pořádku.) V kapitole 3.2 je použit nevhodný termín „strhávání souřadných systémů“. Ve vztahu (3.6) (a podobně dále) by indexy u tenzoru EM pole neměly být nad sebou. (Je dobré dodržovat pořadí indexů i u Christoffelových symbolů tamtéž.) V 2. odstavci na str. 51: co je to „globálně stabilní orbita“? Za rovnicí (3.20) není třeba zdvojit „volně padajících inerciálních pozorovatelů“.

Drobná připomínka k citování rovnic: je obvyklé uvádět čísla rovnic v oblých závorkách (bez závorek se citují čísla kapitol, obrázků a tabulek). Na některých místech je text psán trochu šroubovaně („neosobně“), takže je pak třeba číst věty vícekrát. („...a existence oscilačního charakteru perturbovaného pohybu testovací částice je ekvivalentní tvrzení o stabilitě orbity vůči radiálním či vertikálním perturbacím...“ Podobně viz konec kapitoly 2, hlavně předposlední větu.) Rovněž bych porůznu doporučil prostější jazyk – slova jako „amplifikace“, „manifestuje se“, (nedávno aktuální) „je možno volit *arbitrárně*“, „finálně dosahující bodu obratu“, „černý *region*“ (na pozorovatelově obloze), „se stává nutně velmi *signifikančním observačním fenoménem*“, „precizovat intenzitu“, „akcelerace výpočtů“, „analýza *observací*“, „klastrování twin-peak QPOs“, „v současné astrofyzikální komunitě věnující se QPO *fenoménu* bohužel neexistuje *konsensuálně sdílená teoretická báze*“, apod., by šla nahradit přirozeněji znějícími ekvivalenty. Trochu bych změnil poslední větu před kapitolou 3.3 (je nepatřičné říkat, že předpoklad nabitě hmoty *umožňuje* odhad jejího specifického náboje). Podobně k úplně poslední větě průvodního textu: zdá se mi, že rozdíl mezi nutně speciálními modelovými představami a reálným děním kolem neutronové hvězdy může být natolik velký, že bych pokrok v modelování pohybu testovacích částic a interpretaci QPO nečekal od lepšího pochopení vlastností niter neutronových hvězd...

Konečně v první kapitole jsem postrádal odkazy na některé velmi relevantní práce:

- Schastok J., Soffel M., Ruder H., Schneider M., Stellar sky as seen from the vicinity of a black hole, Am. J. Phys. 55 (1987) 336
- Čadež A., Kostić U., Optics in the Schwarzschild spacetime, Phys. Rev. D 72 (2005) 104024
- Müller T., Falling into a Schwarzschild black hole. Geometric aspects, Gen. Rel. Grav. 40 (2008) 2185
- Müller T., Weiskopf D., Distortion of the stellar sky by a Schwarzschild black hole, Am. J. Phys. 78 (2010) 204

Závěrem: z předložené disertační práce a příložených článků je patrné, že Mgr. Bakala se velmi dobře orientuje v otázkách pohybu fotonů a částic v obecně relativistických prostoročasech a že se v této oblasti již podílel i na původních vědeckých výsledcích, které byly publikovány v recenzovaných periodikách (dva z nich v prestižních časopisech *Astrophysical Journal* a *Classical and Quantum Gravity*). Jeho práce tak dle mého názoru

splňuje požadavky na disertační práci v daném oboru a doporučuji proto, aby byla přijata k obhajobě a aby byl na jejím základě Pavlu Bakalovi udělen titul PhD.

Řím, 7. června 2010

doc. Oldřich Semerák  
Ústav teoretické fyziky  
Matematicko-fyzikální fakulta  
Univerzita Karlova v Praze