

# Co přináší skripta *Aktivne galaktické jadrá ako relativistické systémy?*

Jana Žďárská

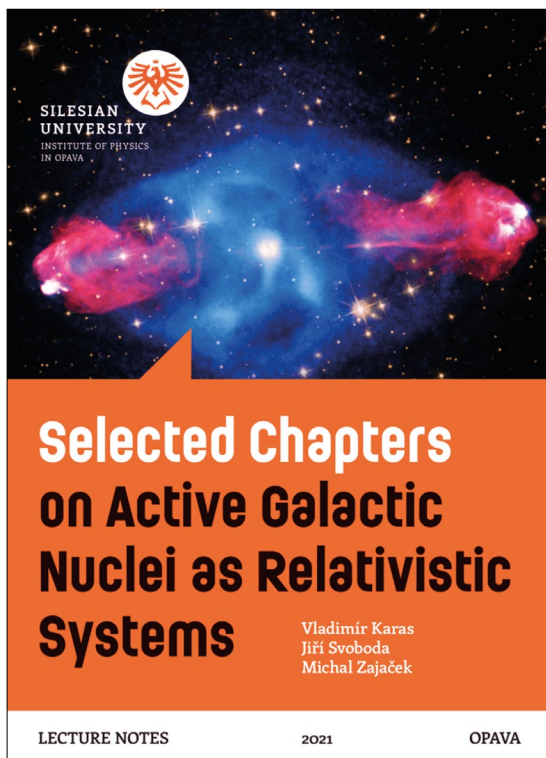
Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8; zdarskaj@fzu.cz

Po několika letech práce a příprav vydali autoři Vladimír Karas, Jiří Svoboda a Michal Zajaček skripta *Vybrané kapitoly o aktivních galaktických jádrech ako relativistických systémech* (Selected chapters on active galactic nuclei as relativistic systems). Pečlivě editovaná publikace vyšla tiskem díky péči Fyzikálního ústavu Slezské univerzity v Opavě v roce 2021. Obálka nové knížky, graficky připravená Václavem Pavlíkem, zobrazuje prototypickou aktivní galaxii Cygnus A s mohutnými relativistickými výtrysky v multispektrálním pohledu napříč vlnovými délkami.

Vědecký obor studia aktivních galaktických jader je tématem propojujícím astronomii s relativistickou fyzikou a kosmologií. Kontinuálně se postupně rozvíjí od počátku 60. let 20. století, kdy Maarten Schmidt identifikoval první kvasar. Jedná se o objekt

v kosmologické vzdálenosti – aktivní galaktické jádro, jehož svítivost výrazně převyšuje svítivost galaxie. „Tento rok – 16. marca – sme si dokonca pripomenuli 60. výročie tohto významného objavu<sup>1</sup>, keď Schmidt identifikoval Balmerovské čiary vodíka v optickom spektre kvazaru 3C273, ktoré boli jasne posunuté smerom k dlhším vlnovým dĺžkam teda ‚dočervena‘ v dôsledku rozpínania vesmíru (kozmozologický červený posun – redshift). Vďaka tomu bolo zrejmé, že jasný bodový zdroj nie je v žiadnom prípade v našej galaxii, ale na tú dobu v nepredstaviteľnej vzdialenosti 749 megaparsekov (2,4 miliardy svetelných rokov). Zo zmeranej vzdialenosti a optického toku žiarenia sa odhadol celkový žiarivý výkon zdroja, ktorý bol rovnako ťažko predstaviteľný – presahoval približne 3000 miliárd slnečných žiarivých výkonov! Neskôr sa zistilo, že zdroj mení svoju jasnosť na krátkych časových škálach niekoľkých dní až týždňov, čo umožnilo určiť rozmer oblasti, z ktorej vychádza žiarenie – mala polomer menší ako Slnecná sústava (pre predstavu zmena jasnosti počas jedného dňa dáva horný limit ~173 astronomických jednotiek na rozmer oblasti, z ktorej vychádza žiarenie). Akreujúca masívna čierna diera poskytovala najlepšie vysvetlenie týchto extrémnych vlastností, a to kvôli malému rozmeru a približne 50-krát vyššej efektívnosti premeny kludovej energie na žiarenie v porovnaní s termonukleárnymi reakciami uprostred hviezd,“ vysvětluje Michal Zajaček.

Vysvětlení obrovské energie kvasarů přišlo v té době především díky obecné teorii relativity, kterou mnozí zprvu v praxi odsuzovali a považovali ji za příliš matematickou. Nicméně i sami relativisté byli zpočátku k zamrzlým hvězdám, tedy černým díram, spíše skeptičtí. Svědčí o tom i Einsteinův článek, v němž se sna-



**Obr. 1** Obálka skript: V. Karas, J. Svoboda, M. Zajaček: Selected Chapters on Active Galactic Nuclei as Relativistic Systems. Silesian University in Opava, Opava 2021. (Slezská univerzita v Opavě, 2021)

1 M. Schmidt: *Nature* **197**, 1040 (1963).



**Obr. 2** Posezení s prof. Jiřím Bičákem u oběda na Matematicko-fyzikální fakultě UK v Praze po přednášce Michala Zajačka 22. 2. 2022 na téma dalekohledu Jamese Webba a infračervené astronomie.

žil zabránit gravitačnímu kolapsu hvězd do singularit<sup>2</sup>, čímž se (marně) pokoušel vyvrátit klíčovou teorii sférického kolapsu podle Oppenheimera a Snydera<sup>3</sup>, která však přetrvala a později ji zobecnil Roger Penrose<sup>4</sup>. „Navrhované alternatívne vysvetlenia neobvykle veľkého sčervenania svetla prichádzajúceho k nám z kvazarov boli z fyzikálneho hľadiska veľmi zaujímavé, avšak pod ťarchou pozorovacích výsledkov museli byť postupne opúšťané: napr. hypotetické ‚starnutie svetla‘ pozdĺž kozmologického lúča či efekt korelácií v zdroji (tzv. Wolfow efekt). Nepreukázala sa ani realita mostov zdanlivo prepájajúcich niektoré kvazary s okolitými galaxiami s veľmi odlišným červeným posuvom (Arpove objekty), ktoré boli po dlhú dobu uvádzané ako argument proti kozmologickým vzdialenostiam kvazarov,“ pripomína Michal Zajaček.

Během posledních šedesáti let, kdy se naše teoretické a observační znalosti o aktivních galaktických jádrech postupně zdokonalovaly, bylo publikováno množství přehledových článků a učebnic. Některé se dnes řadí mezi standardní výukové materiály na univerzitách a otevírají začínajícím studentům astrofyziky a vědcům dveře do neprobádaných astrofyzikálních vod, nebo spíše do horkého plazmatu o teplotě přes 1 000 000 stupňů Celsia v okolí černých děr. Jednou z nich je obsáhlá učebnice Gravitation (zkráceně

2 A. Einstein: *Annals of Mathematics* **40**, 922 (1939).

3 J. R. Oppenheimer, H. Snyder: *Physical Review* **56**, 455 (1939).

4 R. Penrose: Gravitational Collapse and Space-Time Singularities. *Physical Review Letters* **14**, 57 (1965).



**Obr. 3** Československý časopis pro fyziku = česko-slovenské přátelství.

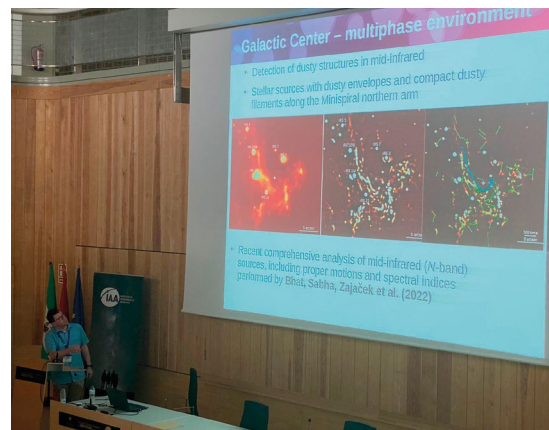
<https://ccf.fzu.cz>

MTW)<sup>5</sup> od Charlese W. Misnera, Kipa S. Thorna a Johna A. Wheelera, která letos slaví 50. výročí svého prvního vydání (vyšla v roce 1973 v nakladatelství W. H. Freeman and Company, reprint vyšel v roce 2017 v nakladatelství Princeton University Press).

Učebnice Karase, Svobody a Zajačka je určitým kompromisem mezi přehledovým článkem o galaktických jádrech (obsahuje 722 referencí) a učebnicí. Kromě dnes již klasické teorie akrece plynu kolem černé díry a jeho elektromagnetických vlastností obsahuje text také aktuální vybrané kapitoly o vlivu silné gravitace na pozorované záření. Pro kontrast s kvasary je zde uveden i příklad velmi slabě akreující černé díry v centru naší galaxie, kde autoři popisují stručnou historii objevu kompaktního rádiového zdroje Sgr A\* až po pozorování rychlých mladých „S“ hvězd, na jehož základě byla určena přesná hmotnost Sgr A\* – 4 miliony Sluncí. Za tento objev byla v roce 2020 udělena Nobelova cena za fyziku Reinhardu Genzelovi a Andree Ghezové.

Ačkoli je těžké představit si čtyři miliony Sluncí v objemu menším, než je vzdálenost Merkuru od Slunce, Sgr A\* je i tak stále jen trpasličí oproti jiným, vskutku gigantickým černým díram. Například výše zmíněný kvasar 3C 273 je poháněn černou dírou o hmotnosti

5 Ch. W. Misner, K. S. Thorne, J. A. Wheeler: *Gravitation*. W. H. Freeman and Company (1973) a Princeton University Press (2017).

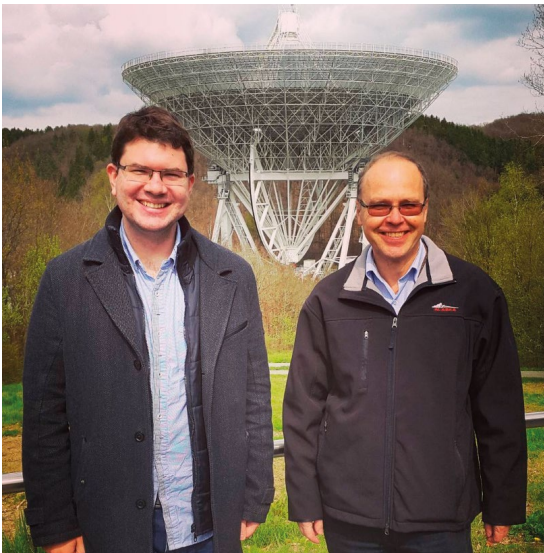


**Obr. 4** Přednáška v Granadě – Michal Zajaček prezentuje příspěvek *Dust-enshrouded star near supermassive black hole: Application to Galactic center G-objects and other low-luminosity galactic nuclei* na konferenci Galactic center workshop v Granadě dne 27. 4. 2023.

až 900 milionů hmotností Slunce. Přestože naše supermasivní černá díra uprostřed Mléčné dráhy patří k těm menším, je k nám v této kategorii objektů nejbliže a má tak velký význam i pro studium ostatních galaktických jader. Hvězdy typu „S“, které kolem ní obíhají, umožňují přesné testování teorie gravitace, včetně ověřování základních relativistických efektů. Kromě toho jsou v současném vesmíru běžné velmi nízké intenzity akrece, a proto Sgr A\* slouží jako prototyp pro přibližně 90 % galaktických jader.

Část textu učebnice je věnována také oblasti vzniku velmi širokých emisních čar vodíku, hořčíku, uhlíku a dalších prvků v oblasti několika tisíc gravitačních poloměrů od supermasivních černých děr (tzv. oblast širokých čar neboli *Broad-Line Region*<sup>6</sup>).

6 BLR.



**Obr. 5** S prof. Vladimírem Karasem v Effelsbergu. Návštěva jednoho z největších, plně ovladatelných radioteleskopů na světě – radioteleskopu Effelsberg o průměru antény 100 metrů – během konference *Existují černé díry? – Fyzika a filozofie černých děr*, která se konala 24.–28. dubna 2017 v německém Bad Honnef u Bonnu.

„Hoci široké čiary v optických spektrách kvazarov spozoroval už Carl K. Seyfert v roku 1948<sup>7</sup>, doteraz sa mechanizmus ich tvorby celkom presne neobjasnil. V učebnici je diskutovaných niekoľko scenárov ich tvorby, ktoré boli navrhnuté už dávnejšie, ale aj niekoľko relatívne nových modelov. Napriek viacerým neistotám je však zrejme, že dominantný príspevok rozšírenia má pôvod v dopplerovskom rozšírení čiar v dôsledku rýchleho, keplerovského pohybu s rýchlosťou niekoľko 1000 km/s, ktorý emitujúci plyn s teplotou 10–20 tisíc stupňov Celzia vykonáva v okolí čiernej diery,“ dopĺňuje Michal Zajaček.

Autoři se v knize nevyhýbají ani nejaktuálnějším otázkám, jako je například otisk silné gravitace černých děr v rentgenových spektrech kompaktních objektů, což se nyní ukázalo jako mimořádně aktuální a důležité pro interpretaci nových dat ze současné unikátní polarimetrické rentgenové mise družice IXPE<sup>8</sup> se schopností zobrazování kosmických objektů a paralelně s tím měření jejich polarizace v rentgenovém oboru řádu kiloelektronvoltových energií. Několik stránek je věnováno také pozorování částic s nejvyšší energií ve vesmíru, tzv. kosmického záření o ultravysoké energii.

Cílem učebnice je poskytnout moderní *multikanálový* pohled na aktivní galaktická jádra a studovat je prostřednictvím elektromagnetického záření, kosmického záření, neutrin a v blízké budoucnosti i gravitačních vln. Věříme, že jmenovaná skripta, která se pyšní 161 stranami důležitých informací, budou užitečným studijním materiálem pro studenty a učitele na vysokých školách. Mohly by též posloužit jako referenční materiál pro vědce a inspirovat je k dalšímu novému výzkumu, což by byla pro autory jistě ta největší odměna. Skripta jsou k dispozici na tomto odkazu: <https://proceedings.physics.cz/selected-chapters-on-active-galactic-nuclei-as-relativistic-systems/>

7 C. K. Seyfert: Five thousand external galaxies and a new dense group. *Astronomical Journal* 53, 203 (1948).

8 Imaging X-Ray Polarimetry Explorer.

RNDr. **Michal Zajaček**, Ph.D., se narodil 31. 12. 1988 v Malacích a je od roku 2021 vědeckým pracovníkem na Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky Masarykovy univerzity, kde se zabývá výzkumem galaktického centra a aktivních galaktických jader. Bakalářské a magisterské studium fyziky a astrofyziky absolvoval v letech 2009–2014 na MFF UK v Praze. Doktorskou práci s názvem *Interakce mezi hvězdným prostředím a prostředím černých děr* obhájil pod vedením prof. Andreea Eckarta v roce 2017 na Univerzitě v Kolíně nad Rýnem. V letech 2017–2019 působil jako postdoktorand na Institutu Maxe Plancka pro radioastronomii v Bonnu, kde se zabýval studiem precese jetů. Společně s Dr. Silke Britzenovou prokázal, že jet blazaru OJ287 vykazuje precesní pohyby s periodou více než 20 let, což se projevuje i nárůstem rádiového toku záření se stejnou periodou. V následujícím období (2019–2021) působil jako vědecký pracovník ve skupině prof. Czerného, kde pracoval na mapování oblasti širokých čar (BLR) v UV oblasti spekter vzdálenějších kvasarů. Tato práce vyvrcholila prvními úspěšnými aplikacemi kvasarů v kosmologii na základě vztahu mezi poloměrem BLR a monochromatickou svítivostí, které byly publikovány v sérii článků ve spolupráci s prof. Bharatem Ratrou (Kansas State University).

Prof. RNDr. **Vladimír Karas**, DrSc., se narodil v roce 1960 a působí v Astronomickém ústavu AV ČR, kde v roce 2004 založil pracovní skupinu pro relativistickou astrofyziku. V letech 2012–2022 zastával pozici ředitele ústavu. Dříve působil v různých vědeckých a pedagogických funkcích na Matematicko-fyzikální fakultě pražské Univerzity Karlovy, kde zavedl přednášky o elementárních procesech v astrofyzice, o aktivních galaxiích, zobrazovacích metodách v astronomii a na další astrofyzikální témata. Vyvinul rychlé numerické přístupy ke zkoumání účinků silné gravitace prostřednictvím variací světla ze zdrojů poblíž černé díry (např. V. Karas a kol.: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 259, 569–575 (1992)). Jeho novější práce se zabývají projevy magnetických polí v prostředí silné gravitace. Aktivně spolupracuje s kolegy na univerzitě v Kolíně nad Rýnem, Univerzitě Roma Tre a v Polské akademii věd ve Varšavě. Byl spoluřešitelem projektu Centra teoretické fyziky a astrofyziky Alberta Einsteina v Praze, editorem monografie *Black Holes: From Stars to Galaxies – Across the Range of Masses* (společně s G. Mattem, vydáno Cambridge University Press). Přispívá též k české účasti na satelitních polarimetrických misích v rentgenovém oboru a v budoucí observatoři CTA pro studium vysokoenergetických částic kosmického záření.

RNDr. **Jiří Svoboda**, Ph.D., se narodil v roce 1982 a je vědeckým pracovníkem Astronomického ústavu Akademie věd ČR. Vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy, kde v roce 2010 obdržel doktorát. Poté získal prestižní ESA Fellowship v Evropské kosmické agentuře, kde působil dva roky v Astronomickém centru ESAC poblíž Madridu. Je držitelem ceny Bernarda Bolzana, Fričovy a Wichterleho prémie. Ve svém výzkumu se zabývá zejména rentgenovou astronomií a studiem aktivních galaxií. V současnosti vede juniorský vědecký tým zkoumající černé díry různých hmotností. Jiří Svoboda je také koordinátorem výzkumného programu Strategie Akademie věd Vesmír pro lidstvo, v jehož rámci zajišťuje odbornou spolupráci na mezinárodních kosmických misích určených k vědeckému výzkumu vesmíru. Má na starosti české zapojení do velkých misí ESA, ATHENA a LISA, určených ke studiu černých děr. Věnuje se také pedagogické činnosti na univerzitách a popularizaci astronomie a kosmických projektů. Jako odborný poradce se podílel na přípravě seriálu *Génius o Albertu Einsteinovi* v produkci National Geographic.

