

Posudek práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě
Univerzity Karlovy

- posudek vedoucího posudek oponenta
 bakalářské práce diplomové práce

Autor: Bc. Matúš Papajčík
Název práce: Exact spacetimes in 2+1 gravity

Studijní program a obor: Fyzika – Teoretická fyzika
Rok odevzdání: 2022

Jméno a tituly vedoucího: prof. RNDr. Jiří Podolský, CSc., DSc.
Pracoviště: Ústav teoretické fyziky MFF UK
Kontaktní e-mail: podolsky@mbox.troja.mff.cuni.cz

Odborná úroveň práce:

- vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Věcné chyby:

- téměř žádné vzhledem k rozsahu přiměřený počet méně podstatné četné závažné

Výsledky:

- originální původní i převzaté netriviální kompilace citované z literatury opsané

Rozsah práce:

- veliký standardní dostatečný nedostatečný

Grafická, jazyková a formální úroveň:

- vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Tiskové chyby:

- téměř žádné vzhledem k rozsahu a tématu přiměřený počet četné

Celková úroveň práce:

- vynikající velmi dobrá průměrná podprůměrná nevyhovující

Slovní vyjádření a komentáře vedoucího práce:

Práce se zabývá systematickým hledáním a klasifikací přesných řešení Einsteinových–Maxwellových rovnic s kosmologickou konstantou ve třech prostoročasových dimenzích. Zapadá tedy do zajímavého a velmi aktuálního tématu studia tzv. 2+1 gravitace, jež zahrnuje i modely kvantové gravitace či AdS/CFT korespondence.

Teorie 2+1 gravitace je předmětem zájmu již více než půl století. Za tu dobu bylo nalezeno mnoho přesných prostoročasů, zejména BTZ černé díry zkonstruované v roce 1992 topologickou metodou. Přehledně je shrnuje rozsáhlá monografie García-Díaz, *Exact Solutions in Three-Dimensional Gravity* (Cambridge University Press, 2017, 434 pp). Teprve zcela nedávno se ale podařilo systematicky najít *všechna* řešení Einsteinových rovnic s kosmologickou konstantou v případě vakua, čistého záření nebo gyratonové hmoty, viz Podolský, Švarc, Maeda, *Class. Quantum Grav.* **36**, (2019) 015099. Ale protože vakuová řešení v 2+1 gravitaci jsou nutně konstantní křivosti, klíčové je hledat také *nevakuová* řešení polních rovnic.

Právě to je obsahem předkládané diplomové práce. Jako zobecnění naší publikace z roku 2019 se studentovi podařilo najít *všechna řešení Einsteinových–Maxwellových rovnic*, včetně nenulové kosmologické konstanty.

V první části je nejprve zformulována nejobecnější možná metrika v 2+1 gravitaci, obecný tvar elektromagnetického pole, včetně příslušných invariantů a NP skalárů, odvozeny Einsteinovy i Maxwellovy rovnice a ukázána též unikátní souvislost se skalárním polem. Poté následuje systematická integrace polních rovnic, kdy je efektivním a elegantním způsobem krok za krokem získáno *obecné explicitní řešení*, které se rozpadá do dvou geometricky disjunktních tříd.

V kapitole 2 jsou nalezena *všechna řešení Kundtova typu*, kdy privilegovaná kongruence neexpanduje. Je také dokázáno, že elektromagnetické pole musí být nutně alignováno s algebraickou strukturou pole gravitačního. Výsledek je shrnut a diskutován v části 2.4.

Komplementární explicitní třída alignovaných *Robinsonových–Trautmanových řešení* s expanzí je nalezena v kapitole 3 a diskutována v části 3.4. V tomto případě však mohou existovat i 2+1 prostoročasy, kdy elektromagnetické pole není s gravitačním alignováno. Příslušné rovnice, které jsou mnohem složitější, jsou zformulovány v kapitole 4 a jako zajímavá ilustrace je v části 4.4 nalezeno jejich konkrétní explicitní řešení.

Tyto výsledky jsou natolik zajímavé, že se nám je již podařilo v březnu 2022 publikovat v prestižním časopise *Phys. Rev. D* **105** (2022) 064004. Článek *All solutions of Einstein–Maxwell equations with a cosmological constant in 2+1 dimensions* tvoří přílohu B práce.

Tím ale diplomová práce ještě nekončí. V kapitole 5 student předkládá *zcela novou metodu hledání algebraické struktury* gravitačních polí v 2+1 dimenzích, která se opírá o analýzu Cottonova a také Cottonova–Yorkova tenzoru (jež v 2+1 gravitaci zastupují Weylův tenzor, který je identicky nulový). Pomocí vhodných veličin (reálných analogií Newmanových–Penroseových skalárů Ψ_A), student prezentuje elegantní a velmi užitečnou metodu algebraické klasifikace. Nadto ukazuje její ekvivalenci s dříve používanou (ale technicky mnohem náročnější) Petrovou metodou opírající se násobnost vlastních čísel i s Debeverovými–Penroseovými podmínkami určujícími charakter hlavních nulových směrů. Tyto výsledky jsou zcela originální a během jara 2023 budou odeslány k publikaci rovněž do časopisu *Phys. Rev. D*. Aby se zmenšilo riziko možného plagiátorství, požádal jsem jako vedoucí práce o nezveřejnění této diplomové práce v SIS.

Je evidentní, že *předložená práce výrazným způsobem přesahuje rámec diplomové a blíží se práci disertační*. Student projevil nebývalou míru samostatnosti, rychlé orientace ve zcela nové problematice (odlišné od tématu jeho práce bakalářské), iniciativy a zájmu. K tomu je nutno připomenout skutečnost, že první části práce vznikaly v době „covidových restikcí“ distanční formou komunikace mezi námi. Rád bych také zdůraznil, že výsledná diplomová práce není v kapitolách 2–4 jen „slepým převzetím“ textu již publikovaného článku, ale pěkným a

adekvátním shrnutím postupu i výsledků, včetně několika dodatečných pozorování, jež jdou nad rámec publikovaného článku. Závěrečná kapitola 5 je téměř hotový druhý článek.

Jako vedoucí práce mám proto nyní při závěrečném hodnocení velmi snadný úkol: Dosud se mi nestalo, aby student výrazně samostatným způsobem dospěl k výsledkům, jež by byly *rok před* obhajobou diplomové práce publikovány ve *Physical Review D*, a přitom aby práce obsahovala *ještě další* část, která je publikovatelná vzápětí. Odborná i formální kvalita práce jsou na tak vysoké úrovni, že bez váhání doporučuji uznat předloženou práci za diplomovou.

Dovoluji si rovněž doporučit komisi, aby tuto práci případně navrhla na *cenu děkana MFF za nejlepší bakalářskou a diplomovou práci obhájenou v akademickém roce 2022/2023*.

Případné otázky při obhajobě a náměty do diskuze:

žádné

Práci

- doporučuji
 nedoporučuji uznat jako diplomovou.

Navrhuji hodnocení stupněm:

- výborně velmi dobře dobře neprospěl/a

Místo, datum a podpis vedoucího:

v Praze dne 16. 1. 2023