

Posudek dizertační práce

autor: *Mgr. Jan Novák*

# The mathematical theory of perturbations in cosmology

oponent: Mgr. Martin Scholtz, Ph.D. [scholtz@utf.mff.cuni.cz](mailto:scholtz@utf.mff.cuni.cz)

Ústav teoretické fyziky, MFF UK

V předkládané dizertační práci se autor Jan Novák zabývá perturbacemi kosmologických modelů v obecné teorii relativity (ve více dimenzích) a v obecnějších, tzv.  $f(R)$ -teoriích. Dizertační práce se skládá z poměrně rozsáhlého teoretického úvodu, který místy obsahuje i autorovy původní výpočty, a tvoří první tři kapitoly dizertace. Hlavním výstupem práce je odborný článek [3] publikovaný v prestižním časopise. Článek není v dizertaci vložený, ale jeho obsah je vyložen ve čtvrté kapitole. Autor nepochybně prokázal, že má přehled v pokročilejších oblastech obecné relativity (spinory, NP-formalismus, GHP-formalismus) a v problematice kosmologických perturbací.

Bohužel, celkový dojem z práce je spíš negativní. Důvodem je velké množství formálních a jazykových nedostatků, chaotická organizace prezentovaného materiálu, nejasné fyzikální úvahy (kapitola 2, 3). S panem Novákem jsem některé aspekty jeho dizertace diskutoval již dříve a s politováním konstatuji, že si pan Novák nenechal poradit a chyby, na něž jsem ho upozorňoval, zapracoval bez opravy i do finální verze dizertace. Nejzávažnějším nedostatkem práce je skutečnost, že pan Novák citovanou literaturu často přebírá doslovně a používá naprosto stejné formulace beze změny, což jsem objevil díky tomu, že tyto pasáže svou jazykovou úrovní ostře kontrastují s pasážemi psanými samotným panem Novákem. Omluvou je pouze fakt, že všechna literatura je uvedena v referencích, ale i tak by se neměly doslova kopírovat celé pasáže. Příklady takových doslovných citací (včetně mých vlastních textů, které jsem sice dal panu Novákovi k dispozici, ale nečekal jsem, že je použije metodou “copy and paste”) uvádím níže.

Oceňuji, že práce je napsaná v anglickém jazyce, takže se stává dostupnou pro široký okruh potenciálních čtenářů. Jazyková úroveň práce pana Nováka je ovšem velmi nevyvážená. Velké množství překlepů, věty ukončené čárkou místo tečky, nedodržování anglické struktury věty, etc. Naopak, některé pasáže, které jsou napsány překvapivě dobře, jsou více-méně doslovným přepisem existující literatury. Například sekce 1.4. *Cosmological perturbation theory* je do značné míry doslovným přepisem reference [1]. Tato publikace je sice v referencích uvedena, ale autor by měl upozornit čtenáře, že celé pasáže jsou doslovným citátem.

Celá práce je z nepochopitelných důvodů napsaná tučným fontem. Značení veličin je značně nekonzistentní, například parameter určující prostorovou křivost ve Friedmannových modelech je střídavě značen symboly  $K$  a  $\mathcal{K}$ , nebo dokonce *mathcalK*. Perturbace jsou někdy

značeny symbolem  $\delta$ , někdy  $d$ , jindy zase  $\mathbf{d}$ . Velmi často se autor odkazuje na neexistující rovnici, takže opravdu hodně odkazů má tvar (??).

Chybějí mi také častější odkazy na literaturu, protože z textu často není jasné, co je převzato z literatury a co je autorův vlastní příspěvek. Což je škoda, protože pak to působí dojmem, že všechno jsou převzaté výsledky a autorovy kreace se v textu ztrácejí. Například v celém textu jsem nenašel zmínku o tom, že autor publikoval nějaký článek a že celá kapitola 4 je originální a publikovaná vědecká práce.

Úsměvný je již abstrakt práce, kde se v české verzi vyskytují formulace

*Nejprve byla prezentována Obecná Teorie Relativity ve vyšší dimenzi. Potom jsme prezentovali Obecnou Teorii Relativity ve vyšší dimenzi.*

Někdy se autor odvolává na neexistující části práce. Například v úvodu prezentuje kandidáty na kvantovou teorii gravitace. Představuje strunovou teorii, smyčkovou gravitaci, a říká, že později v práci bude řeč o twistorové teorii. To se ovšem nestane, slovo twistor se na dalších stránkách práce již neobjevuje. Práce pak končí zcela nesmyslným výkřikem “Quantum chromodynamics” na samostatné stránce.

Je zkrátka vidět, že autor si s formální stránkou příliš starostí nedělal. Dizertační práci tak zachraňuje publikace [3]. Vzhledem k tomu, že většina mých výhrad se týká jazyka a organizace materiálu, tedy věcí spíš formálních, přes velké množství námitek **doporučuji práci uznat jako dizertační**. Pokud se však pan Novák rozhodne pokračovat ve vědecké dráze, bude muset svůj přístup vylepšit. Proto jsem své poznámky a námítky (formální i odborného charakteru) podrobně uvedl ve zbytku tohoto posudku. Tyto komentáře není nutné číst na obhajobě.

## Otázky

1. V kapitole o Kundtově třídě prostoročasů se uvažuje obecná dimenze. Rovnice (2.60)–(2.62) však vypadají 4-rozměrně. Čekal bych, že vektory  $m^\mu$  budou mít nějaké indexy, stejně jako spinové koeficienty. Navíc, uvedené rovnice typicky platí, když jsou vektory  $m^\mu$  nulové; myslel jsem si, že v obecné dimenzi se tyto vektory volí prostorupodobné (zejména v liché dimenzi to asi nejde jinak). Nebo se pletu? Mohl by to autor vysvětlit?
2. V kapitole 3, kde se “zobecňují” výsledky z článku [2], pan Novák přepisuje perturbované rovnice do GHP formalismu. Přesněji, říká, že “master equation” článku [2] může být kompaktně v GHP formalismu zapsána. Není mi úplně jasné, v čem je pokrok, nebo co přesně se dokazuje. Rovnice pole zapsané v GHP formalismu jsou jenom kompaktněji přepsané NP rovnice. Pokrok, který byl dosažen v článku [2] spočívá v tom, že NP rovnice jsou zapsány v “decouplované” formě. Není přepis do GHP formalismu krokem zpět? Autor argumentuje, že je to lepší, ale z textu jsem nepochopil v čem.
3. Jak lze formalismu zavedeného v kapitole 3 využít k efektivnějšímu studiu inflace? Má autor konkrétnější představu?

4. Čemu se bude autor věnovat po obhajobě? Plánuje navázat na výsledky článku [3]? Jaký je další směr výzkumu? Vylepšení numerické metody, opuštění zjednodušujících předpokladů, či něco jiného?

## 0.1 Kapitola *Introduction*

Začátek kapitoly “Introduction” je výkladem základních myšlenek standardního modelu, teorie strun, smyčkové gravitace, autor se také lehce dotýká otázky rigorózní definice Feynmanova dráhového integrálu. Souvislost těchto témat s dizertační prací není naznačena.

V následujících sekcích se autor věnuje standardnímu úvodu do relativistické kosmologie, uvádí Friedmannovy-Robertsonovy-Walkerovy-Lemaitrové (FRWL) modely, diskutuje problém horizontu a plochosti, naznačuje, jak tyto problémy řeší inflační hypotéza; diskutuje také roli kosmologické konstanty. Zde si myslím, že autor zbytečně podrobně vysvětluje věci, které jsou standardní náplní úvodních kurzů. Naopak věci, jež by zasluhovaly podrobnější komentář, například zmiňovaná inflace, když už se o ní mluví, nejsou vysvětleny skoro vůbec. Text tak působí značně roztříštěně a mnohé poznámky jsou samoučelné, jejich vztah k hlavnímu textu není jasný. Například u inflace: autor velmi zhruba řekne, co to inflace je, pak zmíní (hypotetické) měření gravitačních vln v experimentu BICEP2 (aniž by vysvětlil souvislost gravitačních vln a inflace) a pak odvodí tenzor energie-hybnosti pro nehmotné samointeragující skalární pole. Tenzor energie-hybnosti tohoto pole je známá a velmi standardní věc, které ovšem autor věnuje celou stránku. Naopak vůbec nevysvětluje, jak se pomocí skalárního pole inflace modeluje, jaké jsou požadavky na potenciál, atd. Kdyby práce obsahovala i toto, nevadilo by, že je výklad podrobný. Autor však pořád vysvětluje podrobně velmi standardní věci a výklad ukončí právě ve chvíli, kdy by se čtenář mohl konečně dozvědět i něco nového.

V sekcích 1.4. a 1.5. se autor konečně věnuje úvodu do teorie kosmologických perturbací. Vysvětluje zde kalibrační volnost a klasifikaci perturbací (skalární, vektorové, tenzorové). Tyto části působí na první pohled mnohem lépe, ale jak jsem již napsal, jsou to často (téměř) doslovné citace převzaté z publikace [1].

Úvodní kapitola však neplní svůj primární účel, což považuji za nejhorší. V úvodu není řečeno

- co se bude zkoumat,
- proč by se to mělo zkoumat,
- jakými metodami se to bude zkoumat,
- jak je práce rozvržena a co čtenář v jednotlivých kapitolách nalezne.

## 0.2 Kapitola *Standard GR in higher dimensions*

Tuto kapitolu autor začíná dosti zmateným úvodem do obecné relativity ve vyšších dimenzích, zmiňuje se o Meyersově-Perryově řešeních pro rotující černé díry ve více dimenzích,

o stabilitě řešení, nebo o černých prstencích. Je škoda, že autor hovoří o některých výsledcích týkajících se linearizovaných perturbací a používá GHP formalismus a algebraickou klasifikaci prostoročasů dříve, než jsou tyto pojmy zavedeny.

Ovšem části věnované NP formalismu v  $n$ -dimenzích a algebraické klasifikaci jsou napsány celkem dobře. Zajímavá je část věnovaná klasifikaci ve spinorovém formalismu. Jen není jasné, proč autor spinorům věnuje tolik místa, když, jak sám píše, spinorová klasifikace je užitečná pouze ve čtyřech dimenzích a nikde dál se o spinorovou klasifikaci neopírá. V rovnici (2.24) na straně zřejmě chybí na levé straně metrický tenzor.

Hezká, zajímavá a podrobná je diskuse Kundtovy třídy prostoročasů ve vyšších dimenzích. Jenom nechápu, proč se v práci diskutuje právě tato třída, a ne třeba zmíněná Meyersova-Perryova řešení, která snad mají větší (astro)fyzikální smysl.

### 0.3 Kapitola *Perturbations of FRWL spacetimes in GHP formalism*

V této kapitole autor analyzuje a v určitých směrech rozšiřuje článek [2]. V článku [2] autoři studují perturbace FRWL modelů v NP formalismu a sestavují perturbované Bianchiho identity pro perturbace Weylových skalárů. Ukazují, že tyto rovnice lze “decouplet” v tom smyslu, že každý Weylův skalár je řešením rovnice, ve které ostatní Weylovy skaláry nevystupují. Jsou to ovšem nehomogenní rovnice a na jejich pravé straně vystupují spinové koeficienty a NP komponenty Ricciho spinoru. Jelikož jsou tyto neznámé, autoři se omezují na nalezení Greenových funkcí operátoru na levé straně a otázku, jak konkrétně pravá strana vypadá, neřeší (byť posléze provádějí analýzu určitých velmi speciálních případů). Za zmínku stojí, že autoři opravdu operují jenom s Bianchiho identitami pro Weylovy skaláry a nezabývají se kontrahovanými Bianchiho identitami, ani Ricciho identitami.

Autor dizertační práce se v kapitole 3 snaží posunout výpočty prováděné v [2] dál. Zavádí některé základní definice GHP formalismu a snaží se do tohoto formalismu převést jak rovnice uvedené již v [2], tak zbývající Ricciho a Bianchiho identity. Dále autor tvrdí, že se zabývá i rovnicemi s úplnou pravou stranou, tedy s opravdovými zdroji a ne s delta-funkcí.

Ačkoli autor v této kapitole nezrealizoval svůj záměr, objevují se zde určité originální výsledky. Po přečtení kapitoly mám však dojem, že k reálným aplikacím tohoto přístupu je hodně daleko. Také autorova slova o aplikacích v inflační kosmologii jsou velmi vágní a není zřejmé, co má přibližně autor na mysli. Jinými slovy, autor v této práci publikoval své výpočty z fáze, kdy se seznamuje s problémem, ale zatím k ničemu konkrétnímu nedospěl.

Ačkoli je to pro problematiku kosmologických perturbací klíčové, v článku [2] se vůbec neřeší otázka kalibrační volnosti. V době, kdy mě pan Novák oslovil, zda bychom se na článek společně podívali, napsal jsem pár stran textu o perturbacích v NP formalismu, kde jsem v NP formalismu zapsal infinitesimální rotace NP tetrády, diskutoval kalibrační transformace v NP formalismu, transformace formy konexe a spinových koeficientů, a souvislost perturbací metriky s NP veličinami. Tento text jsem dal panu Novákovi k dispozici, pokud by ho shledal užitečným.

Bohužel, tento text se prakticky beze změny objevil zkopírovaný v dizertační práci. Je

pravda, že pan Novák v referencích uvádí “Personal collaboration with M. Scholtz”, ale přesto se mi moc nelíbí, že můj text pan Novák zkopíroval od slova do slova; je to appendix C kapitoly 3. Navíc tento text vůbec nekoresponduje se zbytkem práce, některé věci se opakují v jiném značení, což si pan Novák asi nevšiml.

Abych to shrnul, tato kapitola je v principu velmi zajímavá, ale extrémně nedotažená a bez jakéhokoli použitelného závěru a její součástí je opět text, jehož pan Novák není autorem, aniž by to bylo výslovně řečeno.

#### 0.4 Kapitola *Scalar perturbations in $f(R)$ cosmology in the late universe*

Jak jsem již napsal v úvodu, čtvrtá kapitola je věnována práci [3], kterou pan Novák publikoval se svými spoluautory v prestižním časopise. Bohužel není článek součástí práce, pan Novák pouze vlastními slovy obsah článku vysvětluje, což vzhledem k nižší úrovni angličtiny není nejlepší řešení.

K samotnému článku. Autoři [3] se zabývají vesmírem v pozdější etapě vývoje, přičemž zkoumají skalární perturbace na škálách menších než jsou buňky uniformity (cca 190 Mpc). Ve svém modelu uvažují nelineární  $f(R)$  teorii. Protože vesmír je na uvedené škále značně nehomogenní, autoři argumentují, že jejich přístup, který nazývají “mechanic approach” je vhodnější, než obvyklejší “averaged hydrodynamic approach”. Za použití řady nutných zjednodušení a aproximací pak numericky analyzují dynamiku velkoškálové struktury vesmíru v pozdních etapách vývoje.

Bezpochyby se jedná o zajímavý a důležitý článek. Věřím, že pan Novák musel prokázat teoretické znalosti i výpočetní dovednosti, aby se ocitl na seznamu autorů a díky tomuto článku jsem se rozhodl přiklonit k doporučení této dizertační práce k obhajobě.

## Reference

- [1] Kurki-Suonio H, *Introduction to cosmological perturbation theory* (2011)
- [2] Sharma S K and Khanal U, *Perturbation of FRW spacetime in NP formalism*, Int. J. Mod. Phys. D **23** (2013)
- [3] Eingorn M, Novák J and Zhuk A,  *$f(r)$  gravity: scalar perturbations in the late Universe*, Eur. Phys. J. C **74** (2014)