

# PRIESTOR, ČAS A KVANTOVÁ GRAVITÁCIA

Ján DUBNIČKA

---

## SPACE, TIME, AND QUANTUM GRAVITATION

The paper is devoted to the philosophico-methodological analysis of two fundamental theories – the string theory and the loop quantum gravitation. The theories attempt to unify the general theory of relativity and the quantum theory into one consistent theory that would describe, using a single language, universe as a unified dynamic system. The paper interprets the categories of „space“, „time“ and „time-space“. It analyses differing approaches to defining the above categories by the theories as well as contributions they make in developing them. Similarly, it discusses certain theoretico-methodological problems arising for the theories in constructing the new theory.

---

V posledných dvoch desaťročiach XX. storočia sa vo svete rozvinuli veľmi intenzívne práce v oblasti kozmológie, zamerané na vytvorenie novej teórie, ktorá by bola schopná „jediným jazykom“ opísať náš vesmír ako celostný dynamický systém. Ide o teóriu, ktorá by zmysluplným spôsobom dokázala zjednotiť do novej konzistentnej teórie všeobecnej teórie relativity a kvantovú teóriu.

Za posledných desať rokov bolo sformulovaných mnoho zaujímavých ideí a koncepcií, ktoré nevyhnutne vyžadujú aj filozoficko-metodologickú analýzu.

V čom je základný problém?

Všeobecná teória relativity, ktorá nemá kvantový charakter, opisuje gravitáciu v konceptuálnej forme klasickej vedy. Je to teória veľmi veľkého a „hmotného“ sveta, alebo ako konštatuje americký fyzik a kozmológ J. Smolin „teória priestoru, času a vývoja vesmíru“ ([21], 18). Všeobecná teória relativity však vždy zlyháva, keď ju konfrontujeme so správaním molekúl, atómov a elementárnych častíc, teda s oblasťou mikrosveta.

Kvantová teória úspešne predpovedá vlastnosti a správanie atómov, elementárnych častíc ako i slabej a silnej interakcie (jadrových síl), ktoré pôsobia v jadrách atómov. Poskytuje dobrý základ na pochopenie molekulárneho, atomárneho a subatomárneho sveta. Nevie si však poradiť s opisom priestoru a času v týchto oblastiach.

Pritom obe teórie – každá zvlášť – boli úspešne experimentálne overené a prinášajú relatívne presné adekvátne výsledky, vysvetľujú mnohé nové procesy a javy, ale každá z nich je vzhľadom na vesmír ako dynamický systém neúplná a ohraničená. Inak povedané, každá opisuje jeho štruktúru, vzťahy, vlastnosti atď. len z aspektu jeho určitej štruktúrnej úrovne (časti).

My sa zameriame na jeden základný ontologický problém, ktorý sa pri formulácii novej teórie ukázal ako fundamentálny, a to je povaha priestoru a času – v ich jednote časopriestoru. Vzhľadom na rozsah štúdie sa budeme zaoberať len dvoma koncepciami – teóriou superstrún a slučkovou kvantovou teóriou gravitácie.

Pre filozofa sú kategórie „priestor“ a „čas“ fundamentálne ontologické kategórie. Priestor a čas považujeme za základné formy existencie každého materiálneho objektu. „Priestor je formou koexistencie a čas formou sukcesívnej existencie (zmeny stavu) rozličných súcien“. ([3], 70) Inak povedané všetko, čo jestvuje, jestvuje niekde v priestore a čokoľvek sa udeje, udeje sa v nejakom čase, na všetkých štruktúrnych úrovniach reality – teda aj v celom našom vesmíre. Ako ukázala teória relativity, pohyb „sám ako spôsob existencie hmoty vyjadruje vnútornú jednotu priestoru a času: priestor a čas sú len protikladné momenty jednotnej časopriestorovej variety“. ([3], 70)

Vzniká otázka. Aká je táto časopriestorová varieta, aké sú jej základné charakteristiky, kvalitatívne (topologické) a kvantitatívne (metrické) vlastnosti? Odpoveď ani na súčasnej úrovni vedeckého poznania nie je jednoduchá.

V dejinách filozofického myslenia sa sformovali štyri základné koncepcie priestoru a času – substančná, relačná, dynamická, statická ([18]). (Vo filozofickej literatúre sa môžeme stretnúť aj s inou klasifikáciou – extenzionálna, atributívna, akcidentálna atď. koncepcia priestoru a času.)

Pokúsime sa ukázať, ako k týmto kategóriám pristupujú vyššie uvedené teórie, ktoré najviac pokročili pri riešení problému kvantovej gravitácie. (Samozrejme existujú aj iné koncepcie, ktoré pri konštrukcii kvantovej teórie gravitácie aplikujú odlišné prístupy – teória tvistorov, teória nekomutatívnej geometrie, teória toposov, teória supergravitácie.) ([9], [10], [14], [21]).

Všeobecne je známe, že v Newtonovej klasickej mechanike sú priestor a čas absolútne entity. Definoval ich vo svojej známej práci *Matematické princípy prírodnej filozofie* v roku 1687. Podľa Newtona absolútny priestor

v samej podstate vo vzťahu k čomukoľvek vonkajšiemu, bude vždy rovnaký a nepohyblivý a absolútny, pravdivý matematický čas sám osebe a vo svojej podstate bez akéhokoľvek vzťahu k čomukoľvek vonkajšiemu, plynie rovnomerne a nazýva sa trvaním.

Absolútny priestor a čas sa tak stávajú arénou dynamiky fyzikálnych objektov, pričom sa samy na fyzikálnych procesoch nepodieľajú. Vystupujú ako nejaká „nelátková substancia“, ktorá je vždy v rovnakom stave. To znamená, že u Newtona sa nemenia ani metrické (kvantitatívne), ani topologické (kvalitatívne) vlastnosti priestoru a času. V tejto koncepcii sa zavádza absolútna univerzálna súčasnosť a nekonečne rýchle šírenie signálu, čo znamená okamžité jeho pôsobenie v celom vesmíre.

Táto klasická predstava priestoru a času ako nelátkových substancií bola predpokladom (východiskom) klasickej fyziky a teda aj Newtonovej kozmológie až do začiatku 20. storočia, keď prichádza na scénu A. Einstein so svojou teóriou relativity. Od tohto obdobia sa traduje, že A. Einstein zásadne zmenil koncepciu priestoru a času. Podľa tejto tradície bola substanciálna koncepcia nahradená relačnou koncepciou priestoru a času. Tento pohľad nie je celkom pravdivý. „V teórii relativity, podobne ako v klasickej mechanike, fungujú dva typy priestoru a času, ktoré realizujú substanciálnu aj atributívnu (v danom prípade relačnú) koncepciu“ ([1], 190). Ako vyplýva z doterajších analýz (A. Grünbaum, M. D. Achundov, L. Smolin atď.) ani všeobecná teória relativity sa nedokázala zrieknuť absolútneho priestoru a času. Ukázalo sa, že predovšetkým vo všeobecnej teórii relativity sa nedarí ontologický podriaďiť časopriestor hmote. Podľa A. Grünbauma „hmota (vo všeobecnej teórii relativity – J. D.) nie je zdrojom všeobecnej štruktúry časopriestoru, ale len mení tvar štruktúry, ktorá by bola pre autonómny časopriestor plochá“ ([11], 517). Hoci vo všeobecnej teórii relativity sú geometrické vlastnosti časopriestoru určované rozmiestnením gravitačných mäs, geometria časopriestoru sa týmto rozmiestnením neurčuje. Ako konštatuje J. Wheeler, „geometria predurčuje zákony pohybu hmoty a hmota predpisuje geometrii zakrivenie. Geometria časopriestoru odteraz nie je len arénou, kde sa rozohrávajú boje hmoty a energie. Geometria sa sama zúčastňuje na tejto bitke“ ([22], 18). Nakoniec sám A. Einstein v roku 1953 priznáva, že prekonanie pojmu absolútneho priestoru (a času – J. D.) predstavuje „proces, ktorý sa podľa všetkého ešte ani teraz neskončil“ ([8], 347).

Prechod od klasickej mechaniky k teórii relativity môžeme interpretovať nasledovne: „Na teoretickej úrovni sa realizoval prechod od abso-

lútneho a substanciálneho priestoru a času k absolútnemu a substanciálnemu časopriestoru. Na empirickej úrovni sa realizoval prechod od extenzionálneho priestoru a času k relačnému priestoru a času“ ([1], 192). V teórii relativity sa absolútna súčasnosť zmenila na relatívnu súčasnosť. Niektorí autori takúto jednoznačnosť výkladu všeobecnej teórie relativity nepovažujú za správnu a tvrdia, že je to problém jej interpretácie. Ako konštatuje napr. L. Smolin, „všeobecná teória relativity sa všeobecne nesprávne interpretovala, dokonca aj zo strany mnohých fyzikov, odborníkov v tejto oblasti. Všeobecná teória relativity sa, žiaľ, bežne považovala za stroj produkujúci časopriestorové geometrie, s ktorými sa zaobchádzalo úplne rovnako, ako Newton zaobchádzal so svojim absolútnym priestorom a časom: ako s nemennými a absolútnymi entitami, v ktorých sa pohybujú objekty. Potom už stačilo odpovedať len na otázku, ktorý z možných časopriestorov opisuje reálny vesmír“ ([21], 133). To však zatiaľ nevieme vôbec povedať, i keď poznáme 12 relativistických modelov vesmíru. Podľa L. Smolina „jediný rozdiel medzi týmto a Newtonovým absolútnym priestorom a časom bol v tom, že v Newtonovej teórii neexistovala možnosť voľby, zatiaľ čo všeobecná teória relativity ponúka výber z viacerých možných časopriestorov“ ([21], 133). L. Smolin samozrejme nekritizuje len fyzikov – kozmológov ale i filozofov, pretože „v tomto duchu sa teória vykladá v niektorých učebniciach, a takto ju interpretujú aj niektorí filozofi, ktorí by sa v tom predsa len mali vyznať“ ([21], 133).

Po tejto „kritike“ sa pozrime, ako k danému problému pristupuje teória strún a superstrún (ďalej len strún).

Teória strún sa snaží zjednotiť „všetky sily prírody a poskytnúť takpovediac hlavnú rovnicu riadiacu širokú sféru platnosti fyzikálnych zákonov od kvarkov až po vesmír“ ([9], 11). Teória strún však vyžaduje zásadnú zmenu chápania priestoru, času a hmoty, a teda aj zmenu v interpretácii týchto kategórií.

Pokúsime sa načrtnúť základy a východiská tejto interpretácie a zároveň ukázať, čo nového teória strún prináša k interpretácii kategórií priestoru, času a časopriestoru.

Základným cieľom teórie strún, ako sme už naznačili, je neprotirečivé zjednotenie všeobecnej teórie relativity a kvantovej teórie do jednotnej teórie, ktorá by bola schopná zmysluplne opísať ako mikrosvet tak aj megasvet. Základný problém z hľadiska teórie strún je gravitácia, pre ktorej opis zatiaľ nepoznáme kvantovú teóriu. Ako kvantovať gravitá-

ciu? Ukazuje sa, že pri rozmeroch s Planckovou dĺžkou, čo je  $10^{-35}$  m a Planckovým časom  $10^{-43}$  s, Riemannova geometria, ktorá je jazykom všeobecnej teórie relativity, prestáva na tejto úrovni adekvátne opisovať reálny časopriestor a vyžaduje si modifikáciu. „Na planckovských vzdialenostiach je potrebný nový typ geometrie, ktorý je v súlade s fyzikou teórie strún. Tomuto novému geometrickému rámcu hovoríme kvantová geometria“ ([9], 208). Autori tejto koncepcie tvrdia, že z teórie strún plynú nové geometrické vlastnosti časopriestoru.

V Einsteinovej všeobecnej teórii relativity gravitácia zakrivuje ako priestor tak aj čas, presnejšie časopriestor. Na rozdiel od Newtonovej klasickej fyziky, vo všeobecnej teórii relativity, ako konštatuje J. Wheeler, „v einsteinovskom opise prírody geometria nie je len zakrivený priestor, ale zakrivený dynamický priestor“ ([22], 19). Všeobecná teória relativity tak objasnila gravitačné pôsobenie (gravitačnú interakciu) geometricky ako vlastnosť zakriveného priestoru.

V čom teda je potrebné pozmeniť Riemannovu geometriu? Podľa teórie strún predovšetkým v chápaní ultramalých objektov. V Riemannovej geometrii interpretujeme tieto objekty (elementárne častice) ako bodové. V jeho geometrickom formalizme objekty nemôžu byť menšie ako je planckovský rozmer, pretože za týmto rozmerom stráca zmysel pojem vzdialenosti medzi dvoma bodmi, ktorý je v Riemannovej geometrii fundamentálnym pojmom. Inak povedané, Riemannova geometria je dobrou aproximáciou opisu reality v kozmických rozmeroch, kde galaxie vystupujú ako neštrukturované body, ale v oblasti mikrosвета nedáva adekvátny opis. Naproti tomu v teórii strún pojem bodová častica neexistuje. Je nahradený nebodovým objektom – strunou. Ten sa skúma v rámci kvantovej geometrie teórie strún, ktorá odhaľuje „nové“ a „nečakané“ vlastnosti vesmíru. Stúpenci teórie strún sa snažia ukázať, že časopriestorová štruktúra vesmíru ako dynamického systému je určená časopriestorovou štruktúrou ultramikrosвета.

Podľa Riemannovej geometrie môže byť vesmír ľubovoľne malý (viď. napríklad singularita – nulový objem, nekonečná energia a hustota atď.), ale podľa kvantovej geometrie „vesmír nemôže byť nikdy a v žiadnom smere priestoru menší ako Planckova dĺžka“ ([9], 211). Z uvedeného vyplýva, že nová strunová fyzika explanačne geometriu časopriestoru podstatne iným spôsobom.

Čo je v nej podstatne novým rysom? V stručnosti uvedieme niektoré základné fakty, ktoré autori teórie strún pre jednoduchosť interpretujú

na tzv. hadicovom vesmíre. Bodová častica sa môže v takomto dvojrozmernom priestore pohybovať tromi spôsobmi – v smere dlhého rozmeru, v smere zvinutej dimenzie alebo v kombinácii. Struna okrem spomenutých spôsobov môže navyše oscilovať. Oscilácie zabezpečujú strune dve vlastnosti: a) náboj, b) hmotnosť. Struna môže byť: a) nenavínutá, b) navínutá, c) viackrát navínutá. (Bodová častica sa nemôže navínuť). Podstatným rozdielom medzi navínutou strunou a nenavínutou je jej minimálna možná hmotnosť, ktorú navínuté struny môžu mať a ktorá je určená obvodom kruhového rozmeru a počtom navínutí. Inak povedané, „minimálna hmotnosť navínutého módu je úmerná polomeru kružnice“ ([9], 213). Týka sa to i energie uväznenej v navínutej strune. Pri nenavínutých strunách, ktoré majú tiež určitú minimálnu dĺžku, kvantovomechanické efekty ich príspevok k hmotnosti sú schopné vyrušiť a môžeme ich interpretovať ako častice bez kludovej hmotnosti (fotón, gravitón atď.).

Ako sa tieto vlastnosti prejavujú na geometrii? Zástanci teórie strún tvrdia, že „všetky fyzikálne procesy v hadicovom vesmíre s polomerom kruhovej dimenzie kratším ako Planckova dĺžka, ktorý sa naďalej skraca, sú úplne totožné s procesmi v inom vesmíre, kde je polomer väčší ako Planckova dĺžka a stále narastá“ ([9], 213). „To, čo sa zdalo byť kozmickým kolapsom, teraz vypadá ako kozmické odpruženie“ ([9], 214). Z danej interpretácie vyplýva, že „pri veľkom tresku ani pri eventuálnom veľkom krachu nemá vesmír nikdy nulovú veľkosť (objem – J. D.), ale má prinajmenšom planckovské rozmery vo všetkých smeroch“ ([9], 225).

Teória strún ide oveľa ďalej ako Einsteinova všeobecná teória relativity. Už v Einsteinovej všeobecnej teórii relativity sa časopriestor zakrivoval pod vplyvom hmoty. Podľa tejto teórie sa však jeho spojitosť nemôže nijakým spôsobom narušiť. To znamená, že časopriestor opísaný všeobecnou teóriou relativity nemôže mať žiadne záhyby, trhliny alebo prepichnutia. „Pokiaľ by sa také nepravidelnosti v priestore vyvinuli, rovnice všeobecnej teórie relativity by sa zrútili a ohlásili by katastrofu kozmického rozmeru, akým sa náš dobre vychovaný vesmír zjavne vyhýba“ ([9], 233). Teória strún však ukazuje, že za určitých podmienok sa priestor môže roztrhnúť. Ukázalo sa, že prostredníctvom matematických procedúr sa môžu „niektoré Calabiho – Yauove priestory premeniť na iné roztrhnutím ich povrchu a zošitím vzniknutého otvoru podľa matematicky presného vzorca“ ([9], 235). Matematici pomenovali postupnosť týchto manipulácií flop. Čo je však pre nás z hľadiska prie-

storu, času a časopriestoru zaujímavé, že nová flopom vytvorená Calabiho – Yauova varieta je v určitých prípadoch topologicky odlišná. Inak povedané, stúpenci strunovej teórie sa pokúšajú dokázať, že priestor, čas a aj časopriestor môžu za určitých podmienok meniť svoju topológiu, čo všeobecná teória relativity zásadne nepripúšťala. V začiatočných fázach vývoja vesmíru „z pohľadu teórie strún rozhodne mohlo dôjsť k trhaniu priestoru, čiže k zmene jeho topológie“ a dodávajú, že „z pozorovanej stability hmôt elementárnych častíc vyplýva, že pokiaľ dnes vesmír mení topológiu, robí tak veľmi pomaly, tak pomaly, že vplyv na hmoty častíc je menší ako citlivosť dnešných meracích aparátúr“ ([9], 249). Taká je v stručnosti interpretácia priestoru, času a časopriestoru v teórii strún.

Samozrejme teória strún nastoľuje aj mnoho ďalších problémov, ktoré súvisia s geometriou časopriestoru nášho vesmíru, ako je jedenásť dimenzií tohto časopriestoru, kauzálne pôsobenie, problém konštrukcie M-teórie, čierne diery atď. Všetky tieto problémy majú aj hlboký filozoficko-metodologický dosah. Pokúsime sa ho naznačiť z aspektu interpretácie priestoru, času a časopriestoru v teórii strún.

Najskôr sa však pozrime, ako sa s teóriou strún vyrovnávajú súčasní fyzici a kozmológovia.

Na jednej strane je vyzdvihovaná ako zásadne nový prístup pri opísaní nášho vesmíru na jeho rôznych štruktúrnych úrovniach a je zatiaľ v danej podobe „jediným známym spôsobom konzistentného zjednotenia gravitácie s kvantovou teóriou a negravitačnými interakciami“ ([21], 173). Ako zdôrazňuje L. Smolin, „medzi jej silné stránky patrí prirodzený spôsob zjednocovania všetkých častíc a síl, ale aj to, že existuje veľa konzistentných strunových teórií zahrňujúcich aj gravitáciu. Teória strún je okrem toho aj dokonalou realizáciou hypotézy duality“ ([21], 173).

Na druhej strane však vyvoláva – ako každá nová teória – mnoho otázok, problémov, ba často nesúhlas. Uvedme aspoň tie najpodstatnejšie výhrady a námietky proti teórii strún, ktoré sa nejakým spôsobom dotýkajú aj interpretácie priestoru, času a časopriestoru.

1. Teória strún v dnešnej podobe nie je definitívna a vlastne nevieme, čo si máme pod ňou predstaviť. „Chýba nám dobrá definícia teórie strún a nepoznáme jej fundamentálne princípy... Problém je v tom, že dodnes sa nepodarilo formulovať teóriu strún v podobe prijateľnej fundamentálnej teórie“ ([21], 164). Existujú mnohé riešenia určitej teórie, ale chýba sama teória, podľa ktorej sa tieto riešenia realizujú. Zatiaľ sa nepodarilo pokročiť od zoznamu riešení k princípom teórie. „V súčasnosti ju z väč-

šej časti chápeme iba prostredníctvom... približnej procedúry (poruchová teória), pretože je skôr výsledkom modifikácie približnej procedúry, ako nejakej teórie“ ([21], 166).

2. V súčasnosti neexistuje jedna teória strún, ale celé jej triedy, ktoré môžeme rozdeliť na dva základné typy: a) konzistentné, b) nekonzistentné. Pre nás sú zaujímavé práve konzistentné teórie, pretože poskytujú pre všetky fyzikálne veličiny konečné a zmysluplné výrazy. Problém je však v tom, že počet konzistentných teórií strún je veľmi veľký. Tak napr. vo vesmíre s deviatimi priestorovými rozmermi existuje päť odlišných typov konzistentných teórií strún. „Keď postúpime do trojrozmerného sveta, v ktorom podľa všetkého žijeme, zistíme, že existujú prinajmenšom státisíce rôznych konzistentných strunových teórií. Vo väčšine z nich sa objavujú voľné parametre, čiže teórie nie sú schopné poskytnúť jednoznačné predpovede pre také veličiny, ako sú hmotnosti elementárnych častíc“ ([21], 172). Vzniká otázka: O čom vlastne hovoria jednotlivé teórie strún, o možných typoch vesmírov, o rôznych aspektoch jedného vesmíru, alebo o rovnakých vlastnostiach vesmíru z rôznych aspektov?

3. V teórii strún, a to je tiež zásadne nový pohľad, neexistujú žiadne častice, ale len jednorozmerné struny, ktoré sa pohybujú v priestore, pričom nie sú vnútorne štruktúrované. „Existuje len jeden typ struny a v teórii sa postuluje, že rozličné typy častíc nie sú ničím iným ako rozličnými módmí kmitov týchto slučiek“ ([21], 169). Z uvedeného vyplýva, že všetky dnes známe elementárne častice, ktoré fyzika elementárnych častíc považuje za bodové, sú v skutočnosti vnútorne štruktúrované. To znamená, že „bodovosť“ je z hľadiska teórie strún len určitým priblížením a má svoje hranice. Zdá sa, že na planckovskej úrovni ( $10^{-35}$  m a  $10^{-43}$  s) sa otvára nová štruktúrna úroveň reality, s novými špecifickými vlastnosťami, vzťahmi a zákonitosťami.

4. Ukázalo sa však, že struny sú iba jedným typom zo širokej triedy objektov, ktoré majú viac ako jeden rozmer a nazývajú sa „p-brány“. Sú to „objekty, ktoré sa rozprestierajú do p rozmerov. Špeciálnymi prípadmi sú struny, ktoré majú  $p = 1$  a membrány, pre ktoré platí  $p = 2$ “ ([12], 54). Podľa teórie „p-brán“ je  $p = 1$ -brána jednorozmerná struna,  $p = 2$ -brána je dvojrozmerná plocha alebo membrána atď. Pritom neexistuje nijaký dôvod uprednostňovať  $p = 1$ -brány (struny) pred prípadmi s inými hodnotami  $p$ . To však znamená, že teória strún je čiastkovou teóriou, ktorá opisuje len  $p = 1$ -brány. Čo je však zaujímavé, „všetky p-brány sa



dajú najsť ako riešenia v teóriách supergravitácie s desiatimi alebo jedenástimi rozmermi“ ([12], 54).

5. Mnohé strunové teórie predpovedajú existenciu elementárnych častíc, aké sme doteraz nepozorovali a navyše „väčšina konzistentných teórií strún predpovedá aj iné symetrie medzi časticami, než aké sa pozorujú. Najdôležitejšie z nich sú supersymetrie“ ([21], 172). Na tom by z metodologického hľadiska nebolo nič zvláštne. Každá dobrá vedecká teória má aj predikčnú funkciu, to znamená, že je schopná z aspektu svojej intenzity a extenzity predpovedať existenciu takých materiálnych štruktúr, aké sú z hľadiska danej vedeckej teórie logicky prípustné, explanovateľné, aj keď sme ich zatiaľ nepozorovali. Problémom však je to, že teória strún vo svojej terajšej podobe neposkytuje veľa predpovedí o skutočne pozorovanej fyzike nášho vesmíru a čo je ešte horšie, „ťažko si vieme čo len predstaviť experiment, ktorý by sa mohol uskutočniť v nasledujúcich desaťročiach a mohol by ju definitívne potvrdiť alebo vyvrátiť“ ([21], 176).

6. Teória strún – ako sme uviedli – je pokusom o zmysluplné konzistentné zjednotenie všeobecnej teórie relativity a kvantovej teórie. Tu sa však stretávame s ďalším vážnym problémom, a to sú nekonečné veličiny. Kým v kvantovej elektrodynamike, v kvantovej chromodynamike ako i Weinbergovej – Salamovej teórii pri riešení ich rovníc vieme odstrániť nekonečné výrazy procedúrou renormalizácie, nedá sa táto metóda aplikovať na všeobecnú teóriu relativity. Inak povedané, Einsteinoва teória gravitácie nie je renormalizovateľná, pretože „častice pohybujúce sa v diagramoch (Feynmanove diagramy – J. D.) môžu nadobúdať ľubovoľne veľké hodnoty energie. Podľa W. Daviesa „práve snahy o prekonanie mŕtveho bodu nerenormalizovateľnosti spôsobili určité zmätenie pojmov kvantovej gravitácie“ ([5], 145). Lenže intenzita gravitačnej sily je úmerná energii, pretože podľa Einsteina energia je hmotnosť a podľa Newtona na hmotnosť pôsobí gravitácia. Takže diagramy s väčšími energiami dávajú primerane väčšie efekty, pričom podľa teórie môžu byť energie vnútri diagramov ľubovoľne veľké“ ([21], 171). Zatiaľ sa nenašiel spôsob, ako formulovať gravitačnú teóriu v jazyku častíc vystupujúcich vo Feynmanových diagramoch.

7. Veľmi vážnou výhradou proti teórii strún je jej interpretácia dimenzií a geometrie časopriestoru. Ukazuje sa, že teórie strún nie sú konzistentné v obvyklom štvorrozmernom časopriestore. Obyčajne sa pracuje s desiatimi, jedenástimi alebo dvadsiatimi šiestimi rozmermi. Ako

zdôrazňuje L. Smolin, „teória strún je najjednoduchšia, ak má svet deväť priestorových rozmerov“ ([21], 175). „Keďže desať alebo jedenásť rozmerov veľmi zodpovedá našej bežnej skúsenosti s časopriestorom, bol tu nápad, že šesť alebo sedem rozmerov je zvinutých až natoľko, že ich vôbec nevnímame; uvedomujeme si iba zostávajúce štyri veľké a takmer ploché dimenzie“ ([12], 54). Hovoríme, že nadbytočné rozmery sú kompakťované. Z uvedeného vyplýva, že zavedenie viacrozmerných časopriestorov do teórie strún si vyžiadala z metodologického aspektu jej jednoduchosť. Mnohí fyzici však nie sú naklonení takejto procedúre. Napríklad S. Hawking tvrdí, že sa vždy zdráhal uveriť na dodatočné rozmery. Podľa neho „nadpočetné časopriestorové dimenzie sú samozrejme úplne bežné vo vedecko-fantastickej literatúre, sú takmer nevyhnutnosťou“ ([15], 159). Zatiaľ však neexistujú nijaké pozorovania, ktoré by si vyžadovali dodatočné dimenzie na svoje vysvetlenie. Navyše teória strún nevysvetľuje, prečo práve existujú len tri priestorové rozmery a jeden časový, v ktorých je časopriestor pomerne plochý, a prečo by mali byť len niektoré dimenzie zvinuté. „Vo veľmi ranom vesmíre pravdepodobne boli všetky rozmery veľmi zakrivené. Prečo sa jeden časový a tri priestorové rozmery vyrovnali a ostatné rozmery zostali zvinuté?“ ([15], 159) Jednou z odpovedí by mohol byť známy antropický princíp. Tak napríklad dva priestorové rozmery nie sú dostatočné pre vývoj takých komplexných bytostí, ako je človek. Problém by však bol aj s viacerými priestorovými rozmermi. Napríklad gravitačná sila medzi dvoma telesami by klesala so vzdialenosťou rýchlejšie ako v trojrozmernom priestore, čo by malo vplyv na stabilitu dráh planét okolo slnka, samo slnko by bolo veľmi nestabilné, štruktúra atómov by bola nestabilná atď. „Potom sa zdá byť jasné, že život prinajmenšom taký, aký ho poznáme, môže existovať len v oblasti časopriestoru, v ktorej jeden časový a tri priestorové rozmery nie sú zvinuté do veľmi malého objemu“ ([15], 161). Nadpočetné rozmery priestoru by boli príliš malé aj z hľadiska kozmonautiky, pretože by nemohli byť vzhľadom na svoje rozmery využité na cestovanie kozmickou loďou. „Z pohľadu teórie strún neexistuje nijaký špeciálny dôvod, prečo by sa práve šesť (alebo viacej – J.D.) rozmerov malo kompakťovať, zatiaľ čo zvyšné tri by zostali veľké“ ([21], 176).

Ako ukazuje J. Smolin, každému spôsobu kompakťovacie zodpovedá iná geometria a topológia šiestich nadbytočných rozmerov. Bolo by zaujímavé dokázať tézu, či a ako geometria nadbytočných rozmerov ovplyvňuje intenzitu interakcii pozorovaných elementárnych častíc a ich

hmotností. Ak berieme teóriu strún vážne, naznačuje nám, že „svet, ktorý vidíme, poskytuje iba chudobnú, úzku vzorku všetkých možných fyzikálnych javov, pretože ak je teória pravdivá, hovorí, že väčšina rozmerov a väčšina symetrií je skrytá“ ([21], 176). „Zatiaľ je jej úspešnosť dosť patetická: teória strún nevie opísať ani štruktúru slnka, nehovoriac o čiernych dierach“ ([14], 122).

Vidíme, že k teórii strún majú fyzici vážne výhrady z hľadiska samotnej fyziky. Ale tieto výhrady majú podstatný dosah aj na filozofické a metodologické otázky týkajúce sa interpretácie priestoru, času a časopriestoru v teórii strún. Pokúsime sa načrtnúť niektoré z nich.

V dejinách filozofického myslenia vyčleňujeme štyri základné koncepcie interpretácie priestoru a času – substanciálna, relačná, dynamická a statická. (Môžeme sa stretnúť aj s inou klasifikáciou – extenzionálna, atributívna, akcidentálna atď.) Pokúsme sa ukázať, v rámci akej koncepcie sa interpretujú tieto kategórie v teórii strún.

Pretože teória strún, ako sme uviedli, sa snaží o konzistentné zjednotenie všeobecnej teórie relativity a kvantovej teórie, musí sa nejakým spôsobom vyrovnáť s interpretáciou priestoru, času a časopriestoru z aspektu oboch teórií.

Teória strún, ako sme už uviedli, hľadá cesty k vytvoreniu novej konzistentnej fyzikálnej teórie, ktorá by dokázala adekvátne a neprotirečivo opísať náš vesmír na všetkých jeho štruktúrnych úrovniach – mikrosvet, makrosvet, megasvet. Zaujímá nás, ako sa v tejto teórii mení interpretácia kategórií priestor, čas a časopriestor. Podarí sa teórii strún prekonať absolútnosť časopriestoru? Ako však ukazujú formulácie teórie strún v jej súčasnej podobe, ani jej sa nedarí tento problém riešiť. Teória strún sa netají tým, že aj v nej zohráva dôležitú úlohu geometrický model časopriestoru. „V teórii strún sa struny pohybujú na pozadí časopriestoru. Vlny na strune sa interpretujú ako častice“ ([12], 52). Na dnešnej formulácii teórie strún je najhoršie to, že „nerešpektuje základné poučenie zo všeobecnej teórie relativity, že časopriestor nie je nič iné ako vyvíjajúci sa systém vzťahov, teória strún však závisí od pozadia“ ([21], 163). V nej sa „struny pohybujú na pozadí absolútneho a nemenného časopriestoru. O geometrii priestoru a času sa spravidla predpokladá, že je raz a navždy daná a nemenná, a deje sa jedine to, že niektoré struny sa voči pevnému pozadiu pohybujú a interagujú“ a navyše „v každej teórii strún sa pohyb odohráva voči inému časopriestorovému pozadiu, takže keď chceme definovať konkrétnu teóriu, musíme v prvom rade konkre-

tizovať dimenziu priestoru a geometriu časopriestoru“ ([21], 174 – 175). Z uvedeného vyplýva, že ani teória strún v jej dnešnej podobe nedokázala prekonať absolútny časopriestor a z hľadiska jeho štruktúry ani jeho substancionalnosť. Dokumentuje to aj tým, že štruktúru časopriestoru sťažňuje „s kolosálnym množstvom strún, ktoré realizujú ten istý pravidelný druh vibrácie zodpovedajúci gravitónu“ ([9], 330). Časopriestor sa interpretuje ako „tkanina“ zhotovená zo strún. Podľa J. Smolina „správny prístup spočíva v tom, že celý systém vzťahov tvoriacich priestor a čas treba interpretovať ako jednu dynamickú entitu bez toho, aby sme ju akokoľvek fixovali“ ([21], 174).

Teória strún však oproti teórii relativity urobila ďalší krok dopredu vzhľadom k vlastnostiam priestoru a času. Kým teória relativity odabsolutizovala metrické vlastnosti priestoru, času a časopriestoru, teória strún zrelativizovala aj ich topologické vlastnosti (napr. rozmernosti priestoru a časopriestoru, ich spojitosť atď.), ktoré sa ešte donedávna považovali za univerzálne. Teória strún už pozná pretrhnutie priestoru, prepichnutie priestoru, rozpáranie priestoru, zošívanie priestoru atď., čo samozrejme vedie vždy k zmene topológie priestoru a utvrdzuje nás v tom, že táto teória interpretuje priestor, čas a časopriestor v duchu substancionalnej koncepcie. J. Smolin uzatvára, že v teórii strún sú „prvky novej fyziky skombinované so starým newtonovským rámcom, podľa ktorého priestor a čas je spojitý, nekonečne deliteľný a absolútny“ ([21], 181).

Významnou koncepciou, ktorá intenzívne rozvíja problémy kvantovej gravitácie je slučková kvantová teória gravitácie. Je to teória, ktorá podobne ako teória strún a superstrún sa pokúša zjednotiť všeobecnú teóriu relativity a kvantovú teóriu do jedinej relativisticko-quantovej teórie. Pokúsime sa v krátkosti naznačiť jej prístup k riešeniu tohto problému.

a) Táto teória je teóriou zásadne nového chápania časopriestoru (priestoru a času v ich jednote) a jeho geometrie. Na scénu vstupuje kvantová geometria, založená na tzv. spinových sieťach (matematické štruktúry, ktoré ešte v šesťdesiatich rokoch 20. storočia vypracoval R. Penrose ([14]), ktorá priamo vyplýva z kombinácie základných princípov kvantovej teórie a teórie relativity.

b) Slučková kvantová teória gravitácie ako teória časopriestoru tento interpretuje ako kvantovaný, to znamená, že existuje jeho najmenšie kvantum objemu (kvantum priestoru, kvantum času, ale aj kvantum hmotnosti, kvantum teploty, kvantum objemu ktoré sú považované za Planckove konštanty a sú definované prostredníctvom fundamentálnych

konštant  $G$ ,  $h$ ,  $c$ ). „Priestor nie je spojitý. Vyskytuje sa len v špecifických kvantovaných jednotkách plochy a objemu.“

Za základné jednotky sa považujú:

*Planckova dĺžka* –  $(Gh/c^3)^{1/2} \approx 10^{-35}$  m.

*Planckov čas* –  $(Gh/c^5)^{1/2} \approx 10^{-43}$  s.

*Planckova hmotnosť* –  $(hc/G)^{1/2} \approx 10^{-8}$  kg  $\approx 10^{19}$  GeV.

*Planckova teplota* –  $(hc^5/G)^{1/2}/k \approx 10^{32}$  K.

*Najmenšia možná nenulová plocha* –  $10^{-66}$  cm<sup>2</sup>.

*Najmenší možný nenulový objem* –  $10^{-99}$  cm<sup>3</sup>.

V každom cm<sup>3</sup> priestoru sa nachádza  $10^{99}$  atómov objemu priestoru.

c) Slučková kvantová teória gravitácie dokáže predpovedať zakrivenie priestoru a typ zakrivenia. A pretože podľa nej práve zakrivenie priestoru je tým, čo vytvára gravitáciu, formuluje aj samotnú teóriu kvantovej gravitácie.

d) V slučkovej teórii kvantovej gravitácie nie je geometria časopriestoru konštantná (stabilná), ale sa mení v čase, často „skokmi“, ktoré sa chápajú ako kvantové fluktuácie geometrie.

Áké sú východiská budovania slučkovej kvantovej teórie gravitácie a áké z toho plynú dôsledky?

Základným východiskom tejto teórie, ktorý L. Smolin nazýva prvý princíp je: Vesmír je uzavretý systém. „Vesmír je všetko, čo existuje a mimo neho nemôže existovať vôbec nič... Vysvetlenie čohokoľvek vo vesmíre musí vychádzať iba z vecí existujúcich vo vesmíre“ ([21], 30). Na prvý pohľad veľmi sympatický princíp, pokiaľ ho nezačneme analyzovať z aspektu ontologických kategórií „bytie“, „objektívna realita“, „materiálny svet“. Ak budeme „vesmír“ považovať za synonymum vyššie uvedených ontologických kategórií, teda za všetko, čo existuje, potom treba vysvetliť, prečo ho považujeme za uzavretý systém. Ak je „vesmír“ špeciálnovedným pojmom, ktorý označuje (časopriestorovo) uzavretý systém, teda tú časť materiálneho sveta, ktorá vznikla big-bangom a ktorá sa v súčasnosti rozpína, potom nemôže byť všetkým čo existuje. Tento problém necháme zatiaľ otvorený. Dané východisko má však v teórii slučkovej kvantovej teórie vážne dôsledky. Jeden z dôležitých je, „že akúkoľvek entitu vo vesmíre môžeme *definovať* alebo *opísať* len pomocou iných vecí vo vesmíre. Ak niečo zaujíma polohu, môžeme ju definovať iba vzhľadom na iné veci vo vesmíre“ ([21], 31).

Dôležitou kategóriou v tejto koncepcii je kategória pohyb. „Ak sa niečo pohybuje (vec), dá sa to zistiť iba sledovaním zmien polohy tejto veci

voči iným veciam vo vesmíre“ ([21], 31). Ako ukážeme ďalej, kategória *pohyb* v celej slučkovej kvantovej teórii zohráva kľúčovú úlohu.

Z vyššie uvedeného zároveň vyplýva, že *priestor* v rámci daného vesmíru neexistuje „mimo jestvujúcich vecí, je len jednou stránkou vzťahov medzi nimi“ ([21], 31). Inak povedané, „priestor nezávislý od vzťahov medzi reálne existujúcimi vecami nemá nijaký zmysel“ ([21], 31). Konceptia slučkovej kvantovej teórie gravitácie je teda jednoznačne zameraná proti koncepcii absolútneho a substanciálneho priestoru a zakladá sa na relačnej koncepcii.

Podobne ani *čas* v tejto koncepcii nie je absolútny. Úzko súvisí s pohybom. „Čas nezávisiaci od zmeny (vecí – J. D.) neexistuje... Čas nie je nič iné ako miera zmeny“ (vecí – J. D.) ([21], 38). Môžeme ho opísať len prostredníctvom zmien v sieti vzťahov, ktoré opisujú priestor.

Z uvedeného vyplýva, že „priestor ani čas neexistujú nezávisle od sústavy vyvíjajúcich sa vzťahov (medzi entitami – J. D.), z ktorých sa skladá vesmír“ ([21], 38). Chápanie priestoru a času je v tejto koncepcii dôsledne relačné, zavádza „čiru relačnú povahu opisu priestoru a času do všeobecnej teórie relativity“ ([21], 38). Inak povedané, v slučkovej kvantovej teórii gravitácie sa zavádza vlastnosť „nezávislosť od pozadia“, čo znamená, že neexistuje žiadne nemenné pozadie alebo javisko, ktoré by po celý čas zostávalo bez zmeny, na rozdiel od všeobecnej teórie relativity, ale aj teórii strún, ktoré toto pozadie majú. „Hmota neexistuje v časopriestore, ale naopak priestor a čas sú vytvárané určitými stavmi hmoty – stavmi jej diferencovanosti a existenciou objektov s konečnou kľudovou hmotnosťou. Ale to je to, čo očakávame od relačnej koncepcie priestoru a času“ ([2], 240).

Môžeme teda konštatovať, že vesmír nie je nikdy statický, vždy je v pohybe (zmene). Prvotný je pohyb a zmena na všetkých jeho štruktúrnych úrovniach. V koncepcii slučkovej kvantovej teórie gravitácie potom veci ako také vôbec neexistujú. Vo vesmíre „existujú iba pomerne rýchle a pomerne pomalé procesy“ ([21], 66). A tu sa dostávame v rámci danej koncepcie k ďalšiemu zaujímavému problému. Objekt a jeho stav sa v nej interpretujú ako „ilúzia“. To znamená, že vo vesmíre neexistujú ako absolútne entity, ale má zmysel hovoriť o nich len vo veľmi približnom a dočasnom význame, pretože sú v procese neustálej zmeny. Z pohľadu slučkovej kvantovej teórie gravitácie sa vesmír skladá z veľkého počtu *udalostí*, pričom udalosť sa interpretuje ako najmenšia časť procesu, ako najmenšia jednotka zmeny. Vzniká tu však otázka zmeny

čoho - udalosti? Udalosť tu vystupuje ako základná jednotka zmeny. Vesmír udalostí je relačný, všetky jeho vlastnosti sú opísané pomocou vzťahov medzi udalosťami. „Udalosť“ v danej teórii nahradila „objekt“? V opačnom prípade by udalosť bola procesom vyjadrujúcim zmenu stavu nejakého objektu. Táto časť slučkovej kvantovej teórie gravitácie vyžaduje hlbšiu argumentáciu a zdôvodnenie.

Ďalšou dôležitou kategóriou pri opise vesmíru je kategória „kauzality“. „Práve vďaka príčinnosti má svet určitú štruktúru... a preto sú príčinné vzťahy pre formovanie nášho sveta také dôležité“ ([21], 65). Príčinnosť je považovaná za najdôležitejší vzťah medzi dvoma udalosťami. Minulosť udalosti má význam iba ako súbor udalostí, ktoré ju zapríčinili. Kauzálny vesmír je naplnený iba procesmi, ktoré nasledujú jeden po druhom v dôsledku príčinnej nevyhnutnosti. „Nemá zmysel hovoriť, čo je vesmír ako taký. Ak niekto chce o ňom hovoriť, má jedinou možnosť - vyrozprávať jeho históriu“ ([21], 70). V slučkovej teórii kvantovej gravitácie je teda v rámci kvantového časopriestoru zabudovaná príčinná budúcnosť, reprezentovaná svetelnými kuželmi, ktoré určitú udalosť kauzálnne spájajú s jej minulosťou ako i budúcnosťou. Ak opíšeme štruktúru všetkých možných príčinných vzťahov v našom vesmíre, získame kauzálnu štruktúru vesmíru. V takom vesmíre nevyhnutne zostáva v platnosti princíp determinizmu.

Vážnym problémom v slučkovej teórii kvantovej gravitácie je interpretácia „pozorovateľa“. Ide o vzťah medzi pozorovateľom a skúmaným objektom. Z hľadiska klasického prístupu vždy sa snažíme určiť „presné hranice medzi pozorovateľom a sledovaným systémom“ ([21], 39). V kozmológii však to nie je možné, pretože pozorovateľ je súčasťou vesmíru. Každá výpoveď o vesmíre ako celku obsahuje aj pozorovateľa ako súčasť vesmíru. Pozorovateľ nemôže vystupovať ako systém mimo vesmíru. To samozrejme má dosah na samotné výpovede pozorovateľa. Čo môže pozorovateľ povedať o súčasnom stave vesmíru ako dynamickým systéme? Veľmi málo. Teda len to čo je schopný odvodiť z existujúcich relativistických modelov. A tie sú veľmi chudobné predovšetkým na empirické poznatky. Súvisí to s dvomi základnými predpokladmi (objavmi) relativistickej teórie. 1. Existuje konečná rýchlosť pohybu akejkoľvek entity vo vesmíre, ktorá nepresahuje rýchlosť svetla. 2. Časový interval od vzniku vesmíru po súčasnosť je konečný. Odhaduje sa približne na 15 miliárd rokov. Z týchto predpokladov vyplývajú niektoré dôležité závery pre pozorovateľa. Prvým je to, že pozorovateľ nie je

schopný vidieť celý vesmír, čo znamená, že jeho videnie je ohraničené určitým horizontom. Druhým záverom je to, že pozorovaním vzdialených oblastí vesmíru pozorujeme jeho minulosť a nie prítomnosť. To, ako je vesmír štruktúrovaný za týmto horizontom a akú formu majú pozorované štruktúry, v súčasnosti nevieme povedať. Induktívne zovšeobecnenia na vesmír ako celostný dynamický systém sa opierajú o dva kozmologické princípy – izotropnosť a homogénnosť vesmíru.

Autori slučkovej teórie kvantovej gravitácie zároveň poukazujú na skutočnosť, že pri súčasných kozmologických úvahách nevystačíme s klasickou dvojhodnotovou logikou. Logiku použiteľnú v kozmológii treba budovať tak, aby možnosť posudzovať pravdivosť či nepravdivosť tvrdení závisela od pozorovateľa. Tento problém je však veľmi úzko spätý s objektivnosťou a intersubjektívnosťou vedeckého poznania a verifikáciou vedeckých výpovedí. Takýto typ logiky kozmológovia nazvali teória toposov, ktorú ako neštandardnú logiku môžeme efektívne použiť pri uvažovaní o vesmíre, kde robíme závery na základe neúplných informácií a preto každý náš opis skutočnosti je vždy neúplný. Pozorovateľ, ktorý uvažuje o vesmíre ako celku, nikdy nevidí celý vesmír, ako sme uviedli vyššie, a – samozrejme – nemá o ňom všetky informácie. Preto aj každý model vesmíru je neúplný. Platí to v plnej miere aj o štandardných relativistických modeloch vesmíru.

V rámci slučkovej kvantovej teórie gravitácie bolo potrebné zmeniť aj jej jazyk. Museli sa nájsť zasadne nové matematické štruktúry, prostredníctvom ktorých by bolo možné preformulovať všeobecnú teóriu relativity do podoby oveľa jednoduchšej a do elegantnejšej sústavy jej rovníc, ako ich formuloval A. Einstein. To sa podarilo zrealizovať. Podstatne bol zjednodušený matematický aparát teórie, čo je veľmi podstatné, ktorý sa priblížil jazyku používanému v kvantovej chromodynamike. Nový jazyk slučkovej teórie kvantovej gravitácie priniesol „presné“ predpovede o štruktúre priestoru a času v Planckovej škále. Časopriestor v Planckovej škále sa skladá len zo vzťahov medzi sústavou diskrétnych elementárnych objektov, čím sa dosiahlo to, že riešenia gravitačných rovníc nezávisia od časopriestoru ako pozadia. V tomto smere sa ukázalo veľmi jasne, že kvantová teória gravitácie si vyžaduje zásadne nový pojmový a kategoriálny aparát, nové metódy výskumu ale i overovania a testovania, ako i rozpracovanie nových typov logík. Inak povedané aj kozmológia jednoznačne poukazuje na zmeny, ktoré sa odohrávajú v ontologických, gnozeologických, metodologických a logických základoch súčasnej vedy.



Ešte jedna poznámka. Súčasné vedecké poznanie urobilo v posledných 50. rokoch ohromný skok v poznávaní nášho vesmíru, čo sa prejavilo nahromadením veľkého množstva poznatkov a nových vedeckých teórií. Ak chceme robiť ich serióznou a adekvátnu filozoficko-metodologickú a logickú analýzu, je nevyhnutné na základe súčasnej úrovne vedeckého poznania obsahovo rozpracúvať aj filozofické, metodologické a logické kategórie. Napr. kategórie „pohyb“, „hmota“, „priestor“, „čas“, „kauzalita“ atď. ako filozofické kategórie sú poznačené ešte interpretáciou v rámci klasickej vedy, teda v rámci klasickej paradigmy a racionality. Ukazuje sa, že vedecký pokrok v oblasti fyziky a kozmológie prenikol oveľa hlbšie do materiálnych štruktúr nášho vesmíru, ktoré „klasické“ filozofické kategórie už nedokážu adekvátne analyzovať a explanovať. Zdá sa, akoby filozofia stratila dych pri filozoficko-metodologických analýzach a často ju supľujú špeciálni vedci, čo sa samozrejme prejavuje na ich formuláciách a názoroch. V poslednej dobe to výstižne vyjadril kozmológ S. Hawking. „Až do dneška bola väčšina vedcov príliš zaneprázdnená rozvíjaním nových teórií opisujúcich, čo vesmír je, než aby si položili otázku, prečo tu je. Na druhej strane ľudia, ktorých poslaním je pýtať sa prečo – filozofi – nedokázali s rozvojom vedeckých teórií udržať krok“ ([13], 113). Táto kritika pripomína začiatok 20. storočia, keď po vzniku špeciálnej a všeobecnej teórii relativity a kvantovej fyziky, prvé ich seriózne filozoficko-metodologické analýzy sa začali objavovať až v tridsiatych rokoch daného storočia.

Filozofický ústav SAV  
Klemensova 19  
813 64 Bratislava  
filodubj@savba.sk

## LITERATÚRA

- [1] ACHUNDOV, M. D. (1982): *Koncepcii prostranstva i vremeni: istoky, evolucija, perspektivy*. Nauka, Moskva.
- [2] CECHMISTRO, I. Z. (2002): *Cholističeskaja filosofija nauki*. Universitetskaja kniga, Sumy.
- [3] ČERNÍK, V. (1984): *Systém kategórií materialistickej dialektiky*. Pravda, Bratislava.
- [4] DAVIES, P. C. (1997): *Space and Time in the Modern Universe*. Cambridge University Press, London – New York – Melbourne (rusky: *Prostranstvo I vremja v sovremennoj kartine vselennoj*. Mir, Moskva 1979).
- [5] DAVIES, P. C. (1986): Kvantová gravitace: sjednocený model reality? *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* 31, č. 3.
- [6] DUBNIČKA, J. (1986): *Čas a kauzalita*. Veda, Bratislava.

- [7] DUBNÍČKA, J. (2004): Priestor, čas a teória strún. In: *Používanie, interpretácia a význam jazykových výrazov*. Veda, Bratislava.
- [8] EJNŠTEJN, A. (1967): Predislovijske k knihe M. Jammer *Concepts of Space*. In: *Sobranije naučnych trudov*, t. IV, Nauka, Moskva.
- [9] GREEN, B. (2001): *Elegantní vesmír. Superstruny, skryté rozměry a hledání finální teorie*. Mladá fronta, Praha.
- [10] GREEN, B. (2006): *Struktura vesmíru. Čas, prostor a povaha reality*. Paseka, Praha – Lito-myšl.
- [11] GRÜNBAUM, A. (1969): *Filosofskije problemy prostranstva i vremeni*. Progres, Moskva.
- [12] HAWKING, S. (2002): *Vesmír v orechovej škrupinke*. Slovart, Bratislava.
- [13] HAWKING, S. (2004): *Ilustrovaná teorie všeho. Počátek a osud vesmíru*. Argo, Praha.
- [14] HAWKING, S. – PENROSE, R. (2000): *Povaha prostoru a času*. Academia, Praha.
- [15] HAWKING, S. (1991): *Stručné dejiny času*. Alfa, Bratislava.
- [16] HAWKING, S. (2004): *Ilustrovaná stručná história času*. Slovart, Bratislava.
- [17] HAWKING, S. – MLODINOV, L. (2006): *Ešte stručnejšia história času*. Slovart, Bratislava.
- [18] MOLČANOV, J. B. (1977): *Četyre koncepcii vremeni v filosofii i fizike*. Nauka, Moskva.
- [19] PRIGOGINE, I., – STENGERSOVÁ, I. (2001): *Řád z chaosu*. Mladá fronta, Praha.
- [20] SMOLIN, L. (2004): Atomy priestoru a času. *Scientific American* (české vydanie), Praha január.
- [21] SMOLIN, L. (2003): *Tri cesty ku kvantovej gravitácii. Úvod do súčasných koncepcii priestoru a času*. Kalligram, Bratislava.
- [22] WHEELER, J. A. (1968): *Einstens vision*. Springer – Verlag, Berlin – Heidelberg – New York. (rusky: *Predvidenije Ejnštejna*. Mir, Moskva 1988).
- [23] *Vselennaja, astronomija, filosofija*: Izdatel'stvo Moskovskogo univerziteta, Moskva 1988.