

PROBLÉMY SÚČASNÝCH ASTRONOMICKÝCH METÓD POZNÁVANIA ŠTRUKTÚRY VESMÍRU

ANTON HAJDUK, Astronomický ústav SAV, Bratislava

História ukazuje, že mnohé výsledky astronómie majú závažný filozofický dosah. Chcem tu predstaviť niekoľko takých výsledkov astronómie, najmä tie, ktoré najvýstižnejšie charakterizujú náš dnešný pohľad na vesmír a na priestor. Z tohto hľadiska bude užitočné postupne hovoriť o metódach astronómie, o presnosti doterajších výsledkov a o dôsledkoch nepresností, o technických medziach rozvoja pozorovacích metód, o niektorých osobitostiach metodologických problémov poznávania vesmíru vzhľadom na problém poznávania čiastky voči celku, o probléme kolapsu a o teoretických možnostiach kolapsu vesmíru, o singularitách priestoru a o dynamike priestoru a konečne o postupnej zmene fyzikálneho obsahu pojmov ako o probléme správnej interpretácie poznatkov.

Pojem vesmír sa tu používa tak, ako sa v kozmológii celkom všeobecne používa, t. j. ako ekvivalent pozorovaného vesmíru (u nás niekedy označovaného ako metagalaxia) na rozdiel od filozofického termínu vesmír ako celok, vzťahujúceho sa na celú objektívnu realitu.

K posúdeniu účinnosti metód poznávania štruktúry vesmíru treba si pripomenúť, že dnes zisťujeme žiarenie kozmických objektov prakticky v celej šírke elektromagnetického spektra. Za krátke obdobie vstúpil do astronómie rad nových odvetví, svojím významom a perspektívami ekvivalentných rádioastronómii. Podľa používaných metód spojených s použitím príslušnej vlnovej dĺžky alebo s registráciou častíc vznikla a rozvinula sa v uplynulých rokoch infračervená, ultrafialová, röntgenová a gama astronómia, ale i neutrínová astronómia, astronómia gravitačných vln a ďalšie. V dôsledku toho začíname poznávať kozmické procesy v celej šírke ich rozmanitosti.

Zo všetkých výsledkov astronómie chcem zdôrazniť predovšetkým jeden, a to najdôležitejší a zovšeobecňujúci poznatok o vesmíre — jeho vývoj. Odhalenie dynamiky kozmických procesov vo veľkom meradle znamenalo definitívny zánik statického pohľadu na vesmír.

V dôsledku potvrdenia dopplerovského posunu v spektrách galaxií na rádiových vlnách (dnes už na základe vyše 100 pozorovaní), objavu a rozloženia kvazarov, určenia výskytu hélia vo vesmíre, ale najmä v dôsledku objavu reliktového žiarenia definitívne padla predstava stacionárneho vesmíru.

Odhalením etáp vývoja vesmíru, t. j. časovej postupnosti kvalitatívne odlišných stavov hmoty, sprevádzaných zmenou hustoty vesmíru a časom, sa stal neudržateľným aj posledný pokus Hoyla a Bondiho o záchranu stacionárneho modelu vesmíru predstavou nepretržitého tvorenia hmoty. Nie je preto viac možné odvolávať sa na pozorovania pre

teóriu stacionárneho vesmíru s rovnomerným rozložením hmoty s nekonečným polomerom.

Všetky súčasné predstavy vesmíru a modely vesmíru sú verifikované merateľnými parametrami, ktorými sú predovšetkým: faktor expanzie H (Hubbleho konštanty), deceleračný parameter expanzie, stredná hustota hmoty, priestorové rozloženie objektov a sústav, vek sústav a doba expanzie.

Presnosť v určení parametrov vesmíru sa postupne zvyšuje, a tým sa obmedzuje výber modelov. Jednako uvedené parametre charakterizujú vesmír s určitou nepresnosťou (toleranciou), vyplývajúcou z meraní každej z uvedených veličín. Táto nepresnosť dovoľuje konštrukciu viacerých variantov. Napriek tomu, že nepresnosti nie sú relatívne veľké, varianty modelov vesmíru sa líšia i zásadne (napr. otvorený, hyperbolický vesmír alebo uzatvorený-eliptický vesmír). Je to dôsledok toho, že výsledné hodnoty rýchlosti expanzie vesmíru ležia práve pri parabolickej hranici, na rozhraní medzi eliptickým a hyperbolickým riešením.

Dnešná stredná hodnota Hubbleho konštanty, faktoru expanzie je $H = 65 \text{ kms}^{-1} \text{ Mps}^{-1} \pm 20 \%$. Veličina $1/H$, čo je prevrátená hodnota Hubbleho konštanty, sa označuje ako tzv. vek vesmíru a zodpovedá dobe 12—15 miliárd rokov. Táto hodnota sa získala meraním červených posunov spektrálnych čiar niekoľkých tisíc galaxií do vzdialenosti 3 miliárd svetelných rokov. Meranie rýchlostí galaxií z väčších vzdialeností naráža na hranice rozlišovacej schopnosti ďalekohľadov. Aj pri použití najväčších ďalekohľadov (so 4—6 m priemerom) dostávame zobrazenie spektier galaxií na fotografickej platni iba o rozmeroch 1—2 mm a posun spektrálnych čiar zodpovedá tu asi tisícine milimetra. Napriek tomu sa v posledných rokoch podarilo preniknúť do väčších vzdialeností zásluhou zdokonalenej techniky, ale najmä vďaka existencii obrovských galaxií a predovšetkým objavom kvazarov. Najväčší počet kvazarov je vo vzdialenosti okolo 8—10 miliárd svetelných rokov. Rýchlosti vzdiaľovania týchto objektov dosahujú až 0,8—0,9 rýchlosti svetla. No vzhľadom na to, že absolútna jasnosť kvazarov nie je známa, nemožno ich zatiaľ použiť na určenie decelerácie expanzie. Nedostatočná presnosť doterajších meraní nedovoľuje rozhodnúť, či spomalenie expanzie je dostatočné na to, aby sa expanzia zastavila; v opačnom prípade galaxie majú únikovú rýchlosť vzhľadom na hmotnosť vesmíru a budú expandovať trvale. (Úniková rýchlosť galaxií je v podstate druhá kozmická rýchlosť známa z astrodynamiky, aplikovaná na vesmír; je to obdoba únikovej rýchlosti 11,2 km/s pre odpútanie sa kozmickej rakety od Zeme.) Pochopiteľne, únik závisí nielen od rýchlosti galaxie, ale aj od hmotnosti, resp. hustoty vesmíru. Merania hustoty vesmíru však kolíšu medzi hodnotami 10^{-29} až 10^{-30} g/cm^3 , čo predstavuje práve oblasť kritickej hodnoty, pre ktorú zmerané rýchlosti galaxií sú práve na parabolickej hranici. Časť hmoty vesmíru je totiž optickými teleskopmi ne-

viditeľná, pretože nežiari vo viditeľnom svetle, okrem toho máme málo poznatkov o rozložení medzigalaktickej hmoty.

Najnovší rádioastronomický objav obrovského tmavého mraku medzi dvoma kopami galaxií zoslabuje doterajšiu preferenciu modelu otvoreného vesmíru. Ak sa ukáže, že výskyt takýchto oblakov nie je jav výnimočný, ale všeobecný, zvýši sa úmerne pravdepodobnosť modelu eliptického vesmíru.

Z rozboru parametrov vesmíru vidno, že otázka, či je vesmír uzavretý alebo otvorený, nie je dnes problémom filozofickým, ale otázkou presnejších astronomických meraní a jej vyriešenie závisí od konštrukcie výkonnejších prístrojov. Filozofický problém v otázke vesmíru sa presúva do oblasti vzťahu tohto skúmaného vesmíru k vesmíru chápaného filozoficky, t. j. k vesmíru obsahujúcemu i to, čo sa dnes vymyká poznávaniu. V podstate vo filozofii vždy išlo pri riešení problému vesmíru o *vzťah čiastky k celku*, o extrapoláciu záverov z výskumu čiastky na celok. Nové v dnešnej situácii je to, že doteraz sa chápala poznaná časť vesmíru ako určitá štruktúra pozorovaná po oblasť dosahu teleskopov, ale pokračujúca rovnomerne alebo nerovnomerne za dosah teleskopov. Dnes však bez ohľadu na to, či proces rozpínania bude pokračovať trvale, alebo sa zastaví, zo samého faktu expanzie vyplýva existencia horizontu vesmíru alebo horizontu udalostí, z ktorých časove najvzdialenejšie od nás je Big Bang, realizovaný expandujúcim priestorom. (Nemôžeme pozorovať napr. galaxie alebo objekty vzdialené 20 miliárd svetelných rokov dokonalejšími prístrojmi, pretože pred 20 miliardami rokov neexistovali.) Tu je filozofická extrapolácia viazaná na teoretický predpoklad existencie iných vesmírov a na predpoklad možnosti ich interakcie s našim vesmírom alebo na rozpracovanie filozofického chápania nášho vesmíru ako celého vesmíru.

Ako ďaleko sme dnes od definitívneho vyriešenia otázky uzavretosti či otvorenosti vesmíru? Odhliadnuc od hromadenia zmeraných rýchlostí vzdialených objektov, čo samo osebe znižuje štatistickú chybu meraní, existuje test, ktorým možno overiť krivosť priestoru a určiť odchýlky od euklidovskej geometrie. Tento test spočíva v určení hustoty rozloženia galaxií so vzrastajúcou vzdialenosťou. Za predpokladu rovnomerného rozloženia galaxií (alebo známej funkcie rozdelenia galaxií) možno určiť zo zmien hustoty počtu galaxií v priestorovom uhle so vzdialenosťou metriku priestoru. Počet galaxií v objemovej jednotke zakriveného priestoru je iný než v euklidovskej geometrii. Z nameraného počtu galaxií možno určiť stupeň zakrivenia, t. j. elipticitu alebo hyperbolicitu priestoru. Tento test však vyžaduje registráciu veľmi slabých objektov a začína byť citlivý až pri jasnosti objektov nad 26. magnitúdu. Najväčšími dnešnými ďalekohľadmi vidíme objekty 23. magnitúdy. Dá sa prekonať rozdiel troch hviezdnych veľkostí? Problém je v tom, že optika ďalekohľadov nad 5—6 m sa deformuje vlastnou tiažou a nedáva už vyšší výkon. Podobne je tomu aj u rádioteleskopov, ktorých roz-

mery úmerné ich pracovnej vlnovej dĺžke sú oveľa väčšie. Tento problém sa však úspešne rieši zatiaľ v rádioastronómii metódou apertúrnej syntézy, využitím javu interferencie. Ide o konštrukcie sústav rádioteleskopov (konštruujú sa i optické sústavy) rozmiestnených vo vzdialenostiach, ktoré sú násobkami používanej vlnovej dĺžky a prijímané žiarenie zo všetkých teleskopov sa syntetizuje elektronicky tak, aby utvárali jediný obraz zdroja žiarenia. Touto metódou boli objavené pulzary. Rozlišovacia schopnosť sa zvyšuje so vzdialenosťou základne. Najväčšie dnešné rádioteleskopické systémy prekonávajú rozlišovaciu schopnosť najväčších optických ďalekohľadov. (Anténny systém VLA — Very Large Array v New Mexico so svojimi 27 anténami v tvare písmena Y s ramenami dlhými 21 km zodpovedá jedinej anténe s rozmermi 27 km.) Uskutočnili sa pokusy na báze medzikontinentálnej interferometrie a konštruujú sa projekty interferometrov na báze Mesiac—Zem i väčších. Výpočty predpokladanej citlivosti ukazujú, že na centimetrových a decimetrových vlnách dva teleskopy na báze Zem—Mesiac dosahujú rozlišovaciu schopnosť 1/1000 oblúkovej sekundy a na báze Zem—Mars až 1/10⁶ oblúkovej sekundy. A to je už oblasť postačujúca na overenie geometrie priestoru. Z uvedeného vyplýva, že v nie príliš vzdialenej budúcnosti bude možné overiť formu zakrivenia priestoru.

Krivosť priestoru sa vymyká našej predstavivosti, viazanej na trojrozmerný priestor. (Toto tiež dokazuje, že príroda existuje nezávisle od našich predstáv.) Extrémnym prípadom krivosti priestoru je *gravitačný kolaps*. Kolaps vzniká tam, kde hustota hmoty dosahuje také extrémne hodnoty, že sa priestor takého objektu elipticky uzavrie. Dá sa ukázať, že priestor sa uzavrie, ak hviezda gravitačnou kontrakciou zmenší svoj polomer pod určitú hranicu — tzv. Schwarzschildov polomer ($2GR/c^2$). Pre Slnko je Schwarzschildov polomer približne 3 km, pre teleso o hmotnosti Zeme približne 1 cm.

Pokiaľ teória stavov hviezd vedúca ku kolapsu je pomerne dobre rozpracovaná, pozorovania ukazujú iba na dva také objekty, ktoré možno považovať za čierne diery. Sú to zložky dvojhviezd *X-1 Cyg* a *X-1 Sco*. Písmeno X tu označuje, že ide o zdroje X-žiarenia — t. j. tvrdého röntgenového žiarenia.) Nepozorujeme pritom sám objekt (čiernu diery), ktorý je nepozorovateľný (v dôsledku uzavretosti priestoru), ale pozorujeme plynnú plazmu, ktorá uniká z viditeľnej zložky dvojhviezdy na neviditeľnú, na čiernu diery. Častice plynu, ktoré sa blížia k čiernej diere, sú jej gravitáciou silne urýchľované. A urýchľované častice v magnetickom poli (hviezdy) emitujú X-žiarenie. Z registrácie X-žiarenia v blízkosti dvojhviezdy, z ktorej jedna je neviditeľná, sa usudzuje na existenciu čiernej diery. Ináč by sme museli vysvetliť, prečo nevidíme zložku dvojhviezdy, ktorá má vysokú hmotnosť. Tú určujeme z pohybu viditeľnej zložky okolo ťažiska sústavy. Dva prípady sú dosť málo, ale X-žiarenie sa dá registrovať iba nad atmosférou, teda družicami a družicový výskum hviezd začal len pred pár rokmi. Existencia čiernych dier

má rad filozofických dôsledkov. Uznanie existencie kolapsu sa spočiatku zdalo byť v rozpore s *princípom poznateľnosti*. Ale rozpracovanie teórie gravitačných vln ukázalo možnosť študovať uzavretý priestor kolapsu registráciou gravitačných vln (práve od násobných hviezdnych sústav). Objav kvantovomechanického žiarenia čiernych dier Hawkingom r. 1974 úplne vylúčil kolaps zo stavu principiálnej nepoznateľnosti.

Dalším dôsledkom existencie kolapsu bol záver o obmedzenej platnosti fyzikálnych zákonov v stave kolapsu, čo viedlo k presnejšiemu vymedzeniu sféry platnosti teórie relativity pri raste hustoty hmoty.

Najmarkantnejším filozofickým dôsledkom kolapsu je však zmena pohľadu na štruktúru priestoru, je to objavenie *dynamiky priestoru*.

Niekoľko desiatok rokov sme si zvykali na nepredstaviteľnú predstavu krivosti priestoru, do ktorého gravitačný kolaps zasiahol vytvorením priestorových singularít (akýchsi dier v priestore), daných rozložením hmoty. Lenže lokálne koncentrácie hmoty v objektoch sú v neustálom dynamickom procese. Hustota v lokálnej časti priestoru mení i krivosť priestoru, a teda mení sa i geometria od hyperbolickej (Lobačevského) k parabolickej euklidovskej až po eliptickú (Riemanovu) geometriu. Inými slovami nepretržite sa mení krivosť nespočetného množstva lokálnych častí priestoru. V tomto zmysle priestor je v pohybe a tento pohyb lokálnych zmien priestoru sa dá matematicky opísať pohybovými rovnicami. Disciplína, ktorá to rieši, je geometrodynamika a aréna, v ktorej sa dynamika geometrie uskutočňuje (lepšie povedané, v ktorej sa dá dynamika geometrie matematicky opísať), je *superpriestor*. Superpriestor je názov pre arénu, nie vymyslenú ako dôsledok existencie dynamiky priestoru, ale ako uvádza Wheeler, diktovaný pohybovými rovnicami teórie relativity. Superpriestor nie je prístupný našej predstavivosti, ale je prístupný matematickému vyjadreniu skutočností. Vie z daných počiatočných podmienok odvodiť pozorovateľné zmeny v geometrii reálneho priestoru a tieto zmeny predpovedať.

Ale ako sa vôbec môže priestor pohybovať? Pri tradičnej predstave priestoru ako akéhosi prázdneho prostredia, v ktorom sa pohybujú telesá alebo častice hmoty a v ktorom sa šíri vlnenie, naozaj sa zdá pohyb častí prázdneho prostredia protizmyselný. Lenže prázdny priestor neexistuje. To, čo sa nedávno označovalo za vákuum, je vo svetle dnešných poznatkov fyziky vákua (nová oblasť fyziky) nesmierne zložitú prostredie, ktoré má svoju submikroskopickú štruktúru interagujúcu s časticami a dejmi, ktoré v ňom prebiehajú na úrovni veľmi krátkych trvaní (interakcie na úrovni Planckovej dĺžky). Priestor sa dá dnes považovať za kontinuum, na ktoré sa dajú aplikovať fyzikálne vlastnosti kontinua, akou je napr. pružnosť. Pružnosť priestoru znamená toľko, že krivosť priestoru sa zmení (priestor sa deformuje) prítomnosťou nového hmotného objektu v danej časti priestoru a táto deformácia zmizne, ak objekt túto časť priestoru opustí. Jednako objekt svojou gravitáciou zmení rozloženie hmoty v uvažovanom objeme a zapríčiní určitú zvyš-

kovú deformáciu priestoru. Možno preto hovoriť o koeficiente pružnosti priestoru, vyjadrujúcom vlastnosti priestoru.

Chápanie priestoru ako kontinua podporujú merania periodických zmien izotropie reliktového žiarenia. Ak totiž reliktové žiarenie je dôsledkom Big Bangu, predstavuje žiarenie spojitého pozadia priestoru, voči ktorému sa Zem pohybuje a tento periodický denný pohyb sa musí prejavíť zmenou frekvencie prijímaného reliktového žiarenia. Skutočne túto zmenu frekvencie zistili v oblasti vlnových dĺžok 1 mm. (Maximum reliktového žiarenia je pri vlnovej dĺžke 2 mm). Odvodený pohyb Zeme voči tomuto pozadiu priestorového kontinua je však malý, iba okolo 200 ± 100 km/s a výsledok je dosť neistý.

Okrem zmeny obsahu pojmu priestor určité filozofické dôsledky vyplývajú aj z aplikácie extrémneho prípadu gravitačného kolapsu na vesmír.

Ak by sa ukázalo, že expanzia vesmíru sa zastaví, bude nasledovať kontrakcia vesmíru až ku gravitačnému kolapsu a teda návrat k Big Bangu. Dynamiku extrémne malého priestoru [t. j. rozmeru Planckovej dĺžky] už nemožno opísať pohybovými rovnicami klasickej geometrodynamiky, ale iba rovnicami kvantovej geometrodynamiky, zohľadňujúcej kvantovomechanické stavy. Avšak fyzikálne procesy na úrovni kvantových stavov nie sú vyjadrené spojitými procesmi, ale rozdelením pravdepodobnosti stavov (vyjadrených Schödingerovou rovnicou). Preto stav hmoty po eventuálnom kolapse vesmíru neznačí katastrofu, ale je otvorený pre nový list histórie (terminus technicus) vesmíru v superpriestore. (1, s. 202)

Záverom by som chcel zdôrazniť, že *fyzikálny obsah* niektorých pojmov sa veľmi rýchle mení a že táto zmena obsahu pojmov je arénou pre mylné interpretácie.

Neviem, do akej miery sa mi podarilo ukázať, že sa fyzikálny obsah filozoficky veľmi frekvencovaných pojmov ako vesmír a priestor postupne mení a do akej miery sú predmetom fyziky a astronómie na jednej strane a filozofie na strane druhej.

Považoval som za potrebné predstaviť obsah týchto pojmov chápaných súčasnou fyzikou a astronómiou, pretože by nemalo zmysel diskutovať o filozofických dôsledkoch astronomických pozorovaní, ak by sme odlišne chápali zásadné pojmy. Mám dojem, že mnohé nedorozumenia vznikajú kritikou interpretácií dnešných výsledkov vedy pri používaní pojmov s obsahom spred 10—20 rokov alebo i starších. Navyše jasnosť pojmu závisí od stavu preskúmania predmetu (2, s. 16) a o dnešnom chápaní priestoru, ale i vesmíru sotva možno tvrdiť, že je vyčerpávajúco preskúmaný.

LITERATÚRA

1. WHEELER, J. A.: Symp. on the development of the physicist's conception of nature. D. Reidel, Dordrecht 1973.
2. FILKORN, V.: Úvod do metodológie vied. SAV, Bratislava 1960.