

## KOSMOLOGIE

Úvod: O čem to bude?

*Existuje aspoň jeden filosofický aspekt, o němž se zajímají všichni myslící lidé. Je to problém kosmologie: problém pochopení světa, včetně nás samých a našeho pozorování jakožto součásti světa. Jsem přesvědčen, že veškerá věda je kosmologií a zajímavost filosofie, stejně jako vědy, spočívá pro mě výhradně v jejím přínosu ke kosmologii.*

(K. R. Popper, Logika vědeckého zkoumání, 1958)

Výrok velkého filosofa si neklade za cíl podat exaktní definici kosmologie. Chce spíše vystihnout její nejhlubší poslání: zapojit všechny naše poznatky do provázaného celku. Kosmologie, jak byla odedávna chápána, začíná proto pohledem k nejzazším horizontům. Co všechno na nočním nebi vidíme, jak je to rozloženo a uspořádáno, projevuje se v tom nějaká symetrie, hierarchická skladba? Jak se to pohybuje, co všechno o tom můžeme zjistit? V první fázi vytváření kosmologie tak převládá popis. Předmět kosmologie je ohraničen dosahem našeho pozorování. Nespadají do něho věci příliš nenápadné nebo příliš odlehlé. Naprostou většinu informací nám přináší světlo a zaznamenává je oko. S rozšířením a prohloubením našich obzorů se proto změní i sám předmět kosmologie. První radikální zvrát je lokalizován do začátku 17. století, kdy je sestrojen dalekohled a Galileo Galilei jej obrátí k nebi. K dalšímu zvrátu vede fyzika, která v druhé půli 19. století umožní rozšířit zdroj kosmologických informací na celé elektromagnetické spektrum a přidat k němu i kosmické záření různého druhu. Základními elementy se pro kosmologii stávají hvězdné soustavy – galaxie, které ještě vytvářejí kupy a nadkupy. Vyšší prvky už pravděpodobně neobjevíme, protože náš pohled směřuje do minulosti a jsme již schopni prohlédnout (sledováním elektromagnetického záření z vesmíru) až do doby, kdy galaxie ještě neexistovaly.

Popis světa okolo nás vede k zájmu o kvantitativní údaje – nejprve o prostorovém rozložení pozorovaného. Jak jsou kosmické útvary velké, jak jsou daleko, jak dlouho od nich k nám putuje světlo? Jak dávno vznikly a jak dlouho budou trvat? Podstatnou součástí kosmologie se stávají poznatky o prostorových a časových intervalech jeho objektů a dějů. Od počátků v antice, kdy bylo možno zakládat měření vzdáleností jen na úhlech mezi světelnými paprsky, pokračuje měření světa až k nynějšímu stavu, kdy můžeme říci, že jsme v jistém smyslu dosáhli hranic možností: z větších vzdáleností a z dávnější minulosti k nám již elektromagnetické záření nemůže přicházet. O tom, co je přístupno našemu pozorování, můžeme tedy právem mluvit jako o vesmíru, čili o univerzu všeho, co je pozorovatelné.

Zde nastíněný pokrok v poznávání a měření vesmíru by byl nemožný bez současně probíhajícího pokroku ve znalosti přírodních zákonů. Klade se otázka, z čeho jsou pozorované objekty, jak na sebe navzájem působí, jak lze jejich chování předvídat. Postupně se ukazuje, že fyzikální zákony poznávané pozorováními a experimenty na Zemi platí i ve vesmíru. Můžeme tedy mluvit o fyzikální kosmologii, která se zabývá chováním hmoty ve vesmíru ve velkém měřítku na základě matematicky vyjádřených zákonů fyziky. V současném chladném

a zředěném stavu vesmíru postačuje pro vystižení základních rysů jeho chování Einsteinova obecná teorie relativity z roku 1915, která se zabývá souvislostí mezi rozložením a pohybem hmoty a metrickými vlastnostmi prostoru a času, jinak řečeno gravitací.

Kosmologie založená na obecné teorii relativity vede k nezvratnému závěru, že vesmír se vyvíjí – v minulosti, do níž fakticky při pohledu do dálky nahlížíme, byl podstatně jiný než dnes. Kosmologie se tak stává vědou o dějinách vesmíru, tedy – alespoň potenciálně – jakýmsi mostem mezi humanitními a přírodními vědami. Dospěla-li však kosmologie ke snad již definitivnímu závěru o elementech stavby vesmíru a o jeho prostorovém a časovém rozložení, o naší znalosti jeho zákonů to určitě říci nelze. Jednotná teorie spojující myšlenky obecné teorie relativity a myšlenkami kvantové fyziky nebyla dosud vytvořena a nejranější fáze vývoje vesmíru, kdy byl ve velmi horkém a hustém stavu, zůstávají záhadou. Kosmologie však upozorňuje na nezbytnost úsilí o takovou syntézu. Těžko pochybovat o tom, že obrovské rozlohy dnes pozorovaného vesmíru byly před asi 14 miliardami let napěchovány do nepatrného prostoru, v němž se odehrávaly interakce elementárních částic rozhodující o dalším vývoji. Pohled do dálky i pohled do hloubky směřují vlastně ke společnému úběžníku.

Na otázku, o čem je kosmologie, bychom tedy mohli odpovědět, že je to věda o stavbě, velikosti, zákonech a dějinách vesmíru, nejširší realitě, která je dostupná našemu pozorování a poznání. O tom se dočtete v tomto textu. Literatura na toto téma (i v češtině) je velmi rozsáhlá. Zde usilujeme o shrnutí nejpodstatnějších myšlenek a výsledků současné fyzikální kosmologie. Chceme, aby se s nimi uživatel textu nejen seznámil, ale také je pochopil, a aby mohl sledovat „dobrodružství poznání“ spojené s jejich získáváním. Nevyhýbáme se proto matematice. Otázkami a problémy, připojenými k jednotlivým kapitolám, mu dáváme možnost, aby o přečteném samostatně přemýšlel, samostatně si hledal informace a ověřoval si, nakolik přečtenému porozuměl. Kromě souvislého výkladu kosmologie jsme zařadili různé doplňky, které se podrobněji věnují speciálně zajímavým otázkám.

### ***Otázky k předmětu Kosmologie***

Pokuste se vystihnout místo fyziky mezi ostatními přírodními vědami.

Může znalost kosmologie ovlivnit náš systém hodnot a etické postoje? V jakém smyslu?

Odkud jste čerpali dosavadní znalosti o vesmíru?

[Mezi jednotlivé odstavce bych vložil ilustrativní obrázky kosmických objektů.]

### **1. Starší dějiny kosmologie**

*Pohled' na nebe a seči hvězdy, dokážeš-li je spočítat. Tak tomu bude i s tvým potomstvem.*

(Genesis I.15)

Autor biblického textu patrně předpokládá, že Abraham hvězdy spočítat nedovedl. Kdyby se o to pokusil, mohl by jich na noční obloze ještě neznečištěné našimi svítidly a smogem napočítat několik tisíc. Možná by ho nenapadlo, že počet viditelných hvězd je omezen kvalitou jeho zraku a že i svit Mléčné dráhy pochází z hvězd, které nedokáže rozlišit. Spíše než výzvou k počítání hvězd je text vyjádřením úžasu, který se i dávných lidí zmocňoval při pohledu na hvězdné nebe. Tento pohled, o který jsme se v civilizovaných oblastech do značné míry připravili, není něčím pro vesmír typickým. Ve většině mezigalaktického prostoru by nám nebe připadalo téměř absolutně temné – proč je tomu tak, je jednou z velkých otázek kosmologie. Ale i uvnitř naší Galaxie máme to štěstí, že žijeme v poměrně nezaprášené oblasti, což přisuzujeme výbuchům jedné či několika supernov, po nichž rázové vlny vyčistily okolo nás „bublinu“.

Velkolepost nočního nebe od pradávna probouzela zájem a inspirovala otázky, co nás obklopuje, jak to i s námi vzniklo a k čemu to směřuje. Na takové otázky nejprve odpovídaly mýty, v nichž hrála kosmická tělesa a jevy významnou roli. To však nebyl jediný důvod zájmu o ně. Znalosti o nich se uplatňovaly v mořeplavbě, v datování zemědělských prací a při tvorbě kalendáře, který pomáhal plánovat a organizovat život lidských společenství. Vznikaly také představy o souvislostech nebeských dějů s lidskými osudy a s projevy vůle bohů. Již prehistorické stavby a artefakty (rondely, menhiry) svědčí o zájmech a poznatcích, které lze chápat jako zárodky kosmologie. Zájem lidí se soustřeďuje především na Slunce a Měsíc, ale všímají si i pohybů planet a tvarů souhvězdí. Všechny významné starobylé civilizace – sumerská, egyptská, babylonská, perská, indická, čínská, mayská – mají své kosmologické mýty a soubory poznatků o nebeských jevech, které soustavně pozorují a zaznamenávají.

Za kolébkou vědecké kosmologie však můžeme pokládat až antické Řecko. Jeho myslitelé dokázali zřetelně oddělit vědecké poznání od mýtů a magie. Otevřeli tak cestu k trvalému zdokonalování – ke tvorbě teorií přesahujících empirické poznatky a k jejich kritickému hodnocení, rozvíjení a opravování. Centrem řecké vědy zahrnující kosmologii je nejprve maloasijský Milétos, později se přesouvá do Atén a na sklonku antiky se dovršuje zejména v Alexandrii. Pokrok dosažený během asi sedmi století lze ilustrovat připomenutím jeho hlavních představitelů a výsledků:

Herakleides 387 – 312 př. Kr. soudí, že Merkur a Venuše obíhají kolem Slunce, a vytváří tak zárodek heliocentrické soustavy

Aristarchos 320-250 př. Kr. podává metodu určení velikosti a vzdálenosti Slunce a Měsíce v poměru k velikosti Země a důsledně přijímá heliocentrickou soustavu

Eratosthenes 270 – 194 př. Kr. určuje s dobrou přesností poloměr Země

Hipparchos 190 – 125 př. Kr. rozpoznává rozdíl mezi tropickým a oběžným rokem a sestavuje podrobný katalog hvězd

Ptolemaios 100 – 170 v díle *Almagest* podává přehled všech dosažených astronomických poznatků na základě geocentrické soustavy založené na předepsaném systému pohybů „nebeských sfér“, na nichž jsou podle něho nebeská tělesa upevněna.

Je možno říci, že řečtí astronomové podali detailní popis nejbližší oblasti světa pozorovaného pouhým okem. To byl jejich „vesmír“ tvořený Sluncem, Měsícem a planetami a ohraničený sférou nehybných a neměnných hvězd dosáhli hrubého odhadu velikosti a vzdáleností Země, Slunce a Měsíce našli pravidla řídící pohyby planet po obloze, která platila s přesností, jaká byla v tehdejší době dostatečná pro předpovědi.

Za jiný krok antických myslitelů směrem ke kosmologii bychom mohli považovat jejich snahu nalézt univerzální výklad přírodních dějů, který začíná dohady milétských filosofů o jednotné podstatě světa (podle Thalety je jí voda, podle Anaximandra apeiron čili neomezeno, podle Anaximena vzduch) a vrcholí Leukippovou a Demokritovou atomovou teorií. Tyto snahy však nejsou v antice dostatečně spojeny s empirickými poznatky a nenacházejí uplatnění v astronomii. Antický vesmír tak zůstal oproti vesmíru, jak jej chápeme dnes, značně omezený.

## 2. Mladší dějiny kosmologie

Po úpadku římské říše přichází v evropské vědě dlouhé období stagnace, kdy poznatky starého Řecka udržují arabští vědci a myslitelé (připomeňme si zde, že jména nejjasnějších hvězd jsou arabská). Nové vzepětí přichází až v renesanci a je soustředěno do ještě kratší doby než někdejší „řecký zázrak“. Uvedme jeho hlavní protagonisty.

Kopernik 1473 – 1543 oživil heliocentrickou soustavu

Galilei 1564 – 1642 pro ni poskytl fyzikální argumenty, byť ne vždy dostatečné (*Dialog o dvou soustavách světa*), byl průkopníkem snahy o jednotný základ přírodních věd (*Prubíř*), zdůrazňoval podstatnou úlohu matematiky ve vědě o přírodě a obrátil dalekohled k nebeským objektům.

Kepler 1571 – 1630 objevil pravidla (Keplerovy zákony), jimiž se řídí heliocentrický pohyb planet

Newton 1642 – 1727 našel gravitační zákon a pohybové zákony, z nichž tato pravidla vyplývají. Formuloval první a na dlouhou dobu jedinou ucelenou a propracovanou teorii fyzikálních jevů opírající se o matematiku (*Principia*).

Díky těmto a mnoha dalším velkánům začala nová, vyšší etapa výzkumu sluneční soustavy. Byly objeveny dříve neznámé objekty – Galilei (1610) objevil Jupiterovy měsíce, Huygens (1655) Saturnův měsíc Titan, Herschel (1781) planetu Uran. Výpočty pohybu těles mohly být prováděny s takovou přesností, že Gauss (1801) dokázal „na papíře“ znovu nalézt ztracenou

planetku Ceres a Leverrier úspěšně udal berlínské hvězdárně, kde je třeba hledat (1846) planetu Neptun. Pokrok techniky nám později umožnil používat těchto poznatků i pro lety v kosmickém prostoru, které přivedly člověka na povrch Měsíce. Zhruba od konce minulého století nám také dovoluje nacházet víc a víc planet jiných sluncí a ukazuje tak, že sluneční soustava není ničím výjimečným.

Doba, v níž se dovršovalo poznání zákonů pohybu planet, dala zároveň astronomům impulz k prohloubenému zájmu o hvězdy. Předtím se zdálo, že jsou to většinou mimořádně stabilní útvary, na nichž během lidského života nepostřehneme žádnou změnu. Už názvy dvou nejvýraznějších výjimek (Algol – ďábel, Mira = podivuhodná) napovídaly, že se jedná o cosi až nepatřičného. Avšak Tycho Brahe (1572) a Kepler (1604) měli to štěstí, že mohli být pozorovateli – jak tomu dnes říkáme – supernov, které po nějaký čas svou jasností převyšovaly všechny hvězdy a první z nich byla patrně viditelná i za dne.

Cesta k poznání života hvězd by měla ovšem začít určením jejich vzdáleností. Jak postřehl Galilei, už samo přijetí heliocentrické soustavy posiluje naše naděje to učinit. Jasnější a tudíž bližší hvězdy by měly v důsledku pohybu Země kolem Slunce měnit své polohy na nebi vůči hvězdám slabším a tedy vzdálenějším. Vzhledem k nepatrnosti tohoto jevu se muselo čekat na potvrzení přes dvě stě let. Ve snaze změřit „paralaxy“ hvězd byl však získáno jiné potvrzení heliocentrické soustavy – Bradley a Molyneux zjistili 1725 změnu polohy hvězd během roku, která na jejich vzdálenosti nezávisela a byla projevem aberace světla (směr paprsku hvězdy se pro pozemského pozorovatele v důsledku jeho pohybu mění podobně jako pro osobu běžící v dešti směr pohybu kapek). Vzdálenost nejbližších hvězd určili až 1846 téměř současně Bessel v Královci (61 Cygni), Struve v Pulkově (Vega) a Henderson na Mysu dobré naděje ( $\alpha$  Centauri). Vrcholný úspěch poznávání Sluneční soustavy tak časově splývá s objevem, který je mezníkem pro hvězdnou astronomii.

Výše naznačenou trigonometrickou metodou bylo možno určit jen vzdálenosti nejbližších hvězd. Další možnost by mohlo skýtat porovnávání jejich svítivosti – naráží však na to, že hvězdy nejsou stejné. Potřebujeme „standardní svíčky“, o nichž víme, že by ve stejné vzdálenosti svítily stejně, takže zdánlivá svítivost by svědčila o vzdálenosti. Nejdůležitějšími standardními svíčkami se staly pro menší vzdálenosti cefeidy – proměnné hvězdy, jejichž svítivost souvisí určitým vztahem s jejich periodou.

Svítivost však nezůstala jedinou zjistitelnou vlastností hvězd. V učebnicích astronomie je někdy s jistou škodolibostí citován výrok významného filosofa Comta z roku 1835, podle něhož lidé nikdy nepoznají chemické složení hvězd. Comte na rozdíl od některých jiných filosofů choval sympatie k vědeckému poznání, zřejmě však nebyl informován o pokrocích ve spektroskopii. Studium spektra hvězd se posléze stalo hlavním prostředkem, jak získávat informace o studiu složení hvězd. Vyústilo v jejich klasifikaci založenou na Herzprungově-Russellově diagramu (1910), který udává souvislost mezi jejich teplotou a svítivostí a ve spojení s fyzikálními poznatky o procesech probíhajících ve hvězdách umožňuje pochopit

jejich vývoje. To umožnil vývoj fyziky – Maxwellova teorie elektromagnetického pole, termodynamika a statistická fyzika, po vzniku kvantové teorie pak atomová a jaderná fyzika.

Koncem 19. století se začal rýsovat obraz naší hvězdné soustavy jako disku, v němž je sluneční soustava excentricky položena, takže rovina disku se jeví jako Mléčná dráha, nejsilněji svítící v souhvězdí Střelce, kde je jeho střed. Soustava byla nazvána Galaxií (podle řeckého galaktikos = mléčný – do galaktického disku ovšem patří i hvězdy, které vidíme v příčném směru). Vznikla otázka, zda je jen jeden takový ostrov v prázdném prostoru anebo je naše Galaxie jen jednou z mnoha. Ještě v roce 1920 v tom nebylo jasno. Ve Washingtonu proběhla tzv. Velká debata, v níž prominentní astronomové Shapley a Curtis zastávali protichůdné stanovisko. Příští desetiletí však rozhodlo jednoznačně hlavně díky soustavnému pozorování, která prováděl Hubble se svým pomocníkem Humasonem. Mnohé „mlhoviny“, kladené předtím do naší Galaxie, se ukázaly být samostatnými galaxiemi. Svět, kterým se zabývá kosmologie, se tak opět radikálně změnil. Zároveň Hubble učinil či spíše dovršil pro kosmologii podstatný objev, že slabší a tedy vzdálenější galaxie jeví spektrální posuv k červenému konci spektra.

Hubblovo pozorování se dobře shodlo se zásadním teoretickým pokrokem způsobeným vznikem relativistické teorie gravitace – obecné teorie relativity. Její základní rovnice byly poprvé zapsány 1915, o dva roky později sestavil Einstein řešením rovnic první kosmologický model, který byl statický. V letech 22-24 dvacátých letch Friedman ukázal, že Einsteinovy rovnice mají i nestatické řešení, které se pak stalo, zvláště když bylo podepřeno Hubblovým pozorováním, základem relativistické kosmologie. Červený posuv spekter vzdálených galaxií je v ní vykládán jako projev rozpínání vesmíru. Toto rozpínání je hlavním a určujícím vesmírným dějem – ostatní děje, které byly postupně hlavními tématy kosmologie: vznik a vývoj galaxií, vznik a vývoj hvězd a jejich planetárních soustav, se odehrávají na tomto pozadí. Lze snad říci, že teprve v dvacátém století našla fyzikální kosmologie své pravé téma. Její historie od té doby splývá splývá s poznáváním historie vesmíru.

### ***Otázky k dějinám kosmologie***

Vyhledejte konkrétní údaje o naší „bublině“ v Galaxii, která zlepšuje naše pozorovací podmínky, a o jejím původu.

Nacházejí se na našem území prehistorické památky, které by se mohly vykládat jako doklad dávného zájmu o astronomii?

Thaletovi se přičítá přesná předpověď zatmění Slunce. Mohl Thales takovou předpověď opravdu učinit? Seznamte se s diskusemi o tom a učiňte si vlastní názor.

Patrně největší fyzik starověku Archimedes si položil otázku, kolik zrníček písku by vyplnilo vesmír. V této souvislosti podal odhady vzdáleností mezi nebeskými tělesy. Seznamte se s jeho výsledky a postupy a zhodnoťte je z dnešního hlediska.

Mohou být historické záznamy o astronomických událostech – zatmění, vzplanutí nových hvězd – přínosné i pro získání nových vědeckých poznatků? Pokud ano, uveďte příklady

V dějinách astronomie mají významné místo i naši astronomové Marek Marci z Kronlandu a Tadeáš Hájek z Hájku. Čím konkrétně přispěli?

Mezi „renesanční supernovy“ bývá někdy počítána i Diggesova supernova, je však věcí diskuse, zda ji Digges skutečně pozoroval. Seznamte se s těmito diskusemi a vytvořte si vlastní názor.

Jaké přednosti měly hvězdy, které si astronomové zvolili pro první změření paralaxy?

Bylo možné dospět k odhadům vzdálenosti hvězd i bez znalosti paralaxy?

[obrazový doprovod: mezníky vývoje na časové ose, HR diagram, aberace, paralaxa, Stonehenge]

### 3. Svět galaxií

*Dnes víme, že naše galaxie je pouze jednou ze 400 miliard galaxií v našem pozorovaném vesmíru.* (L. M. Krauss, R. J. Scherrer, Scientific American, březen 2008)

Odhad počtu galaxií uvedený v citátu je první, který nám na otázku „How many galaxies in the Universe“ ukázal vyhledavač. Jsou i mnohé jiné, které se shodují jen řádově. Podobně dopadneme, ptáme-li se na počet hvězd v galaxii, ať už naší nebo průměrné. Bez rozpaků snad můžeme říci, že hvězd v galaxii je řádově tolik, kolik je galaxií v pozorovaném vesmíru a že jsou to počty obrovské.

Ještě před padesáti lety se soudilo, že galaxie jsou v prostoru náhodně a v dostatečně velkém měřítku rovnoměrně rozesety a že hvězdy, které v nich svítí, představují většinu hmotnosti vesmíru. Dnes víme, že rozložení galaxií ve vesmíru připomíná spíše pavučinovou síť a že podíl svítící hmoty na celkové hmotnosti-energii je nepatrný (více o tom později). Přesto stále platí, že hvězdy a galaxie představují největší koncentrace hmotnosti a jsou zdrojem většiny informací, které o vesmíru máme. Můžeme tedy trvat na tom, že galaxie jakožto soubory hvězd jsou základními prvky vesmírné stavby.

Pouhým okem můžeme uvidět jen čtyři galaxie (včetně naší), ne však z jediného místa. Na jižní polokouli je snadné najít malé průvodce naší Galaxie – Velké a Malé Magellanovo mračno. U nás za dobrých podmínek a aspoň průměrným zrakem uvidíme obláček v souhvězdí Andromedy, galaxii, která se velmi podobá naší a asi za čtyři miliardy let se s ní podle věrohodných předpovědí srazí. Zaznamenal ji perský učenec as-Súfi v 10. století ve své *Knize stálic* pod názvem Malý mrak. Curtis v ní pozoroval vzplanutí nov, odhadl z toho její vzdálenost a získal argument pro své stanovisko ve Velké debatě. Hubble roku 1923 určil její vzdálenost pomocí cefeid a definitivně ji tak zařadil mezi galaxie. Byl také neúnavným

identifikátorem a pozorovatelem dalších galaxií a podle toho, jak se mu jevíly v dalekohledu, sestavil jejich dodnes používanou klasifikaci, které se říká Hubblova ladička (či vidlička).

V držadle ladičky nalevo jsou eliptické galaxie, jejichž vnitřek nejeví žádnou strukturu. Mají tvar elipsoidu a v pozorovaném průmětu se jeví jako elipsa. Hubble je rozdělil do sedmi skupin podle hodnoty poměru  $10(a-b)/b$ , kde  $a$ ,  $b$  jsou délky poloos. „Trojný bod“ ladičky představují čočkové galaxie, které jsou jakýmsi přechodem mezi eliptickými a spirálními. Na rozdíl od eliptických mají výrazné jádro a disk, postrádají však spirální strukturu. Spirální galaxie tvoří dvě ramena ladičky podle toho, zda jejich ramena vycházejí přímo z jádra nebo z okrajů příčky. Obě ramena jsou rozdělena do tří skupin podle stupně rozevřenosti ramen. Existuje však i mnoho nezařaditelných „pekuliárních“ galaxií.

Hubblovu klasifikaci lze označit za „morfologickou“, neklade si za úkol zachytit historii vývoje galaxií. Sám se klonil k názoru, že eliptické galaxie jsou ranějším stupněm vývoje a postupně přecházejí ve spirální. Kosmologická pozorování napovídají, že je tomu naopak – ve vzdálených (a tedy i časově dálnějších) oblastech vesmíru je větší podíl spirálních galaxií. Eliptickými se stávají hlavně v důsledku srážek, které rozruší jejich strukturu. Detailní a spolehlivá teorie vývoje galaxií však dosud neexistuje.

Povšimněme si základní vlastnosti galaxií, kterou můžeme zjistit i v případě, že jsou pro nás pouhými svítícími obláčky, o nichž nevíme nic bližšího. Můžeme měřit jejich svítivost – tedy tok energie za jednotkový čas jednotkovou plochou orientovanou kolmo na spojnici s galaxií. Podle optického dojmu z tohoto toku hodnotili již antičtí hvězdáři svítivost hvězd a stanovili podle toho jejich „velikost“ čili magnitudu. Roztřídili viditelné hvězdy do šesti tříd, přičemž jim připadalo, že každá následující třída má o stupeň menší velikost (které ovšem přisouvali vyšší pořadové číslo). Podle Fechnerova zákona vnímáme v aritmetické řadě intenzity podnětů, které se mění v řadě geometrické. Každá třída má tedy  $k$  krát větší svítivost než třída předchozí. Antickým hvězdářům se podařilo zvolit třídy tak, že pátá třída je asi 100 krát méně svítivá než první, tedy  $k^5 = 100$ ,  $1/\log k = 2,5$ . Odtud plyne pro hvězdnou velikost čili magnitudu Pogsonova rovnice

$$(1) m = -2,5 \log I/I_0$$

kde  $m$  je magnituda,  $I$  svítivost pozorovaného objektu a  $I_0$  definatoricky zvolená svítivost pro nultou třídu  $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ lm m}^{-2}$ . Magnitudu lze zavést i pro galaxii a spočítat všechny galaxie o magnitudě přesahující  $m$ . Dostáváme tak závislost  $N(m)$ , která je zřejmě odrazem rozložení galaxií ve vesmíru (protože vzdálenější galaxie nám svítí slaběji).

Tuto závislost lze nejprve zjistit pro malé oblasti na nebi (tedy pro galaxie ležící v jistém prostorovém úhlu). Pozorování ukazuje, že nezávisí na směru, což svědčí o izotropii rozložení galaxií vzhledem k našemu místu ve vesmíru. Protože považujeme za nepravděpodobné, že by se právě naše galaxie nacházela ve středu vesmíru, vede nás to k názoru, že vesmír je také homogenní – hustota, s níž jsou v něm galaxie rozloženy, je všude stejná.



Předpokládejme, že tato hustota je nezávislá na čase. Dále v souladu s fyzikou předpokládejme, že jejich (zdánlivá) svítivost klesá s kvadrátem vzdálenosti. Vzhledem k velkému počtu sledovaných galaxií ve velkých objemech pomeňme jejich individuální rozdíly a přiřipíme jim zcela rovnoměrné rozložení a stejnou absolutní svítivost.

Označme  $r$  poloměr koule, v níž mají galaxie magnitudu přesahující  $m$ . Počet galaxií v této kouli je

$$(2) N = \text{const } 4\pi r^3 / 3, \log N = \text{const} + 3 \log r$$

Svítivost galaxií na obvodu koule je

$$(3) I = \text{const} / r^2$$

Spojením s Pogsonovou rovnicí (1) dostáváme

$$(4) m = \text{const} + 5 \log r$$

a nakonec po dosazení (4) do (2)

$$(5) \log N = 0,6 m + \text{const}$$

Tento vztah je s dobou přesností ověřen až po  $m \leq 19$ . Tak se potvrzuje náš předpoklad o homogenitě vesmíru a o zákonu ubývání poklesu zdánlivé svítivosti se vzdáleností.

Odchyłka pro méně jasné galaxie nás nemusí znepokojovat – tyto galaxie k nám vyslaly své světlo v dávné minulosti a tehdy mohla být jejich průměrná jasnost jiná, ve velkých vzdálenostech by se také mohly projevit odchylky od eukleidovské geometrie, na níž je založen zákon poklesu veličiny  $I$  se vzdáleností.

Světlo galaxií můžeme také podrobit spektrálnímu rozkladu. Hubblova pozorování ukázala další společnou vlastnost galaxií – čím jsou slabší, tím větší posun k červenému konci spektra jeví. Zavedeme-li spektrální posuv z vztahem

$$(6) z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

kde  $\lambda$  je pozorovaná a  $\lambda_0$  emitovaná vlnová délka, dostáváme závislost  $z$  ( $m$ ), o níž se opět zjišťuje, že je s velkou přesností nezávislá na směru pozorování. Její nejprostší vysvětlení je, že galaxie se od nás vzdalují, přičemž rychlost vzdalování závisí na vzdálenosti. Použijeme-li klasického vztahu pro Dopplerův jev, máme

$$(7) \lambda = (1 + u/c) \lambda_0$$

$u$  je rychlost objektu,  $c$  je rychlost světla. Tedy

$$(8) z = u/c$$

Nemá-li vzdalování galaxií porušovat homogenitu jejich rozložení, musí být

$$(9) u = \text{const } r$$

a tedy s odvoláním na (8), (9) a (4)

$$(10) \log z = \log r + \text{const} = 0,2 m + \text{const}$$

Pozorování s dobou přesností potvrzují tento vztah s tím, že odchylka se projevuje u nejjasnějších – tedy nejbližších – galaxií a konstanta ve vztahu je ve skutečnosti poněkud

závislá na  $z$ . To nás nenutí vzdát se předpokladu o homogenním a izotropním rozložení galaxií ve velkém měřítku – u blízkých galaxií je červený posun ovlivněn jejich pohyby nekosmologické povahy, u vzdálenějších se projevuje proměnnost vesmíru v čase, která je přirozeným důsledkem rozpínání.

Již z neobyčejně jednoduchých úvah a pozorování tak dospíváme k závěru, že vesmír je možno s velkou přesností považovat za homogenní a izotropní, což by patrně většina astronomů a fyziků očekávala i předtím, než se o galaxiích vůbec vědělo. S tímto předpokladem se většinou v kosmologii počítá a nazývá se „kosmologický princip“. Někdy se také mluví o zobecněném Koperníkově principu, protože navazuje na Koperníkovu stanovisko, že poloha naší Země není ničím mimořádná. Dalo by se říci, že podle kosmologického principu neexistuje ve vesmíru žádný (hypotetický) pozorovatel, který by mohl podat nějaký privilegovaný popis jeho stavby a historie – na kosmologii, kterou tito pozorovatelé mohou vytvořit, se neprojeví jejich poloha ani směr os jejich souřadnicových soustav. Zde je ovšem třeba dodat, že to platí jen pro pozorovatele, kteří se vůči vesmíru nepohybují – přesněji řečeno sdílejí střední rychlost pohybu kosmické hmoty. Mluví se proto o fundamentálních pozorovatelích. Pro jiné pozorovatele je pozorování galaxií v různých směrech ovlivněno Dopplerovým jevem a podle teorie relativity mají také jiné pojetí současnosti než pozorovatelé fundamentální: na rozdíl od nich pro ně není vesmír v daném čase všude stejný.

Kosmologie nás tak překvapivě vede k privilegované vztažné soustavě a k privilegované současnosti, což může připomínat návrat k Newtonovu absolutnímu prostoru a času. Je ovšem třeba říci, že zatímco Newtonův absolutní prostor a čas byl zcela nezávislý na chování hmoty, pro kterou pouze vytvářel neměnné jeviště, nyní je privilegovanost jistých pozorovatelů, vztažné soustavy a současnosti ve vesmíru odvozena z chování jeho hmotné výplně a lze jí použít pouze ve velkém, kosmologickém měřítku. Přesto se otevírá otázka, nakolik bychom mohli chování vesmíru pochopit v rámci vhodně modifikované newtonovské fyziky.

### ***Otázky ke galaxiím***

Porovnejte všechny dostupné parametry naší Galaxie a galaxie v Andromedě.

Najděte základní údaje o Magellanových mračnecích.

Mohl by člověk s mimořádně dobrým zrakem vidět pouhým okem ještě další galaxie kromě uvedených v textu?

Je naše Galaxie součástí vyšších struktur – kupy, nadkupy?

Co se přesněji rozumí „příčkou“?

Jak by se galaktický vesmír jevil pozorovateli, který se v něm pohybuje rychlostí blízkou rychlosti světla?

Obyčejně se říká, že rychlost světla je nesmírně velká. Je možné hájit i názor, že je malá? (Jiří Grygar píše, že světlo se vesmírem přímo plouží.)

(Obrázky: Hubblova vidlička, umístění kosmických těles na stupnici hvězdné velikosti, obrázky různých galaxií, naše galaktické okolí)

#### 4. Newtonovská kosmologie

Je nesmírně těžké si představit, že všechny částice v nekonečném prostoru jsou rozmístěny tak přesně, že setrvávají v dokonalé rovnováze. Je stejně těžké to uskutečnit, jako postavit ne jednu jehlu, ale nekonečný počet jehel (protože v nekonečném prostoru je nekonečný počet částic) tak, aby stály svise. A přece to pokládám za možné, je-li to dílo vyšší moci, a jsou-li částice jednou tak umístěny, souhlasím s Vámi, že zůstanou v tomto stavu bez pohybu navždy, pokud je neuvede do pohybu táž vyšší moc. (Isaac Newton, korespondence s R. Bentleyem, 1693)

Filosof Bentley položil Newtonovi otázku, proč se vesmír pod vlivem gravitace nezhroutí. Newton odpověděl, že nekonečný vesmír může být v okamžité rovnováze, ale ta je nestabilní a její udržení je vlastně permanentním zázrakem. Tím vlastně na fyzikální vysvětlení chování vesmíru resignoval. Na fyzikálně podložený model chování vesmíru se muselo čekat až do vzniku obecné teorie relativity. Teprve roku 1930 Milne ukázal, že je možná i newtonovská kosmologie a že dokonce pro chování homogenního a izotropního vesmíru dává zcela stejné výsledky jako obecná teorie relativity v případě, že vesmír je vyplněn prachem s nulovým tlakem (což je pro současný vesmír uspokojivé přiblížení, protože jeho střední hustota je velmi malá).

Má smysl se vracet k newtonovské kosmologii, když její možnosti vysvětlovat chování vesmíru jsou oproti relativistické kosmologii omezené? Domníváme se, že ano: základní rovnice v ní mohou být snadno odvozeny a jejich řešení má jednoduchou fyzikální interpretaci. Připomíná nám také, že věda nedává definitivní odpověď na otázku: Jak je to doopravdy? Spíše nám nabízí myšlenkové obrazy, které se více či méně blíží k realitě a v určité oblasti reality mohou vést ke stejným výsledkům i při velmi rozdílném základu.

Newtonovská kosmologie se opírá o poznatek, na němž by ji mohl vybudovat již Newton. Mějme sféricky symetrické rozložení hmoty okolo daného středu. Pak na objekt na povrchu koule s tímto středem působí stejná gravitační síla, jakou by vzbudila hmotnost koule soustředěná v jejím středu. Působení „vnější“ hmoty na tento objekt se vzájemně ruší. Předpokládejme, že vesmírná hmota se může pohybovat jen radiálně (izotropie) a že její hustota je v určitém čase všude stejná (homogenita). Pak gravitace udílí objektu na povrchu uvažované koule o poloměru  $r$  zrychlení

$$(11) a = d^2r/dt^2 = -GM/r^2$$

kde  $G$  je gravitační konstanta,  $M$  hmotnost uvažované koule, která se při radiálním pohybu hmoty zachovává. Vztáhneme-li počáteční podmínky k času  $t_0$ , je

$$(12) M = 4\pi r_0^3 \rho_0$$

kde  $\rho_0$  je hustota hmotnosti v čase  $t_0$ . Diferenciální rovnice (10) je pohybovou rovnicí objektu za předpokladu, že gradient tlaku je nulový (samotný tlak v newtonovské teorii pohyb neovlivňuje) a na objekt nepůsobí žádná další síla kromě gravitace. Předpokládejme dále, že náš objekt (můžeme si pod ním představit třeba galaxii) sdílí pohyb náplně vesmíru (budeme říkat, že je kosmologickým objektem). Aby nebyla homogenita vesmíru s časem porušena, musí tento pohyb splňovat vztah

$$(13) r = r_0 R(t)$$

Zde  $r_0$  je poloha v čase  $t_0$ , v němž pro  $R$  volíme počáteční podmínku

$$(14) R(t_0) = 1$$

Po dosazení (12), (13) do pohybové rovnice (10) dostáváme rovnici

$$(15) d^2R/dt^2 = -4\pi\rho_0G/3R^2 = -C/2R^2$$

kde jsme položili

$$(16) C = 8\pi\rho_0G$$

Tato rovnice se už nevztahuje k jednotlivému objektu, ale k chování vesmíru jako celku. Veličině  $R(t)$ , která určuje, kolikrát se rozměry vesmíru změnily (v minulosti či v budoucnosti) oproti stavu zvolenému za počáteční, říkáme škálový faktor. Určení jeho závislosti na čase je základní úlohou kosmologie.

Vzpomeneme-li nyní na debatu Bentleye s Newtonem, můžeme říci, že Bentley správně očekával zhroucení vesmíru, který by byl v daném okamžiku nehybný. Ani nekonečnost vesmíru by tomu nemohla zabránit. Že se vesmír nehroutlí, vysvětluje se tím, že se rozpíná (v současné době  $R > 1$ ) a newtonovská gravitace toto rozpínání (aspoň do této chvíle) nezastavila.

Pohybovou rovnicí druhého řádu můžeme podobně jako u rovnic klasické mechaniky nahradit rovnicí prvního řádu, vyjadřující zákon zachování energie. Znásobíme ji proto veličinou  $dr/dt$  a zintegrujeme. Tak dojdeme k rovnici pro škálový faktor

$$(17) (dR/dt)^2 = C/R - k$$

kde  $k$  je integrační konstanta.

Zde je však třeba určité opatrnosti. Nemůžeme odtud usuzovat, že je možný statický vesmír s  $C/R = k$ , podobně jako zákon zachování energie neříká, že těleso může v gravitačním poli

Země „viset“ na místě. Příklad  $dR/dt = 0$  neodpovídá původní rovnicí druhého řádu a musí být vynechán. Existenci statického vesmíru by v rámci newtonovské fyziky neumožnila ani „vyšší moc“.

Newtonovská kosmologie je tak schopna popsat a vysvětlit základní vlastnost vývoje vesmíru – jeho rozpínání. Vyžaduje si to ovšem zásadní změnu pohledu na inerciální soustavy. V newtonovském vesmíru neexistují tuhé privilegované soustavy. Jejich úlohu přebírají soustavy spojené s rozpínající se vesmírnou hmotou. Každá taková soustava má střed v určitém místě vesmíru a vzhledem k místnímu pozorovateli v tomto středu se rozpíná okolo něho.

Povšimněme si, že úspěch v nahrazení pohybových rovnic jednotlivých objektů jedinou rovnicí pro škálový faktor byl podmíněn platností Newtonova gravitačního zákona. Při jiné závislosti síly na vzdálenosti by nebylo možno odstranit  $r_0$ . Jedinou výjimkou je případ, kdy v pohybové rovnici objektu vystupuje na pravé straně navíc člen úměrný vzdálenosti a je tedy namísto (11)

$$(18) \quad d^2r/dt^2 = -GM/r^2 + \frac{1}{3} \lambda r$$

Pak lze po dosazení (12), (13) stále krátit, rovnice pro škálový faktor (15) se doplní na

$$(19) \quad d^2R/dt^2 = -4\pi\rho_0G/3R^2 + \lambda R^2/3$$

a příslušná rovnice prvního řádu (17) na

$$(20) \quad (dR/dt)^2 = C/R + \lambda R^2 - k$$

Přídavný člen (při kladném  $\lambda$ ) urychluje rozpínání vesmíru. Zavedl jej v rámci obecné teorie relativity Einstein roku 1917 ve snaze najít statický vesmír. Veličina  $\lambda$  se nazývá kosmologická konstanta. Kosmologický člen se může znatelně projevit jen ve velkém měřítku. K historii s ním spojené a k úvahám o jeho fyzikálním smyslu se dostaneme později.

Vývoj vesmíru v newtonovské kosmologii tedy získáme řešením rovnice (19) nebo rovnice (20) za počáteční podmínky (14). Pro získání řešení, které máme v úmyslu porovnat s realitou, je třeba v rovnici znát střední hustotu hmotnosti  $\rho_0$  v „našem“ čase. Dále je třeba v rovnici druhého řádu (19) doplnit ke (14) ještě další počáteční podmínku na škálový faktor. Protože tento faktor nemá sám o sobě bezprostřední fyzikální význam – jeho hodnota v čase  $t_0$  byla stanovena dohodou a při změně časového počátku by se vynásobil konstantním kladným faktorem, použijeme pro daný účel Hubbleovy konstanty

$$(21) \quad H = (dR/dt)/R$$

Užitím (13) můžeme odtud dostat

$$(22) \quad u = dr/dt = Hr$$

rychlost vzdalování kosmologických objektů je tedy úměrná jejich vzdálenosti. „Konstantou“ se  $H$  nazývá proto, že má v určitém čase stejnou hodnotu pro všechny kosmologické objekty. Je tedy konstantou v prostoru, na čase ovšem závisí.

V případě nulové kosmologické konstanty (rovnice (15)) by nám tedy stačila k identifikaci našeho vesmíru znalost  $H_0$  a  $\rho_0$ . Dnes se ovšem předpokládá, že tato konstanta má nenulovou kladnou hodnotu, kterou nejsme schopni přímo určit. Proto k veličinám  $H_0$  a  $\rho_0$  připojujeme ještě hodnotu  $q_0$  deceleračního parametru v čase  $t_0$ . Tento parametr je definován vztahem

$$(23) \quad q = - (d^2R/dt^2)/RH^2$$

A stejně jako Hubblova konstanta nezávisí na multiplikační konstantě ve škálovém faktoru. Co se týče rovnice (20), konstanty  $C$ ,  $k$  a  $\lambda$  v ní mohou být učeny pomocí  $H_0$ ,  $\rho_0$  a  $q_0$ . Způsobu měření uvedených veličin a jejich vztahu ke kosmologické konstantě si všimneme později.

### ***Otázky k Newtonovské kosmologii***

X? obrázky?

## **5. Klasifikace kosmologických modelů**

Potlačit obrázky znamená potlačit mocný zdroj nápovědí. Obrázková reprezentace je podstatná pro objevy a pro rychlé porozumění. (J. L. Synge, cituje J. Barrow, Vesmírná galerie, 2011)

Přistoupíme k rozboru rovnice (20), kterou bychom asi dovedli vyřešit pro některé dílčí případy. Ukážeme si však, že základní představu o typech řešení si můžeme udělat čistě z jejího grafického znázornění.

Připomeňme si nejprve obdobný přístup k řešení Keplerova problému pohybu dvou těles pod vlivem gravitace. Tento pohyb může být uvažován jako pohyb jediného tělesa o redukované hmotnosti  $\mu$  v centrálním poli. Zákon zachování energie lze vyjádřit jako

$$(24) \quad \frac{1}{2} \mu (dr/dt)^2 + J^2/2\mu r^2 - GM\mu/r = E$$

kde  $E$  je energie,  $J$  moment hybnosti. První člen na levé straně je kinetická energie radiálního pohybu, která nemůže být záporná. Součet dvou dalších členů je efektivní potenciální energie  $U_{ef}(r)$ . Zakreslíme graf závislosti  $U_{ef}$  na vzdálenosti  $r$ . Vodorovnými čarami znázorníme různé energetické úrovně  $E$ , přičemž uvažovaná soustava se může pohybovat pouze v rozmezí nezáporného  $E$ . Z grafu dostáváme klasifikaci keplerovských pohybů:

Pro hodnotu  $E$  odpovídající minimu grafu je  $r$  konstantní a jedná se tedy o kruhový pohyb.

Pro  $E < 0$  finitní pohyb mezi dvěma body obratu (řešením rovnic bychom zjistili, že jde o elipsu)

Pro  $E = 0$  infinitní pohyb s bodem obratu, rychlost se v nekonečnu limitně blíží k nule (parabola)

Pro  $E > 0$  infinitní pohyb, rychlost v nekonečnu se limitně blíží nenulové hodnotě (hyperbola)

V našem kosmologickém případě máme

$$(25) \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + f(R) = -k$$

$$(26) f(R) = -C/R - \frac{1}{3} \lambda R^2$$

Porovnejme s (24). První člen na levé straně musí být opět nezáporný.  $f(R)$  je analogií  $U_{ef}$ , vyneseme jeho graf na svislou osu v závislosti na  $R$ . Různé hodnoty  $k$  znázorníme vodorovnými čarami, příslušné hodnoty  $R$  se mohou realizovat jen nad grafem  $f(R)$ . Předpokládejme, že  $C$  i  $\lambda$  jsou nezáporné, odlišíme případy, kdy některá z těchto konstant má nulovou hodnotu.

**I.  $\lambda = 0, C > 0$**  (čistě newtonovský případ bez kosmologického členu)

$$k > 0$$

$$k = 0$$

$$k < 0$$

**II.  $\lambda > 0, C > 0$**

$$k > 0$$

$$k = 3C/2$$

$$k < 3C/2$$

**III.  $\lambda > 0, C = 0$**

$$k > 0$$

$$k = 0$$

$$k < 0$$

**IV.  $\lambda = 0, C = 0$**

$$k = 0$$

$$k < 0$$