

## 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 součástí 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 zvrat je lokalizován do začátku 17. století, kdy je sestrojen dalekohled a Galileo Galilei jej obrátí k nebi. K dalšímu zvratu 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 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. 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.

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 sečti hvězdy, dokážeš-li je spočítat. Tak tomu bude i s tvým potomstvem.*

(Genesis 1.15)

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 svět 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 společností. 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 poznacích, 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 kolébku vědecké kosmologie však můžeme pokládat až antické Řecko. Jeho myslitelé dokázali 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 Milétoš, 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 základ 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 nejširší 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

nalezli 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 Thaleta 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.

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 velikánům 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 Molyneaux 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, která je určena Herzprungovým-Russellovým diagramem (1910), jenž udává souvislost mezi jejich teplotou a svítivostí a ve spojení s fyzikálními poznatky o procesech probíhajících ve hvězdách umožňuje pochopit jejich vývoj. 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). 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 letů 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 splývá s poznáváním historie vesmíru.

## Otázky

Vyhledejte konkrétní údaje o našem výhodném pozorovacím místě ve vesmíru a o jeho původu.

Nacházejí se na našem území prehistorické památky, které by se mohly vykládat jako doklad 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 poznatků? 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 Digessova 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]

