

Hubbleova konstanta – koeficient úměrnosti mezi rychlostí vzdalování a vzdáleností objektů při expanzi vesmíru. Dnes se hodnota Hubbleovy konstanty odhaduje na 68 km/s na megaparsek.

Hubblův čas – převrácená hodnota Hubbleovy konstanty, dává hrubý odhad stáří vesmíru za předpokladu expanze úměrné času.

Kosmologická konstanta – člen v Einsteinových rovnicích obecné relativity, který je úměrný metrickému tenzoru. Albert Einstein ho zavedl v roce 1917. Jeho účelem bylo, aby rovnice poskytovaly stacionární řešení. Po objevu expanze vesmíru v roce 1929 se tento člen jevil jako zbytečný. Moderní kosmologie o něm opět uvažuje v souvislosti s popisem zrychlené expanze vesmíru.

Horizont vesmíru – efekt způsobený zpžděním signálu. Nejdále dohlédneme do oblastí, z nichž k nám doletělo světlo od doby vzniku vesmíru. Vzdálenější oblasti jsou pro nás za horizontem a nevidíme je.

Flammarionova rytina s dobovou představou o uspořádání světa. Kolorováno v pozdější době.



Milníky kosmologie

Kosmologie je odvětví astronomie, které se zabývá vesmírem jako celkem – jeho uspořádáním, elegancí, řádem, minulostí a budoucností. Pojmenování kosmologie pochází z řeckého slova *kosmos*, které znamená řád či krásu. Čtenář ho bude znát ze slova „kosmetika“, které má stejný slovní základ. Současný kosmologický model se opírá o teorii velkého třesku – horkého hustého počátku, o němž toho zatím příliš nevíme. Vesmír se do současné podoby vyvíjel 14 miliard roků, atomární látka v něm nyní zaujímá zhruba 5 procent, 26 procent tvoří chladná temná hmota a 69 procent temná energie – mysteriózní složka zodpovědná za pozorované rozfukování vesmíru. Zatím nejchatrnější jsou naše znalosti o temné energii a stále není vyloučeno, že jen nerozumíme gravitačním projevům na velkých vzdálenostech.

Samozřejmě, že k nejzajímavějším okamžikům patří samotný počátek spolu s následujícími 400 tisíci léty, kdy byl vesmír v plazmatickém skupenství a nacházely se v něm volné elektrony intenzivně interagující s elektromagnetickým zářením. Právě tomuto období dnes říkáme velký třesk. Prostředí velkého třesku je neprůhledné pro elektromagnetické záření, a tak se dovnitř, do kuchyně velkého třesku, můžeme přímo podívat jen prostřednictvím reliktních neutrin, která se oddělila od látky v jedné sekundě, nebo díky reliktním gravitačním vlnám, které by měly rozvlnit prostor a čas při samotném vzniku vesmíru. Vesmírnou pralátku jsme schopni také připravit uměle na největších urychlovačích světa a zkoumat ji takřkajíc doma, v našich laboratořích. Současné technické prostředky naší civilizace nám připravily hned několik možností, jak zkoumat velký třesk. Věnujme se nyní chronologicky základním zvrátům v moderní kosmologii, která v první polovině dvacátého století postupně nahradila zažitou představu o stálém a neměnném světě, jehož jedinou součástí je naše Galaxie – Mléčná dráha.

Expanze vesmíru

1912 – červený posuv. Americký astronom Vesto Slipher objevuje na Lowellově observatoři ve Flagstaffu (o mnoho let později zde byl jiným dalekohledem objeven Pluto) červený posuv spektrálních čar mlhovin. V té době byly mlhavé obláčky na obloze většinou považovány za mlhoviny v naší Mléčné dráze a jen několik osvěcených astronomů

tušilo, že by mohlo jít o hvězdné ostrovy za hranicemi naší Galaxie. Interpretace červeného posuvu byla proto nejasná a nebyla dávána do souvislosti s expanzí vesmíru. Slipher objevil červený posuv Clarkovým refraktorem, fascinujícím čočkovým dalekohledem z roku 1895 o průměru 61 centimetrů a ohniskové vzdálenosti téměř 10 metrů.

1915 – obecná relativita. Na podzim roku 1915 představuje Albert Einstein na přednášce před Pruskou akademií věd svou zbrusu novou teorii gravitace – obecnou relativitu. Gravitační působení chápe jako zakřivení časoprostoru, proto se nové teorii někdy říká geometrická teorie gravitace. Obecná relativita předpovídá jevy, které jsou pro newtonovskou fyziku obtížně uchopitelné: černé díry, gravitační čočky, strhávání časoprostoru rotujícím tělesem, gravitační vlny, nestacionární vesmír a celou řadu dalších úkazů.

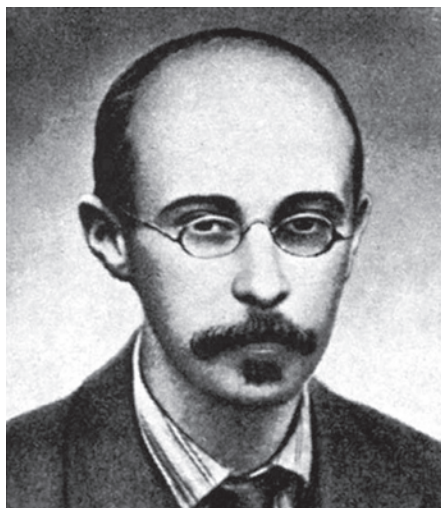
1917 – kosmologický člen. Albert Einstein si byl dobře vědom toho, že jeho nové rovnice pro gravitaci neumožňují statický vesmír. Gravitační interakce přitahuje objekty k sobě a statický vesmír vyplněný látkou by se záhy začal hroutit a smršťovat. V oně době byla představa statického vesmíru natolik vžitá, že Albert Einstein do rovnic zabudoval nový, tzv. kosmologický člen, který měl repulzivní účinky a který se stal protiváhou přitažlivé gravitaci. V témže roce je na západním pobřeží USA transportováno na horu Mt. Wilson 2,5 metru veliké zrcadlo pro nový Hookerův dalekohled. Právě tímto přístrojem budou objeveny expanze vesmíru a temná hmota. A do třetice: v roce 1917 dává ve východní části světa Vladimír Iljič pokyn k výstřelu z Aurory – výstřelu, který změnil naše nazírání na svět srovnatelnou měrou jako čerstvě odlité zrcadlo Hookerova dalekohledu.

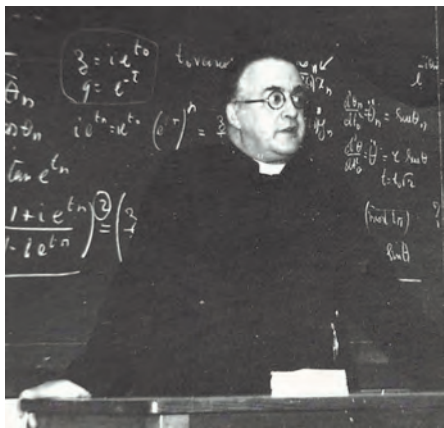
1922 – Fridmanovy modely vesmíru. Ruský meteorolog a matematik Alexandr Fridman provedl analýzu rovnováhy mezi gravitačním přitahováním a repulzí danou kosmologickým členem v Einsteinových rovnicích a zjistil, že nastolená rovnováha je nestabilní. Jakákoli náhodná fluktuace způsobí buď expanzi vesmíru, nebo jeho kolaps. Fridman také ukázal, že pro budoucí vývoj vesmíru je rozhodující jeho hustota. Pro hustotu vyšší než kritickou zvítězí přitahování a vesmír začne kolabovat. Pro nižší hustotu bude vesmír expandovat jednou provždy, a to i bez kosmologického členu. Expanze bude ovšem potřebovat nějaký počáteční impuls, podobně jako vyhození míčku, a bude vždy brzděná (vyhozený míček se také od nás může stále vzdalovat a jeho rychlost bude přitom neustále pomalu klesat).



Albert Einstein, tvůrce nové teorie gravitace, obecné relativity. Bez ní by současná kosmologie byla nemyslitelná.

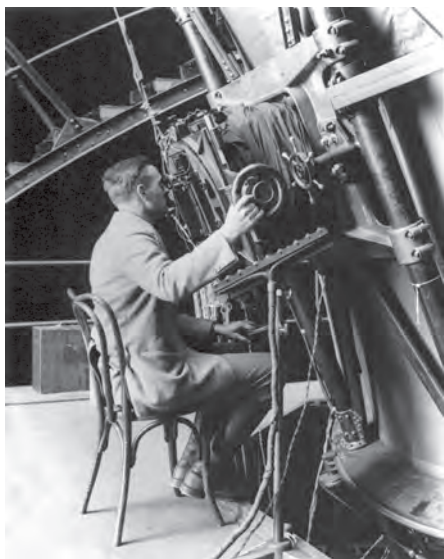
Alexandr Fridman, autor prvního hlubšího rozboru kosmologických modelů založených na obecné relativitě.





Belgický kněz abbé Georges Lemaître uvažoval o expanzi vesmíru a jeho horkém původu už před Hubblem.

Edwin Hubble pozoruje Hookerovým dalekohledem. Tento přístroj umožnil objev expanze vesmíru.



1923 – Mléčná dráha není sama. Edwin Hubble, ředitel observatoře na Mt. Wilsonu (byl jím od roku 1919 do své smrti v roce 1953) novým Hookerovým dalekohledem zjišťuje, že Velká mlhovina v Andromedě obsahuje hvězdy a že není žádnou mlhovinou, ale vzdálenou galaxií. První z hřebíčků do rakve dřívějších názorů na vesmír byl právě zatlučen. Představa Mléčné dráhy jako jediné galaxie ve vesmíru se hroutí a Hubble v dalších letech objevuje celou řadu galaxií, u nichž pečlivě studuje posuvy čar v jejich spektru.

1928 – prvotní atom. Belgický kněz abbé Georges Lemaître vážně uvažuje o možné expanzi vesmíru a ze Slipherových dat dokonce odhaduje rychlost této expanze, tedy hodnotu tzv. Hubbleovy konstanty, kterou zavede Edwin Hubble až o rok později. Lemaître své výpočty publikoval v belgickém časopise, který kosmologická komunita nečetla, a tak se o jeho úvahách astronomická veřejnost nedozvěděla včas. Lemaître si byl vědom, že expanze znamená horký a hustý počátek vesmíru a zavádí pro tento stav pojem tzv. *prvotního atomu*.

1929 – expanze vesmíru. Edwin Hubble doplňuje Slipherova měření řadou vlastních měření, zjišťuje, že červený posuv spektrálních čar galaxií je úměrný jejich vzdálenosti (tzv. Hubbleův zákon), což znamená, že vesmír expanduje, a to tak, že expanze probíhá současně ve všech jeho místech. Albert Einstein prohlašuje, že zavedení kosmologického členu do jeho rovnic je nadbytečné a že šlo o největší omyl jeho života. Vesmír není statický, jak si generace fyziků před Hubblem myslely.

1979 – inflace. Americký kosmolog Alan Guth uvažuje o velmi krátké fázi prudké expanze v prvních okamžicích vzniku vesmíru. Této fázi se říká inflace a mohla by vyřešit některé problémy našeho popisu raného vesmíru. Inflační model doznal v průběhu dalších desetiletí mnoha změn. Příčinou inflace by mohlo být oddělování interakcí nebo nějaké specifické kvantové pole. Důsledkem inflace by měl být plochý vesmír, který je ve všech směrech na velkých škálách stejný. Při inflaci by měly hojně vznikat gravitační vlny.

Reliktní záření

1948 – první výpočty. George Gamow spolu s Ralphem Alpherem a Robertem Hermanem počítají chování počátečního horkého a hustého vesmíru. Na základě tehdejších znalostí jaderné fyziky navrhuji první model tvorby lehkých jader a předpovídají, že na konci plazmatické fáze ochladne vesmír natolik, že se volné elektrony stanou součástí

atomárních obalů a vesmír bude od této chvíle pro elektromagnetické záření průhledný. Světlo se oddělí od látky a bude bloudit vesmírem až do dnešní doby, kdy se jeho vlnová délka protáhne až do oboru mikrovln. Dnes tento svit z konce velkého třesku nazýváme reliktní záření.

1965 – objev záření pozadí. V roce 1963 ukončily *Bellovy telefonní laboratoře* projekt testování první telekomunikační družice Echo (nafouklé pokovené koule, která pasivně odrážela mikrovlnný signál). S nálevkovitou anténou, která po experimentu zbyla, chtěli Arno Penzias a Robert Wilson, zaměstnanci Bellových laboratoří, vytvořit mapu oblohy na vlně 7,3 centimetru. Už při prvních testech antény je zarazil dosti velký šum, který přicházel ze všech směrů. Po mnoha nejrůznějších úvahách se ukázalo, že by snad mohlo jít o šum z konce velkého třesku, tedy o reliktní záření. K definitivnímu závěru bylo ale zapotřebí proměřit spektrální charakteristiku tohoto „šumu“ z oběžné dráhy.

1989 – COBE. V roce 1989 startovala americká družice COBE (*Cosmic Background Explorer*), která zjistila, že Penziasem a Wilsonem objevený šum má teplotu 2,73 kelvinu a závislost jeho intenzity na vlnové délce odpovídá záření absolutně černého tělesa, což je rozhodující charakteristikou reliktního záření. V roce 1992 tato družice objevila fluktuace v reliktním záření (v různých směrech se jeho teplota mírně liší). Detailní analýzu fluktuací ale nebylo možné provést, protože úhlové rozlišení COBE bylo pouhých sedm stupňů.

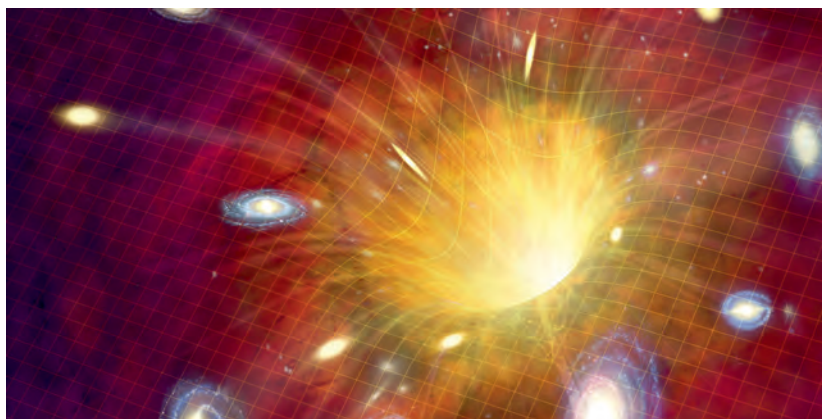
2001 – MAP. Následující americká sonda pro výzkum reliktního záření, s názvem MAP (*Microwave Anisotropy Probe*), startovala v roce 2001. Tentokrát nešlo o družici obíhající Zemi, ale o sondu umístěnou 1,5 milionu kilometrů za Zemi, v tzv. Lagrangeově bodě L2. Sonda měla úhlové rozlišení 0,3°, což umožnilo detailní analýzu zastoupení fluktuací různé velikosti. Ta byla ukončena v roce 2003 a plynulo z ní stáří vesmíru a procentuální zastoupení atomární látky, temné hmoty a temné energie. Poprvé jsme se dozvěděli, že vesmír je starý zhruba 14 miliard roků. Sonda také datovala (z polarizace reliktního záření) období

Reliktní záření – záření, které se od látky oddělilo na konci velkého třesku, přibližně 400 000 let po vzniku vesmíru, v době, kdy se vytvářely atomární obaly prvků a končilo plazmatické období vesmíru. Dnes má teplotu 2,73 K a vlnovou délku v milimetrové oblasti. Je jedním ze základních zdrojů informací pro naše poznání raného vesmíru.

Reliktní neutrina – neutrina, která se oddělila od látky zhruba v jedné sekundě po vzniku světa. Jejich teplota by dnes měla být přibližně 2 kelviny. Reliktní neutrina zatím nedokážeme našimi přístroji zachytit, neboť mají příliš nízkou energii. V budoucnu budou reliktní neutrina cenným zdrojem informací o průběhu velkého třesku.

Reliktní gravitační vlny – gravitační vlny, které měly vznikat při prudkém zvětšení počátečních kvantových fluktuací v průběhu inflační fáze. Existenci reliktních gravitačních vln (jiného spektra) předpovídají ale i další modely vzniku vesmíru. Jejich případná detekce pomůže některé modely vzniku světa spolehlivě vyloučit.

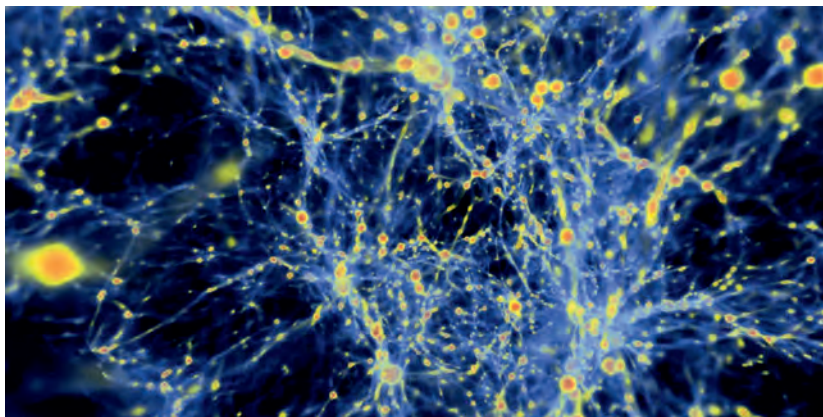
Umělecká vize vzniku vesmíru. Zdroj: Huffington Post.



Chladná temná hmota (CDM) – Cold Dark Matter. Chladná temná hmota je složka temné hmoty, která difunduje do menších vzdáleností, než jsou rozměry zárodečných fluktuací galaxií. Jde tak o jedinou složku temné hmoty, která je schopná tvořit makroskopické struktury. Předpokládá se, že většina temné hmoty je právě chladná temná hmota.

Horká temná hmota (HDM) – Hot Dark Matter. Horká temná hmota je tvořena částicemi s vysokou rychlostí, které se za dobu existence vesmíru dostaly do vzdáleností srovnatelné s rozměry viditelného vesmíru. Tato složka zárodečné fluktuace rozmělní. Jelikož se tyto fluktuace vyvinuly v dnes pozorovatelné struktury, musí horká temná hmota tvořit jen zanedbatelnou část temné hmoty. K této složce patří například neutrina.

Numerická simulace pavučinové sítě vláken temné hmoty (modře) a galaxií a látky atomární povahy (žlutě).
Zdroj: Argonne National Laboratory.



vzniku prvních hvězd, i když zatím jen nepřesně (400 milionů roků, dnes udávaná hodnota je 550 milionů roků). V roce 2003 byla sonda přejmenována po šéfovi projektu na WMAP (Wilkinson MAP).

2009 – Planck. V roce 2009 startovala evropská sonda Planck, zatím nejlepší sonda pro výzkum reliktního záření. Teplotní rozlišení měla 1 mikrokkelvin a úhlové rozlišení 5 obloukových minut. Sonda pořídila nejpreciznější mapu reliktního záření a podrobné měření jeho polarizace. Zpřesnila měření většiny kosmologických parametrů, objevila řadu velmi vzdálených galaktických kup a provedla dosud nejpreciznější frekvenční analýzu fluktuací reliktního záření.

Temná hmota a temná energie

1933 – kupy galaxií. V roce 1933 už jsou známy nejen galaxie, ale i kupy galaxií. Švýcarsko-americký fyzik Fritz Zwicky sleduje na Mt. Wilsonu pohyby jednotlivých členů kupy galaxií ve Vlesech Bereniky a zjišťuje, že množství jejich pohybu neodpovídá gravitačním účinkům viditelné látky. Dochází k závěru, že v kupě musí být mnohem více hmoty, než je pozorovatelné našimi přístroji. V té době předpokládá, že jde o nsvítící atomární látku. Až později se ukázalo, že jde o exotické elementární částice, které nebyly objeveny dodnes. S okolní látkou interagují gravitačně a nejspíše i slabou interakcí. Neinteragují ale ani elektromagneticky, ani slabě, proto je tato látka průhledná.

1968 – spirální galaxie. V roce 1968 pozoruje stejný jev americká astronomka Vera Rubinová ve spirálních galaxiích. Látka na periférii (jak hvězdy, tak oblaka plynu) obíhá galaxie s vyšší rychlostí, než odpovídá gravitačnímu zákonu. Důsledek je stejný – přítomnost neviditelné látky. Další vývoj vede k zakládání mnoha podzemních laboratoří, které se snaží tajemné částice polapit. První nenulový signál má detektor DAMA (DARk MATter) v italské laboratoři Gran Sasso (od roku 1996), po roce 2000 se přidávají další detektory.

1998 – temná energie. Několik vědeckých skupin se snaží zjistit,

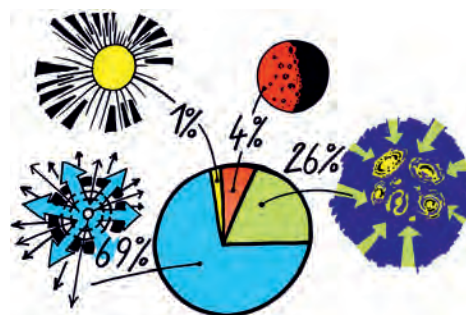
jakou měrou je expanze vesmíru brzděná. Poprvé je k dispozici rozumné měření vzdálenosti galaxií za pomoci supernov typu Ia, které při své explozi uvolní zhruba stejné množství energie a z jejich jasnosti lze pak odhadnout vzdálenost mateřské galaxie. Pokud se podaří pořídit spektrum této galaxie, je vyhráno – máme údaje o vzdálenosti i o rychlosti vzdalování. Na konci roku 1998 zjistily dvě skupiny (jedna vedená Adamem Riessem v Baltimoru a druhá Saulem Perlmutterem v Berkeley), že expanze není brzděná, ale naopak zrychlená, což vede ke vzkříšení Einsteinova kosmologického členu. Tato šokující zpráva obletěla svět, neboť to znamenalo, že za expanzi není odpovědná gravitace (ta expanzi vždy brzdí) ale jakási nová entita, která dostala pracovní název *temná energie*. Později se obdobné závěry učinily na základě sledování fluktuací reliktního záření a ukázalo se, že existence temné energie plyne i z pozorování velkorozměrových struktur. Situace s temnou energií je dodnes nejasná. Za expanzi vesmíru by mohly být odpovědné kvantové fluktuace vakua, nová síla či kvantové pole nazývané *kvintesence*, nebo o zrychlenou expanzi nejde, a jen nerozumíme gravitačnímu působení na velkých vzdálenostech. Všechny tři varianty jsou stále ve hře.

2000 – mapy a simulace. Z gravitačního působení na světlo se daří rekonstruovat rozložení temné hmoty, nacházet vlákna mezi kupami galaxií a pořizovat mapy temné hmoty. Ukazuje se, že temná hmota tvoří ve vesmíru síť vláken a stěn, v jejichž křížení se nacházejí ostrovy atomární látky, kterým říkáme galaxie. Vše doplňují podrobné numerické simulace prováděné na největších superpočítačích na světě. Vesmírná mozaika nabývá neostrých obrysů a dává tušit, že řešení otázky původu temné hmoty je snad nablízku.

Kvarkové gluonové plazma (QGP)

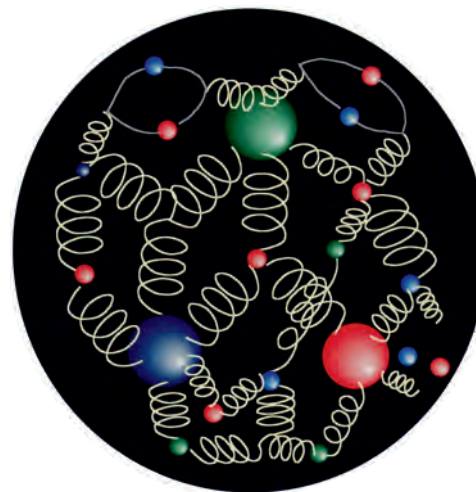
1994 – CERN. V urychlovačovém komplexu CERN je odstartován program, jehož cílem je vytvořit při srážce těžkých jader olova pralátku, která byla ve vesmíru přítomna v čase kolem jedné mikrosekundy. Jde o tzv. kvarkové-gluonové plazma, z něhož se ve vesmíru v čase kolem deseti mikrosekund tvořily první protony a neutrony. Úloha to nebyla nikterak jednoduchá a experimenty trvaly dlouhých šest let, než se v roce 2000 poprvé podařilo vesmírnou pralátku připravit.

2000 – příprava QGP. V roce 2000 bylo na urychlovači SPS (*Super Proton Synchrotron*) poprvé kvarkové-gluonové plazma na kratičky



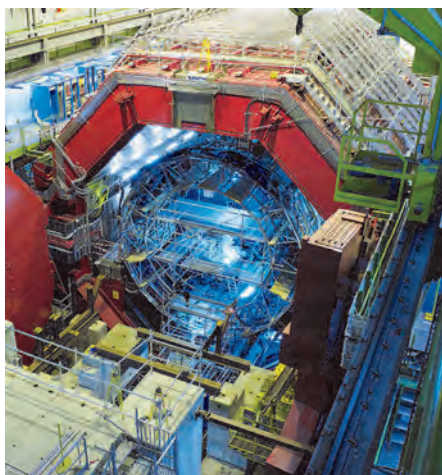
Z celkové hmoty a energie ve vesmíru tvoří 1 % atomární svítilící látka, 4 % atomární nesvítilící látka, 26 % temná hmota a 69 % temná energie. Kresba: Ivan Havlíček.

Uvnitř protonu. Větší barevné kuličky představují kvarky, menší gluonové pojivo. Zakreslené šroubovice jsou linie v tzv. Feynmanových diagramech. Zdroj: Wikipedia.



Kosmologický posuv – posuv spektrálních čar k červenému konci spektra způsobený expanzí vesmíru. Při rozpinání dochází nejen ke vzájemnému vzdalování galaxií, ale i k prodlužování vlnových délek záření. Spektrum vzdálených objektů ve vesmíru se tak jeví posunuté směrem k červené až infračervené oblasti. Kosmologický červený posuv je definován předpisem $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$, kde λ_0 je vlnová délka spektrální čáry v okamžiku vyslání paprsku, λ je vlnová délka téže spektrální čáry v okamžiku zachycení paprsku. Malé kosmologické červené posuvy lze interpretovat pomocí Dopplerova jevu. U velkých posuvů závisí vzdálenost objektu na parametrech expanze vesmíru (Hubbleovy konstantě, křivosti, procentuálním zastoupení temné energie atd.) a není jednoduché z naměřeného kosmologického posuvu vzdálenost přesně určit.

ALICE, detektor na urychlovači LHC, kde se dnes připravuje při vstřícných srážkách jader olova kvarkové-gluonové plazma, pralátka existující ve vesmíru do přibližně deseti mikrosekund. Zdroj: CERN.



okamžik připraveno (10^{-22} sekundy). Experimentům se začalo říkat „malý třesk“. Vzhledem k tomu, že v CERN začínala stavba největšího urychlovače světa LHC (*Large Hadron Collideru*), probíhaly další experimenty ve Spojených státech na urychlovači RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) na Long Island v blízkosti New Yorku. Urychlovač patří Brookhavenské národní laboratoři a bylo na něm provedeno nejvíce experimentů s kvarkovým gluonovým plazmatem vůbec.

2009 – ALICE. Do Evropy se experimenty vrátily v roce 2009. „Malý třesk“ se uskutečňuje na detektoru ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*) urychlovače LHC. Experimenty se provádějí vždy ke konci roku, při srážce dvou jader olova se interakční oblast zahřeje na teplotu o šest řádů vyšší, než je v nitru Slunce. Obdobné experimenty ve Spojených státech využívají jádra zlata. U obou experimentů jde o vstřícné svazky, na rozdíl od roku 2000, kdy byla urychlená jádra olova nastřelována na statický terčik.

A co dál?

V posledních dvou letech se razantně zlepšila naše znalost velkorozměrových struktur a poprvé jsou mapována i rychlostní pole obřích galaktických kup. Vesmír se ze statického systému mění před našima očima v dynamický rej plný pohybu na největších škálách. Je to ale jen jedna strana mince. Dokud nebudeme vědět, co je temná energie, sotva můžeme předvídat chování těchto struktur v budoucnosti a další osud našeho vesmíru.

Obraťme pohled naopak do minulosti. Naše představy o vzniku světa jsou stále nejasné. Na největších urychlovačích světa dokážeme připravit látku ve stavu, která odpovídá látce ve vesmíru v čase 10^{-13} sekundy (desetinu biliontiny sekundy). Do tohoto času jsme naše představy schopni ověřovat a korigovat. V časech kratších jde spíše o snění, jak by mohl vesmír dle našich představ vypadat. Snad se nám jednou podaří zachytit reliktní gravitační vlny, což by napomohlo vyloučit ty modely vzniku světa, které nejsou ve shodě s pozorováním. Jedině další experimenty ukáží, nakolik se naše představy o raném vesmíru shodují s realitou.

■ Petr Kulháněk, 5. 3. 2018, AB 7/2018