

Důsledky obecné teorie relativity

JIŘÍ JERSÁK

# Rozpínání vesmíru podle soudobých poznatků

*Rozpínání vesmíru pro nás pravděpodobně bude brzy tak samozřejmé jako skutečnost, že Země obíhá kolem Slunce. Žykneme si i na to, že lze pozorovat vzdálené galaxie, které jsou od nás rozpínáním unášeny rychlostí větší, než je rychlost světla. Rozpínání vesmíru, plynoucí z obecné teorie relativity, si vysvětlíme názorně, ale přitom se neodkloníme od základních principů této teorie.*

## Historie představ o rozpínání vesmíru

Brzy po objevení obecné teorie relativity v roce 1915 si Albert Einstein uvědomil, že podle této teorie se vesmír musí buď rozpínat, nebo smršťovat, že tedy jeho tehdejší teorie vylučuje statický vesmír. A tehdejší představa byla, že vesmír je statický. Pokusil se tento zdánlivý nedostatek odstranit dodatečným zavedením kosmologické konstanty. Svým odpudivým gravitačním působením měla statický vesmír ochránit před zhroucením se v důsledku přitažlivé síly hmoty. Možnost rozpínání vesmíru nebral vážně. Jiní teoretikové, především Alexander Friedmann a Georges Lemaître, však tuto představu na základě Einsteinovy obecné teorie relativity a několika odvážných zjednodušujících předpokladů rozvinuli během několika let. Lemaître jako první vyslovil hypotézu o velkém třesku jako počátečním stavu vesmíru a nezávisle prohloubil Friedmannovy práce popisující rozpínání vesmíru. Willem de Sitter začal už roku 1917 vyvíjet model vesmíru ovládaného kosmologickou konstantou, v roce 1927 pak Lemaître ukázal, že se takový vesmír rozpíná.

Když Edwin Hubble roku 1929 publikoval data o růstu rudého posuvu (přírůstku vlnové délky světla) ve světelných spektrech galaxií s jejich vzdáleností, byla půda pro teoretické chápání rozpínání vesmíru na základě Einsteinovy obecné teorie relativity dobře připravena. Pak ale došlo k nešťastnému zvratu: jelikož tato teorie byla tehdy pro valnou většinu fyziků a kosmologů příliš složitá, byla vymyšlena různá jiná rádobý „jednodušší“ vysvětlení Hubblova pozorování, vyhýbající se důslednému použití *obecné* teorie relativity. Tak se do literatury a do povědomí generací dostaly mylné představy a některé přetrvávají dodnes. Uvedeme nejčastější z nich:

(i) Přírovnání vzdalujících se galaxií k letícím střepinám bomby po jejím výbuchu v předem přítomném neměnném prostoru.  
(ii) Představa, že rudý posuv je způsoben Dopplerovým jevem, to jest přírůstkem vlnové délky světla v důsledku pohybu zdroje.

(iii) Snaha, často jen podvědomá, chápat rozpínání vesmíru v rámci pravidel *speciální* teorie relativity.

(iv) Přesvědčení, že se rozpínání vesmíru děje v souhlasu se zákonem zachování energie.

Všechny tyto nesprávné představy souhlasí s astronomickými pozorováními blízkých galaxií, a proto přežívaly dlouho. Jejich nesprávnost odhalilo teprve pozorování vzdálených galaxií a reliktního záření. Popisem těchto složitých pozorování se v tomto článku zabývat nebudeme (pozn. red.: viz např. článek Raphaëla Boussa „Zamotaný příběh kosmologické konstanty“, *Vesmír* 78, 7, 1999/1). Jenom shrnujeme, že jejich interpretace skutečně vyžaduje důsledné použití *obecné* teorie relativity. Vysvětlíme ale, proč jsou uvedené představy nesprávné z hlediska teoretického, tedy z hlediska obecné teorie relativity. Nejprve jen stručně:

(i) Rozpíná se sám prostor, galaxie se v něm téměř nepohybují.

(ii) Růst vlnové délky světla je způsoben rozpínáním prostoru během jeho letu prostorem, a ne domnělým pohybem galaxií.

(iii) *Speciální* teorie relativity je pro velké vzdálenosti nepoužitelná.

(iv) Energie se při rozpínání vesmíru nezachovává.

Pro podrobnější vysvětlení je třeba vrátit se k té složité obecné teorii relativity, to jest k teoretickým představám o rozpínání vesmíru starým v roce 2007 už 80 let! Naštěstí astronomická pozorování odhalila mezitím několik vlastností vesmíru, které použití této teorie k popisu rozpínání vesmíru nesmírně zjednodušují. Proto se pokusíme vysvětlit skutečnou podstatu rozpínání vesmíru i bez použití matematického aparátu obecné teorie relativity. Některá ze zmíněných novějších astronomických pozorování a poněkud odbornější aspekty jsou popsány v souběžném článku v *Čs. časopisu pro fyziku* [1]. V obou článcích navazujeme a v mnohých podrobnostech také odkazujeme na nedávný článek J. Langra [2] ve *Vesmíru* o reliktním záření.

## Kosmologický princip

Dnes je představa velkého třesku ověřená řadou pozorování, z nichž nejpřesvědčivější je pozorování reliktního záření, viz [2]. Stáří vesmíru je určeno na necelých 14 Gyr (Gyr = giga year =  $10^9$  let, tj. miliarda let). Pro srovnání uvádíme, že naše galaxie je stará asi 10 Gyr a sluneční soustava asi 4,5 Gyr, jsou to

Prof. Dr. Jiří Jersák (\*1941) vystudoval Fakultu technické a jaderné fyziky ČVUT v Praze. V Ústavu teoretické fyziky na Rýnsko-vestfálské technice v Cáchách se zabývá kvantovou teorií pole a kosmologií (viz <http://tpe.physik.rwth-aachen.de/jersak/>).

tedy stáří srovnatelná. Reliktní záření vzniklo pouze necelých 0,0004 Gyr (380 tisíc let) po velkém třesku, a proto poskytuje pohled na velice mladý vesmír.

Prostorové vzdálenosti ve vesmíru jsou pro nás zcela nepředstavitelné, ať je udáváme v metrech, kilometrech nebo světelných letech. Vhodnou jednotkou vzdálenosti v kosmologii je teprve miliarda světelných let (Gly = giga light year =  $10^9$  světelných let). Astronomové běžně pozorují galaxie a jejich předchůdce, kvasary, na vzdálenosti přes 20 Gly. Poloměr části vesmíru, která je pro nás pozorovatelná, je zhruba 46 Gly. Je to vzdálenost, na které se dnes nachází pozůstatek zdroje reliktního záření, které pozorujeme. Dál zatím nedohlédneme než na „okraj nedohledná“ [2]. V celém článku se budeme zabývat jen touto částí vesmíru, ale pro stručnost budeme většinou psát prostě „vesmír“.

Kosmologie se zabývá především vlastnostmi vesmíru na *současných kosmologických škálách*, to jest zhruba na vzdálenostech srovnatelných nebo větších než 1 Gly. Na těchto škálách jsou rozměry objektů pozorovaných na obloze jen nepatrné. Typický průměr galaxií (o hvězdách ani nemluvě) je jen asi 0,0001 Gly (100 000 světelných let) a jejich kup okolo 0,001 Gly. Ve srovnání s kosmologickými škálami jsou tedy galaxie pouhé nepatrné částičky prachu (viz obr. 1), jejichž struktura nehraje v kosmologii žádnou roli, takže si na kosmologických škálách můžeme představit vesmír jako prostor naplněný řídkým oblakem prachu.

Astronomická pozorování tohoto „prachu“ naznačují, že jeho hustota je všude stejná (obráz. 2). Také reliktní záření k nám dopadá ze všech směrů s téměř stejnou<sup>1</sup> teplotou: okolo  $T=2,7$  K.

Tato pozorování vedou k hypotéze, že vlastnosti vesmíru jsou na kosmologických škálách všude stejné. Hypotéza bývá nazývána *kosmologický princip* (nebo také Koperníkův princip), čímž se zdůrazňuje domněnka, že část vesmíru, kterou obýváme, není ničím mimořádná.

### Vesmír je na kosmologických škálách velice jednoduchý

Podle této hypotézy se všechny části vesmíru vyvíjejí od velkého třesku stejně a lze v nich v každou dobu určit jejich stáří  $t$ . Tím ale zavádíme pro celý vesmír všude platný takzvaný *kosmický čas*  $t$ . Sám vývoj vesmíru, především jeho rozpínání, slouží jako kosmické přesýpací hodiny. V naší době ukazují oněch  $t_0=14$  Gyr (symbolem  $t_0$  se vyjadřuje kosmologické „dnes“).

Další blahodárny důsledek kosmologického principu je velké zjednodušení popisu vesmíru v libovolně zvoleném okamžiku  $t$ , tj. popisu trojrozměrného prostoru. Protože vesmír je všude stejný a ve všech směrech stejně vypadá,<sup>2</sup> pro úvahy o rozpínání vesmíru není třeba zavádět trojrozměrný souřadnicový systém. Pro nějaké dva objekty, například hodně od sebe vzdálené galaxie, stačí brát v úvahu jen jeden údaj: jejich relativní vzdálenost  $D(t)$ . Ta se může měnit s časem, ale nezá-



visí ani na poloze, ani na vzájemné orientaci těch dvou galaxií ve vesmíru. Nezanedbáme proto nic podstatného, když si budeme představovat prostor jako jednodimenzionální. Podobnou představu o vesmíru měli kosmologové již hned po vzniku obecné teorie relativity, což bylo tenkrát velmi odvážné. Dnes je tato představa podložena (nikoli dokázána) mnohými pozorováními.

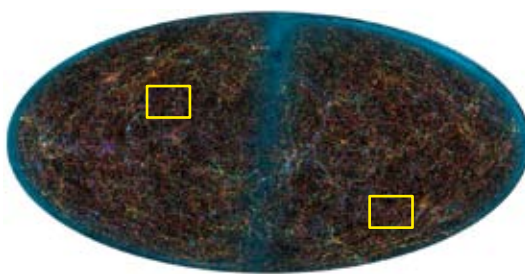
A teď ještě jeden, tentokrát nový a i z hlediska obecné teorie relativity překvapivý výsledek kosmologických pozorování: trojrozměrný prostor v našem vesmíru je v libovolně zvoleném okamžiku  $t$  s pozoruhodnou přesností rovný (euklidovský)! Nemusíme si tedy lámat hlavu představami zakřiveného prostoru. Jak uvidíme později, čtyřrozměrný prostoročas ale zakřivený je, takže speciální teorie relativity v něm platí jen velmi omezeně, viz omyl (iii).

Z toho vyplývá, že si vesmír na kosmologických škálách můžeme bez nepřípustně hrubého zjednodušení představit v každém okamžiku kosmického času  $t$  jako přímou úsečku znázorňující prostor v tomto okamžiku.

### Prostor se rozpíná jako gumová šňůrka

Ve *speciální* teorii relativity je prostor při všech fyzikálních procesech neměnný, je pro ně jenom prkenným jevištěm. V jedné dimenzi je jako pevná dřevěná tyčka, na které je leccos připevněno a leccos se na ní odehrává.

V *obecné* teorii relativity prostor ožívá. Je to elastické jeviště, může se buď rozpínat, nebo smršťovat, a to v závislosti na tom, co je na něm připevněno a co se na něm odehrává.<sup>3</sup>



**1. Galaxie jsou nejkrásnější objekty na obloze. V kosmologii ale slouží jenom k viditelnému označení pevných bodů v prostoru. Dopisní spony by se k tomu hodily také.**

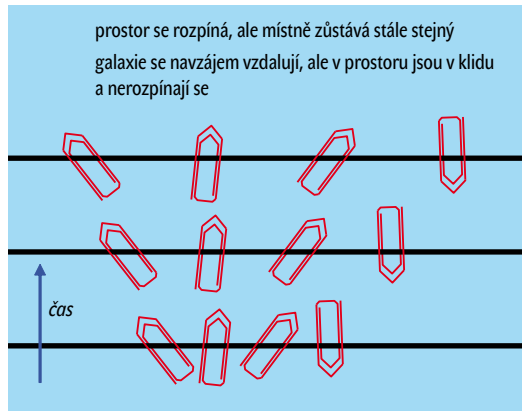
1) Nepatrné změny této teploty v závislosti na směru, objevené pomocí satelitů COBE a WMAP a popsané v [2], podobně jako rozdíly v detailech mezi výřezy na obr. 2, se týkají struktur vesmíru na škálách menších než kosmologických a jsou pro téma tohoto článku bezpředmětné.

2) Tomu se říká homogenita a izotropie.

3) Také se zakřivuje, ale jak jsme právě odůvodnili, pro naše účely to můžeme zanedbat.

**2. Když se manipulací pomocí počítače odstraní z oblohy hvězdy naší galaxie, je vidět, že hustota jiných dobře viditelných galaxií je ve všech směrech zhruba stejná. Na velkých škálách se tedy vesmír zdá být všemi směry stejný (<http://spider.ipac.caltech.edu/staff/jarrett/papers/LSS/>).**

**3. Rozpínání gumové šňůrky se nejlépe pozná na vzájemném vzdalování na ní připevněných „galaxií“.**



Prostorovou úsečku si lze představit jako tenkou rovnou gumovou šňůrku, která se může buď natahovat („rozpínat“), nebo smršťovat. Galaxie pak můžeme dobře znázornit dopisními sponami (obr. 1), které jsou na šňůrce připevněny. Když se šňůrka rozpíná, rostou vzdálenosti mezi na ní připevněnými sponami (obr. 3). Je to právě tento růst vzdáleností mezi sponami, ze kterého nějaký bystrý pozorovatel (pojmenujme ho Hubble) může usoudit na rozpínání šňůrky.

Tento jednoduchý model vystihuje podstatu věci. Vesmír se rozpíná, protože se rozpíná sám prostor. Ten se rozpíná – jako ta šňůrka – *všude*. Jeho vlastnosti se ale na žádném místě rozpínáním nemění.<sup>4</sup>

Z hlediska pana Hubbla, který sedí na jedné z galaxií, jsou ostatní galaxie od něj *unášeny* do dálky rozpínajícím se prostorem jako listy spadlé na proudící vodu. Jejich vzdálenosti  $D(t)$  od pana Hubbla rostou s časem  $t$ . Vůči prostoru ve svém okolí se však galaxie nepohybují, viz omyl (i). Spony/galaxie vlastně slouží k viditelnému označení pevných bodů v prostoru, který je sám o sobě neviditelný. Rozpínání prostoru tedy pozorujeme s jejich pomocí.

Prostor je pro nás tímto způsobem pozorovatelný zatím jen po místa od nás dnes vzdálená oněch 46 Gly. Alespoň potud je v každém okamžiku všude rovný.<sup>5</sup> Co je dál, to s jistotou nevíme, ale zdá se přirozené, že to bude aspoň ještě o kus dál podobné.

Model gumové šňůrky teď použijeme k objasnění několika důležitých poznatků plynoucích z obecné teorie relativity.

**Rychlost unášení galaxií je úměrná jejich vzdálenosti**

Malý pokus s natahováním šňůrky se sponami nás snadno přesvědčí, že vzdálenosti mezi dvěma libovolnými galaxiemi rostou tím rychleji, čím jsou tyto galaxie od sebe vzdálenější. Podobně dnes závisí *rychlost unášení*  $u$  (recession velocity) jednotlivých galaxií od naší galaxie lineárně na vzdálenosti  $D$  těchto galaxií od nás:

$$u = H_0 D.$$

Faktor úměrnosti  $H_0$  se nazývá *Hubblův parametr*, často se mu říká *Hubblůva konstanta*. Tento vztah se obvykle nazývá *Hubblův zákon*. Objevil ho a srovnal s tehdejšími daty již dva roky před Hubblem (1927) Lemaître a také ho, na

rozdíl od Hubbla, správně teoreticky vyložil.<sup>6</sup> Platí jenom s určitými omezeními, protože je v něm zanedbána závislost vzdálenosti  $D$  na čase  $t$  způsobená rozpínáním prostoru.<sup>7</sup>

Při natahování hodně dlouhé šňůrky si snadno uvědomíme, že rychlost unášení vzdálených spon roste s jejich vzdáleností neomezeně. Hubblův zákon to vyjadřuje kvantitativně. Můžeme si například spočítat, na které vzdálenosti dnes dosahuje rychlost unášení  $u$  hodnoty rychlosti světla  $c$ :

$$D_H = c/H_0.$$

Tato vzdálenost se nazývá *Hubblůva vzdálenost*  $D_H$ . Mnoho pozorovaných galaxií a kvasarů se nachází dál, a jsou tedy od nás unášeny *nadsvětelnou* rychlostí, ačkoliv se samy nepohybují.

**Speciální teorie relativity platí, ale jen lokálně**

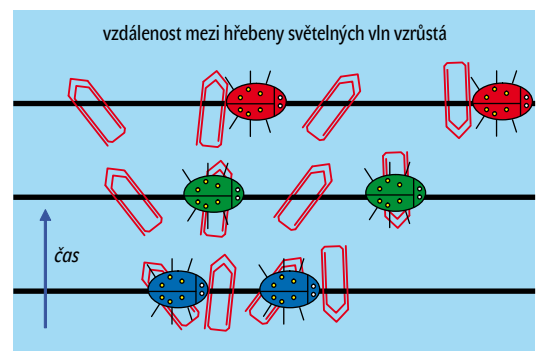
Koho tento závěr šokuje, ten podléhá omylu (iii). Speciální teorie relativity se svou horní hranicí  $c$  pro rychlost pohybu hmoty sice všude platí, ale vždy jen v malé oblasti prostoročasu (lokálně), jako aproximace k obecné teorii relativity. Nelze ji používat při pozorování objektů na kosmologických vzdálenostech.

Příklad gumové šňůrky to znázorňuje: každý její malý úsek se dá přibližně vidět jako kousek dřevěné tyčky, protože se na něm rozpínání projeví jen zanedbatelně. Ale běda, pokusíme-li se aproximovat tyčkou velký úsek šňůrky! Vlastně jde o analogii k známé vlastnosti hladkých křivek, že je lze v okolí každého bodu aproximovat přímkou (tečnou). Prostorčas v obecné teorii relativity je také sice zakřivený (naštěstí si to nemusíme představovat), ale hladký (riemannovský), a proto ho lze v každé oblasti aproximovat rovným prostoročasem speciální teorie relativity. To je jeden ze základních principů obecné teorie relativity.

Unášení pozorovaných galaxií nadsvětelnou rychlostí je jedním z klíčů k astronomickému rozpoznání, že je třeba používat obecnou teorii relativity. Tyto galaxie jsou totiž od nás mnohem dále, než by to bylo možné podle speciální teorie relativity, a jsou proto vidět daleko slaběji, než by z této teorie plynulo [1].

Jak velké jsou vlastně oblasti praktické použitelnosti speciální teorie relativity? Kdy lze rozpínání prostoru zanedbat a kdy ne?

**4. Hřebeny vln světla, znázorněné mezigalaktickými broučky, se při rozpínání prostoru od sebe vzdalují. Vlnová délka proto roste a světlo rudne.**



## Co se vlastně rozpíná a co ne?

Zásadně platí, že libovolné objekty, mezi kterými nepůsobí žádné přitažlivé síly, jsou rozpínáním prostoru od sebe unášeny, a tudíž se od sebe vzdalují. To se hned projevuje měřitelně především u vzdálených galaxií. Obecnou teorii relativity však nelze zanedbat, ani když jsou ty objekty sice mikroskopicky blízko sebe, ale zabýváme se jejich dlouhodobým vývojem. Pak je také jejich vzdalování významné, jak hned uvidíme při diskusi rudého posuvu světla.

Jakmile jsou objekty vázány nějakými silami, je to otázka kdo s koho. Jednotlivé galaxie, o našich fyzikálních laboratořích ani nemluvě, jsou při dnešním tempu rozpínání vesmíru plně ovládnuty přitažlivými silami. Proto je rozpínání prostoru v jednotlivých galaxiích a také jejich kupách zanedbatelné a můžeme se – pokud se vyhneme silným gravitačním polím nebeských těles – spokojit s užíváním speciální teorie relativity.

Avšak síly mezi galaxiemi na vzdálenostech větších, než jsou rozměry jejich kup, jsou zanedbatelné, a proto jsou takové galaxie rozpínajícím se prostorem unášeny od sebe. Na kosmologických škálách je pak speciální teorie relativity zcela nepoužitelná. Tam se projevuje obecně relativistický charakter rozpínání prostoru naplno. Hubblova vzdálenost  $D_H$  k nim rozhodně patří.

Nicméně je dobré si uvědomit, že rozpínání vesmíru se neděje jenom „někde tam daleko ve vesmíru“, ale i v prostoru u nás doma, podobně jako nám i doma plyne kosmický čas. Naše budovy (planeta, sluneční soustava, galaxie) jsou však dostatečně pevné na to, aby to vydržely beze změny. Proto nám rozpínání prostoru až do Hubblova objevu ušlo.

### Rozpínání prostoru vede ke kosmologickému rudému posuvu světla

Rudý posuv, označovaný  $z$ , je pro astronomy ten nejspolehlivější údaj o kosmických objektech – umění ho totiž (na rozdíl od vzdálenosti, rychlosti a absolutní světelnosti těchto objektů) dobře měřit. Proto stojí za to ho přesně definovat: Vlnová délka světla se zvětšuje faktorem  $(1+z)$ . Jestliže se nezměnila, je rudý posuv nulový ( $z=0$ ).

Jaký účinek má rozpínání prostoru na světlo, které se v něm pohybuje? To v našem modelu snadno zjistíme. Znázorníme souseďnou hřebeny světelných vln, jejichž mikroskopická vzdálenost je vlnová délka světla, třeba dvěma stejnými broučky.

Jestliže necháme broučky lézt stejným směrem po dřevěné tyčce, zůstane jejich vzájemná vzdálenost zhruba stále stejná. Vlnová délka zůstává beze změny, při pohybu světla nevzniká podle speciální teorie relativity žádný rudý posuv ( $z=0$ ).

Necháme-li ale lézt broučky po naší gumové šňůrce, kterou přitom napínáme (obr. 4), pak jejich vzájemná vzdálenost poroste. Stejným způsobem roste podle obecné teorie relativity při rozpínání prostoru vlnová délka světla. Rudý posuv vzniká během letu

světla rozpínajícím se prostorem. Mezi hřebeny světelných vln (stejně jako mezi broučky) nepůsobí vnitřní síly, které by je držely na stále stejné vzdálenosti. Proto zcela podléhají rozpínání prostoru ( $z > 0$ ).

Vlnová délka světla při jeho pohybu vesmírem k nám narůstala postupně a v různých dobách různě rychle podle toho, jak rychle se zrovna prostor rozpínal. Výsledný rudý posuv tedy závisí na historii rozpínání prostoru, tudíž zachycuje dlouhodobý vývoj vesmíru. Proto se mu říká *kosmologický rudý posuv*. Obecně platí, že se vlnová délka prodloužila tolikrát, kolikrát se za dobu letu světla k nám zvětšila vzdálenost mezi místem jeho emise a námi. Pro blízké galaxie je rudý posuv  $z$  blízký nule, pro vzdálené galaxie je ale velký, protože k nám světlo od nich letělo dlouho, a tak se jeho vlnová délka dlouhou dobu prodloužovala. Měření rudého posuvu u galaxií na různých vzdálenostech tak poskytuje informaci o historii rozpínání prostoru.

Všimněme si, že jsme o zdroji toho světla a případném pohybu onoho zdroje nemuseli vůbec nic vědět. Celá úvaha byla na tom nezávislá, tudíž nejde o Dopplerův jev způsobený pohybem zdroje, viz omyl (ii).<sup>8</sup>

Pokud se zdroj nebo pozorovatel pohybují vzhledem k jejich okolnímu prostoru, vzniká v důsledku Dopplerova jevu *dodatečný* kladný nebo záporný příspěvek k rudému posuvu. Celkový rudý posuv je pak kombinací kosmologického a dopplerovského rudého posuvu.

Při přesných měřeních rozdílů mezi rudými posuvy (jako v případě reliktního záření) je třeba vzít pohyb Země v úvahu. Příslušný postup umožňuje definovat všude v prostoru pevné body. Jsou to polohy takových myšlených pozorovatelů, kteří vidí reliktní záření stejné ve všech směrech, viz [2]. Dopisní spony na gumové šňůrce takové body znázorňují.

Při studiu vzdálených galaxií a kvasarů s kosmologickým rudým posuvem blízkým jedné a větším je dodatečný příspěvek k rudému posuvu zanedbatelný. Jejich typická rychlost pohybu vůči okolnímu prostoru je jen asi 1000 km/s, což vede k dopplerovskému rudému posuvu jenom okolo  $\pm 0,003$ . Vzdálené galaxie lze tedy při astronomických měřeních ve velmi dobrém přiblížení považovat za prakticky nehybné vůči okolnímu prostoru. Proto je oprávněné znázornit vzdálené galaxie pevně přidělanými dopisními sponami.

Pomocí kosmologického rudého posuvu světla by se dalo v principu zjistit rozpínání prostoru i v místnosti, ve které čtenář tohoto článku právě sedí. Jeho předpokládané hodnoty jsou však na tak malé škále zcela neměřitelné. V našem okolí tedy nehraje rozpínání prostoru žádnou bezprostřední roli.

Připomínáme, že energie světla je nepřímě úměrná jeho vlnové délce. Proto světlo (každý foton) během svého letu v důsledku rozpínání prostoru a z něj plynoucího růstu vlnové délky ztrácí energii úměrně  $1/(1+z)$ . Teplota reliktního záření je úměrná jeho energii, to znamená, že jeho teplota v důsledku kosmologického rudého posuvu také klesá úměrně  $1/(1+z)$ .

4) V tom trochu pokulhává analogie s gumovou šňůrkou, která není striktně jednodimenzionální, a proto se ztenčuje.

5) Proto je často používané znázornění rozpínajícího se vesmíru pomocí sférického (tedy zakřiveného) povrchu nafukovacího balonku nevhodné.

6) Lemaítrova práce zůstala bohužel několik let nepovšimnuta.

7) Přesnější diskusi vztahu mezi rychlostí unášení galaxií a jejich vzdáleností najde čtenář v [1].

8) Zde se podstatně lišíme od názoru vysloveného v [2].



## Jak se popisuje rozpínání prostoru

Ještě jedno zamyšlení nad gumovou šňůrkou nám napoví, že průběh rozpínání prostoru s časem se dá popsat jedinou funkcí času  $a(t)$ . Ta vyjadřuje, jak se v kosmickém čase  $t$  vzdálenost  $D(t)$  mezi libovolným párem od sebe dost vzdálených galaxií liší od jejich vzdálenosti dnes. Jsou úměrné jejich dnešním vzdálenostem a  $a(t)$  je faktor této úměrnosti,

$$D(t) = a(t)D(t_0).$$

Dnes je  $a(t_0) = 1$ , v minulosti bylo  $a(t)$  menší než 1 a brzy po velkém třesku bylo  $a(t)$  téměř nula. V budoucnu asi  $a(t)$  dále poroste. Tato funkce v podstatě popisuje, jak rostou kosmologické škály při rozpínání prostoru. Funkce  $a(t)$  se proto nazývá *kosmický škálový faktor*. Závislost  $a(t)$  na kosmickém čase  $t$  je v podstatě historie rozpínání vesmíru.

Pro kosmický škálový faktor plyne z obecné teorie relativity rovnice, kterou sestavili a studovali Einstein, Friedmann, Lemaître a jiní znalci této teorie. Tato rovnice popisuje časový vývoj  $a(t)$  v závislosti na hustotě hmoty obsažené ve vesmíru a na hodnotě kosmologické konstanty. Tyto potřebné údaje jsou bohužel nejisté.

### Co vesmír obsahuje?

Tady narážíme na problémy, se kterými zápaší astronomové a kosmologové aspoň těch 80 let:

- Jaké druhy hmoty a v jakém množství vesmír vlastně obsahuje?
- Je kosmologická konstanta nenulová, a pokud ano, tak jak je velká?

Trochu se ví a hodně se spekuluje, což by však bylo téma pro jiný dlouhý článek. Zde shrneme jen ty poznatky, které jsou dnes poměrně spolehlivé.<sup>9</sup> Hmota ve vesmíru je (alespoň) dvou druhů:

- *Viditelná hmota* jsou hvězdy, mezihvězdný plyn a prach; počítají se sem také černé díry (protože vznikly kolapsem viditelných hvězd).

- *Temná hmota* je ta, která nevyzařuje ani neodráží světlo, je opticky neviditelná jako vzduch, a tedy vlastně vůbec není temná. Je ale nápadná svou gravitační přitažlivostí. Ve vesmíru je jí daleko více než hmoty viditelné. Obklopuje viditelné galaxie.

Kosmologická konstanta je přirozenou součástí Einsteinovy obecné teorie relativity (i když ji Einstein sám brzy z estetických důvodů neoprávněně zavrhl). Často se místo ní mluví o energii vakua nebo o hypotetickém poli (kvintessenci) s podobnými účinky [4]. Z nedostatku pochopení fyzikální podstaty těchto pojmů zavedli pro ně kosmologové souhrnné pojmenování: *temná energie*.<sup>10</sup> Ani ona není doslova temná, protože je také opticky neviditelná, ale přívlastek „temná“ si asi přesto zaslouží kvůli záhadnosti své fyzikální podstaty. Nyní stručně pár pozoruhodných údajů:

- Oba druhy hmoty zpomalují (brzdí) rozpínání prostoru, zatímco temná energie je urychluje.

- Hustota obou druhů hmoty klesá při rozpínání prostoru („oblak prachu“ se zřeďuje).
- Hustota temné energie se přitom nemění, a tak při rozpínání prostoru temné energie přibývá. Odehrává se s ní tedy něco zcela nezvyklého.
- Dnes je hustota temné energie ve vesmíru zhruba trojnásobkem hustoty energie obsažené v obou druzích hmoty vzatých dohromady.
- Součet hustoty energie obsažené v hmotě a hustoty temné energie má s velkou přesností právě takzvanou „kritickou“ hodnotu, která způsobuje, že prostor je euklidovský. Tento fakt byl platný po celou dobu dosavadního vývoje pozorovatelného vesmíru.

### Historie rozpínání prostoru

Vložíme-li právě uvedené údaje do zmíněné rovnice pro  $a(t)$ , vyjde nám, že se původně velmi rychle rozpínání prostoru prvních 7 Gyr po velkém třesku zpomalovalo, zatímco v následujících 7 Gyr se zase zrychluje. To odpovídá soudobým astronomickým pozorováním. Brzdění bylo způsobeno převládáním hustoty hmoty. Ta se ale zředila, a tak teď převládá konstantní nenulová hustota temné energie.

Kvantitativní popis historie rozpínání prostoru, založený na těchto poznatcích, nám poskytuje řadu dalších zajímavých údajů o vesmíru. Z nich vybíráme především, že všechny pozorované galaxie a kvasary s rudým posuvem  $z > 1,5$  jsou dnes od nás ve větší vzdálenosti, než je Hubblova vzdálenost  $D_H = 14$  Gly.<sup>11</sup> Jsou od nás tedy unášeny nadsvětelnou rychlostí. Pozorování takových objektů je ale dnes pro astronomy běžné, a často je hlášen nový rekord ve velikosti nalezené hodnoty  $z$ . V době psaní tohoto článku je nejvyšší známá hodnota u kvasarů okolo  $z = 6,4$ . Takový kvasar je od nás unášen rychlostí okolo  $2c$ .

### Obzvlášť zajímavá je historie zdroje reliktního záření

V době emise, to jest 0,0004 Gyr po velkém třesku, to bylo žhavé vodíkové a heliové plazma s teplotou asi 3000 K, jehož rychlost unášení od místa, kde jsme dnes my, byla něco přes  $50c$ . Dnes jsou z něj pravděpodobně obyčejné galaxie ve vzdálenosti okolo 46 Gly, unášené od nás „jenom“ rychlostí  $3c$ . Relikt ní záření samo mělo při svém vzniku stejnou teplotu jako plazma. Z poklesu jeho teploty na dnešní hodnotu 2,7 K plyne, že jeho kosmologický rudý posuv je dnes  $z \sim 1100$ . Za dobu letu reliktního záření k nám se tedy vesmír rozepnul zhruba faktorem 1100. Zdroj reliktního záření, dnes vzdálený oněch 46 Gly, byl tedy v době vzniku tohoto záření vzdálen od místa, kde dnes jsme, jenom asi  $46/1100 = \sim 0,04$  Gly, tedy pouhých 40 milionů světelných let (to je zdánlivě blízko, ale takové byly tehdy kosmologické škály). Zato se ale vzdaloval opravdu rychle.

Chceme-li pomocí rovnice pro  $a(t)$  pohlédnout do vzdálené budoucnosti, zjistíme, že hustota hmoty bude zanedbatelná a že na rozpínání prostoru bude mít dominantní vliv tem-

9) Jejich podrobnější popis lze najít v [3].

10) Někteří čeští astronomové používají místo názvu „temná hmota“ a „temná energie“ názvy „skrytá hmota“ a „skrytá energie“. Ta „skrytost“ se ale, podobně jako „temnost“, vztahuje jen na určité druhy pozorování. Domníváme se, že nemáme šanci najít pro oba jevy opravdu výstižné názvy, dokud nebude pochopena jejich fyzikální podstata.

11) Přibližná číselná shoda  $D_H \approx ct_0$  je náhodná (viz [1]) a neměla by svádět ke spekulacím.

ná energie. Takovou možností se zabýval již de Sitter. V jeho modelu lze snadno spočítat (viz [1]), že pak  $a(t)$  roste s časem *exponenciálně* rychle, a to tím rychleji, čím je hustota temné energie větší. Na ověření této předpovědi dnešní kosmologie si ale budeme muset počkat pár Gyr. Pokud je pravdivá, začnou v budoucnosti ještě daleko vzdálenější mizet vzdálené galaxie z dohledu. Budou velice zředěné a tak vzdálené a „zrudlé“, že je téměř nebude vidět. Také reliktní záření podstatně ochladne. Vesmír na velkých škálách bude nudný.

### Pohyb světla v rozpínajícím se prostoru

Jelikož speciální teorie relativity lokálně platí, pohybuje se světlo na každém místě ve vesmíru rychlostí  $c$  vůči okolnímu prostoru. Přitom je ovšem tímto prostorem také unášeno (viz obr. 4). Stejně jako plavec v řece může být unášen proudem ve směru toku, i když plave proti proudu, může být světlo letící směrem k nám unášeno rozpínáním prostoru od nás pryč. Snadno si to ověříme pomocí napínané gumové šňůrky, když necháme lézt broučka směrem k panu Hubblovi, a přesto jeho vzdálenost od pana Hubbla poroste.

Dnes je situace taková, že všechno světlo nacházející se od nás dál, než je Hubblova vzdálenost, je od nás unášeno pryč. Jak to, že tedy můžeme pozorovat objekty, které jsou dál než  $D_H$ ?

Odpověď je, že světlo z těchto objektů, které k nám dopadá dnes, vzniklo před dávnou dobou, což má dva důsledky. Zaprvé vzniklo o hodně blíž k nám, než je dnešní vzdálenost jeho zdroje. Zadruhé se rozpínání vesmíru během jeho pohybu dlouhou dobu zpomalovalo. I když bylo světlo na začátku unášeno od nás, zpomalení rozpínání způsobilo, že se po nějaké době začalo přece jen přibližovat k nám – jako se změnil směr pohybu plavce, když proud v řece dostatečně zeslábně. Souhra těchto dvou důsledků rozpínání prostoru a stáří světla nám umožňuje vidět i objekty unášené od nás nadsvětelnou rychlostí.

Ovšem jen tak, jak vypadaly v minulosti, v době kdy bylo světlo, které dnes vidíme, vyzářeno. Proto je reliktní záření obrazem plazmatu brzy po velkém třesku. Asi 4 Gyr bylo toto světlo unášeno od nás, pak se k nám ale zase začalo přibližovat.

Vztah mezi dobou pohybu světla k nám a vzdáleností jeho světelného zdroje je obecně v důsledku rozpínání prostoru trochu složitý. Zde můžeme jen upozornit, že odhad vzdáleností obdržený vynásobením rychlosti světla  $c$  dobou pohybu světla je při dobách větších než několik Gyr podstatně nesprávný. Skutečné vzdálenosti podceňuje, protože rozpínání prostoru zanedbává. To se projevuje například na dnešní vzdálenosti zdroje reliktního záření – a tedy na poloměru pro nás pozorovatelné části vesmíru. Je zhruba třikrát větší, než by vyšlo z takového nesprávného odhadu ( $c \times 14 \text{ Gyr} = 14 \text{ Gly}$ ).

### Energie se při rozpínání prostoru nezachovává

Při úvahách o rudém posuvu světla při jeho pouti rozpínajícím se prostorem vzniká nevy-

hnutelně otázka, kam se poděla ta část jeho energie, která mu ubyla v důsledku přírůstku jeho vlnové délky.

Podle soudobého chápání rozpínání prostoru se tato energie prostě ztrácí. Zákon zachování energie při rozpínání prostoru není použitelný. To je důsledek spolehnutí na obecnou teorii relativity, ve které zákon zachování energie platí jen za určitých dodatečných podmínek. Ty ale právě v rozpínajícím se prostoru splněny nejsou (i když jsou splněny při většině jiných aplikací této teorie). Proto se také může prostor rozpínat při konstantní hustotě temné energie. Celková energie v rozpínajícím se objemu přitom přece roste!

Nezávidíme čtenáři jeho pocity, když je poprvé konfrontován s touto představou. Většinou jsme vyrůstali v přesvědčení o neomezené platnosti zákona zachování energie. Pro jeho platnost mluví všechny dosavadní zkušenosti fyziků, chemiků, inženýrů a vynálezců. Proto zdůrazníme, že všechny tyto dosavadní zkušenosti byly nashromážděny za podmínek, kdy je rozpínání prostoru zcela zanedbatelné. Extrapolace na situaci, kdy tomu tak není, je neoprávněná a vede k omylu (iv).

### O teoretických spekulacích a jistotě

V tomto článku se pečlivě vyhýbáme nesčetným zajímavým spekulativním teoriím, kterými dnes kosmologie a jí blízké oblasti fyziky žijí. Týkají se především té nejranější doby vývoje vesmíru, příčiny a průběhu velkého třesku. Některé získaly i ve veřejnosti popularitu, která by mohla snadno zastřít skutečnost, že ještě vůbec nejsou ověřeny experimenty nebo pozorováními.

To, že se zde snažíme zůstat na pevné půdě, ale také není zárukou, že vylíčené soudobé teoretické chápání rozpínání prostoru je už konečné. Například bude v budoucnu zajímavé, zda přesnější měření potvrdí kosmologický princip. Je vesmír na kosmologických škálách skutečně tak jednoduchý? Jsou přírodní zákony všude ve vesmíru stejné? [4] A také představy o podstatě temné energie zjevně nesou rysy teoretické spekulace. Nejlepší bude, když si čtenář v budoucnu aspoň každých 10 let zjistí, co je v kosmologii nového a jak to s těmi teoretickými spekulacemi dopadlo.

Na závěr je třeba zdůraznit, že rozpínání prostoru je přírodní jev plynoucí z obecné teorie relativity a potvrzený mnoha pozorováními v astronomii. Není to žádná spekulace, nýbrž jistota. I když se možná nakonec ukáže být trochu složitější, než jsme ho zde popsali, jistě zůstane spolu s Galileovým „Eppure si muove“ [2] jedním ze základních objevů v kosmologii.

V našem denním životě nehraje sám fakt rozpínání prostoru prakticky žádnou roli, ovlivňuje nás ještě méně než skutečnost, že Země obíhá kolem Slunce. Podobně jako pohyb Země kolem Slunce se ale stává významnou složkou našeho chápání přírody.

*Poděkování:  
Koncept tohoto článku je založen na řadě populárněvědeckých publikací různých autorů, obzvlášť dobře napsán je článek Ch. Lineweavera a T. Davisové [5]. Děkuji prof. J. Hořejšímu za pozvání přednášet na toto téma na Matematicko-fyzikální fakultě Karlovy univerzity a za cenné připomínky, Ing. J. Smižanské a Dr. M. Jersákové za podněty k vylepšení textu.*

### K DALŠÍMU ČTENÍ

- [1] J. Jersák: článek zasláný do Čs. časopisu pro fyziku (předběžná verze tohoto článku se nachází na internetu pod adresou <http://tpe.physik.rwth-aachen.de/jersak/expansion.html>).
- [2] J. Langer, Pohled na okraj nedohledna, Vesmír 85, 658, 2006/11.
- [3] I. Melo: Tmavá energie, zrýchlení a plochost vesmíru, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie 46, 89–100, 2001/2.
- [4] J. Jersák: Mohou být základní fyzikální konstanty proměnlivé?, Vesmír 83, 13, 2004/1.
- [5] Ch. H. Lineweaver, T. M. Davis, Misconceptions about the Big Bang, Scientific American 292, March 2005, p. 24–33. Tento článek lze zdarma stáhnout internetem z adresy <http://www.mso.anu.edu.au/~charley/publications.html>.