

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Michal Křížek

Nobelova cena za fyziku v roce 2011 udělena za objev zrychlujícího se rozpínání vesmíru

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 57 (2012), No. 2, 89--101

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/142917>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2012

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Nobelova cena za fyziku v roce 2011 udělena za objev zrychlujícího se rozpínání vesmíru

Michal Krížek, Praha

1. Úvod

V roce 2011 byla udělena Nobelova cena za fyziku třem astronomům za objev zrychlujícího se rozpínání vesmíru. Svým významem je srovnatelná s nejhodnotnějšími Nobelovými cenami vůbec (jako např. za objev struktury DNA). Je to vlastně po 5 letech další Nobelova cena za kosmologii¹ (srov. [29]). Švédská královská akademie věd rozhodla rozdělit částku 10 milionů švédských korun mezi vedoucí osobnosti dvou soupeřících týmů zejména za práce [28], [30] a [27] z let 1997–1999, které vedly ke změření hodnot některých důležitých kosmologických parametrů našeho vesmíru k určení příslušných nejistot a k zjištění, že vesmír se rozpíná zrychleně v důsledku skryté (temné) energie.



Obr. 1. Saul Perlmutter, Adam Riess a Brian Schmidt

Prvním oceněným (podle abecedy) je Američan Saul Perlmutter (*1959), který získal polovinu Nobelovy ceny. Perlmutter vedl *Supernova Cosmology Project* na University of California v Berkeley. Vystudoval fyziku na Harvard University v roce 1981 a získal vědecký titul Ph.D. rovněž z fyziky na University of California v Berkeley v roce 1986.

¹Kosmologie je odvětví fyziky zabývající se největšími prostorovými i časovými vzdálenostmi a otázkami vzniku a vývoje vesmíru jako celku.

Druhým oceněným je Adam Guy Riess (*1969), který je profesorem astronomie na Johns Hopkins University a Space Telescope Science Institute v Baltimore ve státě Maryland. Tento známý americký kosmolog absolvoval The Massachusetts Institute of Technology v roce 1992 a titul Ph.D. obhájil na Harvard University v roce 1996.

Konečně třetím oceněným je americko-australský astronom Brian Schmidt (*1967), vedoucí týmu *High-z Supernova Search* na Australian National University ve Weston Creek. Schmidt vystudoval astronomii na University of Arizona v roce 1989 a Ph.D. dosáhl na Harvard University v roce 1993. Oba posledně jmenovaní laureáti získali druhou polovinu Nobelovy ceny.

Slavnostní nobelovské přednášky² všech tří laureátů proběhly 8. prosince 2011 v Aule Magna na univerzitě ve Stockholmu. Posluchači se dozvěděli, jaké bylo teoretické pozadí jejich výzkumu, jak byl zorganizován observační program, jaké kosmologické modely lze nyní apriori vyloučit apod. Nobelovy ceny za fyziku pak byly jako každoročně předány dne 10. prosince³ v den výročí smrti Alfreda Nobela (zemřel v roce 1896).

2. Rozpínající se vesmír a Hubbleova konstanta

Protože Nobelova cena byla udělena za kosmologii, připomeňme si nejprve některé důležité milníky ve vývoji této disciplíny. Koncem 16. století Giordano Bruno (1548–1600) v pojednání *De l'Infinito, Universo e Mondi* [2] vyslovil hypotézu, že vesmír je nekonečný a že každá hvězda vypadá jako naše Slunce, což se často považuje za počátek novodobé kosmologie [23]. Od té doby bylo učiněno mnoho významných objevů.

V roce 1900 německý fyzik Karl Schwarzschild (1873–1916) v práci [36] předložil domněnku, že vesmír má konečný objem a že lze jej popsat obrovskou trojrozměrnou hypersférou. Odvodil dokonce i dolní odhad jejího poloměru $r > 100\,000\,000$ AU a studoval její neeuclidovskou strukturu pomocí paralax nejbližších hvězd. O dva řády větší dolní odhad poloměru vesmíru stanovil v roce 1924 Arthur Eddington ze vzdálenosti některých kulových hvězdokup (viz [24], str. 76).

Pokud se od nás vzdaluje nějaký vesmírný objekt, jeho charakteristické spektrální čáry ve viditelném oboru vykazují v důsledku Dopplerova jevu rudý posuv. Jestliže se k nám objekt přibližuje, spektrální čáry světla se naopak posouvají k modré části spektra. Například naše „sousedka“, galaxie M31 v Andromedě, se projevuje modrým posuvem, protože radiální složka její rychlosti (tj. rychlosti směrem k pozemskému pozorovateli) činí cca 300 km/s (viz [38]). Veličina *rudý posuv* z je definována jednoduchým vztahem

$$z = \frac{\lambda}{\lambda_0} - 1,$$

kde λ_0 je vlnová délka určité spektrální čáry v klidu za normálních pozemských podmínek⁴ a λ je odpovídající měřená vlnová délka světla z pozorovaného nebeského objektu. Záporné z mají tedy objekty, které se k nám přibližují, a kladné z mají vzdalující se

²Přednášky jsou volně ke stažení na adrese www.nobelprize.org.

³Cena se uděluje již od roku 1901, kdy ji získal W. C. Röntgen.

⁴Například červená H_α čára odpovídá přeskoce elektronu ze třetí na druhou hladinu atomu vodíku, kdy vzniká foton o vlnové délce $\lambda_0 = 656.3$ nm.

objekty (míní se radiální složka rychlosti). Je-li např. $z = 1$, pak $\lambda = 2\lambda_0$. Tak velký rudý posuv mají galaxie, jež jsou od nás vzdáleny zhruba 7 miliard světelných let. Číslo $1 + z$ získané ze spektra nějaké hodně vzdálené galaxie nám tak vlastně udává, kolikrát se vesmír⁵ rozeplul, než její světlo doletělo k nám. Protože se fotony šíří ve vakuu stejnou rychlostí c pro všechny vlnové délky (tedy i energie), z nezávisí na volbě λ_0 . Z relativistického vztahu (viz [17], s. 348) $z = \sqrt{(c+v)/(c-v)} - 1$ pak dostaneme rychlost vzdalování sledovaných objektů

$$v = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} c.$$

Myšlenka, že by se vesmír mohl rozpínat, vznikla už v roce 1915. Tehdy americký astronom Vesto Mevlin Slipher (1875–1969) proměřoval spektra 15 dobře pozorovatelných spirálních mlhovin, viz [39]. Ke svému překvapení zjistil, že 11 z nich vykazuje rudý posuv spektrálních čar železa a vanadu, zatímco jen 3 modrý posuv a jeden objekt měl přibližně nulový posuv. Tři objekty (NGC 1068, 4565 a 4594) se od nás vzdalovaly dokonce rychlostí větší než 1000 km/s a průměrná radiální rychlost směrem od Země všech 15 spirálních mlhovin byla kolem 400 km/s. Vesmír v našem okolí se tudíž s vysokou pravděpodobností rozpínal.

Další významný objev učinil Edwin Powell Hubble (1889–1953) na observatoři Mount Wilson v Kalifornii, kde byl tehdy největší teleskop světa s průměrem zrcadla 2.5 m. Při pozorování mlhoviny M31 v Andromedě zjistil, že je složena z obrovského množství hvězd podobně jako naše Galaxie (Mléčná dráha). V letech 1922–1923 pomocí pulzujících proměnných hvězd – cefeid⁶ zjistil, že M31 a další mlhoviny nepatří do naší Galaxie, ale že jde o velice vzdálené hvězdné ostrovy.⁷ Objevil tak vlastně mnohé galaxie v okolí Mléčné dráhy. Mlhovina M31 je tedy samostatná galaxie, která je dokonce větší než ta naše. Podle současných měření je od nás vzdálena přes 2 miliony světelných let, zatímco průměr Galaxie je kolem 100 000 světelných let.

Roku 1925 Gustav Strömberg (1882–1962) publikoval článek [41], kde porovnával radiální rychlosti 43 galaxií, většinou spirálních (téměř všechny jejich radiální rychlosti však změřil V. Slipher). Pouze 5 z nich vykazovalo modrý posuv, zatímco 38 rudý posuv.⁸ To už byl statisticky velice významný fakt, který vyžadoval hlubší analýzu. Ze statistického hlediska je téměř vyloučeno, že by šlo o náhodu, kdyby byl vesmír v průměru stacionární. Kdyby totiž pravděpodobnosti výskytu galaxie s modrým a rudým posuvem byly rovny 0.5, pak pravděpodobnost, že z náhodně vybraných 43 galaxií bude mít nejvýše 5 modrý posuv, je jen

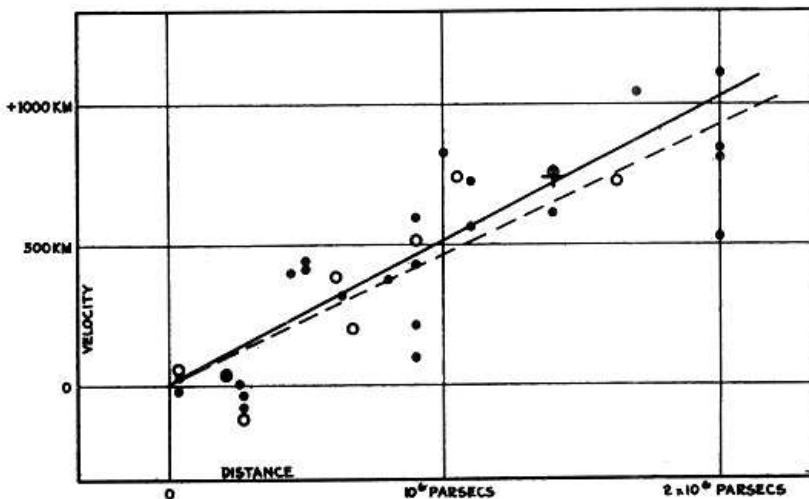
$$p = 2^{-43} \sum_{j=0}^5 \binom{43}{j} < 10^{-6}.$$

⁵ *Vesmír* budeme modelovat izochronou v prostoročasu, která odpovídá určitému časovému okamžiku po Velkém třesku. Jeho expanze se pak modeluje trojrozměrnou rozpínající se varietou ve čtyřrozměrném prostoročasu. Pozor: zcela jinou trojrozměrnou varietou v prostoročasu je tzv. *pozorovatelný vesmír*, který navíc vidíme jen v projekci na nebeskou sféru.

⁶ Cefeidy patří mezi tzv. *standardní svíčky*, což jsou jakékoliv třídy astronomických objektů se známou svítivostí.

⁷ K podobnému závěru došel i Herbert Curtis už v roce 1917, viz [4].

⁸ V roce 1929 Hubbleův spolupracovník Milton L. Humason (1891–1972) ze spektra eliptické galaxie NGC 7619 v souhvězdí Pegasa zjistil, že se od nás vzdaluje rychlostí 3800 km/s, což už je více než procento rychlosti světla!



Obr. 2. Původní obrázek charakterizující rozpínání vesmíru z Hubbleova článku [12]. Na vodorovné ose je vzdálenost příslušné galaxie od nás v parsecích a na svislé ose je radiální složka rychlosti galaxie (správně má být v jednotkách km/s), která je opravena o pohyb Slunce v naší Galaxii. Černými puntíky jsou znázorněny vyšetřované galaxie a plnou čarou vztah (1). Kroužky a přerušovaná čára odpovídají shlukům galaxií.

Tak se opět zjistilo, že se vesmír v našem okolí rozpíná s pravděpodobností takřka rovnou jedné.

V roce 1927 belgický kosmolog Georges E. Lemaître (1894–1966), inspirován Strömbergovým článkem [41], přišel s myšlenkou Velkého třesku⁹ v práci [20]: *Homogenní vesmír s konstantní hmotností a vzrůstajícím poloměrem vysvětluje radiální rychlost extragalaktických mlhovin*. O dva roky později pak rozpínání vesmíru nezávisle potvrdil E. Hubble. Ve svém článku [12] publikoval graf (viz obr. 2), který udává, že radiální složka v rychlosti uvažované galaxie závisí přibližně lineárně na její vzdálenosti D od nás, tj.

$$v = H_0 D. \quad (1)$$

S využitím stejnoměrného horního odhadu absolutní svítivosti hvězd a pomocí cefeid z 22 galaxií odvodil¹⁰ hodnotu konstanty úměrnosti z (1)

$$H_0 \approx 500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \doteq 1.62 \cdot 10^{-17} \text{ s}^{-1},$$

která se po něm nazývá *Hubbleova konstanta*. Tak velká hodnota ale odporovala některým skutečnostem. Např. pro určení *Hubbleova stáří vesmíru* $T_0 = 1/H_0$ vycházelo

⁹Anglický termín *Big Bang* poprvé vyslovil Fred Hoyle až v roce 1949, autorem českého termínu *Velký třesk* je Jiří Grygar. S myšlenkou, že vesmír mohl mít v hodně dávne minulosti „nulový poloměr“, přišel ale už v roce 1922 A. Friedmann. V anglickém překladu článku [8], footnote 11, se doslova píše: „The time since the creation of the world is the time that has flowed from that instant when the space was one point ($R = 0$) until the present state ($R = R_0$); this time may also be infinite.“

¹⁰Je pozoruhodné, že Hubble necituje Slipherovy články [38] a [39], ani Lemaîtreův článek [20], ani Strömbergův článek [41], který vyšel v renomovaném časopise *Astrophysical Journal*.

méně než 2 miliardy let, což je ve zjevném rozporu se stářím Sluneční soustavy 4.6 miliardy let. Hubble totiž mnohonásobně podcenil vzdálenosti pozorovaných galaxií. Později se hodnota Hubbleovy konstanty zpřesňovala. Soudobá měřicí technika umožnila stanovit mnohem menší hodnotu (viz např. Riess a kol. [33])

$$H_0 \approx 72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \doteq 2.33 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

v okolí naší Galaxie a věříme, že i jinde ve vesmíru je nyní přibližně stejná.

V roce 1933 Fritz Zwicky (1898–1974) při pozorování obří kupy galaxií A1656 ve Vlasech Bereniky zjistil, že jednotlivé galaxie obíhají kolem středu kupy mnohem rychleji, než odpovídá newtonovské mechanice (virialové větě). Aby se tento paradox vysvětlil, předpokládá se, že existuje tzv. *temná hmota (skrytá nezářivá látka)*, jež zatím nebyla přímo detekována a jež rozpínání vesmíru brzdí.

3. Supernovy typu Ia – standardní svíčky

Pro kosmologii je podstatná pouze gravitační interakce (vliv dalších tří fyzikálních interakcí se v případě velkých prostorových vzdáleností zanedbává). Základní kosmologické principy popsané jazykem matematiky jsou uvedeny např. v [43], [23] či [25]. Pro populárnější výklad odkazujeme na známou Weinbergovu publikaci [44].

Podle Einsteinova kosmologického principu¹¹ je vesmír ve všech bodech homogenní a izotropní. Věříme totiž, že jako pozorovatelé nejsme na žádném výjimečném (privilegovaném) místě ve vesmíru. *Homogenita* je předpokládaná vlastnost vesmíru, kdy pro daný pevný okamžik se vesmír na velkých prostorových škálách (většinou se uvádí miliarda světelných let)¹² jeví stejný všem pozorovatelům, ať jsou kdekoliv. Jinými slovy, pro každý pevný čas požadujeme translační symetrii vesmíru.

Podobně *izotropie* je předpokládaná vlastnost vesmíru, kdy se vesmír na velkých prostorových škálách jeví pozorovateli v každém bodě¹³ stejný ve všech směrech (tj. požadujeme rotační symetrii vesmíru). Teoreticky lze odvodit (viz např. [23], [44]), že izotropie v každém bodě implikuje homogenitu.¹⁴ Předpokládáme-li tedy izotropii vesmíru, můžeme se zabývat stanovením rychlosti jeho rozpínání.

K tomuto účelu si zavedeme další pojmy. *Supernovou* se rozumí hvězda, která vybuchla a její jasnost se mnohamiliardkrát zvýší v důsledku gravitačního kolapsu a následně explozivní nukleosyntézy. Už v roce 1938 Walter Baade (1893–1960), který spolupracoval s Fritzem Zwickym, konstatoval, že supernovy by mohly být slibnými kandidáty pro měření vesmírné expanze. Supernova totiž může vydávat po několik týdnů tolik světla jako menší galaxie. Světlo z takových objektů k nám letí skrze expandující vesmír, a tak se postupně prodlužuje vlnová délka jednotlivých fotonů

¹¹Termín *Einsteinův kosmologický princip* zavedl v roce 1935 E. A. Milne [22]. Už v roce 1922 ale C. Charlier v [13] píše, že kosmologický princip zavedl Einstein, i když jej tak nepojmenoval.

¹²Ve vesmíru však existují i větší struktury, např. *Sloan Great Wall* je „šňůra“ galaxií dlouhá 1.37 miliard světelných let.

¹³Kdyby měl vesmír tvar povrchu vejce a pozorovatel by se nacházel na jeho špičce, jevil by se mu vesmír izotropní, ale nebyl by izotropní ve všech bodech.

¹⁴O možnosti jakéhosi rotujícího vesmíru, který by byl homogenní a neizotropní, uvažoval Kurt Gödel [10] – např. pokud bychom viděli polovinu oblohy s modrým posuvem a druhou polovinu s rudým posuvem. Toho lze dosáhnout pro libovolnou lichou dimenzi d na sféře \mathbb{S}^d (protože ji lze „učesat“).

(jde o tzv. kosmologický Dopplerův jev). Změřené vlnové délky a svítivost supernov nás tak dobře informují o historii rozpínání vesmíru, čehož podstatně využili i laureáti Nobelovy ceny.

Supernovy se dělí na několik typů. Pokud nemají ve svém spektru čáry vodíku, nazývají se třídy I a dělí se dále na dva typy Ia a Ib podle toho, zda mají či nemají ve svém spektru charakteristické absorpční čáry křemíku o vlnové délce 615 nm. Značná podobnost při porovnávání jednotlivých výbuchů supernov typu Ia ukazuje, že patrně mají stejný spouštěcí mechanismus. Supernovy typu Ia dosahují maxima svítivosti zhruba po 20 dnech. Po mnoho týdnů pak mají v podstatě stejný, pozvolna klesající průběh jasnosti po hlavním maximu světelné křivky. Zejména rychlost poklesu jasnosti se ukázala být rozhodující pro kalibraci a určování vzdáleností, protože maximum jejich absolutního zářivého výkonu kolísá.

Všeobecně přijímaný model předpokládá, že mechanismus supernov typu Ia je tento. Jedná se o těsnou dvojhvězdu, jejíž jedna složka je bílý trpaslík (o vysoké hustotě až 10^5 kg/cm^3) a druhá složka červený obr, který postupně zvětšuje svoji velikost. Jakmile se naplní Rocheův lalok, který je definován ekvipotenciálními plochami procházejícími Lagrangeovým bodem L_1 , dochází k přetékání hmoty z červeného obra přes bod L_1 na bílého trpaslíka (podrobnosti viz [15]). Hmoty přetéká tak dlouho, až hmotnost bílého trpaslíka dosáhne tzv. Chandrasekharovu mez nestability $1.4 M_{\odot}$, kde $M_{\odot} = 1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ je hmotnost Slunce. Po překročení této meze dojde ke gravitačnímu kolapsu trpaslíka. Nejprve se jeho vnitřní části zhroutí do neutronové hvězdy (o nepředstavitelně vysoké hustotě větší než 10^{11} kg/cm^3), na níž pak začnou padat vnější části trpaslíka. Uvolněná energie způsobí obrovskou explozi a sekundární složka dvojhvězdy přitom podstatně změní svou trajektorii. Za tento scénář a další objevy získal indický astrofyzik Subrahmanyan Chandrasekhar (1910–1995) Nobelovu cenu za fyziku v roce 1983. Chandrasekharova mez nám tak vlastně ve vesmíru určuje standardní svíčky, u nichž můžeme odhadnout vzdálenost pomocí svítivosti a Pogsonovy rovnice.¹⁵

V typické galaxii se zcela náhodně objeví jen několik supernov za tisíciletí. Proto oba oceněné týmy srovnávaly snímky určité části oblohy s mnoha tisíci galaxiemi vždy po několika týdnech. Po odečtení obou snímků občas našly nepatrné světlé body – kandidáty na supernovy typu Ia, u nichž bylo nutno analyzovat následné světelné křivky [26].

4. Měření kosmologických parametrů

Rychlost rozpínání vesmíru není konstantní v čase, neboť ji mimo jiné ovlivňuje gravitační působení hmoty, jejíž střední hustota klesá. Proto místo konstanty H_0 ze vztahu (2) budeme uvažovat funkci $H = H(t)$, pro niž $H(t_0) = H_0$, kde $t_0 = 13.8$ miliard let je odhad stáří vesmíru podle současných kosmologických modelů. Pro pevný čas t její hodnota nezávisí na prostorových proměnných v důsledku předpokládané

¹⁵Pogsonova rovnice $m_1 - m_2 = 2.5 \log_{10}(I_2/I_1)$ udává vztah mezi rozdílem pozorovaných magnitud $m_1 - m_2$ dvou světelných zdrojů a poměrem hustot I_2/I_1 jejich světelných toků. Je-li poměr $I_2/I_1 = 100$, vidíme, že mezi zdroji je rozdíl 5 magnitud. Pro představu o absolutní velikosti m dojdeme, že např. pro Polárku je $m = 2.2$.

izotropie vesmíru. Funkce $H = H(t)$ nazývaná *Hubbleův parametr* se definuje jako poměr

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}, \quad (3)$$

kde tečka označuje časovou derivaci a $a = a(t)$ je nezáporný rostoucí a spojitě diferencovatelný *škálovací parametr*.¹⁶ Např. pro $a(t) = Ct^{2/3}$ s konstantou $C > 0$ v jednoduchých klasických kosmologických modelech bez skryté energie (viz např. [23] a [44]) dostáváme klesající funkci

$$H(t) = \frac{2}{3t} \quad (4)$$

během posledních $t_0 - 380\,000$ let, kdy dominuje látka nad zářením. Pro funkci (4) tak dostáváme

$$H(t_0) = 1.53 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}.$$

Všimněme si ale, že změřená hodnota v (2) je o 52% větší. Hlavním důvodem je skutečnost, že ve vztahu (4) se neuvažuje vliv skryté energie. Kdybychom znali časový průběh Hubbleova parametru, pak integrací (3) dostaneme vztah $a(t) = a(t') \exp \int_{t'}^t H(\tau) d\tau$ pro $0 < t' \leq t$, přičemž $a(0) = 0$.

Koncem 20. století se kosmologové¹⁷ domnívali, že škálovací parametr je vždy konkávní funkce, tj. \dot{a} je klesající funkce času, protože rozpínání vesmíru brzdí přitažlivá gravitační síla. Pak ale přišlo velké překvapení. Oba oceněné týmy (Supernova Cosmology Project a High- z Supernova Search) se koncem devadesátých let zaměřily na supernovy ve velkých vzdálenostech odpovídacích rudému posuvu 0.2 až 1. Nezávisle zjistily, že supernovy typu Ia mají až o 15% menší svítivost (viz [9], [27], [30]), než by měly mít, kdyby se vesmír rozpínal zpomaleně. Pomocí různě obarvených filtrů oba týmy navíc zjistily, že zeslabení svítivosti prakticky není způsobeno extinkcí.¹⁸ To ale znamená, že se světlo supernov šíří do většího objemu, než kdyby rozpínání vesmíru zpomalovala pouhá gravitace. Aby se vysvětlil tento paradox, bylo nutno kromě temné hmoty zavést ještě *skrytou (temnou) energii*, která rozpínání vesmíru naopak urychluje. Tak bylo zjištěno, že derivace $\dot{a} = \dot{a}(t)$ je rostoucí (tj. a je ryze konvexní) v časovém intervalu posledních cca 5 miliard let, což odpovídá rudému posuvu přibližně $0 \leq z \leq 0.7$.

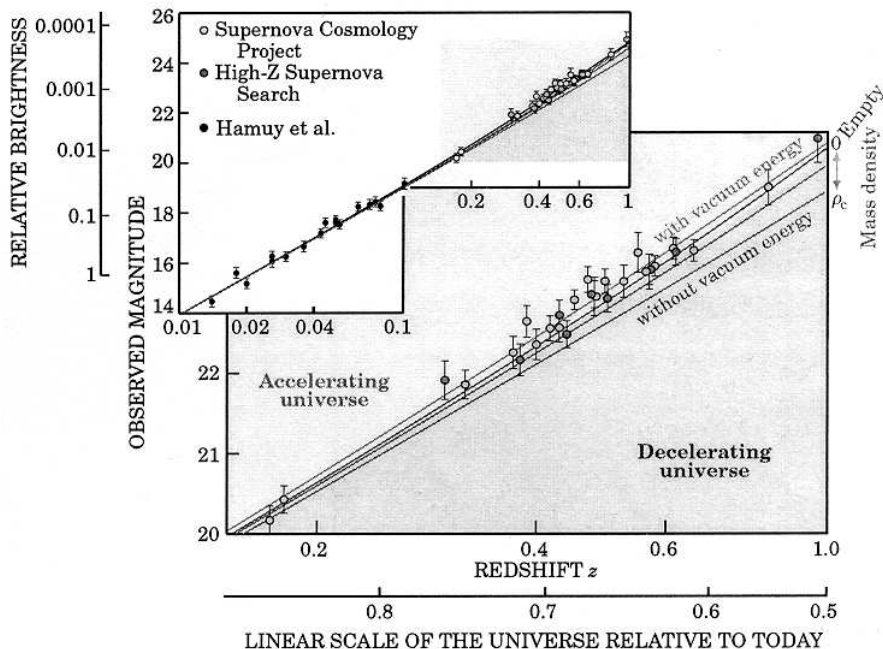
Na obrázku 3 vidíme přehled výsledků obou soupeřících týmů vedených Saulem Perlmutterem a Brianem Schmidtem. Na vodorovné ose je rudý posuv a na svislé ose je příslušná velikost v magnitudách supernovy, což je jednotka pro měření hvězdné velikosti (jasnosti) nebeských objektů.¹⁹

¹⁶Pro nenulovou normalizovanou křivost $k = \pm 1$ se vesmír obvykle modeluje trojrozměrnou varietou $x^2 + y^2 + z^2 + kw^2 = ka^2(t)$ v \mathbb{R}^4 . V obou případech je součet úhlů v „trojúhelníku“, jehož strany jsou geodetiky, větší než 180° , neboť se jedná o nadsféru a hyperboloid dvojdílný (nikoli jednodílný)! Pro $k = 1$ a pevný časový okamžik t označuje hodnota $a(t)$ poloměr vesmíru, viz [20]. Pro nulovou křivost $k = 0$ udává vzdálenost dvou „typických“ galaxií. Parametr $a = a(t)$ vystupuje ve Friedmannově-Lemaîtreově-Robertsonově-Walkerově metrice (viz [3], [25]).

¹⁷Výjimkou byla Novozélandka Beatrice Tinsley (1941–1981), která již v 70. letech minulého století uvažovala o zrychlujícím se rozpínání vesmíru o konečném poloměru [11] a [42]. K této vlastnosti ji přivedlo mj. zjištění, že nejvíce kvasarů je v oblasti $z \approx 2$.

¹⁸Extinkce je zeslabením intenzity záření v důsledku průchodu nějakým prostředím.

¹⁹Poznamenejme, že magnituda je tím větší číslo, čím objekt svítí slaběji.



Obr. 3. Supernovy typu Ia charakterizující zrychlené rozpínání vesmíru podle Perlmutterova článku [26]. Na vodorovné ose je rudý posuv jednotlivých supernov a na svislé odpovídající pozorovaná magnituda. Pro $z < 0.1$ jsou pro porovnání znázorněny též výsledky Hamuyova týmu naměřené před rokem 1996.

Pro hodně vzdálené objekty ($z > 1$) naměřená data naznačují, že existovalo období zpomalování kosmické expanze, tj. kdy derivace škálovacího parametru \dot{a} je klesající funkce času, viz [31], [32] a [33]. Některé studované supernovy byly vzdáleny dokonce více než 10 miliard světelných let. Tak se zjistilo, že zpomalující se rozpínání vesmíru se změnilo ve zrychlené asi po 8 až 9 miliardách let od Velkého třesku.

Oba týmy se zaměřily na stanovení hodnot několika dalších důležitých kosmologických parametrů. Prvním z nich byla současná hodnota Hubbleova parametru. Podle obou týmů je její hodnota blízká (2). Odtud vychází Hubbleovo stáří vesmíru $T_0 = 1/H_0 \approx 13.6$ miliard let, což je jen hrubý odhad jeho skutečného stáří t_0 .

V roce 1922 Alexander A. Friedmann (1888–1925) odvodil ze soustavy deseti Einsteinových rovnic²⁰ pro dokonale symetrický vesmír, který je pro každý pevný časový okamžik homogenní a izotropní, nelineární diferenciální rovnici (viz [8]) pro rychlost rozpínání vesmíru (angl. expansion rate)

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{kc^2}{a^2}, \quad (5)$$

kde G označuje gravitační konstantu, $\rho = \rho(t)$ střední hustotu látky ve vesmíru,

²⁰Einsteinovy rovnice obecné relativity se opírají o tenzorový počet, který si v Praze Einstein osvojil během diskuzí s Georgem Pickem v letech 1911–1912.

k/a^2 prostorovou křivost, $k \in \{-1, 0, 1\}$ a Λ je kosmologická konstanta,²¹ která vystupuje v Einsteinových rovnicích obecné teorie relativity u absolutního členu (viz např. [3], [23], [25]). Předposlední člen v rovnici (5) obsahující Λ hraje pro $t \rightarrow \infty$ dominantní roli, protože hustota $\rho(t)$ je úměrná $a^{-3}(t)$. Vydělíme-li rovnici (5) čtvercem H^2 , pak pomocí (3) dostaneme pro všechna t rovnici pro tři bezrozměrné parametry

$$1 = \Omega_M(t) + \Omega_\Lambda(t) + \Omega_k(t), \quad (6)$$

kde Ω_M je hustota temné a baryonové hmoty²² a dalších hmotných částic, Ω_Λ je hustota skryté energie, Ω_k je parametr hustoty prostorové křivosti a

$$\Omega_M(t) = \frac{8\pi G\rho(t)}{3H^2(t)}, \quad \Omega_\Lambda(t) = \frac{\Lambda c^2}{3H^2(t)}, \quad \Omega_k(t) = -\frac{kc^2}{H^2(t)a^2(t)}. \quad (7)$$

Rovnice (6) tak udává vztah mezi hustotou hmoty, hustotou energie a hustotou křivosti vesmíru. Pro plochý vesmír s $k = 0$ tedy platí $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$. Tuto rovnost však nelze dokázat pomocí měření, která vždy vykazují nějakou chybu.

Důležitým krokem bylo tedy určit současné hodnoty parametrů Ω_M a Ω_Λ (Ω_k se pak dopočte z (6)). V článcích [28], [30] a [27] z let 1997–1999 se uvádí, že hustota skryté energie $\Omega_\Lambda > 0$ s pravděpodobností vyšší než 99 % a hustota temné hmoty $\Omega_M \approx 0.2$. V dnešní době je už známo kolem tisíce supernov typu Ia s rudým posuvem $z > 0.1$. A tak se hodnoty parametrů Ω_M a Ω_Λ neustále zpřesňují. Příslušný $\Omega_M - \Omega_\Lambda$ diagram byl nedávno uveřejněn v [35], str. 16. Např. podle článku Riese a jeho spolupracovníků [33] jsou současné hodnoty přibližně $\Omega_M = 0.3$ a $\Omega_\Lambda = 0.71$. Podle (6) a (7) by tedy platilo²³

$$\Omega_k(t_0) = -0.01 = -\frac{kc^2}{H^2(t_0)a^2(t_0)}, \quad (8)$$

což odpovídá kladné křivosti $k = 1$, tj. trojrozměrné hypersféře vložené do čtyřrozměrného prostoru. Odtud a podle (2) vychází nepředstavitelně velký poloměr současného vesmíru²⁴

$$a(t_0) = \frac{10c}{H_0} \approx 1.3 \cdot 10^{27} \text{ m} \approx 140 \text{ Gly},$$

a proto se nám jeví vesmír skoro plochý.

²¹A. Einstein předpokládal, že vesmír je stacionární a zpočátku nevěřil na jeho rozpínání. Aby zabránil gravitačnímu kolapsu vesmíru, zavedl roku 1917 do svých rovnic obecné teorie relativity kosmologickou konstantu [6]. Její repulzivní charakter mu umožňoval i nadále uvažovat neexpandující stacionární vesmír. V r. 1917 Willem de Sitter (1872–1934) však našel velice speciální řešení Einsteinových rovnic [5], které popisuje rozpínání izotropního vesmíru s nulovou hustotou a $\Lambda > 0$. Když pak v r. 1929 Hubble publikoval článek [12] o rozpínání vesmíru, Einstein se kosmologické konstanty zřekl a prohlásil, že to byl největší omyl v jeho vědecké kariéře [7].

²²Baryonová hmota je tvořena převážně protony a neutrony.

²³V článku [40] byly pomocí fluktuací reliktního záření získány hodnoty parametrů $\Omega_k = -0.014$ a $\Omega_\Lambda = 0.716$ (metoda je popsána v [21], str. 96). Také standardní Λ -CDM model (angl. Lambda-Cold Dark Matter) uvažuje podobné hodnoty.

²⁴Všechny zde uváděné hodnoty je třeba brát „se značnou rezervou“, protože se jedná jen o přibližné modely zatížené celou řadou nejrůznějších chyb.

Z rovnice (5) pro Einsteinův stacionární vesmír²⁵ s $\dot{a} = 0$ dostáváme odhad $\Lambda \leq 3k/a^2$. Dalším cílem týmů vedených Perlmutterem a Schmidtem bylo tedy stanovit skutečnou hodnotu kosmologické konstanty Λ . Nebylo totiž známo, zda je její hodnota kladná, nulová či záporná. Perlmutter se svým kolektivem odvodil z prvních 42 pozorovaných supernov její kladnou hodnotu s pravděpodobností 99.8 % (viz [28], str. 580). V současnosti se v literatuře uvádí celá řada horních i dolních odhadů, které se většinou pohybují kolem hodnoty 10^{-52} m^{-2} (viz např. [14], [16], [18]). Podle (7), (2) a naměřených hodnot vskutku máme $\Lambda \approx 0.71 \cdot 3H_0^2/c^2 = 1.22 \cdot 10^{-52} \text{ m}^{-2}$.

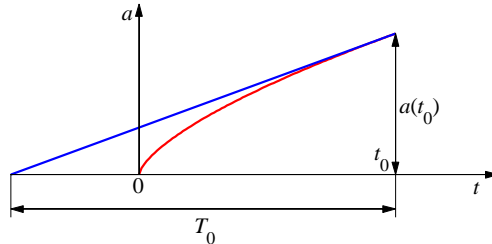
Významným úkolem bylo také stanovit hodnotu bezrozměrného zpomalovacího (deceleračního) parametru

$$q := -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2} = -\frac{\ddot{a}}{a}H^{-2} = -\dot{H}H^{-2} - 1, \quad (9)$$

kde druhá rovnost plyne z (3). Odtud vidíme, že současná hodnota zpomalovacího parametru $q_0 = q(t_0)$ je vlastně jen další koeficient v Taylorově rozvoji

$$a(t) = a(t_0)\left(1 + H_0(t - t_0) - \frac{1}{2}q_0H_0^2(t - t_0)^2 + \dots\right).$$

Proto bylo nutno získat spektra supernov typu Ia, které jsou velice vzdáleny ($z \approx 1.7$), viz [7]. V práci [33], str. 110, byla nalezena záporná hodnota parametru $q_0 = -0.6$, tj. a je ryze konvexní v okolí t_0 .



Obr. 4. Kdyby byl škálovací parametr konkávní funkce, pak by její graf ležel pod tečnou procházející bodem $(t_0, a(t_0))$. Pro $\dot{a}(t_0) > 0$ by tedy věk vesmíru t_0 nepřevyšoval Hubbleovo stáří vesmíru $T_0 = 1/H_0 = 13.6$ miliard let, což ale není v souladu s naměřenými daty.

Zápornou hodnotu $q_0 < -1$ (z níž podle (9) plyne, že $\dot{H}(t_0) > 0$) ovšem předpovídala již koncem sedmdesátých let minulého století Beatrice Tinsleyová. Pokud by totiž byl škálovací parametr $a = a(t)$ na svém definičním oboru všude konkávní funkce (viz obr. 4) a $\dot{a}(t_0) > 0$, pak podle (3) a (2) pro věk vesmíru t_0 platí

$$t_0 \leq T_0 = \frac{a(t_0)}{\dot{a}(t_0)} = H_0^{-1} \doteq 4.29 \cdot 10^{17} \text{ s} \doteq 13.6 \text{ miliard let}.$$

²⁵V tomto případě z (3) a (7) plyne, že $\Omega_M(t) = \Omega_\Lambda(t) = -\Omega_k(t) = \infty$ pro všechna t . Pro „pulzující“ cyklický vesmír, který končí „Velkým křachem“, platí podobné vztahy pro jistý okamžik t_1 , kdy $\dot{a}(t_1) = 0$. Od času t_1 se tedy vesmír začíná smršťovat, přestože hustota skryté energie je $\Omega_\Lambda(t_1) = \infty$. Je také pozoruhodné, že hodnota parametru hustoty křivosti Ω_k těsně po Velkém třesku byla nepatrná, neboť $\dot{a}(0) \approx \infty$. Nyní je totiž také téměř nulová (viz (8)) a parametr Ω_k není monotónní funkce, je-li a v okolí t_0 konvexní.

To ale odporovalo pozorováním, protože některé hvězdy se považovaly za starší. Tak Tinsleyová zjistila, že škálovací parametr musí být na nějakém intervalu ryze konvexní funkce, což odpovídá zrychlujícímu se rozpínání vesmíru, viz její článek z roku 1978: *Accelerating Universe revisited*, [42].

5. Závěr

Velké objevy obvykle nevznikají bez pomoci dalších badatelů. Velkou zásluhu v použití výsledků neeukleidovské geometrie na náš vesmír má nesporně K. Schwarzschild. Již v r. 1900 si uvědomil, že vesmír by mohl mít konečný objem [36]. Rozpínání vesmíru prokázal V. Slipher (viz [39], [41]) mnohem dříve než E. Hubble. Friedmann našel model rozpínajícího se vesmíru, nikoliv rozpínání skutečného vesmíru. To, že vesmír mohl mít kdysi „nulový poloměr“ předpokládal A. Friedmann [8] již v r. 1922, tj. o pět let dříve než k podobnému závěru došel G. Lemaître na základě astronomických pozorování. Lemaître však odvodil Hubbelův lineární vztah (1) mezi rychlostí galaxie a její vzdáleností od nás o 2 roky dříve než Hubble (viz [20], str. 55–56). Jasně argumenty pro zrychlující se rozpínání vesmíru poprvé předložila B. Tinsleyová koncem sedmdesátých let minulého století. I když její článek [42] vyšel v *Nature*, v pracích laureátů NC [26]–[28], [30]–[33] není citována.

V současnosti probíhá velká diskuse o tom, co je záhadným zdrojem skryté energie, která svými antigravitačními účinky způsobuje zrychlující se rozpínání vesmíru, viz [1], [9]. Uvažuje se, že by základní fyzikální konstanty mohly záviset na čase. Kdyby např. hodnota gravitační konstanty vhodně klesala, dostali bychom pozorované zrychlené rozpínání vesmíru [37], jež se také občas vysvětluje energií vakua. Hustota této energie by podle kosmologických modelů však měla být $2 \cdot 10^{110}$ erg/cm³, zatímco měření dávají o 120 řádů nižší hodnotu $2 \cdot 10^{-10}$ erg/cm³ (viz [3]), kde 1 erg = 10^{-7} J. Uvažuje se i o existenci dynamického skalárního pole (kvintesence), které způsobuje zrychlenou expanzi vesmíru, viz [21], str. 99. Pomocí kladné gravitační aberace lze vysvětlit, odkud pochází skrytá energie na zrychlené rozpínání vesmíru [19]. Nekládná aberace totiž odporuje principu kauzality, viz PMFA 53 (2008), 295.

Poděkování. Autor děkuje RNDr. Miroslavu Brožovi, Ph.D., RNDr. Jiřímu Grygarovi, CSc., Ing. Vladimíru Novotnému, doc. RNDr. Attilovi Mészárosovi, DrSc., a RNDr. Vojtechu Rušinovi, DrSc., za inspirující diskuse. Článek byl podpořen grantem IAA 100190803 GA AV ČR a RVO 67985840.

L i t e r a t u r a

- [1] AMENDOLA, L., TSUJIKAWA, S.: *Dark energy – Theory and observations*. Cambridge Univ. Press, Cambridge 2010.
- [2] BRUNO, G.: *De l'Infinito, Universo e Mondi*, Venezia 1584, (český překlad je obsažen v Bruno, G.: *Dialogy*. Academia, Praha 2008).
- [3] CARROLL, B. W., OSTLIE, D. A.: *Introduction to modern astrophysics*. Pearson Addison-Wesley 2007.
- [4] CURTIS, H. D.: *Novae in spiral nebulae and the island universe theory*. Publ. Astronom. Soc. Pacific 29 (1917), 206–207.

- [5] DE SITTER, W.: *On the relativity of inertia. Remarks concerning Einstein latest hypothesis.* Proc. Kon. Ned. Acad. Wet. 19 (1917), 1217–1225.
- [6] EINSTEIN, A.: *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie.* Koniglich Preuss. Akad. Wiss., Berlin (1917), 142–152.
- [7] FILIPPENKO, A. V.: *Einstein's biggest blunder? High-redshift supernovae and the accelerating universe.* arXiv: astro-ph/0109399v2, Nov. 2001.
- [8] FRIEDMANN, A.: *Über die Krümmung des Raumes.* Z. Phys. 10 (1922), 377–386.
- [9] GLANZ, J.: *Astronomers see a cosmic antigravity force at work.* Science 279 (5355) (1998), 1298–1299.
- [10] GÖDEL, K.: *An example of a new type of cosmological solutions of Einstein's field equations of gravitation.* Rev. Mod. Phys. 21 (1949), 447–450.
- [11] GUNN, J. E., TINSLEY, B.: *An accelerating Universe?* Nature 257 (1975), 454–457.
- [12] HUBBLE, E.: *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae.* Proc. Nat. Acad. Sci. USA 15 (1929), 168–173.
- [13] CHARLIER, C. V. L.: *How an infinite world may be built up?* Arkiv för Mat. Astronom. Fys. 16 (1922), 1–34.
- [14] IORIO, L.: *Can Solar system observations tell us something about the cosmological constant?* Int. J. Mod. Phys. D15 (2006), 473–476.
- [15] JORDAN IV, G. C. et al.: *Three-dimensional simulations of the deflagration phase of the gravitationally confined detonation model of type Ia supernovae.* Astrophys. J. 681 (2008), 1448–1457.
- [16] KERR, A. W., HAUCK, J. C., MASHHOON, B.: *Standard clocks, orbital precession and the cosmological constant.* Classical Quant. Grav. 20 (2003), 2727–2736.
- [17] KLECZEK, J.: *Velká encyklopedie vesmíru.* Academia, Praha 2002.
- [18] KRANIOTIS, G. V., WHITEHOUSE, S. B.: *Compact calculation of the perihelion precession of Mercury in general relativity, the cosmological constant and Jacobi's inversion problem.* Classical Quant. Grav. 20 (2003), 4817–4835.
- [19] KRÍŽEK, M.: *Does a gravitational aberration contribute to the accelerated expansion of the Universe?* Comm. Comput. Phys. 5 (2009), 1030–1044.
- [20] LEMAÎTRE, G. E.: *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques.* Ann. Soc. Sci. de Bruxelles, April (1927), 49–59.
- [21] MELO, I.: *Tmavá energia, zrýchlenie a plochosť vesmíru.* PMFA 46 (2001), 89–100.
- [22] MILNE, E. A.: *Relativity, gravitation and world structure.* Clarendon Press, Oxford 1935.
- [23] MISNER, CH. W., THORNE, K. S., WHEELER, J. A.: *Gravitation* (20th edition). W. H. Freeman and Company, New York 1997.
- [24] NUSSBAUMER, H., BIERI, L.: *Discovering the expanding Universe.* Cambridge Univ. Press 2009.
- [25] PEEBLES, P. J. E.: *Principles of physical cosmology.* Princeton Univ. Press, New Jersey 1993.
- [26] PERLMUTTER, S.: *Supernovae, dark energy, and the accelerating universe.* Physics Today 56 (2003), April, 53–60.
- [27] PERLMUTTER, S., ALDERING, G. et al.: *Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae.* Astrophys. J. 517 (1999), 565–586.

- [28] PERLMUTTER, S., GABI, S. et al.: *Measurements of the cosmological parameters Ω and Λ from the first seven supernovae at $z \geq 0.35$* . *Astrophys. J.* 483 (1997), 565–581.
- [29] PITŇA, A.: *Nobelova cena za fyziku za rok 2006*. *PMFA* 52 (2007), 1–16.
- [30] RIESS, A. G., FILIPPENKO, A. V., . . . , SCHMIDT, B. et al.: *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*. *Astronom. J.* 116 (1998), 1009–1038.
- [31] RIESS, A. G., NUGENT, P. E., . . . , SCHMIDT, B. et al.: *The farthest known supernova: Support for an accelerating universe and a glimpse of the epoch of deceleration*. *Astrophys. J.* 560 (2001), 49–71.
- [32] RIESS, A. G., STOLGER, L.-G. et al.: *Type Ia supernova discoveries at $z > 1$ from the Hubble space telescope: Evidence for past deceleration and constraints on dark energy evolution*. *Astrophys. J.* 607 (2004), 665–687.
- [33] RIESS, A. G., STOLGER, L.-G. et al.: *New Hubble space telescope discoveries of Type Ia supernovae at $z \geq 1$: Narrowing constraints on the early behavior of dark energy*. *Astrophys. J.* 659 (2007), 98–121.
- [34] RUDNICK, G. et al.: *Measuring the average evolution of luminous galaxies at $z < 3$: The rest-frame optical luminosity density, spectral energy distribution, and stellar mass density*. *Astrophys. J.* 650 (2006), 624–643.
- [35] SCHWARZSCHILD, B.: *Discoverers of the Hubble expansion's acceleration share Nobel physics prize*. *Physics Today* 64 (2011), 14–17.
- [36] SCHWARZSCHILD, K.: *Über das zulässige Krümmungsmaß des Raumes*. *Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft* 35 (1900), 337–347.
- [37] SISTERNA, P., VUCETICH, H.: *Time variation of fundamental constants: Bounds from geophysical and astronomical data*. *Phys. Rev. D* 41 (1990), 1034–1046.
- [38] SLIPHER, V. M.: *The radial velocity of the Andromeda Nebula*. *Lowell Observatory Bull.* 1 (1913), 56–57.
- [39] SLIPHER, V. M.: *Spectrographic observations of nebulae*. *Amer. Astronom. Soc., Popular Astronomy* 23 (1915), 21–24.
- [40] SPERGEL, D. N. et al.: *Three-year Wilkinson microwave anisotropy Probe (WMAP) observations: Implications for cosmology*. *Astrophys. J.* 170 (2007), 377–408.
- [41] STRÖMBERG, G.: *Analysis of radial velocities of globular clusters and non-galactic nebulae*. *Astrophys. J.* LXI (1925), 353–362.
- [42] TINSLEY, B.: *Accelerating Universe revisited*. *Nature* 273 (1978), 208–211.
- [43] WEINBERG, S.: *Gravitation and cosmology: Principles and applications of the general theory of relativity*. John Wiley and Sons, Inc., New York, London 1972.
- [44] WEINBERG, S.: *První tři minuty: Moderní pohled na počátek vesmíru*. Mladá fronta, Praha 1983, 1998.
- [45] ZWICKY, F.: *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*. *Helv. Phys. Acta* 6 (1933), 110–127.