

Měření vzdáleností ve vesmíru

Mgr. Martin Vilášek,
Planetárium Ostrava,
Hornicko-geologická fakulta,
Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Abstrakt

Měření vzdáleností ve vesmíru je jednou z nejdůležitějších disciplín astronomie. Přestože základní metoda měření paralaxy je známa dvě tisíciletí, podařilo se ji úspěšně použít teprve před 185 lety. Její použitelnost je však pouze v nejbližším galaktickém okolí. Pro měření vzdáleností jiných galaxií a objektů v tzv. kosmologických vzdálenostech je zapotřebí jiných metod. Ty využívají elektromagnetické záření, pohyb těles, porovnávání vlastností hvězd, posun čar ve spektru a mnoho dalších. V tomto článku jsou vybrány a popsány základní metody, které astronomové používají.

Measuring Distances in Space

Abstract

Measuring distances in space is one of the most important disciplines of astronomy. Although the basic method of parallax measuring has been known for two millennia, it was successfully used only 185 years ago. However, its applicability is only in the nearest galactic neighbourhood. Other methods are needed to measure the distances of other galaxies and objects in the so-called cosmological distances. These use electromagnetic radiation, the movement of bodies, comparing the properties of stars, the shift of lines in the spectrum and many others. In this article, the basic methods used by astronomers are selected and described.

Keywords: parallax, radiotelescope, laser measurements, parsec, light year, absolute stellar magnitude, standard candle, distance module, Doppler phenomenon, redshift, supernova brightness, VLBI, expansion of the universe

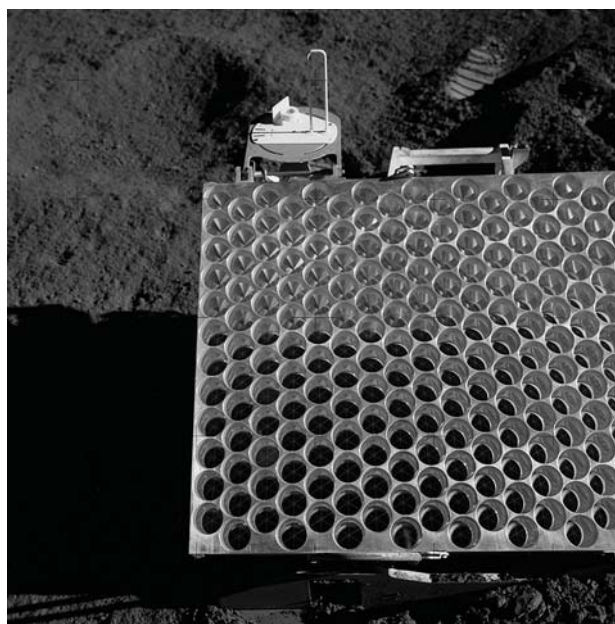
1. Úvod

Velikost vesmíru a vzdálenost kosmických objektů zajímá lidstvo od nepaměti. První odhady známe od starověkých myslitelů např. Eratosthena z Kyrény, kterému se podařilo určit obvod Země s přesností 2 %, nebo Aristotelovo měření poměru vzdáleností Slunce a Měsíce. Zde však nepatrný rozdíl v úhlu (necelé 3 stupně) způsobil velkou chybu ve stanovení poměru vzdáleností (19:1 místo 390:1) [1]. Je jasné, že tímto způsobem měření bychom se nedobrali relevantních výsledků.

2. Jak daleko je Měsíc?

Nejbližším kosmickým tělesem je Měsíc, který obíhá kolem Země. Zmapovat jeho pohyb kolem ní není jednoduché, protože je rušen především gravitačním působením Slunce a také ostatními planetami. V minulosti se provádělo zpřesnění dráhy měřením časů zákrytů hvězd Měsícem, ale od okamžiku přistání Apolla 11 to už nebylo zapotřebí. Astronauté totiž umístili na jeho povrchu speciální koutové odražeče (obr. 1). Ten první tedy umístila posádka Apolla 11, další přidalo Apollo 14 a 15, a také jsou využívány odražeče na Lunochodu 1 a 2. Metoda spočívá v měření času letu krátkých pulsů laseru odražených od cíle na Měsíci. Každý puls trvá jen 100 ps (pikosekund, 1 ps = 10^{-12} s) [2]. Laser vysílá série impulsů, které po odrazení od odražečů zachycuje dalekohled s průměrem 3,5 m (obr. 2).

Díky tomu lze dnes měřit vzdálenost Měsíce s přesností 1 mm. Přesnost měření ovlivňuje řada jevů jako např. ná-



Obr. 1 Odražeč Apolla 15, NASA

klon samotných odražečů na Měsíci, průchod světla zemskou atmosférou, slapové působení Měsíce na Zemi a zdvih litosféry, stav počasí a mnoho dalších vlivů. Jednou ze stanic, které toto měření provádí je Apache Point Observatoř v Texasu a Observatoire de la Côte d'Azur ve Francii [3]. Rozsah průměrů používaných dalekohledů na všech světových stanicích se pohybuje od 0,76 m do 3,5 m.

Podobným způsobem se provádí i měření vzdáleností planet nebo malých těles Sluneční soustavy (planetek nebo komet), ale místo laserů jsou využívány radioteleskopy s vysokým výkonem až 1 MW. Intenzita signálu odraženého od zkoumaného objektu je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vzdálenosti. Radioteleskopy dokážou měřit vzdálenosti velmi rychle a je možné z nich získat i informace o tvaru a povrchových vlastnostech tělesa, které nelze zjistit jinými technikami ze Země. Díky tomu lze měřit velmi přesně pohyb těles, která se nebezpečně přibližují k Zemi a pomáhají astronomům zpřesňovat dráhu těchto objektů, jako např. u planetky 99942 Apophis [4], (obr. 3).

Díky této technice byly v 90. letech minulého století detekovány oblasti s vysokou odrazivostí v okolí severního pólu planety Merkur, což vědce vedlo k domněnce přítomnosti vodního ledu na dně některých kráterů. Po detailním zkoumání těchto oblastí sondou Messenger v letech 2011 až 2015 byla přítomnost ledu potvrzena.

3. První hvězda

K měření vzdáleností hvězd nám už radary ani lasery nestačí. A k tomu, abychom určili, která z hvězd je k nám nejbližší, vedla dlouhá cesta. Ta začala už ve starověkém Řecku, kdy Aristoteles (384–322 př. n. l.) tvrdil, že Země je středem vesmíru. Toto tvrzení podpořil i Archimédés (287 až 212 př. n. l.), který odmítl heliocentrismus s tím, že by musela být pozorována **paralaxa** hvězd (změna polohy blízké hvězdy vůči vzdálenému hvězdnému pozadí). Tu se bohužel řeckým učencům pozorovat nepodařilo, a proto geocentrismus vítězil dlouhé tisíce let.

Nepodařilo se to později ani tak slavným astronomům, jakými byli Tycho Brahe, Tadeáš Hájek z Hájku, nebo

Keplerův učitel Michael Mästlin, kteří se snažili změřit paralaxu „nové“ hvězdy (tzv. Tychonovy hvězdy), jež se na obloze objevila v roce 1572.

Použitelnost metody měření paralaxy si odzkoušeli francouzští astronomové Jérôme de Lalande a Nicolas-Louis de Lacaille v roce 1752, když se jim podařilo poměrně přesně určit vzdálenost Měsíce na 58,8 zemských poloměrů (správná hodnota je 60,27).

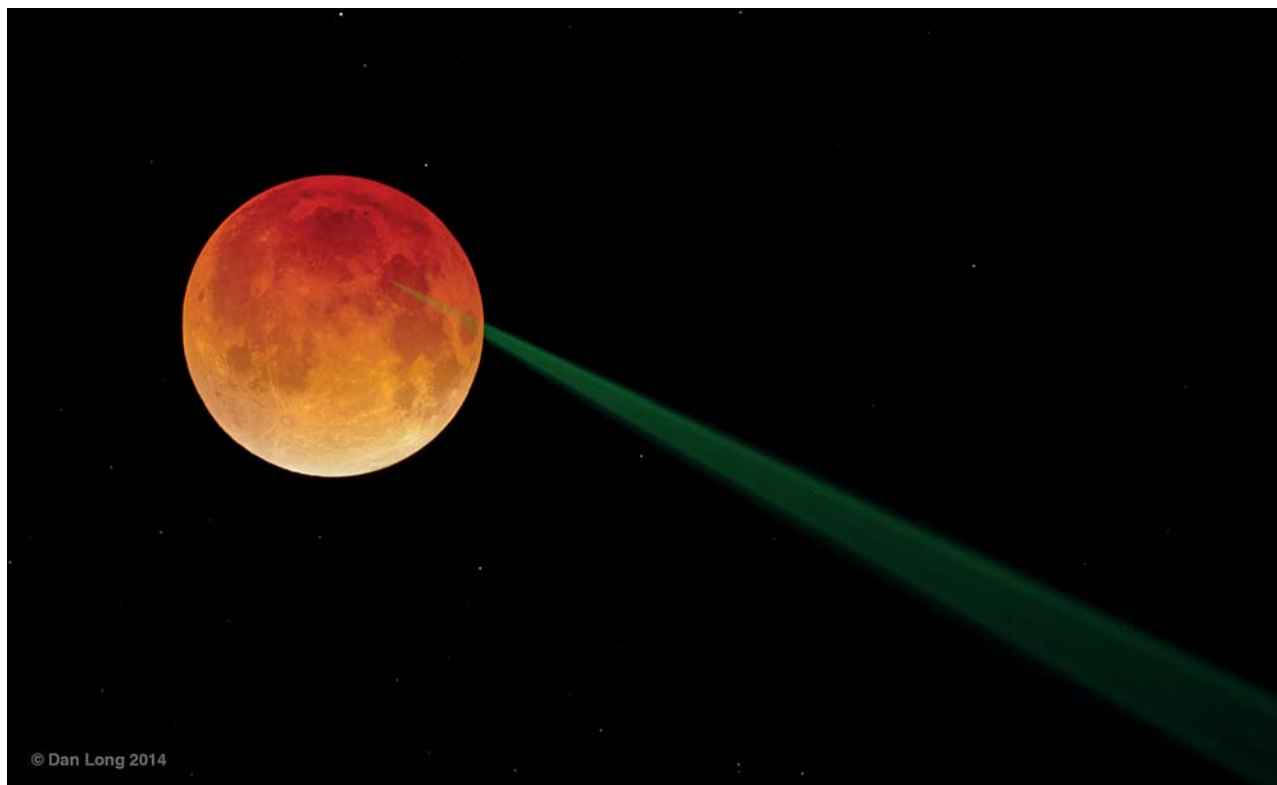
Avšak první změření „hvězdné“ neboli tzv. **roční paralaxy** π se podařilo Friedrichu Wilhelmu Besselovi u hvězdy 61 Cygni. Měření prováděl několik let a poté v roce 1838 publikoval její paralaxu (0,314") a stanovil její vzdálenost na 10,4 světelného roku, což je ve velmi dobré shodě se současnou hodnotou 11,4 světelného roku. Výpočet je oproti měření velmi jednoduchý: $d = 1/\pi$, kde d je měřená vzdálenost.

Z metody určení paralaxy je odvozena také jedna ze základních jednotek vzdáleností: **parsek** (pc). Je to vzdálenost, ze které je vidět poloměr zemské dráhy pod úhlem 1 obloukové vteřiny. V současnosti jsme schopni touto metodou měřit s přesností na tisíce vteřiny, což nám dává možnost zjišťovat vzdálenosti do několika tisíc parseků.

Další jednotkou pro měření vzdáleností je **světelný rok**. Je to vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za 365 pozemských dnů a odpovídá hodnotě 9,46 bilionů kilometrů. Mezi parsekem a světelným rokem existuje převodní vztah: 1 parsek = 3,26 světelného roku.

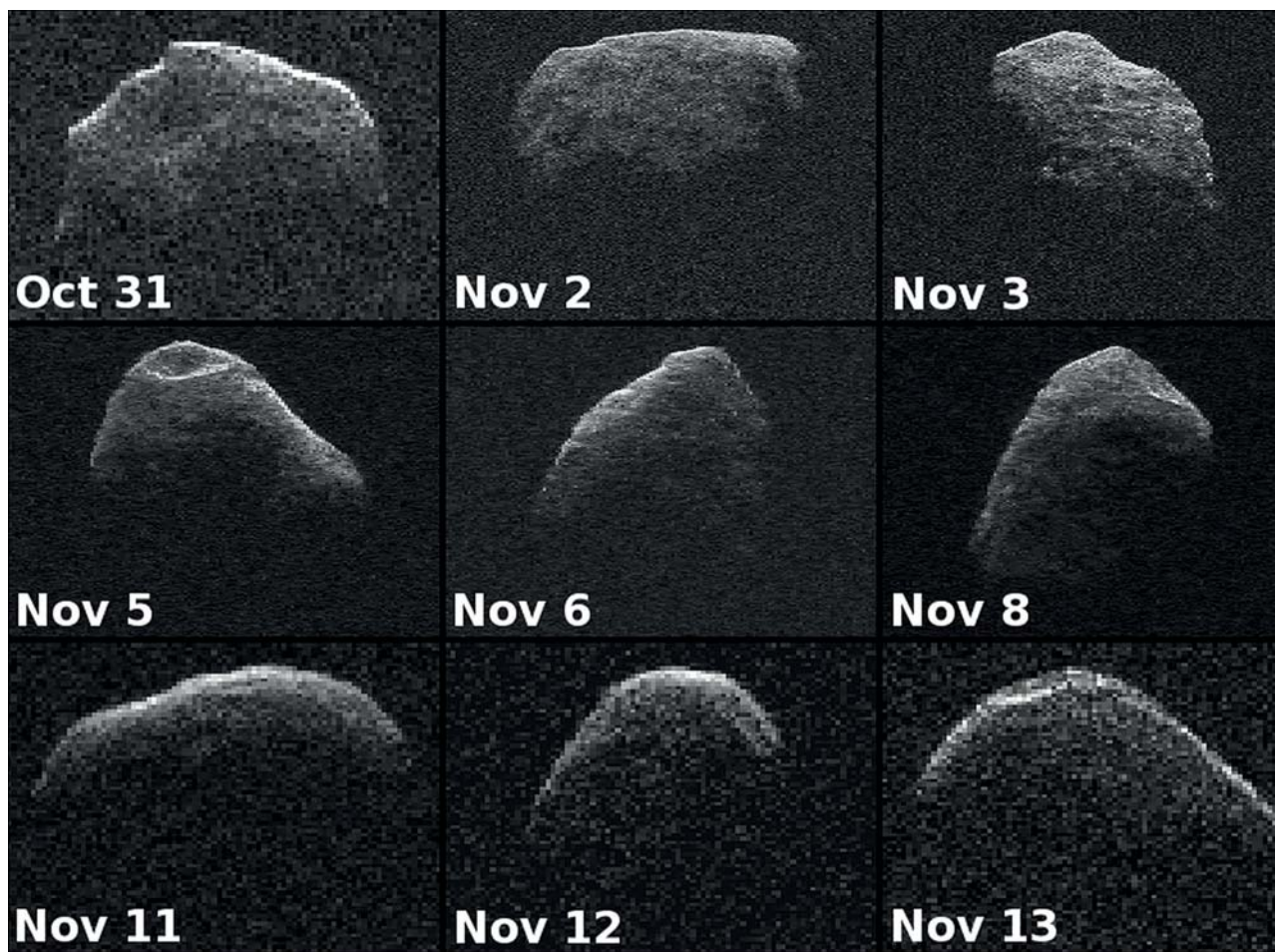
4. Modul vzdálenosti

Řecký astronom Hipparchos (190–120 př. n. l.) rozdělil jasnosti hvězd do 6 skupin (hvězdných velikostí): nejjasnější hvězdy byly v 1. skupině, nejslabší v 6. skupině. Toto roz-



© Dan Long 2014

Obr. 2 Laser k Měsíci, Dan Long, Apache Point Observatory



Obr. 3 Radarové snímky asteroidu Apophis, NASA

dělení matematicky popsal v 19. století anglický astronom Norman Pogson (1829–1891), který zjistil, že hvězdy 1. velikosti jsou stokrát jasnější, než hvězdy 6. velikosti. Díky němu dnes určujeme jasnost objektu podle toho, „jak moc na nás svítí“. Jednotkou hvězdné velikosti je magnituda (mag). Ty nejjasnější hvězdy, které vidíme očima na obloze, mají hvězdnou velikost -1 mag, ty nejslabší $+6$ mag. Jasnost Měsíce v úplňku dosahuje $-12,6$ mag a Slunce $-26,7$ mag.

V případě, že chceme posoudit, jaké jsou skutečné jasnosti různých hvězd, musíme zkoumanou hvězdu posunout do vzdálenosti 10 parseků. V této vzdálenosti pak zjišťujeme absolutní hvězdnou velikost M . A pokud tuto hodnotu porovnáme s hvězdnou velikostí m pozorovanou ze Země, dostaneme tzv. modul vzdálenosti čili rozdíl obou hvězdných velikostí, ze kterého lze vypočítat vzdálenost hvězdy.

Vztah vypadá takto:

$$M = m + 5 + 5 \log \pi,$$

kde π je paralaxa, z níž vypočteme vzdálenost. Tuto metodu lze použít pro měření vzdáleností hvězd v naší Galaxii [5].

5. Standardní svíčka

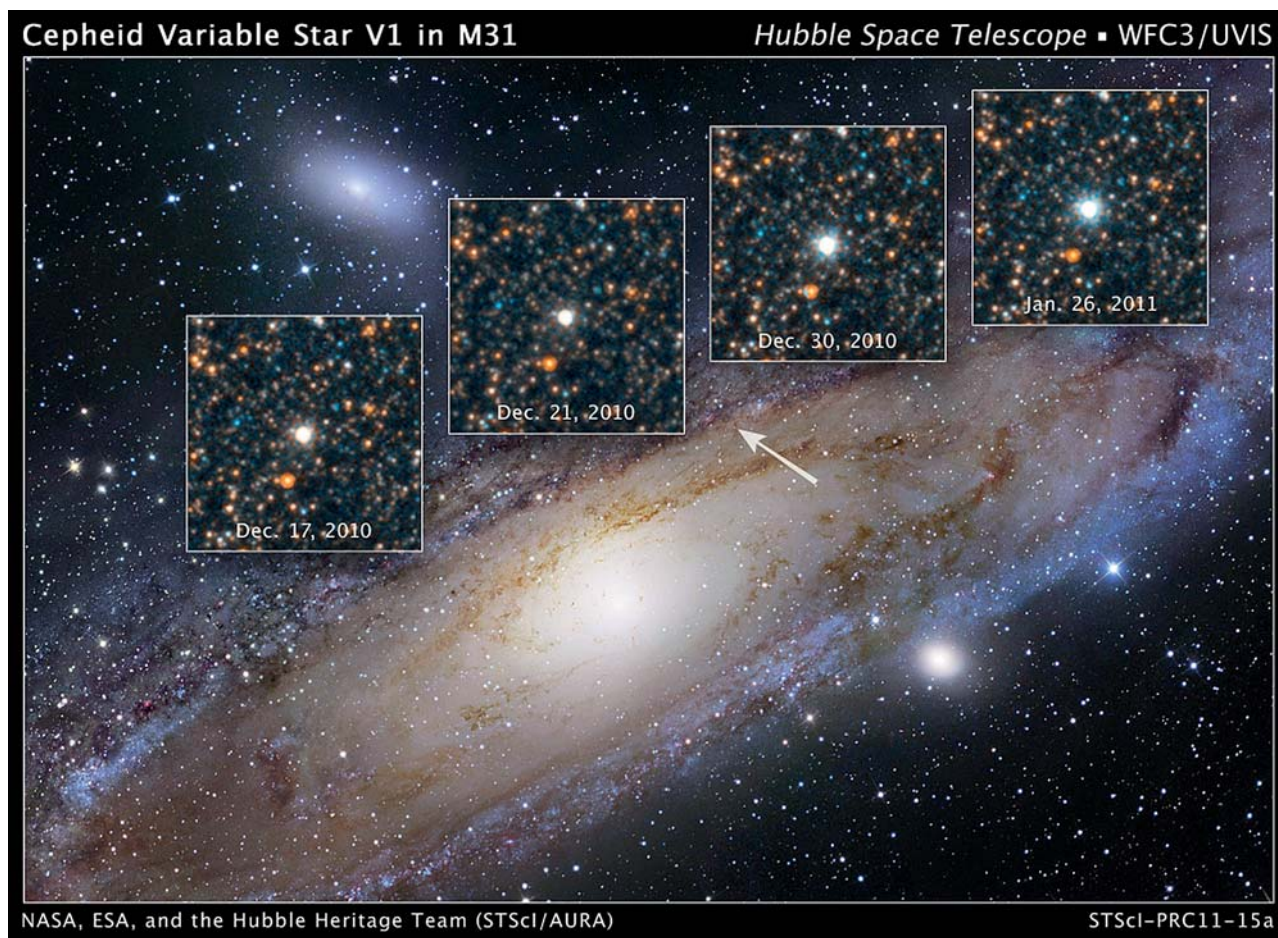
Pro měření větších vzdáleností se dnes používají hvězdy známé pod označením cefeidy. Jsou to objekty, jejichž jasnost se pravidelně mění v závislosti na zářivém výkonu.

První hvězdu tohoto typu objevil mladý astronom John Goodricke (1764–1786), který v dětství prodělal těžkou nemoc, kvůli které ohluchl. Po návratu ze studií se začal profesionálně věnovat pozorování hvězd a v roce 1784, v pouhých 20 letech, objevil u hvězdy delta Cephei pravidelné změny jasnosti. Tyto hvězdy mají poměrně velký zářivý výkon, takže jsou viditelné na poměrně velké vzdálenosti. Ke změně jasnosti dochází vlivem změn teploty a také poloměru hvězdy. Na základě velkého množství měření bylo možné statisticky stanovit závislost absolutní hvězdné velikosti M na periodě pulzace T , a tedy vypočítat z modulu vzdálenosti i to, jak je daleko.

Vztah mezi periodou pulzací a zářivým výkonem cefeid se podařilo určit americké astronomce Henriette Swan Leavittové v roce 1912, když proměřovala jasnosti hvězd ve Velkém Magellanově mračnu. Protože se cefeidy nacházejí i v naší Galaxii, lze jejich vzdálenosti proměřit i metodou paralaxy a vytvořit tzv. **standardní svíčku**. Tím získáváme přesně kalibrovaný zdroj, který lze použít pro měření mnohem větších vzdáleností ve vesmíru. Díky velkým dalekohledům dnes cefeidy pozorujeme v galaxiích vzdálených až 500 milionů světelných let (obr. 4).

6. Tullyho-Fischerova relace

Jak ale změříme vzdálenost galaxie, v níž už žádné hvězdy nerozpoznáme? Na tuto otázku odpověděli v roce 1977



Obr. 4 Změny jasnosti v čase u cefeidy V1 v galaxii M31, NASA, ESA a Hubble Heritage Team

astronomové Richard Tully a James Fischer. Podařilo se jim zjistit, že rychlost rotace spirální galaxie závisí na její celkové hmotnosti. Čím je galaxie hmotnější, tím rychleji rotuje, a protože se v ní nachází více hvězd, má i větší zářivý výkon. Vědci proměřili potřebné parametry u blízkých galaxií a vytvořili relaci, díky níž lze z rychlosti rotace zjistit absolutní hvězdnou velikost galaxie. Tu pak porovnáme s její hvězdnou velikostí a z modulu vzdálenosti spočítáme skutečnou vzdálenost [6].

Od té doby bylo uskutečněno mnoho dalších měření různých galaxií, čímž došlo ke zpřesnění relace a je tedy možné ji dnes použít jako jednu z relevantních metod k měření vzdáleností galaxií za použití spektrální analýzy (obr. 5).

7. Supernovy

Pojem supernova zná téměř každý. Většinou si za ním představíme výbuch hvězdy, která je na konci svého životního cyklu. Na pozemské obloze můžeme dalekohledem zahlédnout několik pozůstatků po supernovách, například Krabí mlhovinu. Najdeme ji v souhvězdí Býka na zimní obloze, poblíž jeho spodního rohu u hvězdy dzéta Tauri. Výbuch této hvězdy pozorovali čínští a arabští astronomové v roce 1054. Hvězda host, jak ji nazvali, se objevila 4. 7. a byla tak jasná, že ji viděli 23 dnů na denní obloze. Na té noční pak po dobu dvou let. Pravou podstatu Krabí mlhoviny se podařilo vysvětlit až ve druhé polovině 20. století.



Obr. 5 Spirální galaxie M100, NASA, ESA, Hubble

Gravitace stlačila jádro hvězdy desetkrát hmotnější než Slunce do objektu o průměru necelých 30 km, což vyvolalo silnou rázovou vlnu, která rozmetala obal hvězdy do okolního prostoru rychlostí asi 11 000 km za sekundu (ten-

to typ exploze označujeme jako supernova II. typu). Při tom se uvolnilo množství energie, díky níž se supernova stala viditelnou na obrovskou vzdálenost. Některé supernovy se svou jasností vyrovnají jasnosti celé galaxie, a protože známe množství vyzařené energie supernov (6×10^{45} J), můžeme vypočítat její absolutní hvězdnou velikost, a tedy i modul vzdálenosti.

Zajímavé je, že supernova může vzniknout ještě jiným způsobem, a to, pokud normální hvězda obíhá kolem bílého trpaslíka. Bílý trpaslík je hvězda s hmotností do 1,4násobku hmotnosti Slunce. V těsné dvojhvězdě však trpaslík nasává materiál obíhající hvězdy. Tím zvyšuje svoji hmotnost, přičemž jakmile překročí tzv. Chandrasekharovu hranici (1,4násobek hmoty Slunce), zhroutí se do neutronové hvězdy. Uvolněná gravitační energie způsobí výbuch supernovy typu Ia, která dosáhne stejné absolutní hvězdné velikosti jako supernova II. typu.

8. Červený posuv

Všichni jsme už slyšeli houkání sirény projíždějícího vozu složek integrovaného záchranného systému. Když se k nám vůz přibližuje, výška tónu sirény se postupně zvyšuje. Jakmile kolem nás projede, dojde rychle ke snížení výšky tónu. Tento jev poprvé popsal Christian Doppler v roce 1842. V astronomii se projevuje posuvem čar ve spektrech pohybujících se vesmírných objektů. Když se objekt přibližuje, čáry se posunují do modré oblasti spektra, když se vzdaluje, čáry se posunují do červené oblasti spektra. Pak hovoříme buď o modrém, nebo červeném posuvu.

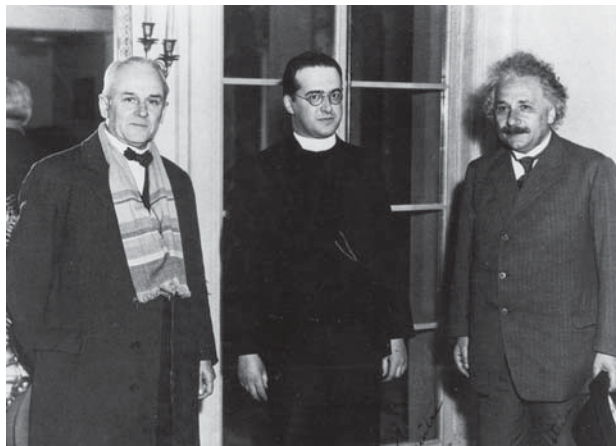
Na začátku 20. století, přesněji v roce 1909, nastoupil mladý americký astronom Vesto Slipher na Lowellovu observatoř ve Flagstaffu. Zde se zabýval spektroskopii a zkoumal atmosféry planet. Později se začal zabývat spektry mlhovin, mezi které se v té době řadily i tehdy neznámé galaxie. A právě v jejich spektru se Slipherovi podařilo v roce 1912 objevit červený posuv, který ale nedokázal vysvětlit.

V roce 1915 publikoval Albert Einstein obecnou teorii relativity. Rovnice, které teorii popisují, se podařilo vyřešit ruskému matematikovi a fyzikovi Alexandru Fridmanovi v roce 1922. Z jeho řešení vyplývalo, že by se měl vesmír rozpínat nebo smršťovat.

Informace o červeném posuvu a rozpínání vesmíru si „dal dohromady“ belgický kněz Georges Lemaître a na základě toho jako první odvodil z obecné teorie relativity vztah, podle něž je rychlost vzdalování objektu úměrná jeho vzdálenosti (jinak řečeno, čím je objekt od nás dále, tím rychleji se vzdaluje a tím je tedy jeho červený posuv větší). Svě výsledky ale publikoval v místním vědeckém časopise, navíc ve francouzštině v roce 1927, proto se o nich vědecký svět mluvící anglicky nedozvěděl (obr. 6).

Červeného posuvu ve spektrech mlhovin, který naměřil Slipher, si všiml v roce 1923 jiný americký astronom, Edwin Hubble. Pomocí tehdy největšího dalekohledu na observatoři Mount Wilson s průměrem 2,5 m fotografoval mlhovinu v souhvězdí Andromedy a některé další. Ke svému překvapení zjistil, že tyto objekty tvoří hvězdy a že se jedná o stejné galaxie, jakou je naše Mléčná dráha. Díky cefeidám, které našel, se mu podařilo změřit poprvé i jejich vzdálenost (900 000 světelných let, současná hodnota je 2,537 milionu světelných let [7]) a vesmír se tak v té době poměrně razantně zvětšil.

V roce 1929 Hubble zjistil, že spektrální čáry pozorovaných galaxií jsou posunuty do červené části spektra, což



Obr. 6 Millikan, Lemaître a Einstein na konferenci v roce 1933, CALTECH

interpretoval jako jejich rychlost vzdalování přímo úměrnou vzdálenosti jednotlivých galaxií (čili dospěl ke stejnému výsledku jako Lemaître o dva roky dříve). Tato měření se tak stala prvním experimentálním důkazem rozpínání vesmíru.

Změřit míru vzdalování, tedy koeficient úměrnosti se astronomům podařilo až o mnoho desítek let později díky Hubbleovu kosmickému dalekohledu. Dnes se jí říká Hubbleova konstanta a díky ní lze zjistit, jak daleko se nacházejí ty nejvzdálenější galaxie nebo kvazary (obr. 7).

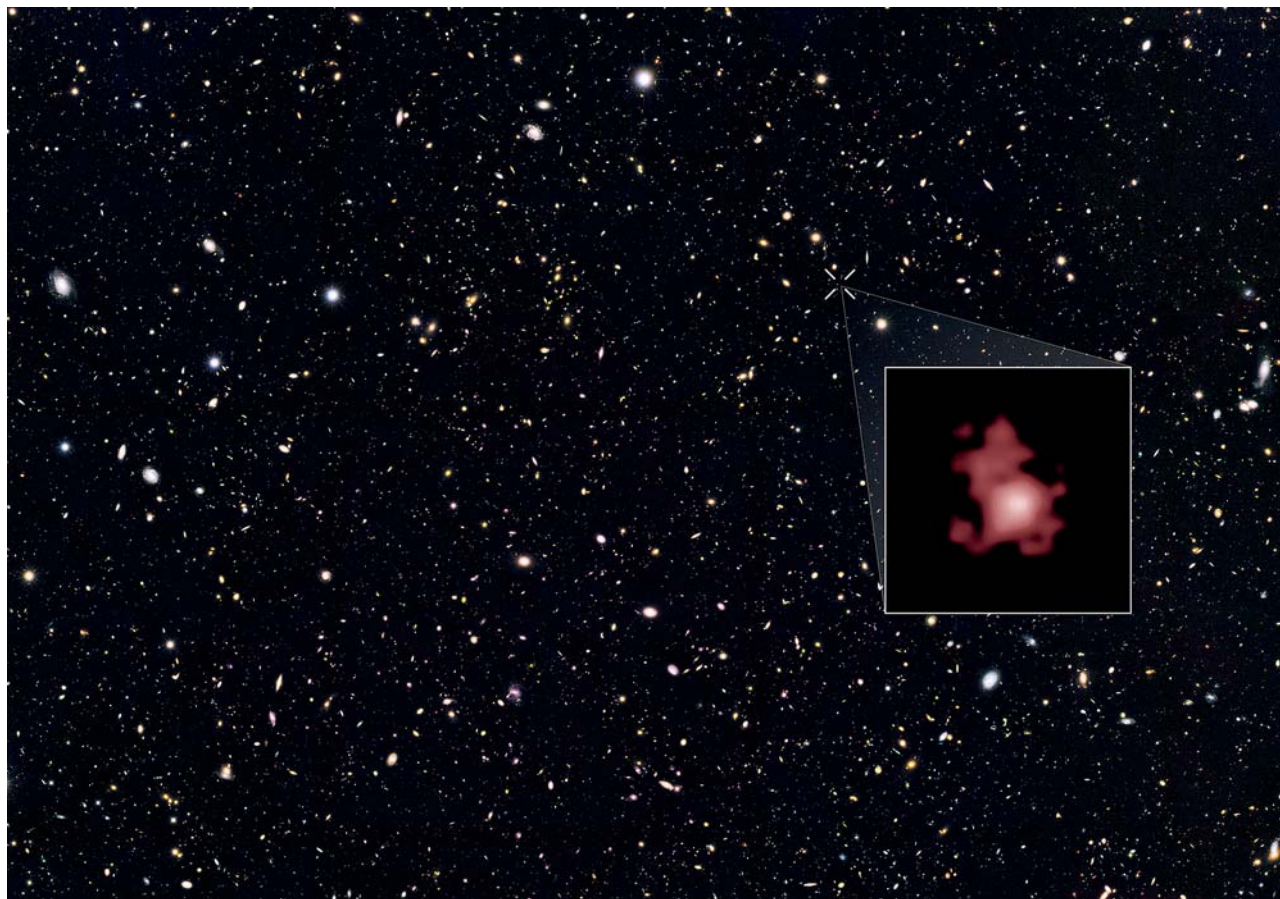
9. Tajemné kvazary

Ještě přesnější metodou se jeví zjišťování závislosti absolutní hvězdné velikosti na poměru vyzařování v rentgenové a ultrafialové oblasti spektra kvazarů [8]. Tuto závislost astronomové předpokládali už od sedmdesátých let 20. století, ale ověřit se jí podařilo teprve nedávno díky rentgenovým družicím vyslaným do vesmíru.

Kvazary jsou pravděpodobně zárodky budoucích galaxií s obřími černými děrami v centrech, které se nacházejí ve vzdálenostech několika miliard světelných let od nás. Jejich spektrum je proto výrazně posunuto k červenému konci [9]. Byly objeveny v roce 1963 jako objekty s velmi malou úhlovou velikostí na obloze, ale gigantickým zářivým výkonem v řádech 10^{35} až 10^{40} W. V kosmické geodézii jsou kvazary známy jako mimogalaktické objekty, které využívá technologie interferometrie s velmi dlouhými základnami (VLBI, Very Long Baseline Interferometry) k tvorbě souřadnicových systémů: Mezinárodního nebeského souřadnicového systému (ICRS, International Celestial Reference System) a Mezinárodního terestrického souřadnicového systému (ITRS, International Terrestrial Reference System) [10].

10. Závěr

Je fantastické, do jakých vzdáleností můžeme dnes nahlédnout. Pozemské dalekohledy s průměry zrcadel přes 10 m využívají speciální systémy adaptivní optiky, které poskytují lepší obraz než některé přístroje na oběžné dráze. Ve výstavbě jsou obří teleskopy se zrcadly o průměru



Obr. 7 Nejvzdálenější galaxie GN-Z11, NASA

až 40 m [11], které mají být uvedeny do provozu v roce 2028. Tyto přístroje nám umožní vidět ještě dále a více. Vědci očekávají, že se jim s jejich pomocí podaří vyřešit současné nezodpovězené otázky týkající se temné hmoty a temné energie, a posunout tak hranice pozorovatelného vesmíru do mnohem větších vzdáleností.

LITERATURA:

- [1] KLECZEK, J.: Velká encyklopedie vesmíru, Academia, 2002.
- [2] APOLLO (the Apache Point Observatory Lunar Laser-ranging Operation.) [online]. Dostupné na: <https://tmurphy.physics.ucsd.edu/apollo/apollo.html>.
- [3] Space Geodesy Project. [online]. Dostupné na: https://space-geodesy.nasa.gov/NSGN/sites/Apache_Point/Apache_Point.html.
- [4] NASA Rules Out Earth Impact in 2036 for Asteroid Apophis. [online]. Dostupné na: https://www.nasa.gov/mission_pages/asteroids/news/asteroid20130110.html.
- [5] Měření vzdáleností. [online]. Dostupné na: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/struktury/vzdaleni.php>.
- [6] TULLY, R. B.–FISCHER, J. R.: A New Method of Determining Distances to Galaxies, *Astron. Astrophys.* 54, 661–673 (1977) [online]. Dostupné na: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/struktury/vzdaleni/Tully-Fischer.pdf>.
- [7] POMIER, R.: The star that changed the cosmos: M31-V1. Dostupné na: <https://www.astronomy.com/science/the-star-that-changed-the-cosmos-m31-v1/>.
- [8] ŠTRUP, M.: Nová metoda měření vzdáleností v kosmu – rentgenová astronomie. [online]. Dostupné na: <https://kosmonautix.cz/2015/12/nova-metoda-mereni-vzdaleni-v-kosmu-rentgenova-astronomie/>.

- [9] LANGER, J.–WEINZETTL, V.: Kosmologický červený posuv a zachování energie, *Vesmír* 76, 574, 1997/10 [online]. Dostupné na: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1997/cislo-10/kosmologicky-cerveny-posuv-zachovani-energie.html#&gid=1v&pid=1>.
- [10] KOSTELECKÝ, J.–KLOKOČNÍK, J.–KOSTELECKÝ, J.: Kosmická geodézie. [online]. Dostupné na: <https://docplayer.cz/106292731-Kosmicka-geodezie-prof-ing-jan-kostecky-drsc-doc-ing-jaroslav-klokocnik-drsc-ing-jakub-kostecky-ph-d.html>.
- [11] The Extremely Large Telescope, European Southern Observatory. [online]. Dostupné na: <https://elt.eso.org/>.

Do redakce došlo: 31. 5. 2023

Lektoroval:
prof. Ing. Jan Kostecký, DrSc.,
Výzkumný ústav geodetický,
topografický a kartografický, v. v. i.



Pro příští GaKO připravujeme:

LEDERER, M.–NESVADBA, O.: Projekt zhuštění gravimetrického mapování

ZEMKOVÁ, I.–GIBA, P.: Štatistické zisťovanie v prostredí katastra nehnuteľností a možnosti jeho využitia