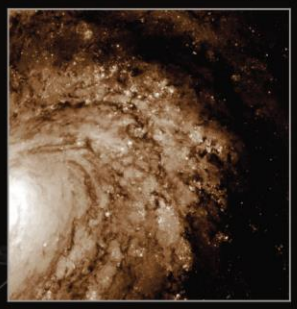
THE ESA/ESO ASTRONOMY EXERCISE SERIES

Student exercises in astronomy using observations from the NASA/ESA Hubble Space Telescope and the ESO telescopes



Exercise 2

The Distance to M100 as Determined By Cepheid Variable Stars

Based on Observations with the NASA/ESA Hubble Space Telescope

esa

ESO

Obsah

Úvod

Úvod strana 2

Kosmologie a určování vzdáleností strana 3

Použití Cefeid pro odhad vzdáleností strana 5

M100 a velká spirála strana 7

Cvičení

Měření a výpočty strana 8

Cvičení 1 strana 8

Cvičení 2 strana 9

Cvičení 3 strana 10

Cvičení 4 strana 10

Cvičení 5 strana 10

Cvičení 6 strana 11

Cvičení 7 strana 11

Cvičení 8 strana 11

Literatura

Odborné časopisy strana 12

Poznámky pro učitele

Poznámky pro učitele strana 14

Úvod

ESA/ESO Astronomická cvičení č.2

Určení vzdálenosti M100 pomocí proměnných hvězd - Cefeid

Astronomie je dostupná a názorná věda, ideální pro vzdělávací účely. Během několika posledních let představili NASA, ESA, Hubbleův vesmírný teleskop a observatoř La Silla a Paranal v Chile nejhlubší a nejpozoruhodnější pohledy do Vesmíru, jaké kdy byly pořízeny. Ačkoliv, Hubbleův vesmírný teleskop a teleskop ESO již nepořizují nové ohromující snímky, jsou stále pro astronomy neocenitelné. Tyto dalekohledy mají excelentní prostorové a úhlové rozlišení (ostrost snímků) a umožňují astronomům pohledy do nejvzdálenějšího Vesmíru, jaké kdy byly pořízeny a umožňují nalézat odpovědi na dlouhodobě nezodpovězené otázky.

Ačkoliv jsou analýzy těchto pozorování velmi detailní, v principu jsou tak jednoduché, že je lze použít ve vzdělávání. Můžeme tak ukázat studentům, jak mohou tuto práci zopakovat vlastními silami a prostředky.

Tento soubor cvičení byl vytvořen evropským partnerem projektu Hubble, Evropskou vesmírnou agenturou (ESA), která má zajištěných 15% pozorovacího času Hubbleova vesmírného dalekohledu, společně s Evropskou jižní observatoří (ESO).

Obrázek 1: NASA/ESA Hubbleův vesmírný dalekohled
Hubbleův vesmírný dalekohled pořizuje neobyčejné snímky našeho Vesmíru z oběžné dráhy Země.

Úvod

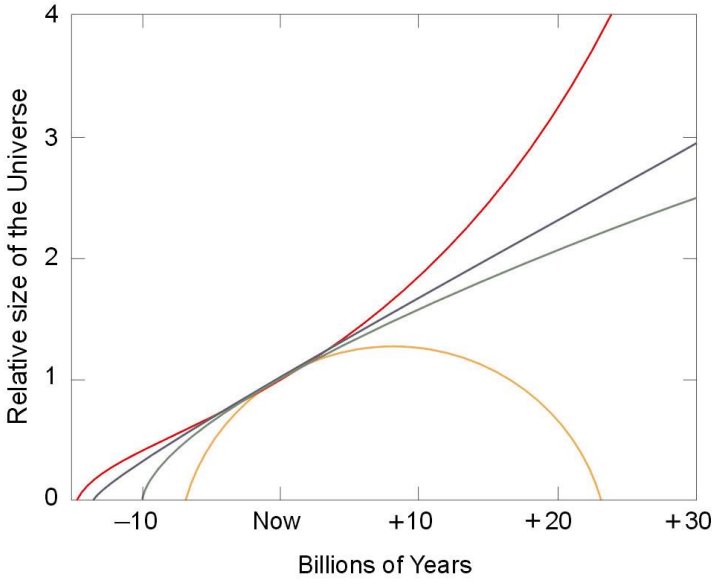
Kosmologie a určování vzdáleností

Jak starý je vesmír? Jak rychle se rozpíná? Začne se někdy v budoucnosti smršťovat? To jsou základní kosmologické otázky, které mají dlouho očekávané odpovědi.

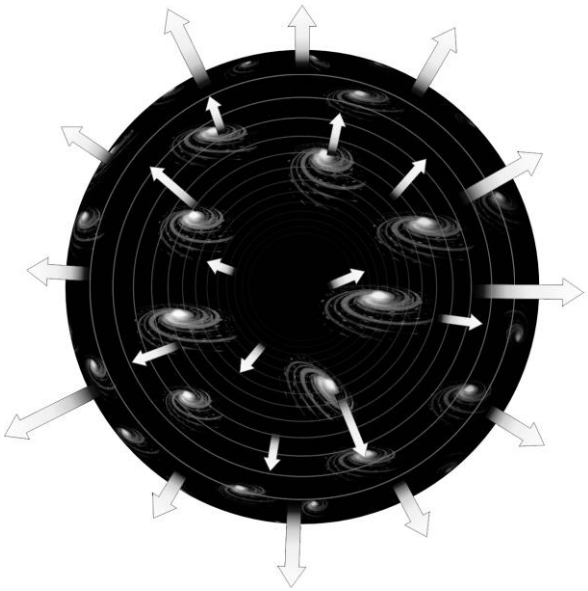
Osud vesmíru je úzce spjat s budoucím chováním/vývojem rychlosti jeho rozpínání. V případě, že by se rozpínání zpomalovalo, vesmír by se jednoho dně měl začít smršťovat. Dosavadní pozorování však naznačují, že se pravděpodobně bude nafukovat do nekonečna.

Expanze způsobuje to, že všechny galaxie se vzdalují od pozorovatele (například na Zemi), a to tím rychleji, čím jsou dále. Výraz známý jako Hubbleův zákon (odvodil jej Edwin Hubble v roce 1929) popisuje vztah vzdálenosti objektu a rychlostí jeho vzdalování *v*. Hubbleův zákon zní:

$v = H_0.D$

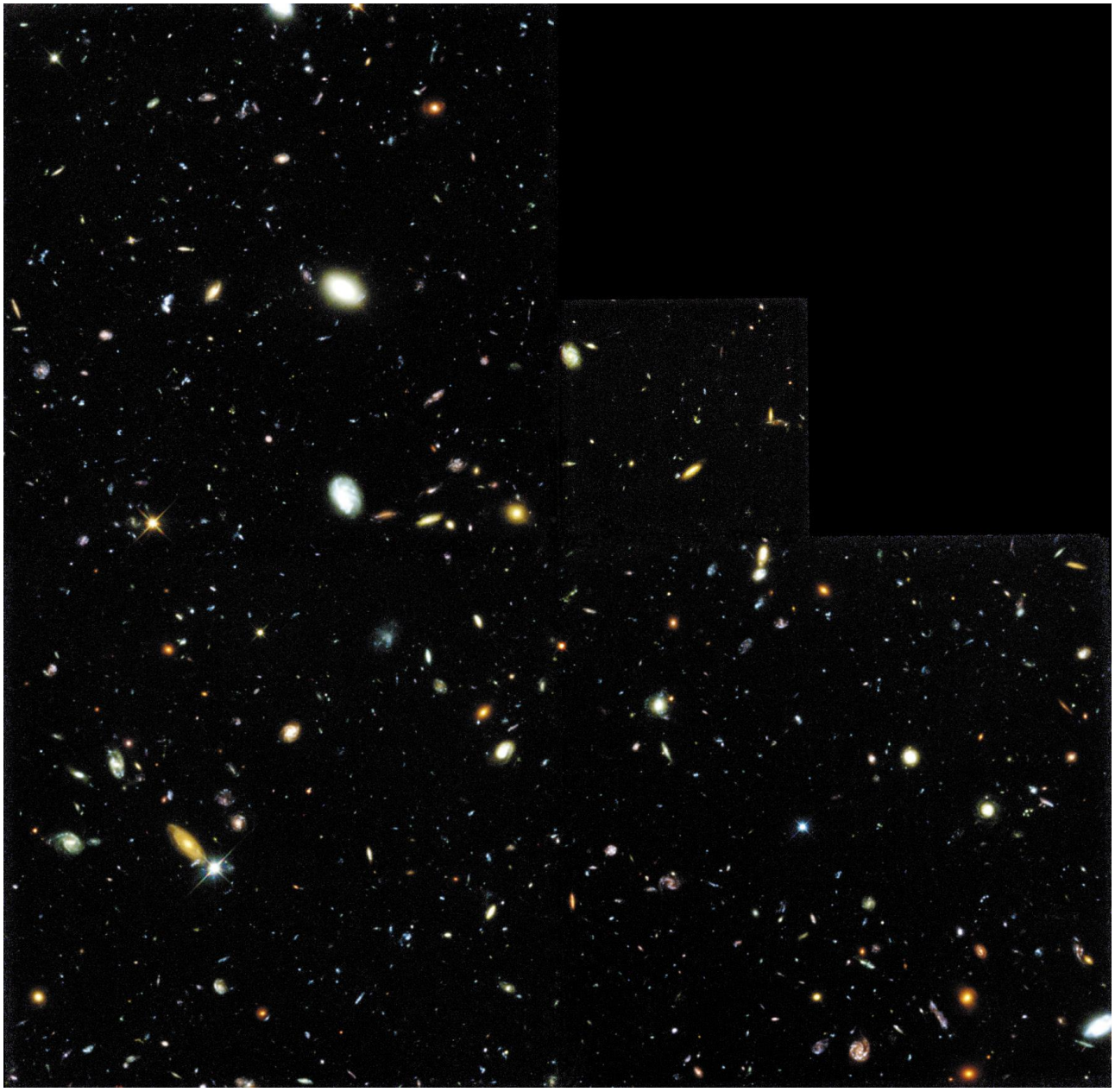


Obrázek 2: Osud vesmíru
Tento graf dává do souvislosti rozměr vesmíru a stáří vesmíru – jinými slovy ukazuje, jak se s časem rozpíná nebo smršťuje. Jednotlivé křivky ukazují různé osudy vesmíru.



Obrázek 3: Vzdalující se galaxie
Tento obrázek znázorňuje, jak se od sebe vzájemně galaxie vzdalují v důsledku rozpínání vesmíru.

Úvod



Obrázek 4: Vzdálené galaxie s vysokou hodnotou rudého posuvu
Tento snímek, který pořídila Wide-Field and Planetary Camera (WFPC2) Hubbleova vesmírného dalekohledu, ukazuje mnoho galaxií vzdálených miliardy světelných let. Většina z nich obsahuje miliardy hvězd. Galaxie na tomto snímku se od nás vzdalují vysokými rychlostmi.

Uvádí se, že galaxie se v našem vesmíru vzdalují od sebe rychlostí v, která je závislá na vzájemné vzdálenosti galaxií D. H_0 je základním parametrem vesmíru – Hubbleova konstanta – důležitým v mnoha kosmologických otázkách a popisuje, jakou rychlostí se dnes vesmír rozpíná.
Stáří vesmíru je nepřímo úměrné Hubbleově konstantě H_0:

$t = 1/H_0$

Hodnota H_0 má obrovský význam pro určení stáří našeho vesmíru. Ale jak ji můžeme určit? Pro určení H_0 je potřeba určit radiální rychlost pohybu v a vzdálenost D galaxie nebo ještě lépe skupiny galaxií a najít průměr těchto měření.

Radiální rychlost je možné relativně snadno určit: můžeme určit takzvaný rudý posuv světla přicházejícího od galaxie. Rudý posuv je přímým důsledkem pohybu objektu směrem od nás. Jedná

se o Dopplerův posuv světla od jednotlivých galaxií,

Obrázek 5: Henrietta Leavittová
Porozumění relativní jasnosti a proměnlivosti hvězd, to byla náplň převratné práce Henrietty Swan Leavittové (1868-1921). Práci napsala na Harvardu, kde přesně z fotografií kalibrovala jasnosti 47 hvězd, které nazýváme jako „standardní svíčky" pro určování vzdáleností dalších hvězd. Leavittová objevila a katalogizovala přes 1500 proměnných hvězd v blízkém Magellanově mračnu. Z toho katalogu zjistila, že jasnější Cefeidy mají delší periodu pulzace, čehož se dnes využívá ke kalibrování vzdáleností ve vesmíru (s laskavým svolením AAVSO).

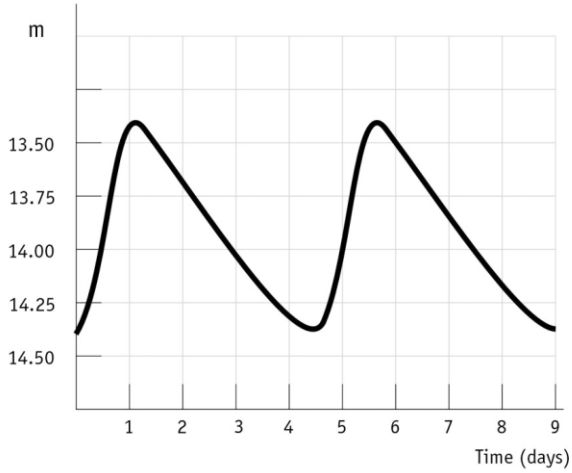
což vede k posunu vlnové délky světla z těchto galaxií k červené části spektra. Vzhledem k tomu, že červené světlo má větší vlnovou délku než modré světlo, vlnová délka světla putujícího od vzdálené galaxie směrem k Zemi narůstá. Tato změna vlnové délky se nazývá rudý posuv a galaxie s vysokým rudým posuvem se pohybují vysokými radiálními rychlostmi.

Použití Cefeid pro odhad vzdáleností

Měření vzdálenosti astronomického objektu je mnohem obtížnější a je jednou z největších výzev, které astronomové čelí. V průběhu let byla nalezena řada způsobů, jak kalibrovat vzdálenosti ve vesmíru. Jedním z nich je třída hvězd, zvaných Cefeidy.

Cefeidy jsou vzácně se vyskytující, velmi jasné hvězdy, které velmi pravidelně mění svou jasnost. Jsou pojmenované podle hvězdy δ–Cephei ze souhvězdí Kefeus, která byla prvním známým případem tohoto konkrétního typu hvězdy a současně je viditelná pouhým okem.

V roce 1912 pozorovala astronomka Henrietta Leavittová (viz obr. 5) 20 Cefeid v Malém Magellanově mračnu (SMC). Malé rozdíly ve vzdálenostech jednotlivých Cefeid jsou ve srovnání se vzdáleností celého SMC od Země zanedbatelné. Jasnější hvězdy v této skupině jsou skutečně jasnější, a není to jen proto, že jsou blíže. Henrietta Leavittová objevila vztah mezi skutečnou jasností a periodou pulsace proměnných hvězd, zvaných Cefeidy a ukázala tak, že jasnější Cefeidy mají delší periodu pulzace. Pozorováním periody pulzace Cefeidy je možné odvodit, jaká je skutečná jasnost a pozorováním zdánlivé jasnosti je možné určit vzdálenost Cefeidy. Proto je možné Cefeidy používat jako jedny ze „standardních svíček" ve vesmíru, které je možné použít pro určování vzdáleností Cefeid samotných nebo pro kalibraci (nastavení nulového bodu) dalších indikátorů vzdálenosti. Cefeidy se liší od ostatních proměnných hvězd charakteristickou světelnou křivkou (viz obr. 6).



Obrázek 6: Typická světlená křivka Cefeidy
Světelná křivka Cefeidy má charakteristický tvar, přičemž jasnost vždy prudce vzroste a potom klesá pomaleji. Amplituda změny jasnosti je typicky 1 - 2 jasnosti.

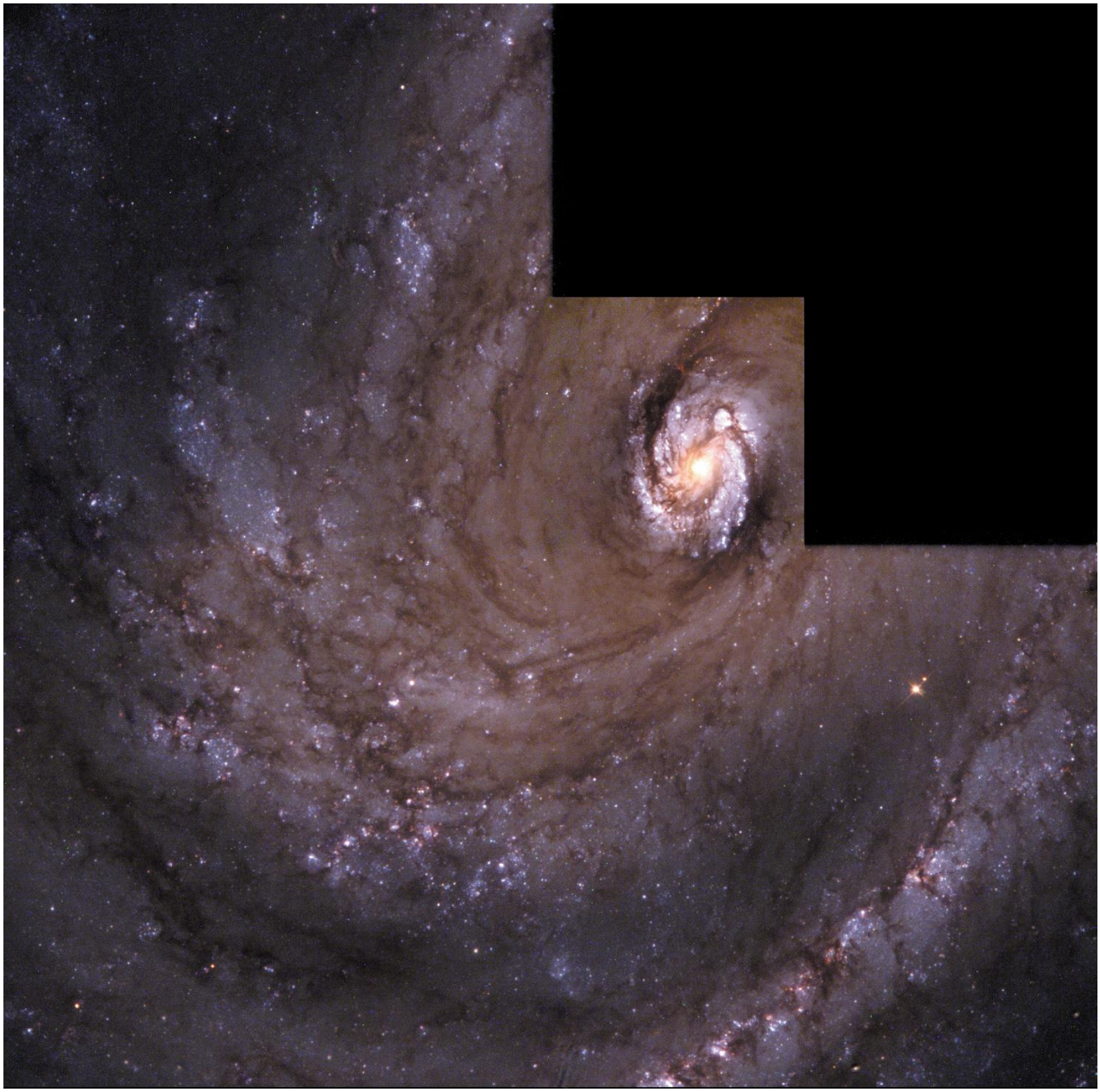
Nejpřesnější měření rychlosti pohybu i vzdálenosti byly přirozeně provedeny pro objekty, které jsou relativně blízko Mléčné dráhy. Dříve, než začal pracovat Hubbleův vesmírný dalekohled, pozemské observatoře objevili Cefeidy v galaxiích vzdálených až 3,5 Mpc od našeho Slunce (viz definice megaparseku v matematických nástrojích). U takovýchto vzdáleností ale vstupuje do hry vliv další rychlosti. Galaxie se vzájemně gravitačně přitahují a to představuje nerovnoměrně rozloženou složku pohybu, což ovlivňuje naše měření jednotné části rychlosti, vyplývající z rozpínání vesmíru. Tato

Úvod

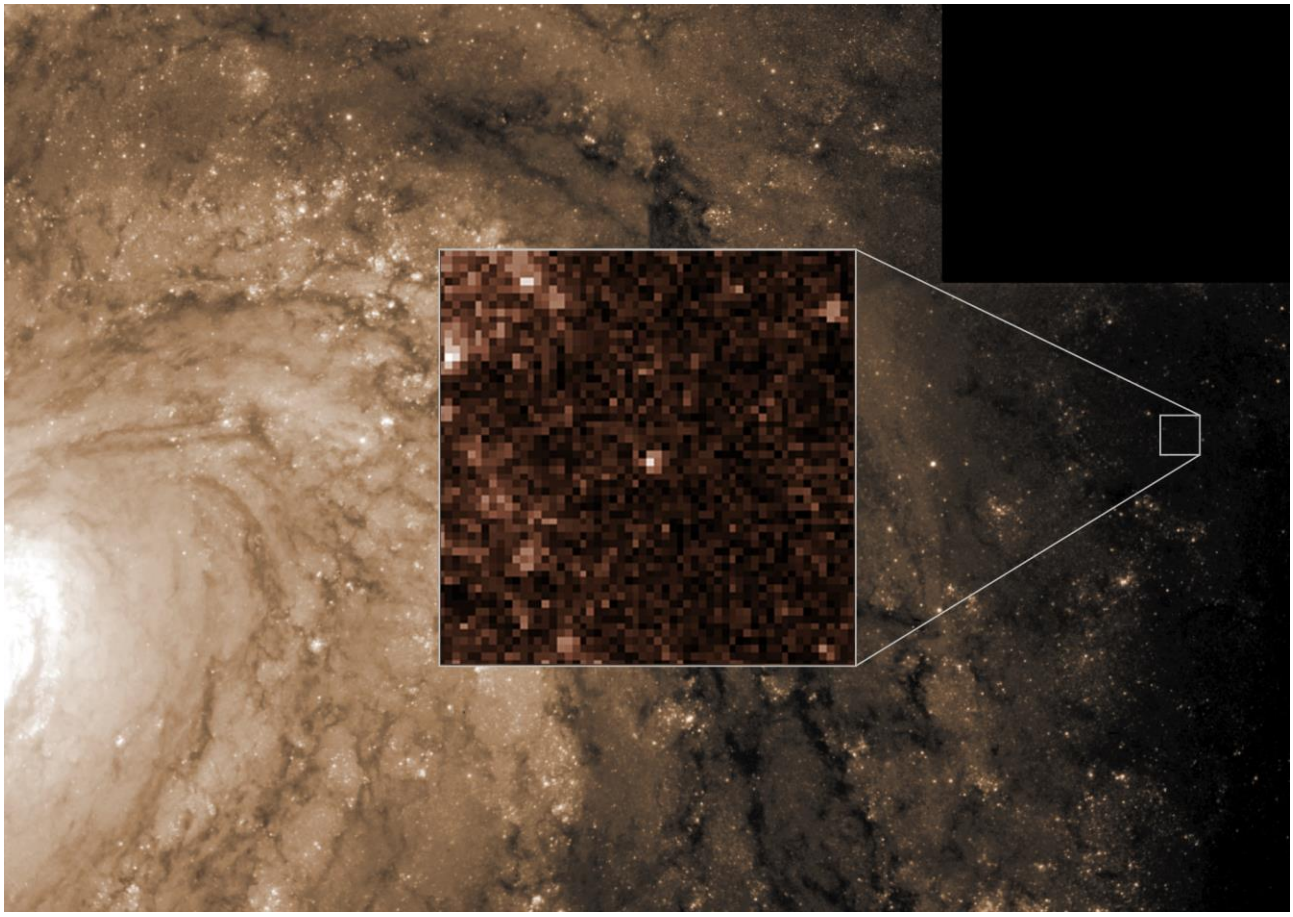
nerovnoměrně rozložená složka rychlosti je známá jako radiální rychlost a její účinek je srovnatelný s rychlostí rozpínání v naší místní části vesmíru. Aby bylo možné studovat celkovou expanzi vesmíru, je nutné spolehlivě určovat vzdálenosti vzdálených galaxií, u kterých je rychlost expanze mnohem vyšší než je radiální rychlost. Hubbleův vesmírný dalekohled nachází Cefeidy ve vzdálenostech až 20 Mpc.

Před tím, než Hubble byl v provozu, se astronomové přeli o to, zda je vesmír starý 10 nebo 20 miliard let. Nyní je shoda obecně mnohem větší – stáří vesmíru se uvádí mezi 12-ti a 14-ti miliardami let.

Jedno z klíčových zařízení Hubbleova vesmírného dalekohledu (HST) mělo jasný a dlouhodobý úkol. Co nejpřesnější určit Hubbleovu konstantu a tím i stáří vesmíru. Sledovat celkem 18 vzdálených galaxií proto, aby byly odhaleny všechny Cefeidy. Jednou z těchto galaxií je M 100.



Úvod

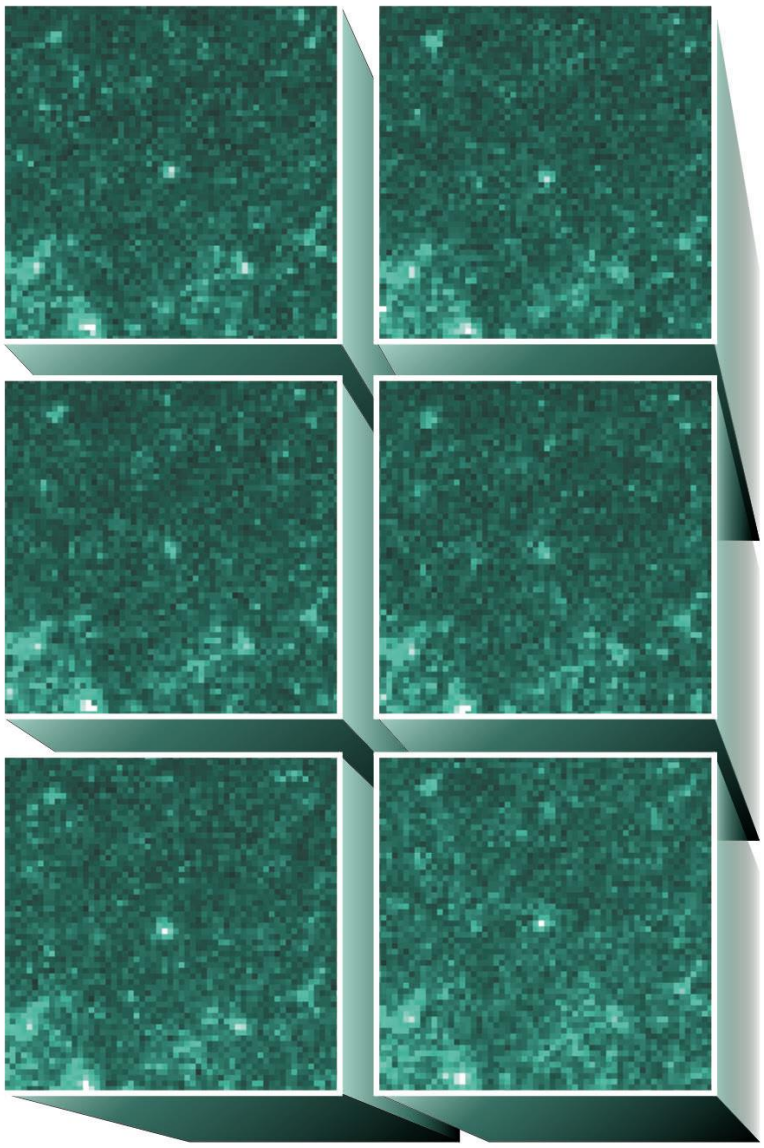


Obrázek 8: Hubble stopuje Cefeidy v M100
Kamera s vysokým rozlišením na HST detekovala a vybrala jednu z Cefeid používaných v tomto cvičení. Hvězda se nachází v oblasti bohaté na rození nových hvězd v jednom ze spirálních ramen galaxie (hvězda se nachází ve středu výřezu).

M100 a velká spirála

Galaxie M100 je velkolepá galaxie ve velké kupě galaxií v souhvězdí Panny. Tato kupa obsahuje 2500 galaxií. M100 je rotační systém plynu, prachu a hvězd podobný Mléčné dráze a je natočená v rovině kolmé ke směru od Země. Název vychází z faktu, že galaxie má číslo 100 v Messierově katalogu nehvězdných objektů. M100 je jedna z nejvzdálenějších galaxií, ve kterých bylo provedeno přesné měření Cefeid. Toto cvičení je založeno na snímcích HST a na datech této galaxie.

Cvičení



Obrázek 9: Cefeida v M100
Šest snímků, pořízených v různých časech, ukazuje jednu z Cefeid v galaxii M100. Hvězda je v centru každého snímku. Je zřejmé, že jasnost hvězdy se mění v čase.

Měření a výpočty

Závislost jasnosti Cefeid na periodě změny této jasnosti byl od doby prvního měření Henrietty Leavittové mnohokrát revidován. Nejlepší odhad tohoto vztahu je v současnosti:

$M = -2.78 \log(P) - 1.35$

kde M je absolutní hvězdná velikost a P je perioda měření ve dnech.

Na stranách 9 a 10 se nacházejí světelné křivky pro 12 Cefeid z galaxie M100, které měřil Hubbleův vesmírný dalekohled.

Cvičení 1

? Použitím těchto světelných křivek určete absolutní hvězdnou velikost M pro všech 12 hvězd.

Naším cílem je určit vzdálenost galaxie M100. Jestli si vzpomínáte na rovnici pro určení vzdálenosti, potom budete vědět, že absolutní hvězdná velikost M sama o sobě pro určení vzdálenosti nestačí. Musíme znát ještě zdánlivou hvězdnou velikost.

Cvičení

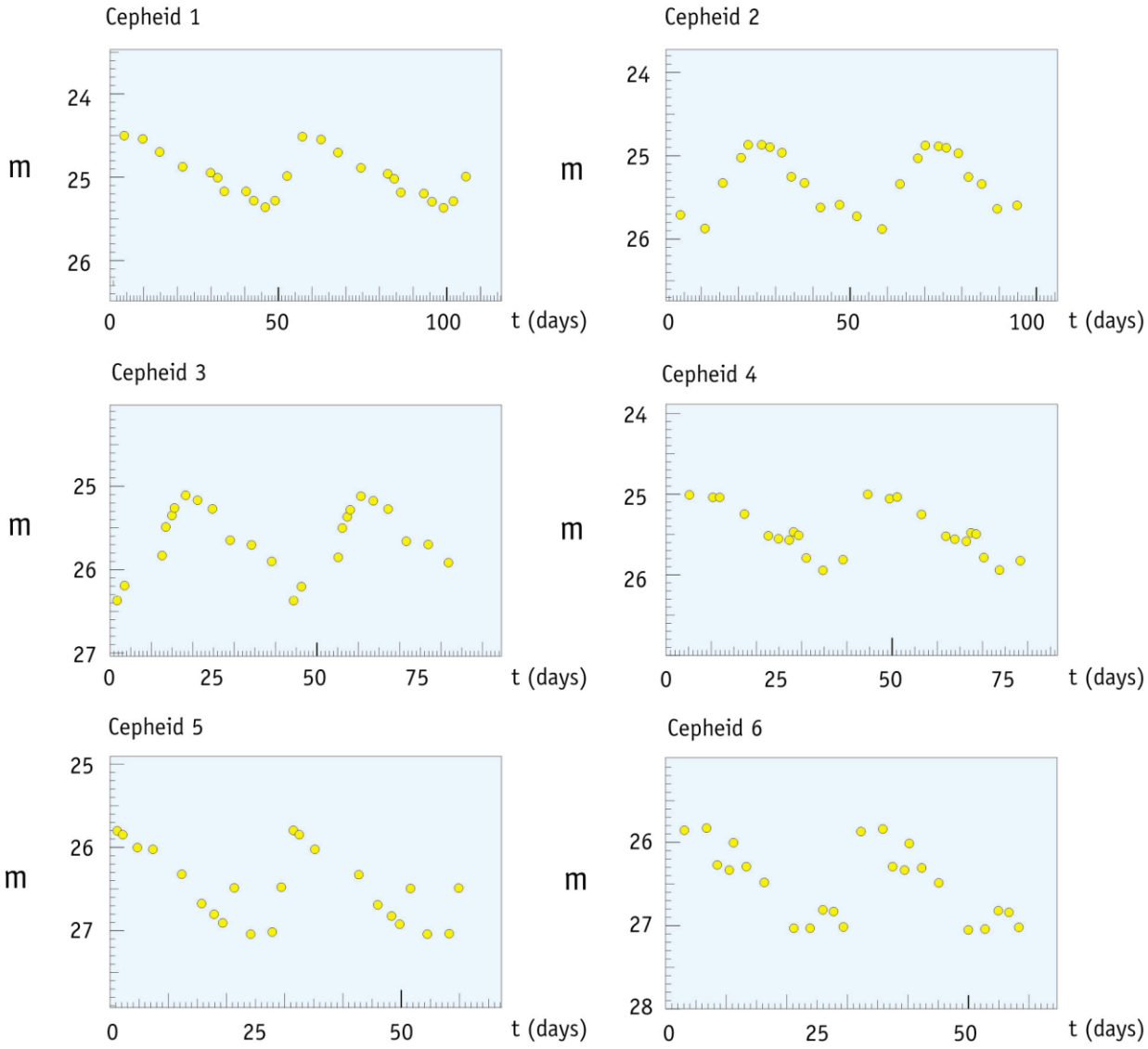
Kromě problémů s přesným měřením množství dopadajícího světla a kalibrováním změřených hvězdných velikostí, astronomové po sto let diskutovali o použití zdánlivé hvězdné velikosti *m*, která se v případě Cefeid mění.

Cvičení 2

? Přemýšlejte nad metodou pro určení zdánlivé hvězdné velikosti *m* použitím světelných křivek.

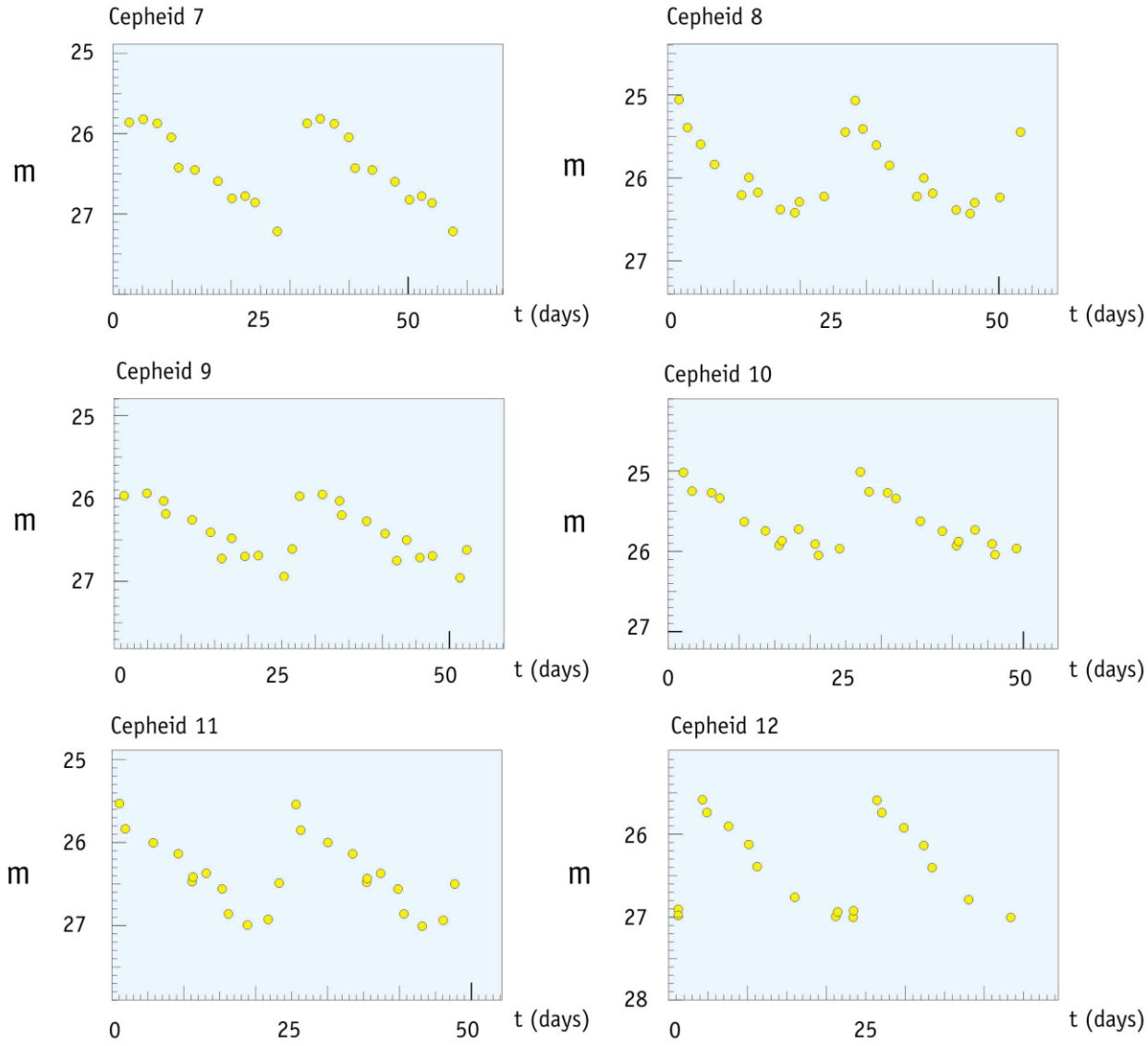
Na začátku 20. století astronomové určovali minimální zdánlivou hvězdnou velikost m_{min} a maximální hvězdnou velikost m_{max} a poté použili průměrnou hodnotu *m* těchto dvou měření.

Pokud to také uděláte – nebo použijete vlastní metodu – máte všechny informace pro určení vzdálenosti galaxie M100.



Obrázek 10: Světelné křivky Cefeid
Světelné křivky dvanácti Cefeid v galaxii M100, které pozoroval HST. Absolutní hvězdná velikost *M* je určená pomocí periody změny jasnosti. Upravené použito z Freedman a kol. (1994).

Cvičení



Pokračování obrázku 10: Světelné křivky Cefeid

Cvičení 3

? Určete *m* a *D* (v Mpc) pro každou Cefeidu.

Mohli byste samozřejmě provést výpočty dvanáctkrát pro každou proměnnou hvězdu. Nebo také můžete zkusit napsat jednoduchý program pro kalkulátor nebo požít nějaký tabulkový procesor (např. MS Excel).

Cvičení 4

? Zvažte pravděpodobné důvody, proč nenaleznete stejné vzdálenosti pro různé proměnné hvězdy.

Cvičení 5

? Určete *m* a *D* (v Mpc) pro každou Cefeidu.

Již jste určili vzdálenosti dvanácti různých proměnných hvězd v galaxii M100. Můžete z toho určit vzdálenost celé galaxie M100?

Cvičení

? Mohl by mít fakt, že každá z dvanácti Cefeid má jinou polohu v M100, vliv na různost vzdáleností od Země?.

? Zjistěte velikost Mléčné dráhy (můžete na příklad použít astronomickou knihu nebo internet). Předpokládejte, že M100 má srovnatelné rozměry. Nyní se pokuste odpovědět znovu na předchozí otázku.

Cvičení 6

? Vypočítejte střední vzdálenost všech dvanácti proměnných hvězd a uvažte ji jako vzdálenost M100.

? V původních vědeckých materiálech byla vzdálenost M100 určena z měření Hubbleova vesmírného dalekohledu. Hodnota tohoto měření je 17,1 ± 1,8 Megaparseků. Při určování této hodnoty byla vzata v úvahu přítomnost mezihvězdného prachu. Porovnejte své výsledky s touto hodnotou.

Cvičení 7

Jak si pamatujete z úvodu (strana 5), radiální rychlost v galaxie jako je M100 společně s informací o její vzdálenosti vám může dát odpověď na otázku na hodnotu obecné rychlosti rozpínání vesmíru, jak popisuje Hubbleova konstanta H_0. H_0 je vyjádřena v jednotkách km/s/Mpc. Radiální rychlost kupy galaxií v souhvězdí Panny, jejímž členem je M100, byla dříve určena na 1400 km/s (Freedman a kol., 1994).

? Určete Hubbleovu konstantu použitím zmíněné rychlosti v a průměrné vzdálenosti D.

Cvičení 8

? Za předpokladu, že stáří vesmíru t je určeno jako převrácená hodnota Hubbleovy konstanty, $t = 1/H_0$. Nezapomeňte převést na správné jednotky. Kolikrát je vesmír starší než Země?

Literatura

- Freedman, W.L., Madore, B.F., Mould, J.R., Ferrarese, L.; Hill, R., Kennicutt, R.C., Jr., Saha, A., Stetson, P.B., Graham, J.A., Ford, H., Hoessel, J.G., Huchra, J., Hughes, S.M., and Illingworth, G.D., 1994, Nature, 371, 757-762.: *Distance to the Virgo cluster galaxy M100 from Hubble Space Telescope observations of Cepheids.*

Další články najdete zde:
http://www.astroex.org/

Tiráž

EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY

Education and Public Relations Service

The ESA/ESO Astronomy Exercise Series
Exercise 2: The Distance to M100 as Determined by Cepheid Variable Stars
2nd edition (23.05.2002)

Produced by:
the Hubble European Space Agency Information Centre and the European Southern Observatory:
http://www.astroex.org
(Pdf-versions of this material and related weblinks are available at this address)

Postal address:
European Southern Observatory
Karl-Schwarzschild-Str. 2
D-85748 Garching bei München
Germany

Phone: +49 89 3200 6306 (or 3200 60)
Fax: +49 89 3200 64 80 (or 320 32 62)
E-mail: info@astroex.org

Text by:
Anne Værnholt Olesen, Lars Lindberg Christensen, Jean-Marc Brauer, and Arntraud Bacher

Graphics and layout:
Martin Kornmesser

Proof Reading:
Anne Rhodes and Jesper Sollerman

Co-ordination:
Lars Lindberg Christensen and Richard West

Thanks to the Tycho Brahe Planetarium, Denmark, for inspiration, to Wendy Freedman for providing the data, and to Nina Troelsgaard Jensen, Frederiksberg Seminarium, for comments.

Poznámky pro učitele

Rychlý přehled

V tomto cvičení měříme periodu pulzace a zdánlivou hvězdnou velikost proměnných hvězd – tzv. Cefeid, v galaxii M100. Absolutní hvězdná velikost je odvozena ze vztahu mezi periodou pulzace a intenzitou osvětlení a vzdálenost M100 potom může být určena pomocí rovnice pro vzdálenost objektů ve vesmíru. Konečně počítáme hodnotu Hubbleovy konstanty (s použitím hodnoty radiální rychlosti galaxie M100 pozorované jinými vědci) a dále odhadujeme stáří vesmíru.

Poznámky pro učitele obsahují řešení problémů společně s diskuzí o přiblíženích a zjednodušeních, které byly v textu provedeny.

Hypotéza, že vesmír expanduje od Velkého třesku konstantní rychlostí, je správná jen v jistých kosmologických modelech. Taková expanze je možná pouze tehdy, jestliže vesmír obsahuje velmi málo hmoty která, ať už viditelná nebo skrytá, gravitačně zpomaluje expanzi. Nedávné výsledky nevedly k žádným pevným závěrům týkajících se rychlosti rozpínání vesmíru, takže výraz použitý v tomto cvičení můžeme považovat za sice zjednodušený, ale dostatečně přesný.

Všimněte si, že vesmír prošel podle nedávných kosmologických modelů fází zpomalování expanze (vzhledem ke gravitačnímu působení temné a viditelné hmoty), které trvalo asi 5 miliard roků po Velkém třesku. Od té doby se zdá, že se nacházíme v období zrychlování expanze, jako by působil nějaká tajemná odpudivá gravitace. Tato síla je známá jako „Temná energie“ nebo „kvintesence“ (pátý element).

Cvičení 1, 2 a 3

Použitím metody navržené ve cvičení 2 a jednoduchým měření s pravítkem na papíře, získáme následující výsledky:

Číslo Cefeidy	t_2	t_1	perioda t_2-t_1	M	m_{max}	m_{min}	Průměrná hodnota m	D/Mpc	Průměrná hodnota D/Mpc
1	100,0	46,5	53,5	-6,15	24,50	25,30	24,90	16,25	19,85
2	58,5	11,0	47,5	-6,01	24,90	25,90	25,40	19,15	
3	61,0	18,5	42,5	-5,88	25,10	26,40	25,75	21,15	
4	74,0	35,0	39,0	-5,77	25,00	25,95	25,48	17,77	
5	50,0	19,0	31,0	-5,50	25,80	27,05	26,43	24,22	
6	50,0	21,0	29,0	-5,42	25,80	27,10	26,45	23,61	
7	35,0	4,5	30,5	-5,48	25,80	27,20	26,50	24,85	
8	46,0	19,0	27,0	-5,33	25,05	26,40	25,73	16,25	
9	31,0	5,0	26,0	-5,28	25,90	27,00	26,45	22,22	
10	27,0	2,5	24,5	-5,21	25,00	26,10	25,55	14,20	
11	43,0	19,0	24,0	-5,19	25,55	27,00	26,28	19,61	
12	38,0	16,0	22,0	-5,08	25,60	27,00	26,30	18,90	

Protože je M100 velmi vzdálená galaxie, jiné metody (jako je například vykreslování m(P)) nefungují dobře. Proto jsme vybrali vztah mezi periodou pulzace a intenzitou osvětlení, který umožňuje studentům odvodit dva koeficienty a ty potom použít ve zmíněné rovnici. Výsledkem je, že se cvičení může účastnit větší množství studentů – což považujeme za výhodu (v důsledku samozřejmě ☹).

Poznámky pro učitele

Cvičení 4

Prvním důvodem, který vyvstane na mysli je, že se jedná o normální nejistotu měření. Měření tohoto druhu, ručně prováděná, nejsou příliš přesná. Přesnost je možné zvýšit použitím rafinovanějších metod měření. Alternativně je možné použít dva různé druhy Cefeid, které mají poněkud odlišné vlastnosti.

Cvičení 5

Ano, nyní máme na základě relativně velkého vzorku Cefeid rozumný odhad vzdálenosti M100.
Ne, velikost galaxie M100 je malá ve srovnání s její vzdáleností.
Mléčná dráha má průměr přibližně 25 kpc. Odpověď na předchozí otázku: rozhodně ještě ne.

Cvičení 6

Hodnota 19,8 Mpc, určená pomocí metody zde použité, je docela rozumná.
Otázka byla položená proto, aby si studenti uvědomili, že nejistoty měření jsou součástí mnoha přírodních věd a toto se týká zcela jistě i astronomie.

Cvičení 7

$H_0 = v/D$ = 1400/19,85 = 70,53 km/s/Mpc

Tato hodnota je v přijatelném rozmezí. Obecně by se hodnota Hubbleovy konstanty měla pohybovat v rozmezí 60 až 80 km/s/Mpc.

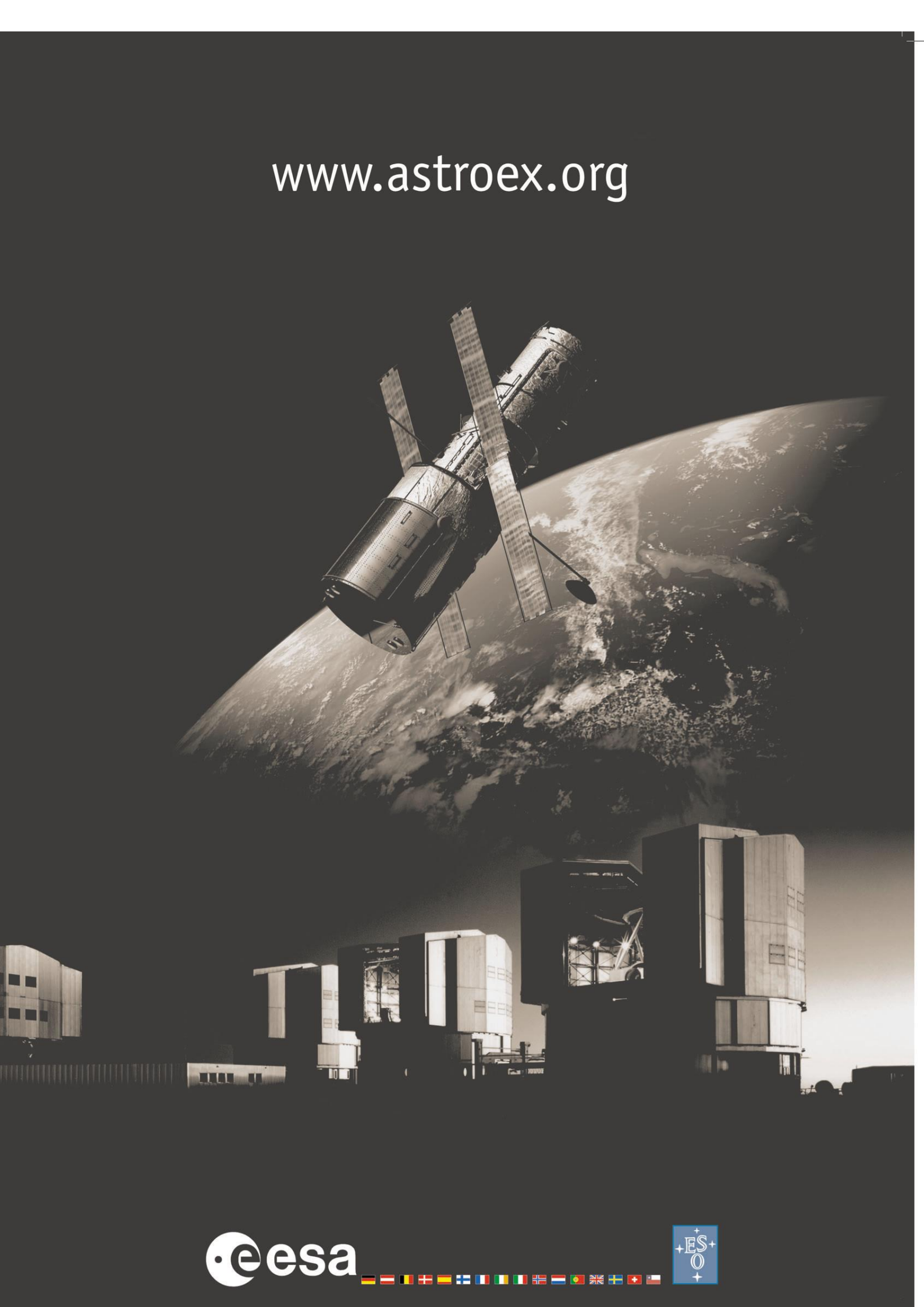
Cvičení 8

Použitím převodu mezi Mpc a km získáme pro H0 = $2{,}286.10^{-18}$ s^{-1}.

$t = 1/H_0 = 4{,}375.10^{17}$ s = $13{,}87.10^{9}$ roků.

To je zhruba trojnásobek stáří Země (asi 4,6 miliard roků). Tato otázka byla položena proto, aby studenti mohli porovnat stáří vesmíru s něčím, co už znali dříve.

www.astroex.org



esa

ESO