



Astrofyzika VII. cvičení
Extragalaktická astronomie

Vladimír Štefl
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Kosmologický posuv

Úloha 13.3 Které z emisních čar v následující tabulce můžeme z povrchu Země pozorovat v optickém oboru spektra u kvasaru s následujícím rudým posuvem

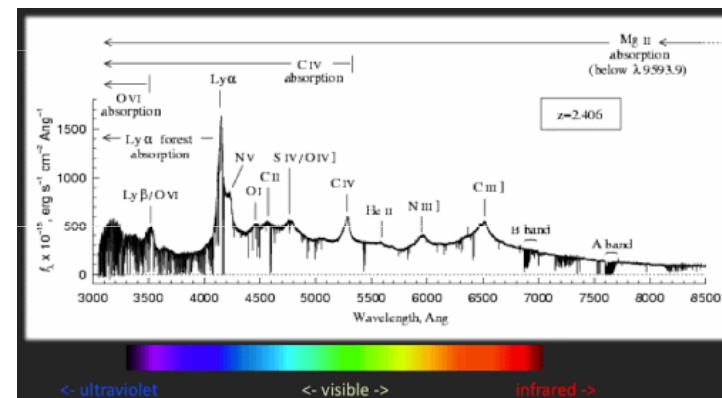
- a) $z = 0,1$
- b) $z = 1,0$
- c) $z = 4,0$.

Tabulka hlavních emisních čar u aktivních galaxií a kvasarů:

L_{α}	121,6 nm	H_{β}	486,1 nm
N V	124,0 nm	O III	495,9 nm
C IV	154,9 nm	O III	500,7 nm
C III	190,9 nm	N II	654,8 nm
Mg II	279,8 nm	H_{α}	656,3 nm
O II	372,7 nm	N II	658,4 nm
Ne III	386,8 nm	S II	671,7 nm
H_{δ}	410,2 nm	S II	673,1 nm
H_{γ}	434,1 nm		

Řešení: Při výběru vhodných čar vyjdeme ze vztahu $(z + 1) \lambda_l = \lambda_p$, kde λ_p musí být v optické části spektra. Tedy v případě a) všechny čáry od Ne III, b) čáry C III až po čáru Ne III, c) čáry L_{α} až C IV.

výklad vzniku čar



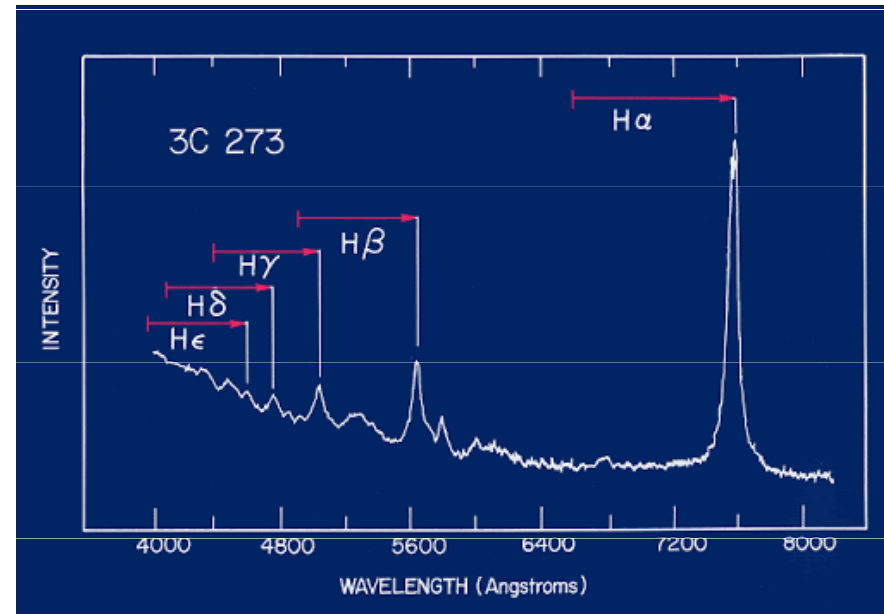
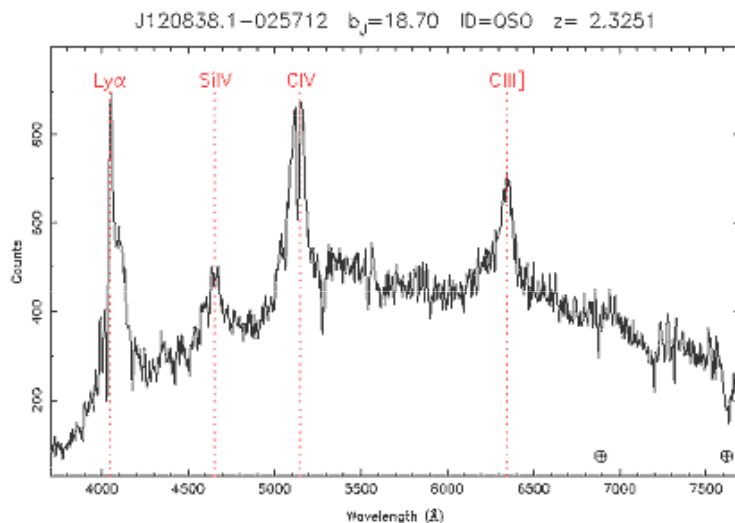
Kosmologický rudý posuv

Úloha 13.4 Ve spektru kvasaru byl optickou spektroskopií zjištěn rudý posuv $z = 2,5$. Které emisní čáry byly při tomto zjištění použity? Viz tabulka předcházející úlohy.

Řešení: Využijeme vztah $(z + 1) \lambda_l = \lambda_p$. Nejvhodnější a nejčastěji používanou čarou je L_α .

Úloha 13.5 Ve spektru kvasaru 3C 273 byly zjištěny široké intenzivní emisní čáry o naměřených vlnových délkách 761,3 nm, 563,9 nm a 503,4 nm. Určete, kterém prvku náleží. Stanovte vzdálenost kvasaru. Jaký je jeho zářivý výkon, jestliže hustota zářivého toku zjištěná v horních vrstvách atmosféry Země je rovna $6,2 \cdot 10^{-14} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Řešení: Použitím vztahu $(z + 1) \lambda_l = \lambda_p$ zjistíme, že jde postupně o čáry H_α , H_β , H_γ vodíku. Vzdálenost je $r = cz/H = 640 \text{ Mpc}$. Zářivý výkon kvasaru stanovíme ze vztahu $L = 4\pi r^2 F_{\text{bol}} = 3 \cdot 10^{38} \text{ W}$.

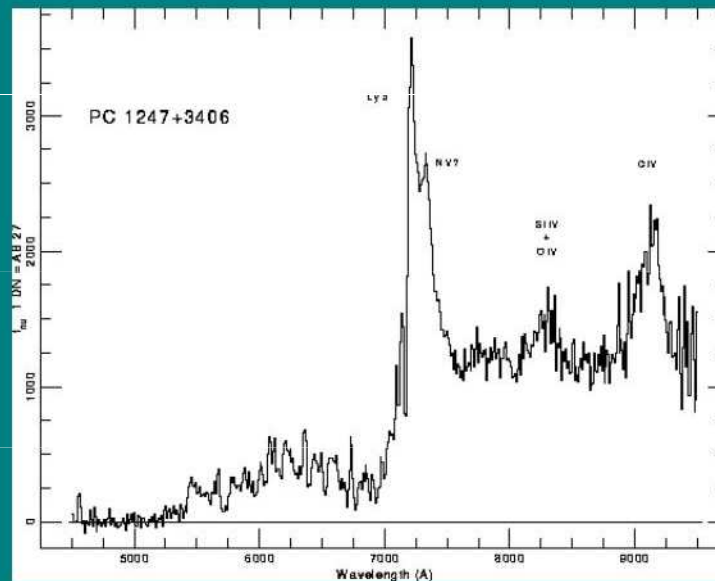


Hubbleův - Lemaitrův zákon

Úloha 13.19 U kvasaru PC 1247+3406 byly ve spektru identifikovány emisní vodíkové čáry, mimo jiných také čára L_{α} $\lambda_l = 121,6 \text{ nm}$. Detekována na Zemi má čára vlnovou délku $\lambda_p = 721,4 \text{ nm}$. Určete rychlost vzdalování kvasaru.

Řešení: Při hodnotě $z = \frac{\lambda_p - \lambda_l}{\lambda_l} = 4,93$ je rychlost $v = c \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1} = 0,95c$.

Un spectre de quasar lointain :
PC 1247+3406, $z=4.897$

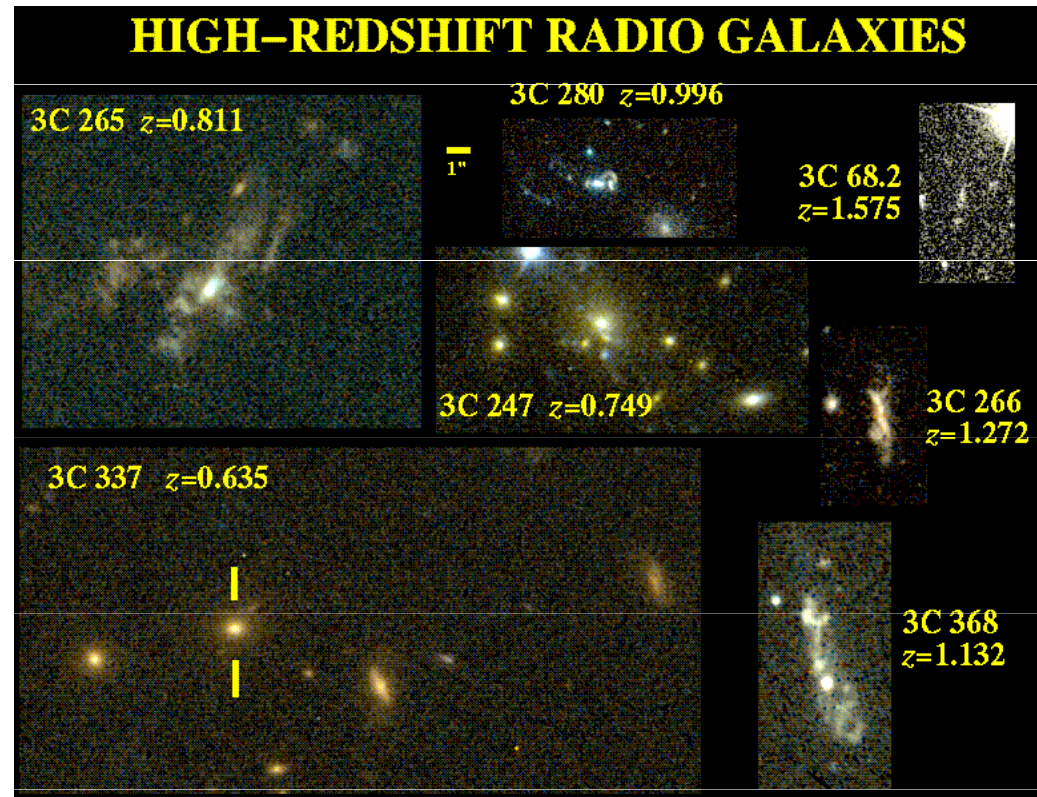
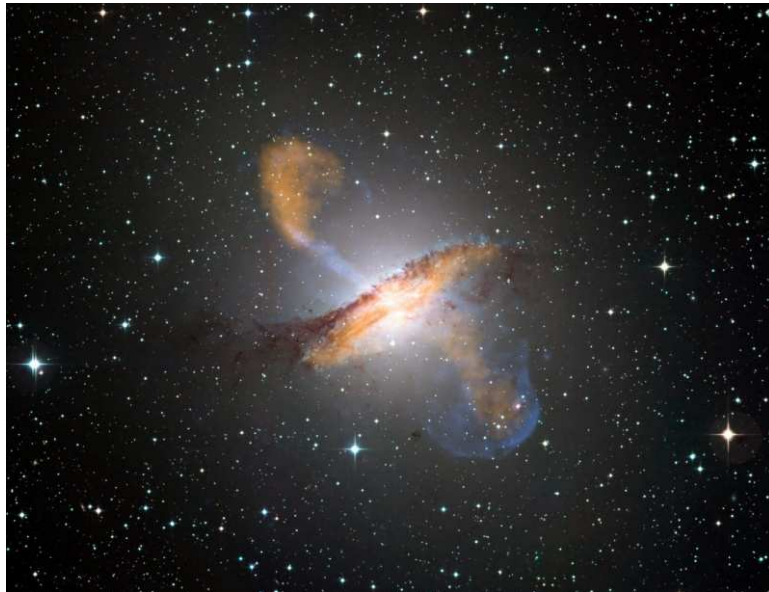


Schneider et al. 1991, AJ 102, 837

Hubbleův - Lemaitrův zákon

Úloha 13.17 Rádiový zdroj v jádře aktivní galaxie má úhlovou velikost $0,001''$, kosmologický rudý posuvu je $z = 0,5$. Určete lineární rozměry zdroje v pc.

Řešení: Rychlost vzdalování stanovíme ze vztahu $v = c \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1} = 0,38c$. Vzdálenost určíme z Hubbleova zákona $r = \frac{v}{H} = 1500 \text{ Mpc}$. Skutečná lineární velikost zdroje je $D = 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^9 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ AU} = 7,5 \text{ pc}$.



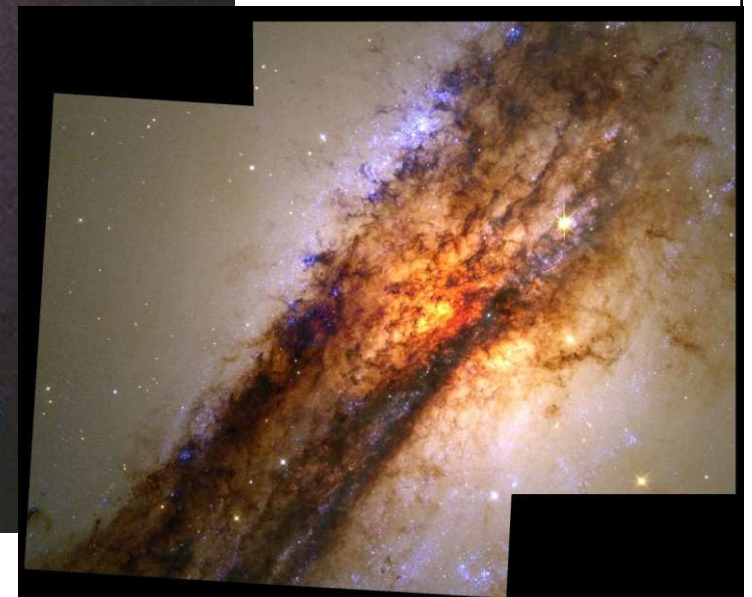
Rádiová galaxie Centaurus A - NGC 5128

$r = 4,0 \text{ Mpc}$

$v_r = 547 \text{ km.s}^{-1}$

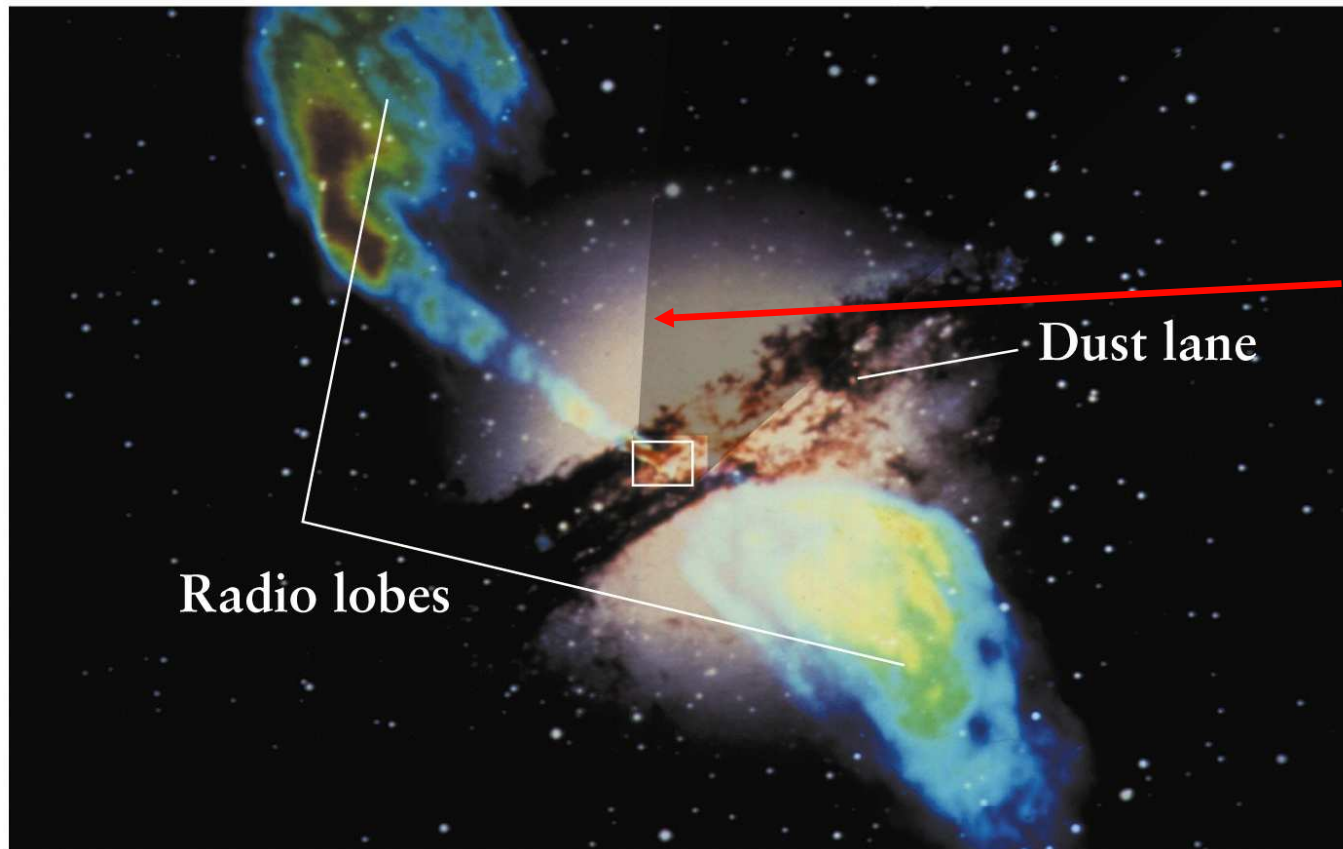
srážka galaxií

uprostřed černá díra $5 \cdot 10^7 M_\odot$
pozorování klasických cefeid $\rightarrow r$
aktivní jádro galaxie 10^{34} W



Rádiová galaxie Centaurus A

$$L \approx 10^{37} \text{ W}$$



Cen A v rtg. oboru



dva rádiové zdroje - laloky symetricky položené -
relativistické elektrony - mag. pole → synchrotronní zář.

Hubbleův - Lemaitrův zákon

Úloha 13.11 V kupě galaxií čítající asi 10 000 galaxií v souhvězdí Vlas Bereničín, byl u 100 nejjasnějších galaxií spektroskopicky zjištěn průměrný rudý posuv $\langle z \rangle = 0,0232$. Při znalosti Hubbleovy konstanty $H = 75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ určete vzdálenost kupy galaxií.

Řešení: Rychlost vzdalování je $v = cz = 6\,960 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, vzdálenost $r = v/H = 93 \text{ Mpc}$.



Černá díra v jádře Galaxie

Úloha 13.9 Odhadněte hmotnost černé díry v jádře Galaxie, jestliže bylo zjištěno, že oběžné doby hvězd obíhajících ve vzdálenosti 275 AU od jádra jsou 2,8 roku.

Řešení: Hmotnost centrálního tělesa – černé díry určíme z III. Keplerova zákona v přesném tvaru $M \cong \frac{R^3}{G} \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cong 2,6 \cdot 10^6 M_{\odot}$.

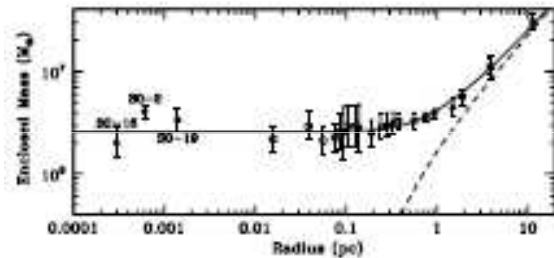


Fig. 3 Enclosed mass as a function of radius. The masses from the individual star's orbital motion agree both with one another and the earlier estimates based on velocity dispersion measurements. The solid line shows the best fit black hole plus luminous cluster model based on the earlier measurements. The new orbital masses increases the central dark mass density by 4 orders of magnitude, dramatically strengthening the case for a central supermassive black hole.

Table 1 Estimates of the central dark mass from fits to the stellar orbital motion. The reported values come from fits that solve for a common center of attraction and assume a distance of 8 kpc. Only solutions with fractional uncertainties less than 30% are listed here.

Star	Mass ($10^6 M_{\odot}$)
S0-2	4.1 ± 0.6
S0-16	3.0 ± 0.7
S0-19	3.4 ± 0.9
Average	3.6 ± 0.4

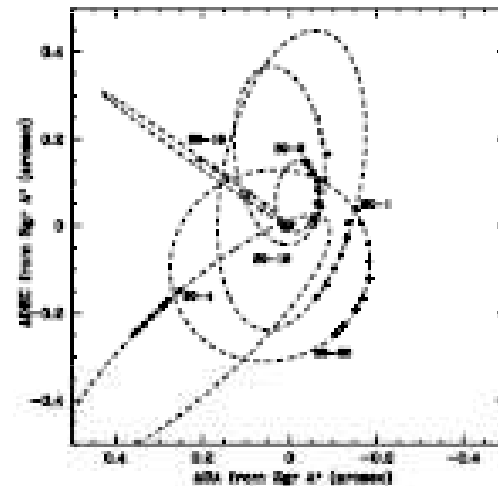
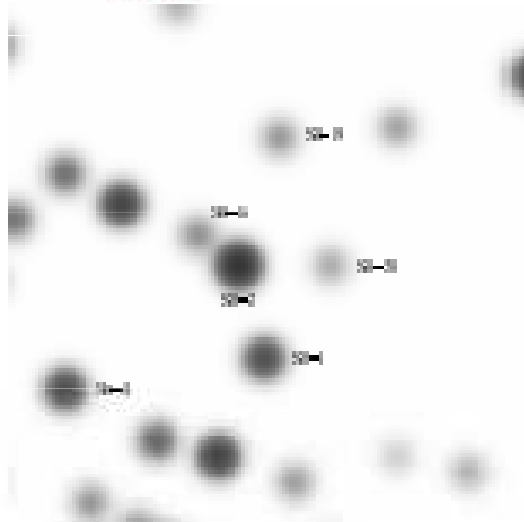
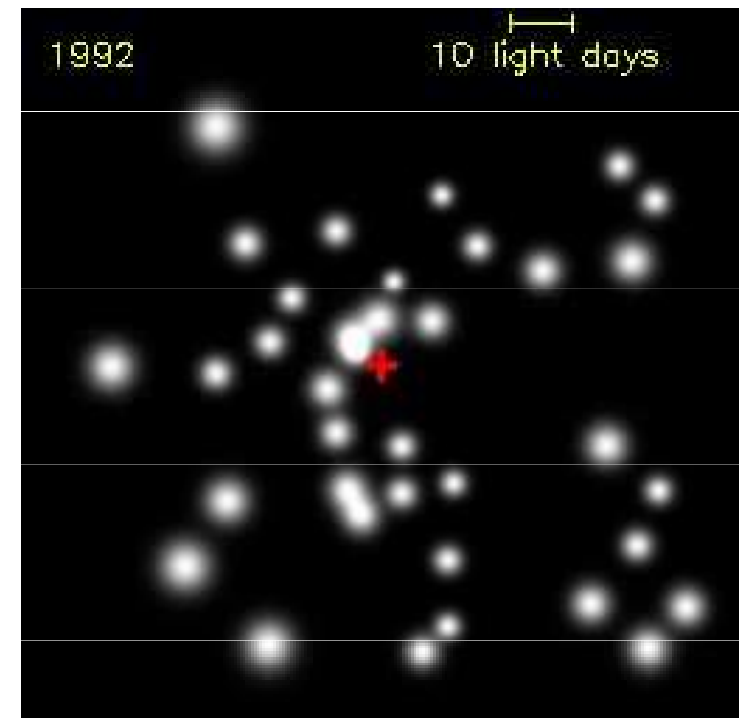


Fig. 1 (a) A $1'' \times 1''$ cleaned image centered on the nominal position of Sgr A* showing the 2001 positions of some of the stars that have been followed over the course of the Keck proper motion study. Three of the newly identified stars are S0-16, S0-19, and S0-20. (b) The annual positions of some of these stars with orbital solutions. Each star is labeled by its first measurement.

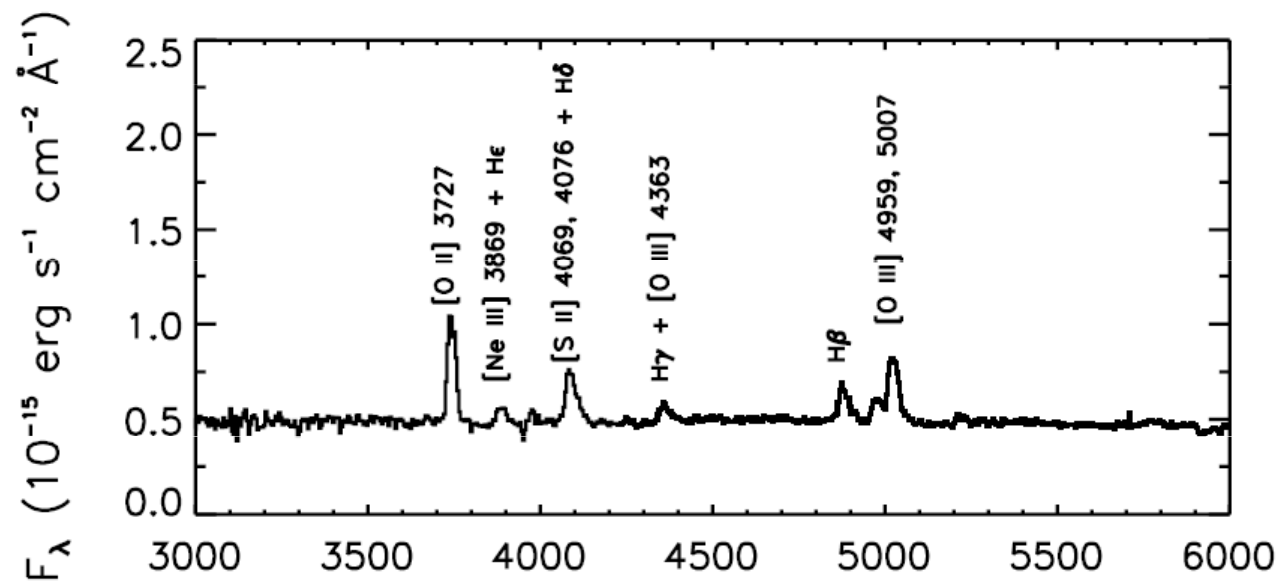


Černá díra v jádře M 87

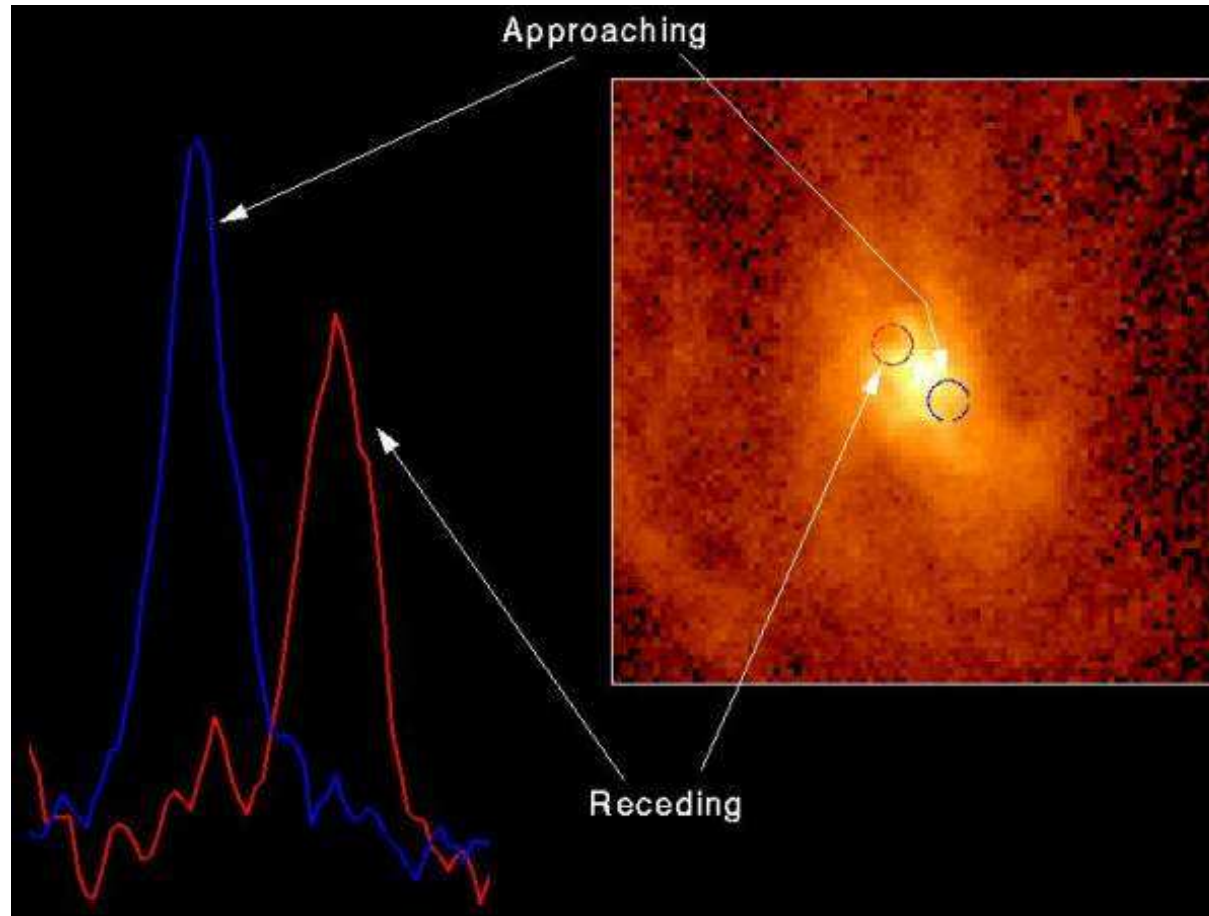
Úloha 13.15 Emisní čáry plynu ve středu gigantické eliptické galaxie M 87, NGC 4486 byly zkoumány spektrografem na Hubbleově kosmickém dalekohledu. Ze spektrální diagnostiky čáry O II 372,7 nm byla určena oběžná rychlost $500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ plynu při poloměru $0,25''$. Odhadněte hmotnost centrální oblasti uvnitř prstence. Za předpokladu, že se jedná o černou díru určete její Schwarzschildův poloměr. U galaxie M 87 byla zjištěna hodnota $z = 0,004$.

Řešení: Nejprve z Hubbleova zákona stanovíme vzdálenost $r = \frac{v}{H} = \frac{cz}{H} = 16 \text{ Mpc}$. Úhlový poloměr převedeme, $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$. Skutečný poloměr prstence je $R = \alpha r = 5,9 \cdot 10^{17} \text{ m}$. Při zanedbání hmotnosti látky vně disku a jejím sféricko-symetrickém rozložení můžeme psát $\frac{v^2}{R} = \frac{GM}{R^2} \Rightarrow M = \frac{v^2 R}{G} \cong 2 \cdot 10^{39} \text{ kg} \cong 10^9 M_{\odot}$. Dosazením do vztahu pro Schwarzschildův poloměr $R_S = \frac{2GM}{c^2} \cong 3 \cdot 10^{12} \text{ m} \cong 10^{-4} \text{ pc}$.

spektrograf STIS: spektrum jádra M 87



Černá díra v M 87



při $r = 16 \text{ pc} = 4,9 \cdot 10^{17} \text{ m}$, $i = 42^\circ$

$v_c \sin i = 460 \text{ km.s}^{-1}$, $v_c = 690 \text{ km.s}^{-1}$

$M = v_c^2 r / G \approx 4 \cdot 10^{39} \text{ kg} \approx 2 \cdot 10^9 M_S$

Černá díra v M 87

First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole

The Event Horizon Telescope Collaboration

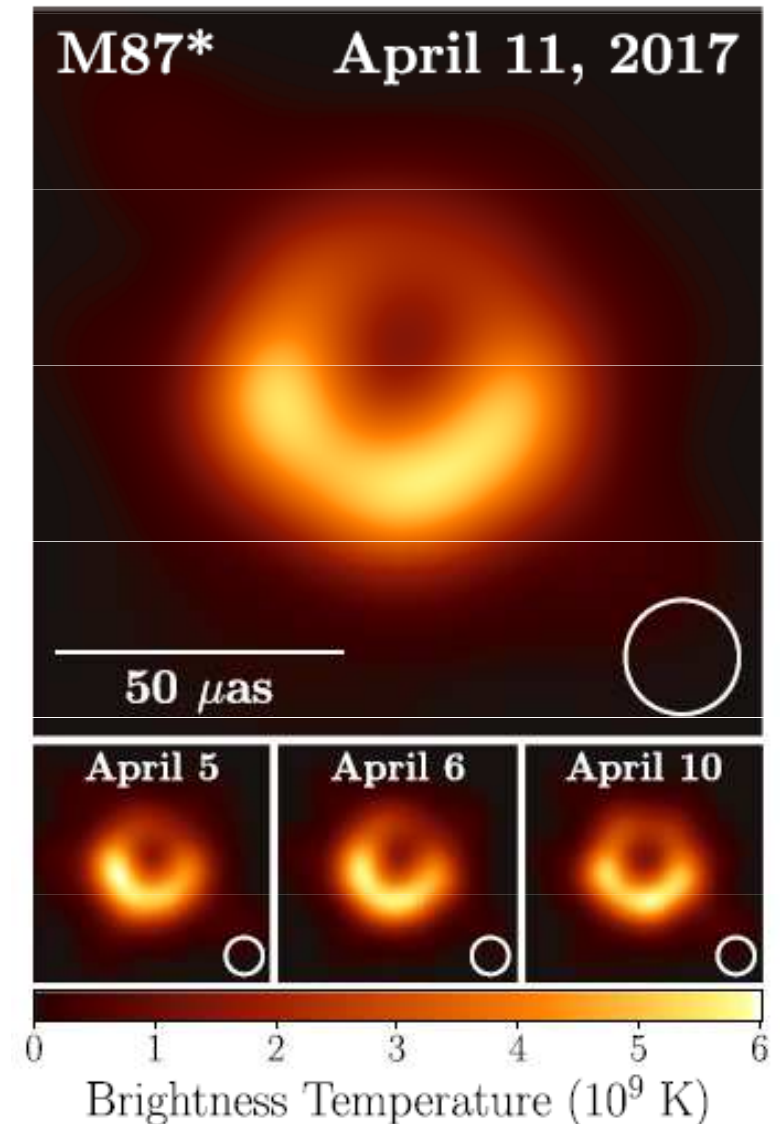
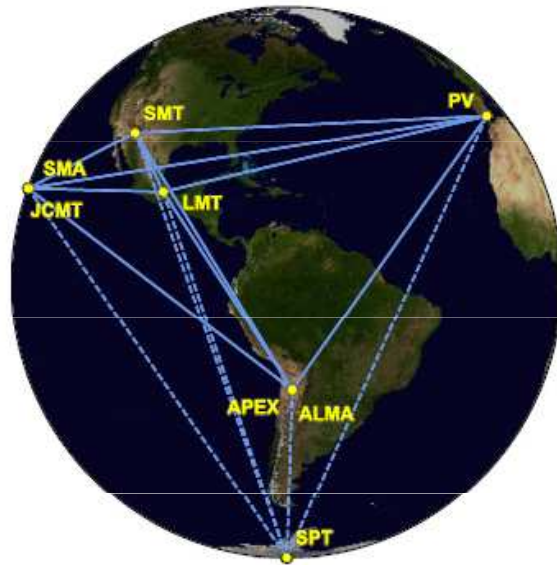
(See the end matter for the full list of authors.)

Received 2019 March 1; revised 2019 March 12; accepted 2019 March 12; published 2019 April 10.

Abstract

When surrounded by a transparent emission region, black holes are expected to reveal a dark shadow caused by gravitational light bending and photon capture at the event horizon. To image and study this phenomenon, we have assembled the Event Horizon Telescope, a global very long baseline interferometry array observing at a wavelength of 1.3 mm. This allows us to reconstruct event-horizon-scale images of the supermassive black hole candidate in the center of the giant elliptical galaxy M87. We have resolved the central compact radio source as an asymmetric bright emission ring with a diameter of $42 \pm 3 \mu\text{as}$, which is circular and encompasses a central depression in brightness with a flux ratio $\gtrsim 10:1$. The emission ring is recovered using different calibration and imaging schemes, with its diameter and width remaining stable over four different observations carried out in different days. Overall, the observed image is consistent with expectations for the shadow of a Kerr black hole as predicted by general relativity. The asymmetry in brightness in the ring can be explained in terms of relativistic beaming of the emission from a plasma rotating close to the speed of light around a black hole. We compare our images to an extensive library of ray-traced general-relativistic magnetohydrodynamic simulations of black holes and derive a central mass of $M = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_{\odot}$. Our radio-wave observations thus provide powerful evidence for the presence of supermassive black holes in centers of galaxies and as the central engines of active galactic nuclei. They also present a new tool to explore gravity in its most extreme limit and on a mass scale that was so far not accessible.

Key words: accretion, accretion disks – black hole physics – galaxies: active – galaxies: individual (M87) – galaxies: jets – gravitation






















Černá díra v M 87 - kolektiv autorů

Table 1
Parameters of M87^a

Parameter	Estimate
Ring diameter ^a d	$42 \pm 3 \mu\text{as}$
Ring width ^a	$< 20 \mu\text{as}$
Crescent contrast ^b	$> 10:1$
Axial ratio ^a	$< 4:3$
Orientation PA	$150^\circ - 200^\circ$ east of north
$\theta_g = GM/De^2$ ^c	$3.8 \pm 0.4 \mu\text{as}$
$\alpha = d/\theta_g$ ^d	$11^{+0.5}_{-0.3}$
M^e	$(6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_\odot$

Parameter	Prior Estimate
D^e	$(16.8 \pm 0.8) \text{ Mpc}$
$M(\text{stars})^e$	$6.2^{+1.1}_{-0.6} \times 10^9 M_\odot$
$M(\text{gas})^e$	$3.5^{+0.9}_{-0.3} \times 10^9 M_\odot$

The Event Horizon Telescope Collaboration,

Kazunori Akiyama^{1,2,3,4} , Antxon Alberdi⁵ , Walter Alef⁶, Keiichi Asada⁷, Rebecca Azulay^{8,9,6} , Anne-Kathrin Baczko⁶ ,
David Ball¹⁰, Mislav Baloković^{4,11} , John Barrett² , Dan Bintley¹², Lindy Blackburn^{4,11} , Wilfred Boland¹³,
Katherine L. Bouman^{4,11,14} , Geoffrey C. Bower¹⁵ , Michael Bremer¹⁶, Christiaan D. Brinkerink¹⁷ , Roger Brissenden^{4,11} ,
Silke Britzen⁶ , Avery E. Broderick^{18,19,20} , Dominique Brogiere¹⁶, Thomas Bronzwaer¹⁷, Do-Young Byun^{21,22} ,
John E. Carlstrom^{23,24,25,26}, Andrew Chael^{4,11} , Chi-kwan Chan^{10,27} , Shami Chatterjee²⁸ , Koushik Chatterjee²⁹,
Ming-Tang Chen¹⁵, Yongjun Chen (陈永军)^{30,31}, Ilje Cho^{21,22} , Pierre Christian^{10,11} , John E. Conway³² , James M. Cordes²⁸,
Geoffrey B. Crew² , Yuzhu Cui^{33,34} , Jordy Davelaar¹⁷ , Mariafelicia De Laurentis^{35,36,37} , Roger Deane^{38,39} ,
Jessica Dempsey¹² , Gregory Desvignes⁶ , Jason Dexter⁴⁰ , Sheperd S. Doeleman^{4,11} , Ralph P. Eatough⁶ ,
Heino Falcke¹⁷ , Vincent L. Fish² , Ed Fomalont¹, Raquel Fraga-Encinas¹⁷ , William T. Freeman^{41,42}, Per Friberg¹²,
Christian M. Fromm³⁶, José L. Gómez⁵ , Peter Galison^{4,43,44} , Charles F. Gammie^{45,46} , Roberto García¹⁶, Olivier Gentaz¹⁶,
Boris Georgiev^{19,20} , Ciriaco Goddi^{17,47}, Roman Gold³⁶ , Minfeng Gu (顾敏峰)^{30,48} , Mark Gurwell¹¹ ,
Kazuhiro Hada^{33,34} , Michael H. Hecht², Ronald Hesper⁴⁹ , Luis C. Ho (何子山)^{50,51} , Paul Ho⁷, Mareki Honma^{33,34} ,
Chih-Wei L. Huang⁷ , Lei Huang (黄磊)^{30,48}, David H. Hughes⁵², Shiro Ikeda^{3,53,54,55} , Makoto Inoue⁷, Sara Issaoun¹⁷ 

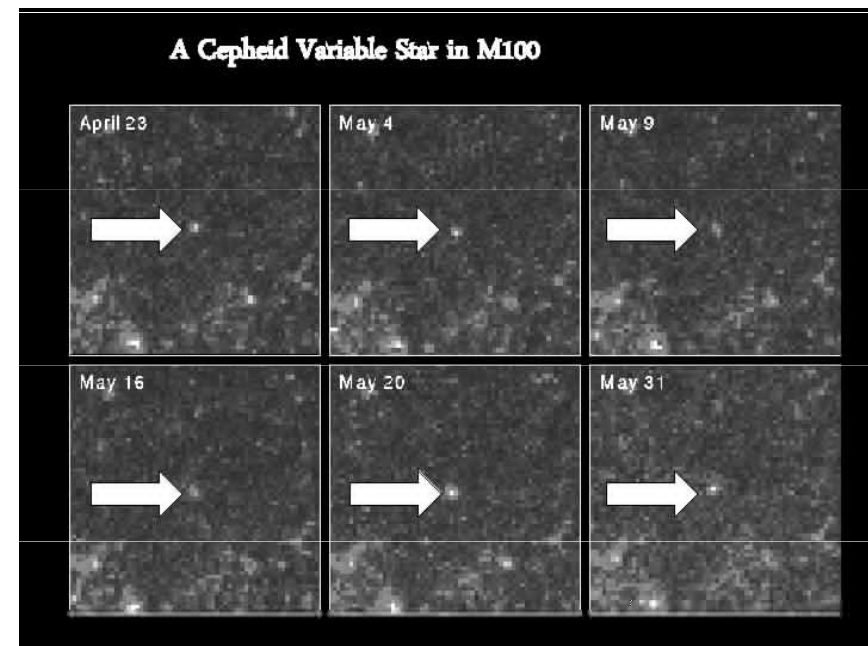
Černá díra v M 87 – kolektiv autorů

David J. James^{4,11}, Buell T. Jannuzi¹⁰, Michael Janssen¹⁷, Britton Jeter^{19,20}, Wu Jiang (江悟)³⁰,
Michael D. Johnson^{4,11}, Svetlana Jorstad^{56,57}, Tachyun Jung^{21,22}, Mansour Karami^{18,19}, Ramesh Karuppusamy⁶,
Tomohisa Kawashima³, Garrett K. Keating¹¹, Mark Kettenis⁵⁸, Jae-Young Kim⁶, Junhan Kim¹⁰, Jongsoo Kim²¹,
Motoki Kino^{3,59}, Jun Yi Koay⁷, Patrick M. Koch⁷, Shoko Koyama⁷, Michael Kramer⁶, Carsten Kramer¹⁶,
Thomas P. Krichbaum⁶, Cheng-Yu Kuo⁶⁰, Tod R. Lauer⁶¹, Sang-Sung Lee²¹, Yan-Rong Li (李彦荣)⁶²,
Zhiyuan Li (李志远)^{63,64}, Michael Lindqvist³², Kuo Liu⁶, Elisabetta Liuzzo⁶⁵, Wen-Ping Lo^{7,66}, Andrei P. Lobanov⁶,
Laurent Loinard^{67,68}, Colin Lonsdale², Ru-Sen Lu (路如森)^{30,6}, Nicholas R. MacDonald⁶, Jirong Mao (毛基荣)^{69,70,71},
Sera Markoff^{29,72}, Daniel P. Marrone¹⁰, Alan P. Marscher⁵⁶, Iván Martí-Vidal^{32,73}, Satoki Matsushita⁷,
Lynn D. Matthews², Lia Medeiros^{10,74}, Karl M. Menten⁶, Yosuke Mizuno³⁶, Izumi Mizuno¹², James M. Moran^{4,11},
Kotaro Moriyama^{33,2}, Monika Moscibrodzka¹⁷, Cornelia Müller^{6,17}, Hiroshi Nagai^{3,34}, Neil M. Nagar⁷⁵,
Masanori Nakamura⁷, Ramesh Narayan^{4,11}, Gopal Narayanan⁷⁶, Iniyar Natarajan³⁹, Roberto Neri¹⁶, Chunchong Ni^{19,20},
Aristeidis Noutsos⁶, Hiroki Okino^{33,77}, Héctor Olivares³⁶, Gisela N. Ortiz-León⁶, Tomoaki Oyama³³, Feryal Özel¹⁰,
Daniel C. M. Palumbo^{4,11}, Nimesh Patel¹¹, Ue-Li Pen^{18,78,79,80}, Dominic W. Pesce^{4,11}, Vincent Piétu¹⁶,
Richard Plambeck⁸¹, Aleksandar PopStefanija⁷⁶, Oliver Porth^{29,36}, Ben Prather⁴⁵, Jorge A. Preciado-López¹⁸,
Dimitrios Psaltis¹⁰, Hung-Yi Pu¹⁸, Venkatesh Ramakrishnan⁷⁵, Ramprasad Rao¹⁵, Mark G. Rawlings¹²,
Alexander W. Raymond^{4,11}, Luciano Rezzolla³⁶, Bart Ripperda³⁶, Freck Roelofs¹⁷, Alan Rogers², Eduardo Ros⁶,
Mel Rose¹⁰, Arash Roshanineshat¹⁰, Helge Rottmann⁶, Alan L. Roy⁶, Chet Ruszczyk², Benjamin R. Ryan^{82,83},
Kazi L. J. Rygl⁶⁵, Salvador Sánchez⁸⁴, David Sánchez-Argüelles^{52,85}, Mahito Sasada^{33,86}, Tuomas Savolainen^{6,87,88},
F. Peter Schloerb⁷⁶, Karl-Friedrich Schuster¹⁶, Lijiang Shao^{6,51}, Zhiqiang Shen (沈志强)^{30,31}, Des Small⁵⁸,
Bong Won Sohn^{21,22,89}, Jason SooHoo², Fumie Tazaki³³, Paul Tiede^{19,20}, Remo P. J. Tilanus^{17,47,90}, Michael Titus²,
Kenji Toma^{91,92}, Pablo Tome^{6,84}, Tyler Trent¹⁰, Sascha Trippe⁹³, Shuichiro Tsuda³³, Ilse van Bemmelen⁵⁸,
Huib Jan van Langevelde^{58,94}, Daniel R. van Rossum¹⁷, Jan Wagner⁶, John Wardle⁹⁵, Jonathan Weintroub^{4,11},
Norbert Wex⁶, Robert Wharton⁶, Maciek Wielgus^{4,11}, George N. Wong⁴⁵, Qingwen Wu (吴庆文)⁹⁶, Ken Young¹¹,
André Young¹⁷, Ziri Younsi^{97,36}, Feng Yuan (袁峰)^{30,48,98}, Ye-Fei Yuan (袁业飞)⁹⁹, J. Anton Zensus⁶,
Guangyao Zhao²¹, Shan-Shan Zhao^{17,63}, Ziyang Zhu⁴⁴, Juan-Carlos Algaba^{7,100}, Alexander Allardi¹⁰¹, Rodrigo Amestica¹⁰²,
Jadyn Anczarski¹⁰³, Uwe Bach⁶, Frederick K. Baganoff¹⁰⁴, Christopher Beaudoin², Bradford A. Benson^{26,24},
Ryan Berthold¹², Jay M. Blanchard^{75,58}, Ray Blundell¹¹, Sandra Bustamente¹⁰⁵, Roger Cappallo²,
Edgar Castillo-Domínguez^{105,106}, Chih-Cheng Chang^{7,107}, Shu-Hao Chang⁷, Song-Chu Chang¹⁰⁷, Chung-Chen Chen⁷,
Ryan Chilson¹⁵, Tim C. Chuter¹², Rodrigo Córdoba Rosado^{4,11}, Iain M. Coulson¹², Thomas M. Crawford^{24,25},
Joseph Crowley¹⁰⁸, John David⁸⁴, Mark Derome², Matthew Dexter¹⁰⁹, Sven Dornbusch⁶, Kevin A. Duvetoir^{2,144},
Sergio A. Dzib⁶, Andreas Eckart^{6,110}, Chris Eckert², Neal R. Erickson⁷⁶, Wendeline B. Everett¹¹¹, Aaron Faber¹¹²,
Joseph R. Farah^{4,11,113}, Vernon Fath⁷⁶, Thomas W. Folkers¹⁰, David C. Forbes¹⁰, Robert Freund¹⁰, Arturo I. Gómez-Ruiz^{105,106},
David M. Gale¹⁰⁵, Feng Gao^{30,40}, Gertie Geertsema¹¹⁴, David A. Graham⁶, Christopher H. Greer¹⁰, Ronald Grosslein⁷⁶,
Frédéric Gueth¹⁶, Daryl Haggard^{115,116,117}, Nils W. Halverson¹¹⁸, Chih-Chiang Han⁷, Kuo-Chang Han¹⁰⁷, Jinchi Hao¹⁰⁷,
Yutaka Hasegawa⁷, Jason W. Henning^{23,119}, Antonio Hernández-Gómez^{67,120}, Rubén Herrero-Illana¹²¹, Stefan Heyminck⁶,
Akihiko Hirota^{3,7}, James Hoge¹², Yau-De Huang⁷, C. M. Violette Impellizzeri^{7,1}, Homin Jiang⁷, Atish Kamble^{4,11},
Ryan Keisler²⁵, Kimihiro Kimura⁷, Yusuke Kono³, Derek Kubo¹²², John Kuroda¹², Richard Lacasse¹⁰², Robert A. Laing¹²³,
Erik M. Leitch²³, Chao-Te Li⁷, Lupin C.-C. Lin^{7,124}, Ching-Tang Liu¹⁰⁷, Kuan-Yu Liu⁷, Li-Ming Lu¹⁰⁷, Ralph G. Marson¹²⁵,
Pierre L. Martín-Cocher⁷, Kyle D. Massingill¹⁰, Callie Matulonis¹², Martin P. McColl¹⁰, Stephen R. McWhirter²,
Hugo Messias^{121,126}, Zheng Meyer-Zhao^{7,127}, Daniel Michalik^{128,129}, Alfredo Montaña^{105,106}, William Montgomerie¹²,
Matias Mora-Klein¹⁰², Dirk Muders⁶, Andrew Nadolski¹⁴⁶, Santiago Navarro⁸⁴, Joseph Neilsen¹⁰³, Chi H. Nguyen^{10,130},
Hiroaki Nishioka⁷, Timothy Norton¹¹, Michael A. Nowak¹³¹, George Nyström¹⁵, Hideo Ogawa¹³², Peter Oshiro¹⁵,
Tomoaki Oyama¹³³, Harriet Parsons¹², Scott N. Paine¹¹, Juan Peñalver⁸⁴, Neil M. Phillips^{121,126}, Michael Poirier²,
Nicolas Pradel⁷, Rurik A. Primiani¹³⁴, Philippe A. Raffin¹⁵, Alexandra S. Rahlin^{23,135}, George Reiland¹⁰,
Christopher Risacher¹⁶, Ignacio Ruiz⁸⁴, Alejandro F. Sáez-Madaín^{102,126}, Remi Sassella¹⁶, Pim Schellart^{17,136}, Paul Shaw⁷,
Kevin M. Silva¹², Hotaka Shiokawa¹¹, David R. Smith^{137,138}, William Snow¹⁵, Kamal Souccar⁷⁶, Don Sousa²,
T. K. Sridharan¹¹, Ranjani Srinivasan¹⁵, William Stahm¹², Anthony A. Stark¹¹, Kyle Story¹³⁹, Sjoerd T. Timmer¹⁷,
Laura Vertsatschitsch^{11,134}, Craig Walther¹², Ta-Shun Wei⁷, Nathan Whitehorn¹⁴⁰, Alan R. Whitney², David P. Woody¹⁴¹,
Jan G. A. Wouterloot¹², Melvin Wright¹⁴², Paul Yamaguchi¹¹, Chen-Yu Yu⁷, Milagros Zeballos^{105,143},
Shuo Zhang¹⁰⁴, and Lucy Ziurys¹⁰

Určování vzdálenosti M 100 – cefeidy, klíčový projekt HST - kosmologie

Úloha 13.8 Dosud nejvzdálenější klasické cefeidy (s typickými periodami 1 - 50 dnů) byly objeveny za pomoci Hubbleova kosmického dalekohledu v galaxii M 100, která je součástí bohaté kupy galaxií v souhvězdí Panny. Na obr. je znázorněna závislost pozorované vizuální hvězdné velikosti a periody pulsace, tedy závislost perioda – zářivý výkon. Užitím dvou cefeid nejbližše položených k přímkové závislosti, na grafu označených, stanovte jejich vzdálenost a tudíž vzdálenost galaxie M 100.

Řešení: U první cefeidy $m_v = 26,3$ mag, $\log P = 1,39$ dne. Ze závislosti $M_V = -2,80 \log P - 1,43$ stanovíme $M_V = -5,3$ mag. Dosazením do vztahu $\log r = 1 + 0,2 (m_v - M_V) = 7,32$, $r \cong 20$ Mpc. U druhé cefeidy analogicky $m_v = 25,6$ mag, $\log P = 1,61$ dne, $M_V = -5,94$ mag. Vzdálenost $\log r = 7,31$ pc, tudíž $r \cong 20$ Mpc.



Kosmologie

Úloha 13.28 Odvoďte v rámci klasické fyziky vztah mezi kritickou hustotou a Hubbleovou konstantou. Odhadněte stáří vesmíru.

Řešení: Zkoumejme sférickou oblast prostoru o hmotnosti $M = \text{konst.}$, $\rho = \rho(t)$, $R = R(t)$. V ní se pohybují částice – galaxie o hmotnosti m , částice na povrchu koule má rychlost v_R . Platí vztah pro celkovou mechanickou energii $\frac{1}{2}mv_R^2 - G\frac{mM}{R} = W_c$. Odtud pro hustotu energie w dostaneme $\frac{1}{2}v_R^2 - G\frac{M}{R} = w$. V určitém čase $t = t_0$, platí podle Hubbleova zákona $v_R = H R(t)$ a dále $\rho = \rho(t_0)$. Úpravou obdržíme $R^2 \left(\frac{1}{2}H^2 - \frac{4}{3}G\pi\rho \right) = w$. V kritickém stavu při $R \rightarrow \infty$ je $\frac{w}{R^2} \rightarrow 0$ platí $\frac{1}{2}H^2 - \frac{4}{3}G\pi\rho_k = 0$, odtud $\rho_k = \frac{3H^2}{8\pi G}$. Při střední rychlosti expanze $v_R \cong \frac{R}{t}$, odkud s použitím Hubbleova zákona $v_R = H R$ obdržíme $t \cong \frac{1}{H}$. Přijmeme-li Hubbleovu konstantu $H = 75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ je $t \cong 10^{10}$ roků.

$$\frac{\ddot{R}}{R^2} + 2\frac{\dot{R}}{R} = -\frac{kc^2}{R^2} \quad (1) \quad k \begin{cases} -1 \\ 0 \\ +1 \end{cases}$$

$$\frac{\ddot{R}}{R^2} - \frac{8\pi G}{3}\rho = -\frac{kc^2}{R^2} \quad (2)$$

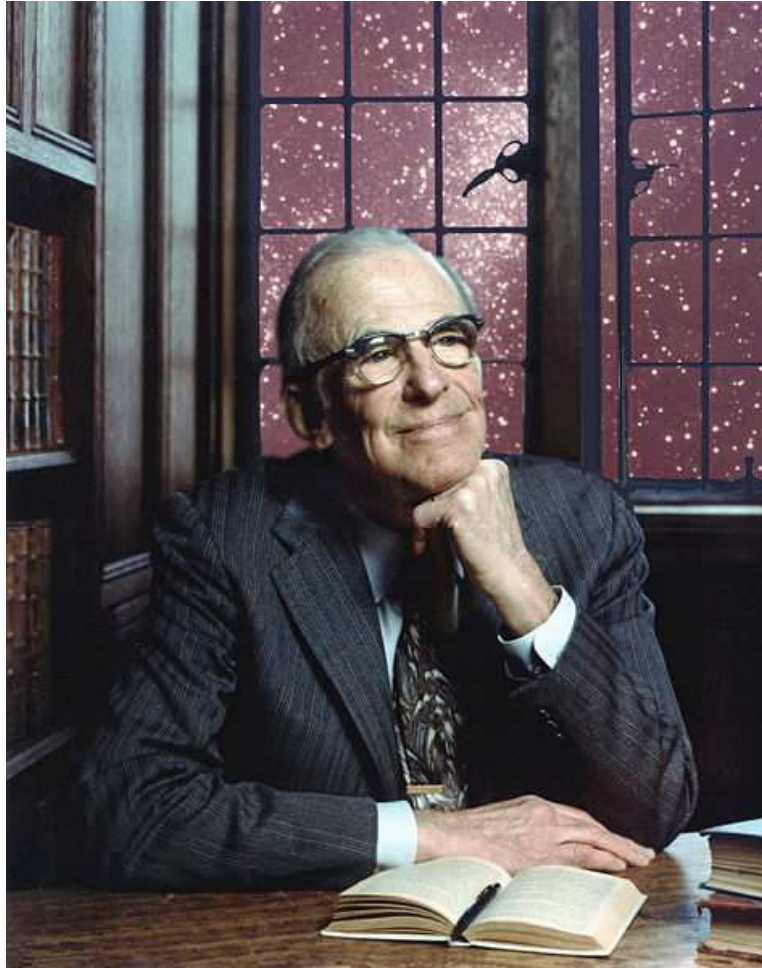
do směr uvedeme $H = \frac{\dot{R}}{R}$ i $q = -\frac{\ddot{R}}{R} \cdot \frac{1}{H^2}$

pro $\frac{\ddot{R}}{R^2} = H^2$ a vyřešení $\frac{1}{c^2}$ (2)

$$\frac{k}{R^2} = \frac{8\pi G\rho}{3c^2} - \frac{H^2}{c^2} \quad \text{i pro } k=0 \Rightarrow$$

$$\rho_k = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

Kosmický dalekohled



Lyman Spitzer 1914 - 1997,
astrofyzik: mezihvězdné prostředí
- určování teploty z intenzity čar*,
r. 1946: pro Douglas Aircraft
zpráva o výhodách dalekohledu
mimo atmosféru

*Spitzer,L.:Ap. J. 107, (1948), p. 6 - 34,

Ap. J. 109, (1949), p. 337-353.



srpen, 2003

REFERENCES

- (1) Oberth, H., 1923. *Die Rakete zu den Planetenräumen*, R.Oldenbourg-Verlag, Munich.
- (2) Stewart, J.Q., 1929. Lecture to Brooklyn Academy of Science, April 11.
- (3) Richardson, R.S., 1940. Lunar Observatory No. 1, in *Astounding Science Fiction*, p. 113, Street and Smith, 1940 February.
- (4) Spitzer, L., 1946. Astronomical advantages of an extra-terrestrial Observatory, *Project RAND Report*, Douglas Aircraft Co., September 1.

Kosmický dalekohled

Q. Jl R. astr. Soc. (1979) 20, 29–36

History of the Space Telescope*

Lyman Spitzer, Jr

Princeton University Observatory, Princeton, New Jersey, USA

(Received 1978 October 18)

I THE IDEA

The basic concept of the Space Telescope is essentially a simple one – a large multipurpose telescope in orbit around the Earth, well above the atmosphere. It is well known that such a telescope would have two very great scientific advantages over instruments on the ground. First, its location in a vacuum, out where the stars do not twinkle, would make it possible for the sharpness of an image to be limited only by diffraction of light, rather than by the variable refraction known to astronomers as ‘seeing’. Thus a telescope with an aperture between 2 and 3 m should yield images about 0.1 arcsec in size, about a tenth of the images normally obtainable at good astronomical

with large reflecting telescopes in space. Among this list of scientific programs, which includes some of the more interesting problems now visualized for the Space Telescope, were:

- (a) push back the frontiers of the Universe and determine galactic distances by measuring very faint stars,
- (b) analyse the structure of galaxies,
- (c) explore systematically the structure of globular clusters,
- (d) study the nature of planets, especially their surfaces and atmospheres.

HST - Hubbleův kosmický dalekohled



Proč HST?

- **možnost pozorování v neoptickém oboru**
- **odstranění vlivu atmosféry**

Vypuštění Hubbleova kosmického dalekohledu



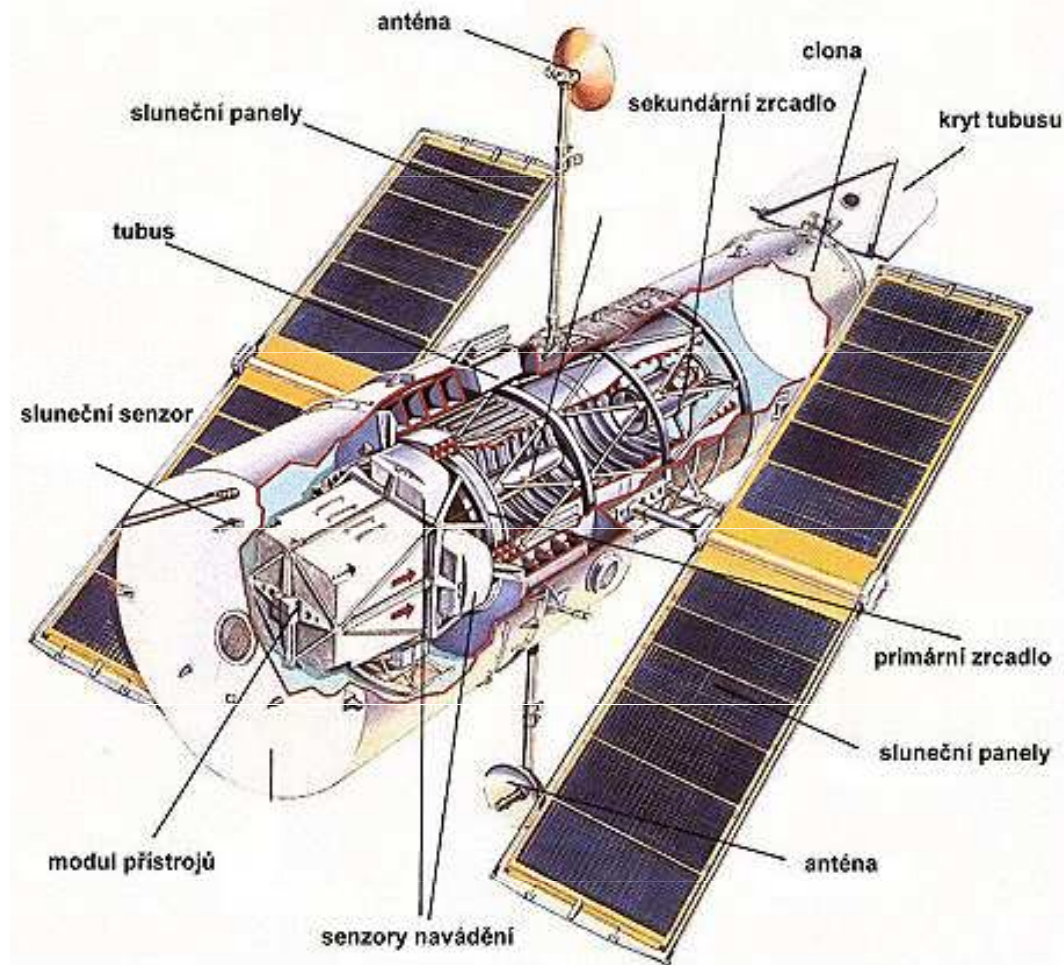
zdržení 1986
havárie Challengeru

vypuštění duben 1990

průběžná současná poloha:

http://hubblesite.org/the_telescope/where.a.s_hubble_now/basic_version.php

HST - Hubbleův kosmický dalekohled



Samotný název přístroje "Hubbleův kosmický teleskop" nevystihuje přesně jeho podstatu a charakter. Měli bychom spíše hovořit o automatické observatoři umístěné na oběžné dráze. Přístroj se skládá nejen ze samotného dalekohledu, ale z celé řady dalších a nezbytně nutných systémů. Mezi ni patří například systém orientace a stabilizace dalekohledu, přístroje pro zobrazení a analýzu záření, řídicí systém, systém zálohování a předávání napozorovaných dat, telemetrický systém, energetický systém atd.

Základní údaje: délka: 13,1 m, šířka: 4,3 m, hmotnost: 11 600 kg
Optický systém: primární zrcadlo 2,4 m (systém Ritchey-Chrétien), sekundární 0,34 m
Počáteční dráha: 610 km, sklon 28,5 stupňů
Plánovaná životnost: 15 let (za předpokladu servisních misí raketoplánu)
Cena dalekohledu: 1,5 mld. dolarů (skutečná cena bude zřejmě vyšší)

Hubbleův kosmický dalekohled

doba oběhu okolo Země 97 min

hmotnost při startu 11 600 kg

spotřeba elektrické energie 2400 W

průměr primárního zrcadla 2,4 m

průměr sekundárního zrcadla 34 cm

detekovaný rozsah elektromagnetického záření

120 nm – 2400 nm

HST – konstrukce, přístroje

Ritcheyův-Chrétienův optický systém, s otvorem v **hlavním hyperbolickém zrcadle**, paprsky → na hlavní zrcadlo, → odraz sekundární zrcadlo → vyvedení otvorem do **přístrojové části ke zpracování**

Přístrojová sekce složena ze dvou částí:

osová pozice a čtyři mimo osové pozice

v **osové pozici** širokoúhlé planetární kamery:

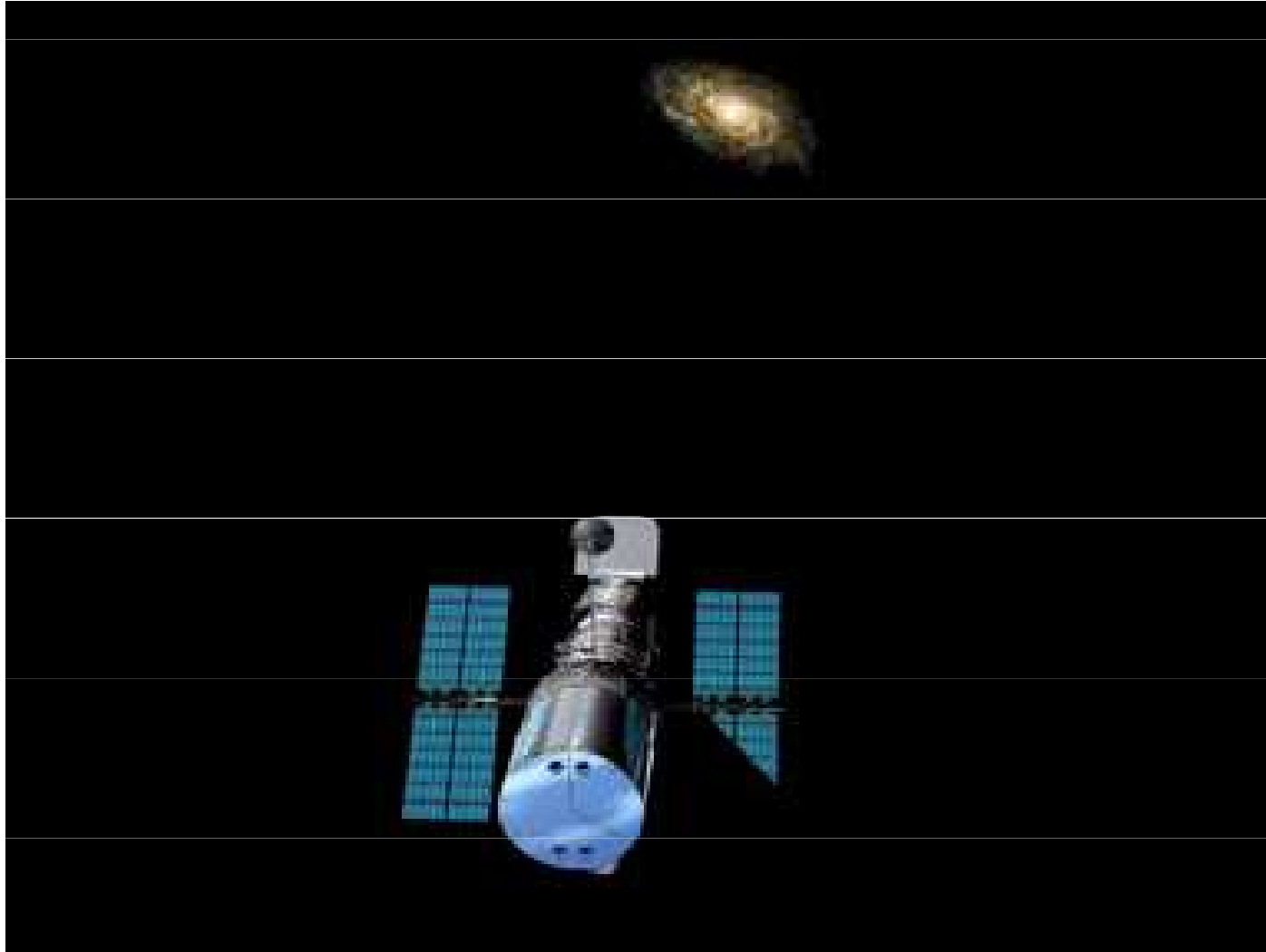
WFPC → WFPC2 → WFC3

v mimo osových pozicích přístroje - **kamery, spektrografy**
zabudovány modulárně, servisní mise - snadná výměna

Přístroje HST - 1990

- 1. WFPC: WF - širokoúhlá kamera, velké zorné pole, PC - planetární kamera s velkou ohniskovou vzdáleností, velké zvětšení**
- 2. GHRS: Goddardův spektrograf s vysokým rozlišením v ultrafialovém oboru**
- 3. FOC: Kamera slabých objektů v ultrafialovém oboru**
- 4. FOS: Spektrograf slabých objektů**
- 5. HSP: Vysokorychlostní fotometr pro pozorování proměnných hvězd**

Činnost HST

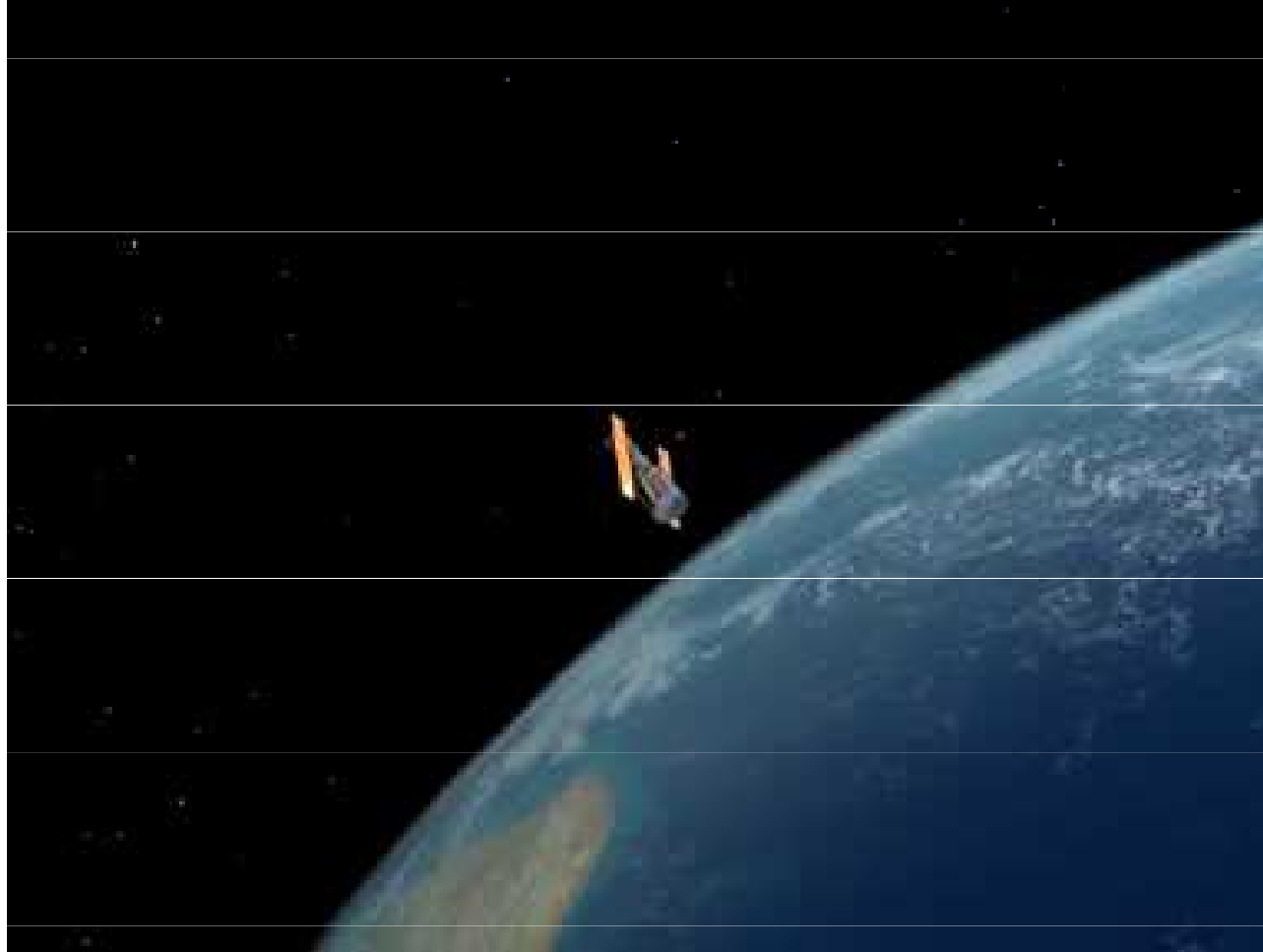


Hubbleův kosmický dalekohled - úloha

Určení práce pro převedení HST z kruhové oběžné dráhy $h_1 = 500$ km na $h_2 = 600$ km

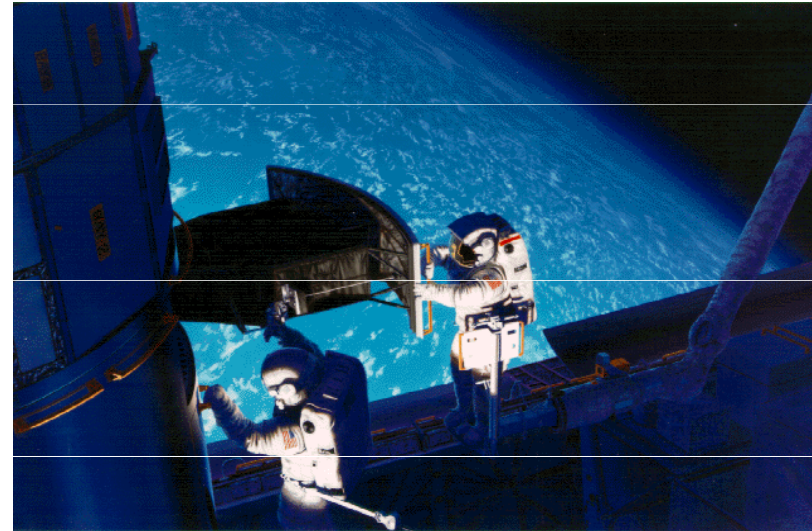
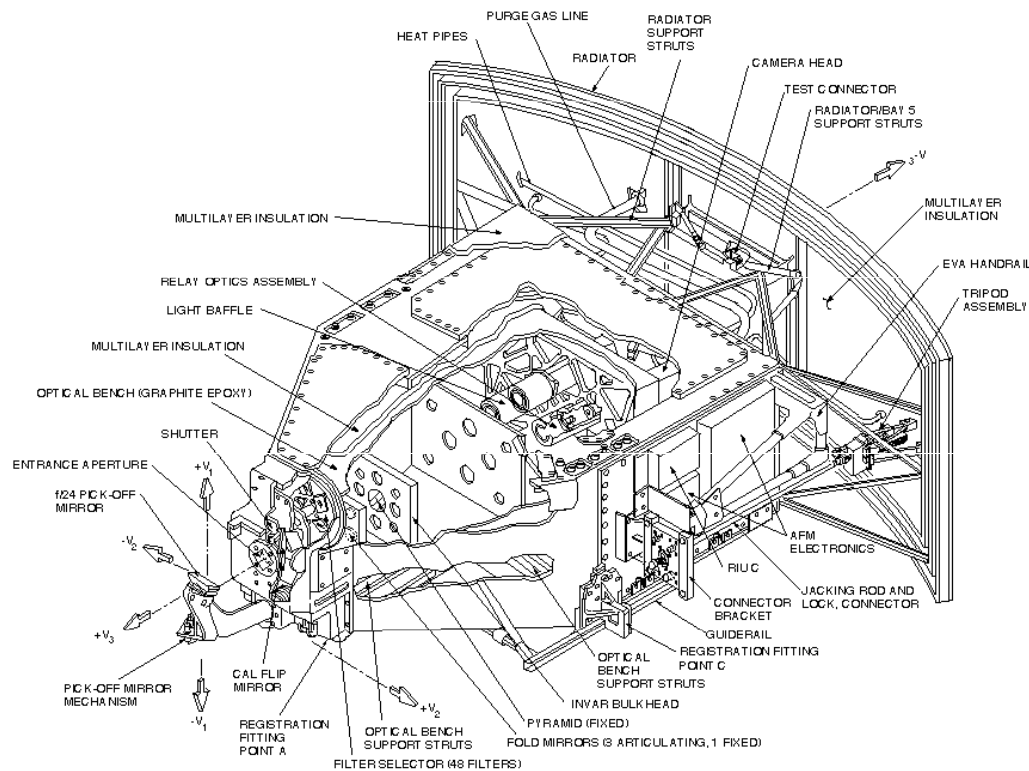
$$\begin{aligned} A &= (W_{k1} + W_{p1}) - (W_{k2} + W_{p2}) = \\ &\left(\frac{1}{2} m_H v_1^2 - G \frac{m_H M_Z}{R_Z + h_1} \right) - \left(\frac{1}{2} m_H v_2^2 - G \frac{m_H M_Z}{R_Z + h_2} \right) = \\ &G \frac{m_H M_Z}{2} \left(\frac{1}{R_Z + h_2} - \frac{1}{R_Z + h_1} \right) = -4,5 \cdot 10^9 \text{ J} \end{aligned}$$

HST na dráze kolem Země



Širokoúhlé planetární kamery WFPC

WFPC 2: (110 – 1 100) nm, 4 CCD prvky, 800 x 800 px, 48 filtrů



**výměna kamery - květen 2009,
WFPC/IR 3, (380 – 1 700) nm
2,3 x 2,1 arcmin**

Space Telescope Imaging Spectrograph – STIS 1997 - 2004, 2009 -



$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

Vysoké rozlišení $R \sim 200\,000$
UV oblast

Střední rozlišení $R \sim 5\,000 - 10\,000$

Nízké rozlišení $R \sim 750$
(164 – 1014) nm

Mřížky 67 – 3 600 vrypů/mm
blazeovaný úhel $(0,7 - 14,7)^\circ$

16 difr. mřížek, 12 v I. řádu,
4 echelle vyšší řády

Grating	Sp. Range (Å)	Å Per tilt	Resolving power
G750L	5240- 10270	5030	530-1040
G750M	5450- 10140	570	4870-9050
G430L	2900-5700	2800	530-1040
G430M	3020-5610	286	5390-10020
G230LB	1680-3060	1380	620-1130
G230MB	1640-3190	1155	5470-10630
G230L	1570-3180	1610	500-1010
G230M	1640-3100	90	9110-17220
G140L	1150-1730	610	960-1440
G140M	1140-1740	55	11400-17400
E230M	1570-3110	800	30000
E230H	1620-3150	267	114000
E140M	1150-1710	620	45800
E140H	1150-1700	210	114000

Hlavní vybrané výsledky 30 let HST

1. Sluneční soustava
2. Extrasolární soustavy
3. Vznik a zánik hvězd
4. Černé díry v jádrech galaxií
5. Upřesnění vzdáleností ve vesmíru !

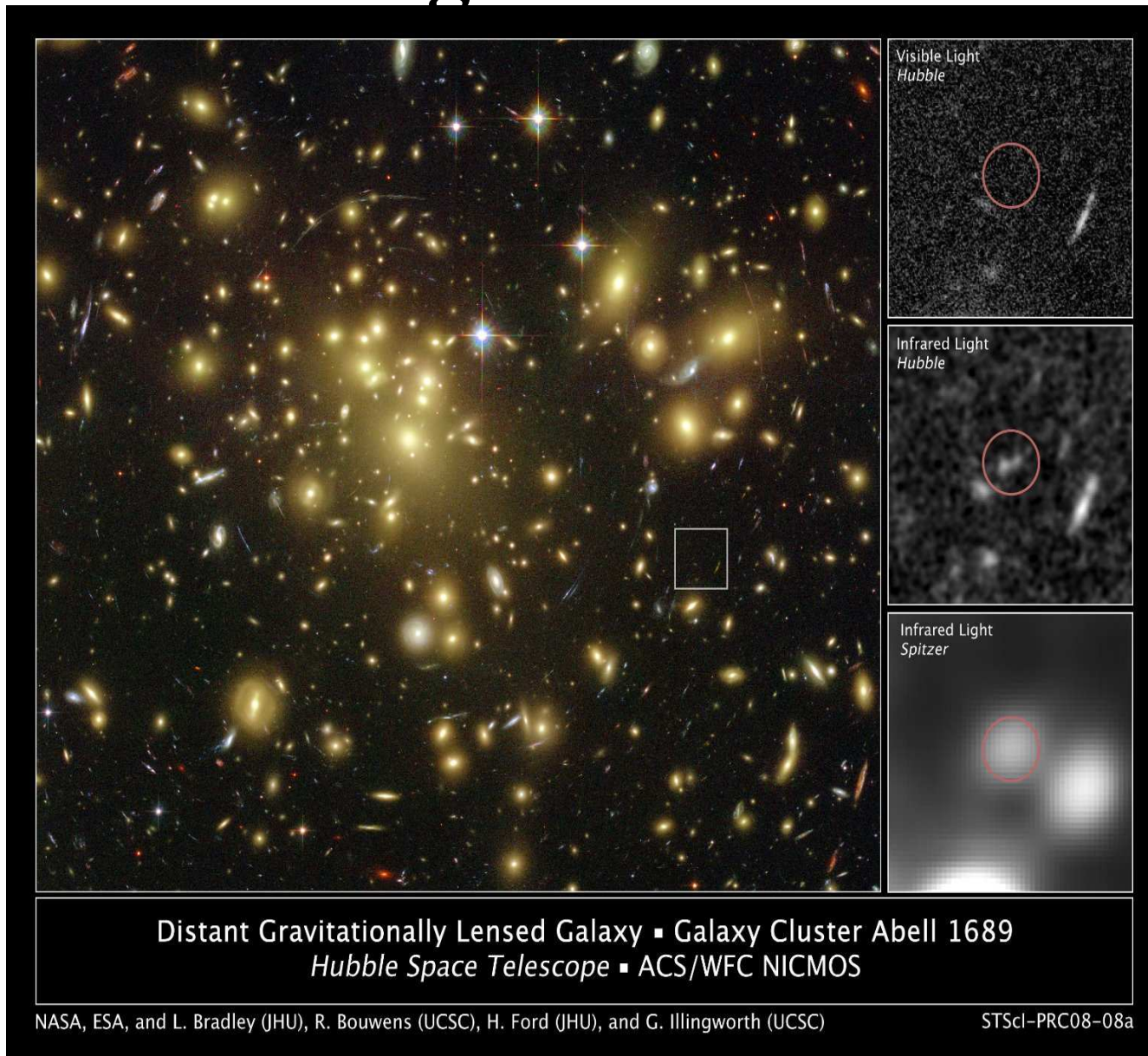
1 000 000 pozorování

500 000 snímků

30 000 různých polí

článek – MFI – 20 let činnosti

Vzdálená galaxie A1689-zD1



r = 4 miliardy pc, hvězdy vzniklé 250 milionů roků po velkém třesku

Úlohy - řešení

Cvičení Sluneční soustava

2. 7, 2. 11, 2. 12, 2. 13, 2. 15, 2. 20

Kosmická mechanika

**3. 1, 3. 2, 3. 3, 3. 5, 3. 9, 3. 10, 3. 12, 3. 13,
3. 16, 3. 17, 3. 18, 3. 19, 3. 20**