

Antonín Růkl

Jak (ne)byl zmapován Měsíc

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 47 (2002), No. 1, 31--37

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141110>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2002

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>

# Jak (ne)byl zmapován Měsíc

*Antonín Růkl, Praha*

## Minulost

Mapování bylo vždy neodmyslitelnou součástí objevitelských cest na Zemi. Nejinak je tomu při průzkumu těles sluneční soustavy. Historie začala přirozeně u Měsíce, jediného tělesa dostupného primitivními dalekohledy již od 17. století. Selenografií a její hlavní součástí, tj. mapováním Měsíce, se tradičně zabývali jednotlivci, zkušení pozorovatelé a zruční kreslíři. Mnozí z nich věnovali pozorování Měsíce a kreslení map našeho souseda podstatnou část svého života. Už letmý pohled dalekohledem na nesmírně členitou měsíční krajinu napovídá, jak přetěžký a sotva splnitelný úkol je převést ruční kresbou do mapy přesně a věrně všechny detaily, vizuálně pozorované dalekohledem. I když se selenografové snažili zasadit kresbu do husté sítě vybraných bodů, jejichž polohy byly změřeny např. vláknovým mikrometrem, vždy bylo nutno většinu terénních tvarů kreslit ručně, od oka. Mnohakilometrové chyby v polohách i tvarech přitom byly běžné.

Co přinesla první polovina 20. století? Rozvoj astrofotografie umožnil přesnější a objektivnější zobrazování povrchu Měsíce. Mezinárodní astronomická unie stanovila závazná pravidla pro pojmenovávání měsíčních útvarů a v roce 1935 přijala katalog měsíčního názvosloví *Named Lunar Formations* jako mezinárodní normu; byl to začátek konce chaotické nomenklatury zděděné z minulosti. Do výzkumu Měsíce začaly pronikat astrofyzikální metody a stále zřetelněji se ukazovala nutnost týmového řešení problémů. V praxi však přetrvával individualistický přístup, Měsícem se zabývali většinou amatéři a mezi profesionálními astronomy převládl názor, že povrch naší přirozené družice je z astronomického hlediska již prozkoumán dostatečně a jeho další výzkum patří jiným vědním oborům (což nebylo daleko od pravdy). Vznikaly také další mapy, negativně poznamenané omezenými možnostmi terestrických pozorování: atmosférickými vlivy, nedostatečným rozlišením detailů na Měsíci a také subjektivním přístupem jednotlivých selenografů.

## Znovuobjevený Měsíc

Dějiny moderní kartografie těles sluneční soustavy začínají koncem padesátých let 20. století. První lety k Měsíci a zejména závod o Měsíc, oficiálně nevyhlášený, ale

---

Ing. ANTONÍN RŮKL (1932), Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, Královská obora 233, 170 21 Praha 7, e-mail: [ruk1@planerarium.cz](mailto:ruk1@planerarium.cz)

s nebývalým nasazením probíhající v šedesátých letech mezi Spojenými státy a tehdejšími Sovětským svazem, byly mohutným impulsem k zahájení novodobých mapovacích programů. Ukázalo se totiž, že dosavadní mapy Měsíce, celkem uspokojující pozemské pozorovatele, jsou svou kvalitou, přesností a měřítkem zcela nevyhovující pro přípravu letů na Měsíc. Nyní už nikoli jednotlivci, ale velké týmy, přední světové observatoře a kartografické ústavy byly zapojeny do produkce map nejvyšší dostupné kvality.

## První a poslední profesionální mapování Měsíce ze Země

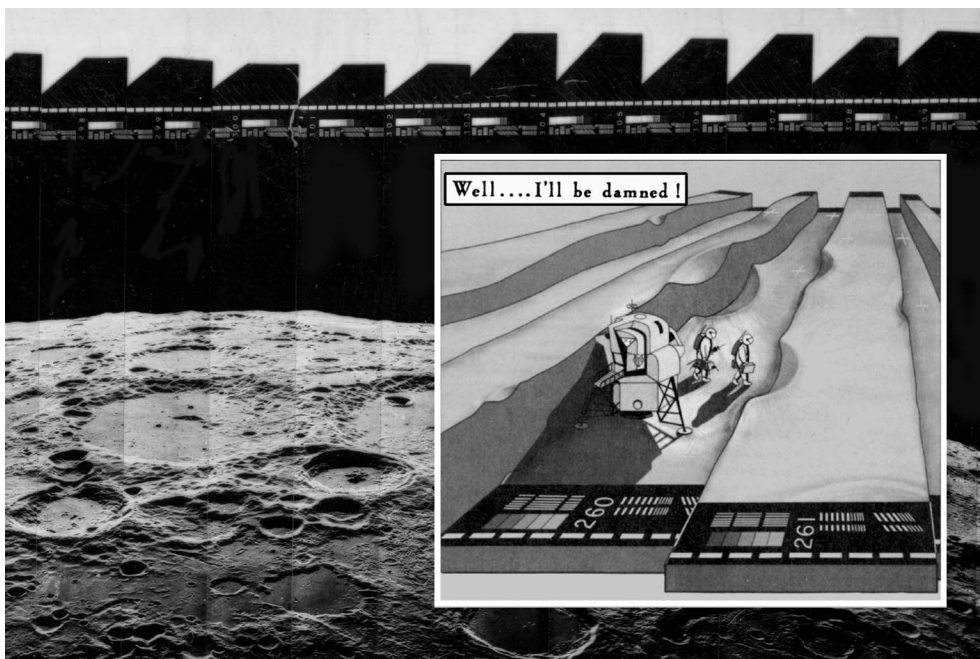
První v řadě moderních projektů byla mapa Měsíce v měřítku 1 : 1 000 000 (Lunar Astronautical Chart, LAC), zpracovávaná mapovací službou amerického letectva (U. S. Air Force Chart and Information Center — ACIC) pro organizaci NASA v letech 1960–1967. Jako podklad pro kresbu měsíčního povrchu sloužily nejlepší fotografie pořízené velkými dalekohledy; pod vedením proslulého astronoma Gerarda Kuipera vznikly fotografické atlasy Měsíce, dodnes nepřekonané. Týmy zkušených pozorovatelů doplňovaly vizuálním pozorováním jemné detaily, nezřetelné na fotografiích. Na vysokohorské observatoři Pic-du-Midi v Pyrenejích byly pořízeny tisíce snímků Měsíce jako podklad k měření relativních výšek a výškových profilů pro mapy LAC; tento program probíhal při Manchesterské univerzitě v Anglii pod vedením našeho známého krajana prof. Zdeňka Kopala. Do roku 1967 byly dokončeny celkem 44 mapy LAC, pokrývající větší část přivrácené strany Měsíce. Projekt, který původně počítal s pokrytím celého povrchu Měsíce (včetně odvrácené strany) 144 mapami, bohužel nebyl nikdy dokončen.

Snímkování Měsíce z kosmických sond, zahájené programy Ranger a Lunar Orbiter v letech 1964–1967, ukázalo četné (a přirozeně nevyhnutelné) nepřesnosti map LAC, založených na terestrických pozorováních. Velkými dalekohledy lze za ideálních podmínek rozpoznat na Měsíci podrobnosti velké asi 300 až 500 metrů; menší detaily bývají často interpretovány chybně, omezená rozlišovací schopnost dalekohledu a všudypřítomný neklid vzduchu kladou pozemskému pozorování (vizuálnímu i fotografickému) nepřekročitelné meze. Takové nesnáze u kosmických sond odpadají.

Pět sond Lunar Orbiter snímkovalo dohromady téměř 99 % povrchu Měsíce. Většina povrchu přivrácené strany byla vyfotografována s rozlišením od 75 do 125 metrů, tedy mnohem podrobněji, než dovolují na Měsíci rozlišit terestrická pozorování. Nebyl tu však již zájem starší mapy LAC přepracovat s využitím nových podkladů a projekt dokončit. Závod o Měsíc totiž nabýval na úpornosti a globální mapování v něm nemělo prvořadý význam: pozornost kartografů se soustředila spíše na detailní mapy oblastí, přicházejících v úvahu pro přistání astronautů. Přesto patří mapy LAC k tomu nejlepšímu, co kdy bylo v kartografii Měsíce vytvořeno. V neposlední řadě jsou to mapy krásné, názorné a velmi dobře čitelné; poprvé na nich byla uplatněna nová technika kresby stínovaného terénu pomocí speciální stříkácí pistole. Tato technika (vyvinula ji slečna Patricia Bridges z týmu kartografů ACIC) se od té doby standardně používá na všech moderních mapách těles sluneční soustavy.

## Mapování Měsíce z kosmických sond

Šedesátá léta patřila Měsíci. Asi nejvýznamnějším úspěchem selenografie v té době bylo rozšíření mapování na odvrácenou stranu Měsíce. Navzdory vžitým učebnicovým tvrzením, že díky libracím můžeme ze Země postupně pozorovat až 59 % měsíčního povrchu, bylo možno před érou měsíčních sond spolehlivě mapovat jen necelých 50 % povrchu našeho souseda. Značné nerovnosti terénu a extrémní perspektivní zkreslení při okraji měsíčního disku znemožňují rozpoznat ze Země skutečnou podobu útvarů v okrajových partiích Měsíce. Chceme-li poznat okrajové partie a tím spíše odvrácenou stranu Měsíce, nezbyvá než si prohlédnout našeho souputníka z jiných směrů, očima kosmických sond. První pohled na část odvrácené strany zprostředkovala sovětská sonda Luna 3 již v roce 1959. Celý povrch Měsíce byl však poprvé systematicky snímkován americkými sondami Lunar Orbiter až v letech 1966–67. Od roku 1967 byl již zmapován celý Měsíc s výjimkou 1 % svého povrchu; poslední bílé místo zůstalo (až do roku 1994) v okolí jižního pólu.



Obr. 1. Rekonstruované snímky ze sond Lunar Orbiter se skládají z mnoha úzkých proužků, vzniklých použitou technikou skenování a přenosu obrazů z filmového pásu, exponovaného, vyvolaného a ustáleného na palubě sondy. Sestavení jednotlivých proužků do celkového obrazu se neobešlo bez nahodilých chyb, značně komplikujících kartografické zpracování snímků. Vložená karikatura představuje zatrpklý komentář k obtížím topografického mapování podle snímků z Lunar Orbiterů. (Astronaut z Apolla říká: „No teda . . . ať se propadnu!“ Karikatura je převzata z knihy [1]. Koláž A. RÜKL.

„Express Science“ aneb „věda z rychlíku“, jak se někdy označuje výzkum naší přirozené družice v období závodu o Měsíc, poznamenala i program Lunar Orbiter: ne-

dostatečná data ke snímkům se stala noční měrou kartografů. Náhle tu byly nesmírně podrobné snímky povrchu Měsíce, ale nebylo v lidských silách umístit je dostatečně přesně do sítě měsíčních poledníků a rovnoběžek. Největší nejistota v polohách útvarů byla na mapách odvrácené strany Měsíce, kde chyby dosahovaly několika stupňů (selenocentricky), což znamená deseti- až stakilometrové chyby v souřadnicích.

Následovaly ovšem další mapovací programy, především v rámci amerických projektů. Rovníkové oblasti v rozloze asi 20 % z celkového povrchu Měsíce byly velmi podrobně a přesně mapovány z kosmických lodí Apollo 15, 16 a 17. Orbitální moduly těchto expedic byly vybaveny speciálními mapovacími a panoramatickými kamerami s vysokým rozlišením. Fotografovalo se na filmový materiál, který pak posádky dopravily na Zemi k dalšímu zpracování, takže odpadly problémy s dálkovým přenosem obrazu. Ke všem snímkům byla tentokrát k dispozici veškerá data, nezbytná k jejich kartografickému vyhodnocení. Odkazem projektu Apollo jsou mimo jiné série přesných map v měřítku 1 : 250 000 (Lunar Topographic Orthophotomaps, Lunar Orthophotomaps). Byly též aktualizovány a doplněny některé mapy LAC 1 : 1 000 000 v rovníkové oblasti Měsíce. Bohužel, program Apollo byl ukončen předčasně. Kompetentní činitelé rozhodli, že létání na Měsíc a sbírání kamení stálo poplatníky už dost peněz, Rusům už netřeba dále demonstrovat, kdo je první, a zbývající tři plánované lety Apolla byly tedy zrušeny. Přitom nejméně dva ze zbývajících letů mohly zahrnovat snímkování z polární dráhy, a tím by bývalo bylo možné dosáhnout téměř úplného a podrobného zmapování Měsíce už v sedmdesátých letech.

## Měsíc po dvaceti letech a dále

Nahodilé snímky Měsíce přicházely později např. ze sond typu Zond, Mariner 10 a Galileo. Sonda Mariner 10, určená k výzkumu Merkuru, proletěla v r. 1974 kolem Měsíce; přitom byl testován kamerový systém sondy a získána velmi dobrá mozaika ze snímků okolí severního pólu Měsíce. V letech 1990 a 1992, v obou případech v prosinci, proletěla kolem Měsíce sonda Galileo, využívající „gravitační prak“ od Země ke změně dráhy k Jupiteru. „Letmý pohled“ z Galilea stačil k objevu gigantické impaktní pánve (později nazvané South Pole — Aitken) na odvrácené straně Měsíce. Snímky z průletových sond naznačily velmi slibné perspektivy pro mapování Měsíce s využitím pokročilých technologií. Meziplanetární sonda Galileo jako první nesla CCD-kameru se systémem pro digitální přenos obrazu; tato technika poskytuje mnohem kvalitnější data pro mapovací (i jiné) účely než předtím používaný televizní přenos obrazu. Pokročilá technika rovněž umožnila fotografování v několika vybraných spektrálních oborech (multispektrální zobrazování). Sonda Galileo tak předznamenala novou etapu mapování Měsíce, charakterizovanou pozoruhodnými výsledky pozdějších umělých družic Clementine a Lunar Prospector.

Na systematické, globální mapování čekal Měsíc až do roku 1994, kdy sonda Clementine pořídila z polární oběžné dráhy kolem Měsíce přes 2,5 milionu snímků v několika spektrálních oborech, spolu s měřením výšek a dalších parametrů. Snímky z Clementine vyplnily také zbývající bílé místo na mapách okolí jižního pólu Měsíce.

Poprvé byl získán globální soubor digitálních dat charakterizujících řadu parametrů měsíčního tělesa, včetně přesných poloh zobrazených útvarů. Data z Clementine umožňují mapovat nejen měsíční krajinu, ale také tvar celého měsíčního tělesa, zastoupení určitých chemických prvků na povrchu Měsíce, gravitační pole Měsíce atd.

Sonda Clementine zprostředkovala vskutku komplexní pohled na Měsíc, zejména z geofyzikálního a geologického hlediska. Další podstatný pokrok v tomto směru znamenaly výsledky pozorování z družice Lunar Prospector, která operovala na polární oběžné dráze kolem Měsíce od ledna 1998 do července 1999. Družice podrobně mapovala chemické složení měsíčního povrchu, pátrala po ledu v polárních oblastech, měřila charakteristiky gravitačního a magnetického pole Měsíce atd. Velký ohlas mělo oznámení objevu vodního ledu o předpokládané hmotnosti kolem tří miliard tun, nacházejícího se ve stále zastíněných oblastech na obou pólech. Mezi přístroji Lunar Prospectoru však nebyla fotografická kamera.

Ze dvou posledně jmenovaných sond to tedy byla Clementine, která pořídila data potřebná k mapování povrchových útvarů měsíční krajiny. Hlavním posláním Clementine bylo ověřovat funkci celé řady nových senzorů pro různé účely (byla to původně vojenská sonda, připravená v rámci programu SDI — strategické obranné iniciativy). Proto byla dráha sondy zvolena jako jistý kompromis, bohužel nevhodně pro potřeby topografického mapování. Většina měsíčního povrchu byla snímkována „se Sluncem v zádech“, tj. v úplňkovém osvětlení, beze stínů, jež by daly vyniknout povrchovým útvarům. Digitální mapy z Clementine sice mají vysokou polohovou přesnost, poskytují rozlišení podrobností do velikosti 100 metrů, ale na převážné části měsíčního povrchu nepodávají plastický a názorný obraz terénu (s výjimkou okolí pólů, kde je Slunce stále nízko nad obzorem).

Než se dočkáme nových sond a vhodnějších snímků Měsíce, nabízí se zajímavá možnost využít přes 30 let staré, ale dosud nepřekonané záběry ze sond Lunar Orbiter (LO). Digitalizované snímky z LO lze v počítači geometricky transformovat (cíleně deformovat) tak, aby se přesně kryly s odpovídajícími částmi mapy ze sondy Clementine. Tak je konečně možné správně „usadit“ snímky z LO do souřadnicové sítě a sestavit z nich přesnou a velmi užitečnou mapu. Pilotní projekt tohoto druhu realizoval v r. 2001 astrogeologický tým USGS (U. S. Geological Survey) ve Flagstaffu v Arizoně, kde je světově známé centrum kartografie těles sluneční soustavy. Na zkoušku bylo upraveno a s velmi dobrým výsledkem transformováno 5 snímků z LO. Na pokrytí celého Měsíce by bylo zapotřebí zpracovat asi 400 záběrů z LO. Bude-li takový projekt realizován, bude to značný pokrok v mapování Měsíce, zejména těch jeho částí, které leží mimo rovníkovou oblast, snímковanou z orbitálních modulů Apollo.

Ani důmyslné využití snímků z LO a Clementine však nemůže nahradit či doplnit chybějící informace o terénních tvarech v měsíční krajině. Např. nízké, oblé vyvýšeniny, jako jsou tzv. dómy nebo mořské hřbety, čela lávových proudů apod., se prozradí svým stínem jen v bezprostřední blízkosti terminátoru (rozhraní mezi osvětlenou a neosvětlenou polokoulí). To dobře znají pozorovatelé Měsíce, kteří díky zřetelným stínům snadno rozliší u terminátoru nepatrné vyvýšeniny či deprese, jaké se na fotografiích z LO, pořízených při jiném, méně příznivém osvětlení, prostě neprojevují. Také proto dosud čekáme na příští umělé družice Měsíce, které budou

systematicky a v krátkých časových odstupech fotografovat okolí ranního i večerního terminátoru. Snímky takového charakteru, nejlépe stereoskopické a doplněné výškovými daty, by bylo možno využít k podrobnému globálnímu zmapování Měsíce, včetně vytvoření digitálního třírozměrného modelu měsíčního povrchu. Z technického hlediska by to dnes byl rutinní projekt, vycházející z vícekrát ověřených postupů a technologie. Budoucí mapovací družice Měsíce by měla realizovat program srovnatelný s výsledky sond Marsu, jako byly Viking 1 a 2 (1976–1980) nebo mimořádně úspěšný Mars Global Surveyor (mapuje Mars velmi podrobně od r. 1999 dodnes). Zatím můžeme pouze konstatovat, že Mars (ale i jiná vzdálená tělesa sluneční soustavy) je jako celek zmapován lépe, systematictěji a přesněji než neskonale bližší Měsíc. Je a není to paradox; díky pokročilé technologii snímání a přenosu dat není vzdálenost mapovaného tělesa pro kvalitu přenášených údajů rozhodující.

Výzkum Měsíce a jeho budoucí využití (projekt stále osídlené základny na Měsíci) je dnes ve stínu projektů s vyšší prioritou, avšak příští lety k Měsíci se již prakticky připravují. V září 2002 by měla odstartovat japonská sonda Lunar-A, vybavená mimo jiné mapovací kamerou s rozlišením třicetimetrových podrobností na měsíčním povrchu. Další japonská sonda, Selene, se připravuje na rok 2003; její orbitální část bude vybavena také kamerou, laserovým výškoměrem a radarem. V květnu 2004 by měla být navedena na polární dráhu kolem Měsíce evropská (ESA) sonda SMART-1. Po dobu šesti měsíců má SMART-1 mapovat Měsíc pomocí miniaturní CCD kamery s rozlišením podrobností do 50 m. Budou-li tyto a jiné připravované projekty úspěšné, mohli bychom se již v průběhu prvního desetiletí 21. století dočkat významného pokroku v mapování Měsíce a ve výzkumu našeho nejbližšího nebeského souseda, stále ještě skrývajících mnoho otázek.

\* \* \*

*K našemu přehledu dodejme ještě praktickou poznámku o formách a dostupnosti map Měsíce. V 60. a 70. letech, zejména po skončení projektu Apollo, vzniklo jen v USA přes 800 map nejrůznějších měřítek, provedení a určení. Výsledným produktem v té době byla přirozeně mapa vytištěná na papíře. Naprostá většina těchto map se neobjevila na knižním trhu a zájemci si je objednávali individuálně, přímo u výrobce. Dvacetiletý odstup v mapování Měsíce od Apolla ke Clementine znamenal také podstatnou změnu v přístupu, technice, metodách výroby a distribuce nových map. Výroba tištěných map (nejen Měsíce, ale i ostatních těles sluneční soustavy) byla značně omezena. Data ze sondy Clementine již nebyla zpracována ve formě vytištěné mapy, ale výhradně v digitální podobě. Pro odborné kruhy, kde je uživatelů málo, se tisk nevyplatí, nehledě na to, že tiskem ani dost dobře nelze zobrazit veškerá získaná data a jejich kombinace tak, jak je zapotřebí pro řešení jednotlivých výzkumných úkolů. K uživatelům se digitální mapy dostávají na nosičích CD ROM, prostřednictvím internetu apod. (např.: <http://pdsmaps.wr.usgs.gov/maps.html>). Na papíře nadále zůstávají mapy určené pro nejširší okruh zájemců: nástěnné mapy, školní atlasy, mapy a atlasy pro astronomy amatéry apod., běžně dostupné na knižním trhu. V České republice je*

největším vydavatelem a distributorem astronomických map Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy (<http://www.planetarium.cz>).

## L i t e r a t u r a

- [1] GREELEY, R., BATSON, R. M.: *Planetary Mapping*. Cambridge University Press, Cambridge 1990.
- [2] KOPAL, Z., CARDER, R. W.: *Mapping of the Moon*. D. Reidel, Dordrecht 1974.
- [3] RÜKL, A: *Měsíc*. Mapa převrácené strany Měsíce 1 : 6 900 000. ZES Brno a Hvězdárna a planetárium hlavního města Prahy 1999.

# Matematika hudebních nástrojů

*Rachel W. Hall a Krešimir Josić*

## 1. Úvod

Historie hudebních nástrojů je stará desetitisíce let. Zlomky fléten a píšťal z kostí nacházíme už u neandrtálců. Nedávno v Číně nalezená 9000 let stará flétna je asi na světě nejstarším hudebním nástrojem, na který lze dosud hrát (obrázky i nahrávky zvuku této flétny najdete na <http://www.bnl.gov/bnlweb/flutes.html>). Tyto rané nálezy ukazují, že se lidé již dávno snažili vytvářet zvuky určitých výšek — tedy zvuky, u nichž převažuje jistý kmitočet (frekvence). Otvory v těle flétny prozrazují, že pravěký muzikant již musel mít jistou koncepci hudební stupnice.

Matematické studium hudebních nástrojů nacházíme už u pythagorejců, kteří objevili, že jisté příjemně znějící kombinace tónů mají výšky v poměru malých celých čísel, jako 2 : 1 a 3 : 2. Otázkami ladění a akustiky se zabývají od té doby nejskvělejší přírodovědci. Uvedme jako tři vynikající příklady studii *Harmonie universelle* (*Všeobecná harmonie*) z r. 1636 [19], v níž se Marin Mersenne zabývá laděním a akustikou, práci *On the Sensation of Tone* (*O vnímání tónu*, H. v. Helmholtz) z r. 1870 [15] a plodnou *The Theory of Sound* (*Teorie zvuku*, Lord Rayleigh), z r. 1877 [21].

---

RACHEL W. HALL, St. Joseph's University, 5600 City Ave., Philadelphia, PA 19131, e-mail: [rhall@sju.edu](mailto:rhall@sju.edu); KREŠIMIR JOSIĆ, Department of Mathematics and Statistics, Boston University, 111 Cummington Street, Boston, MA 02215, e-mail: [josic@math.bu.edu](mailto:josic@math.bu.edu)

*The Mathematics of Musical Instruments*. Monthly 108 (April 2001).

© The Mathematical Association of America 2001.

Přeložil JAN OBDRŽÁLEK.