



Mozaika snímků ze sondy Lunar Reconnaissance Orbiter zachycující pánev Orientale. (Foto: NASA)

# Měsíc pod drobnohledem

**Měsíc, přirozený souputník Země. Jak vznikl, jaký byl jeho vývoj a proč nás provází? Co tvoří jeho povrch, co nám o něm prozradily kosmické sondy a co přinesl program Apollo? A je pravdou, že se na něm nachází největší kráter ve Sluneční soustavě? O známých i neznámých zajímavostech Měsíce jsme hovořili s Mgr. Pavlem Gabzdylem z Hvězdárny a planetária Brno, p.o.**

**Měsíc je vaší celoživotní vášní. Napsal jste o něm desítky knih a vytvořil nepočítaně vzdělávacích pořadů. Jak se to stalo, že vás tolik zaujal?**

O Měsíc jsem se začal zajímat na začátku devadesátých let. Nejprve mě fascinoval při pohledu dalekohledem, později jsem se začal více zajímat o vznik jednotlivých povrchových útvarů. To mě později přivedlo ke studiu geologie na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity v Brně.

**Ve svém medailonku se zmiňujete, že je pro vás Měsíc celoživotní vášní a hlavním centrem vašeho zájmu. Co na něm nejraději pozorujete?**

Bude to znít možná zvláště, ale mě zajímá kolem Měsíce všechno. Od jeho vzniku, vývoj přes původ jednotlivých útvarů, vzhled v dalekohledu, složení měsíčních hornin až po legendy a mýty s ním spojené. Ostatně sám jsem měl to velké štěstí poznat měsíční povrch jednak s pomocí velkých dalekohledů a pak i z bezprostřední blízkosti, díky studiu vzorků lunárních meteoritů v rámci mé bakalářské a diplomové práce. Dnes jej vnímám i jako vhodný objekt k fotografování společně

s dominantami mého současného domovského města v rámci projektu Neuvěřitelné Brno. **Hovoříte o mýtech a legendách. Jak byl vlastně Měsíc vnímán historicky, a jak si jeho vznik tehdejší astronomové vysvětlovali?**

Jakmile astronomové začali poznávat satelity jiných planet naší Sluneční soustavy, ukázalo se, že pár Země–Měsíc se od všech ostatních liší. Nasvědčuje tomu už prosté porovnání jejich velikostí. Náš Měsíc zaujímá po Jupiterově Ganymedu, Saturnově Titanu, Jupiterově Callisto a Io úctyhodné páté místo. Všechny zmíněné měsíce ovšem náleží velkým plyným planetám, takže vzájemný poměr jejich hmotností je zhruba jedna ku několika tisícům. Poměr hmotnosti Země ku Měsíci je však jen 81:1. Země s Měsícem se proto jeví spíše jako dvojplaneta.

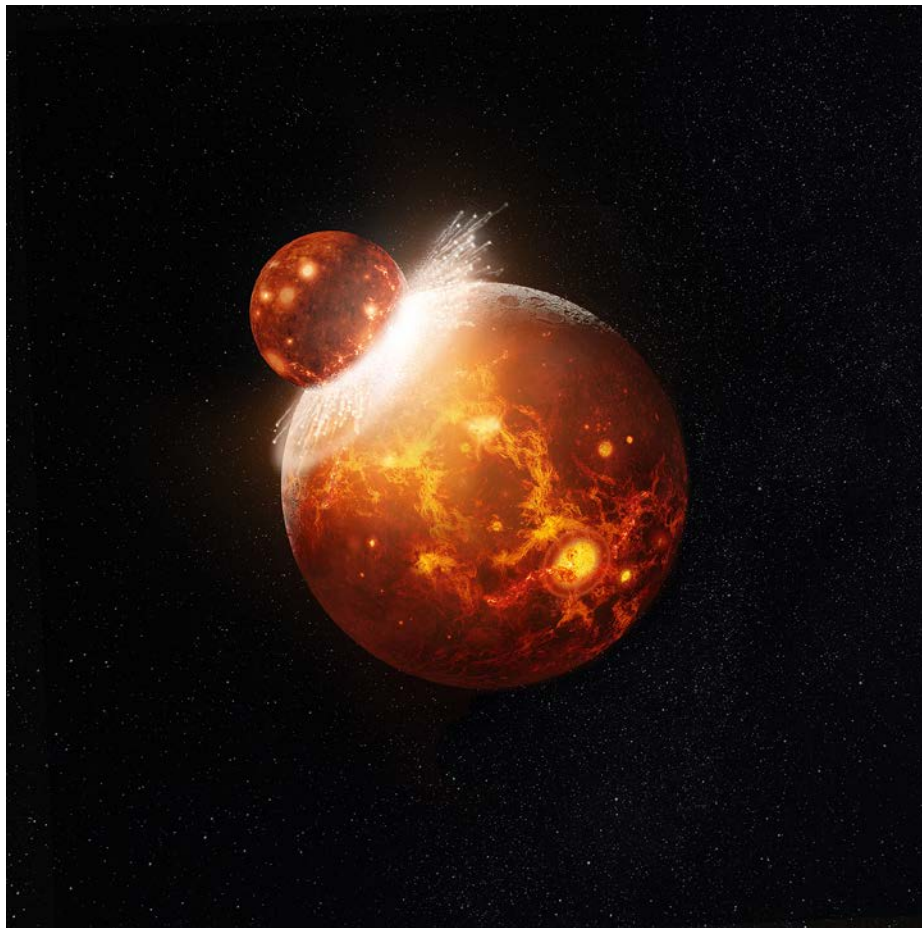
Vědci už v průběhu 19. a počátku 20. století přišli hned s třemi různými scénáři vzniku našeho Měsíce. Jeden z prvních scénářů vycházel z modelu vzniku planet, podle kterého Sluneční soustava vznikla díky gravitačnímu smršťování velkého mračna prachu a horkého plynu, jež se postupně zformovalo do podoby rotujícího disku. V centrálních oblastech vzrostla teplota a hustota hmoty natolik, že zde vzniklo Slunce. Ze zbylého materiálu se pak v okolí mladé hvězdy vytvořily planety. Podobně vznikly velké měsíce Jupiteru, Saturnu, Uranu a Neptunu, které ve většině případů připomínají jakési miniatury planetárních soustav. Stejnou představu proto astronomové aplikovali i na Zemi s Měsícem. Pokud by Země s Měsícem vznikly společně, byli by kosmickými sourozenci.

S jinou teorií vzniku Měsíce přišel v roce 1879 George Darwin – syn známého přírodovědce Charlese Darwina. Ten předpokládal, že Země kdysi rotovala kolem své osy mnohem rychleji než dnes a že Měsíc se od ní „odtrhnul“. Pokud by došlo k oddělení Měsíce od rychle rotující Země, byl by Měsíc synem Země. V roce 1907 astronom W. H. Pickering dokonce vyslovil názor, že k odtržení došlo v místě dnešního Tichého oceánu, což podle něj vyvolalo na zemském povrchu napětí, které později vedlo k odtržení Evropy od Ameriky.

Třetí model vzniku Měsíce byl založen na zjištění, že některé měsíce velkých planet obíhají v opačném směru, než v jakém rotují kolem své osy jejich mateřské planety. Takové měsíce nemohly vzniknout současně s planetami, ale musely být zachyceny z okolí. Americký astronom Thomas Jefferson Jackson See se domníval, že podobným způsobem zachytila svůj satelit i naše planeta. Pokud by došlo k zachycení Měsíce, byl by náš přirozený satelit manželem Země.

**Kdy se nahlížení na vznik našeho Měsíce změnilo a z jakého důvodu se tak stalo?**

Obrat nastal v polovině sedmdesátých let 20. století, kdy hned dva vědecké týmy přišly se skutečně převratnou myšlenkou, že Měsíc vznikl při gigantickém střetu předchůdce naší planety s tělesem asi desetkrát méně hmotnějším, než Země. Ačkoliv se takový scénář vzniku zdál zprvu jako velmi málo pravděpodobný, postupem času se ukázalo, že nejlépe vysvětluje většinu tehdy známých vlastností našeho souputníka. Tato teorie se mezi od-



Velký impaktor, který se měl srazit se Zemí a způsobit tak vznik Měsíce, dostal jméno Theia. (Vizualizace: P. Gabzdyl)

borníky vžila pod názvem „velká srážka“. Podle modelu z konce minulého století se naše Země střetla se svým menším sourozencem, který obíhal po velmi podobné dráze kolem Slunce. Tato planeta dostala i své jméno z řecké mytologie – Theia. Střet připomínal nepovedený tah kosmického billiardu: Theia se k Prazemi přiblížila nejprve z boku. Téměř tečná srážka rozžhavila materiál obou těles v místě střetu na teplotu přes deset tisíc stupňů Celsia a vystřelila jej na oběžnou dráhu kolem Prazemě. Zpomalený zbytek Thei se už však ze spárů gravitačního působení Země nevyprostil, zabořil se do její kůry a tím také zanikl. Kolem Země se z trosek této kolize vytvořil obrovský prstenec rozžhaveného materiálu, z něhož se v průběhu několika tisíc roků vytvořil náš Měsíc. Během srážky však došlo k totální destrukci Thei a o většinu jejího materiálu se obohatila naše Země. Země se při srážce zachovala jako Černá vdova, která svého dočasného sourozence zcela zahubila.

**Předpokládá se tedy, že Měsíc vznikl po srážce Země s jiným velkým tělesem. Víme, jak tato kolize probíhala?**

I když velká srážka byla dlouhou dobu nejlépe provedeným scénářem vzniku našeho Měsíce, začaly se v něm počátkem nového milénia objevovat výrazné trhliny. Mohly za to především přesnější analytické metody. Analýzy ze 70. let minulého století ukázaly, že poměry některých izotopů jsou v lunárních a pozemských horninách velmi podobné, což bylo v souladu s původním modelem velké srážky.

Přesnější analýzy uskutečněné o 30 let později ale odhalily, že zmíněné poměry izotopů jsou prakticky shodné. A to už v souladu s původním modelem nebylo. Proto se dnes objevuje celá řada nových scénářů vzniku našeho kosmického souseda.

S jedním z nich přišla americká astrofyzikarka Robin Canupová v roce 2012. Jednalo se o model, který počítal se srážkou dvou planet, z nichž obě měly mít poloviční hmotnost současné Země. Simulace ukázaly, že po takové srážce, by Země s Měsícem byly tvořeny z poloviny materiálem impaktoru a z poloviny materiálem „terče“. Slabinou modelu byla nutnost většího impaktoru (5x větší než Mars), než předpokládala původní teorie velké srážky.

S velmi zajímavou teorií přišel i vědecký tým vedený Ralucou Rufuovou z prestižního Weizmannova institutu věd v Izraeli, který vychází z předpokladu, že v raném období formování Sluneční soustavy musely být srážky naší planety s jinými velkými tělesy poměrně častou záležitostí. Co když tedy vznik Měsíce nezpůsobila jedna gigantická srážka, ale desítky menších impaktů, které zajistily dostatečné promísení zárodečného materiálu? Aby Rufuová tuto teorii potvrdila, uskutečnila přes 800 počítačových simulací vzniku Měsíce. Bombardovala naši planetu množstvím projektilů různých velikostí. Každý kosmický projektil, který narazil do Země, vymrštil do prostoru roztažený materiál. Ten se hromadil kolem Země, chladl a vytvářel malé měsíce,

jež postupně migrovaly dál od planety, aby se o několik milionů let později spojily do jednoho velkého Měsíce. Když se počet projektilů přiblížil ke dvaceti, začal se na simulacích vytvářet Měsíc podobný tomu skutečnému. Tato teorie publikovaná v roce 2017 má velkou přednost. Nepočítá totiž se srážkou s tak velkým tělesem, jakým měla být Theia, ale s řadou mnohem menších těles, jejichž výskyt ve vnitřní části Sluneční soustavy je mnohem pravděpodobnější než existence dalšího tělesa planetárních rozměrů.

**Astronomové či astrofotografové si občas při práci stýskají, že jim Měsíc na obloze všechno přezáří. Proč jej máte rád Vy a pamatujete si, kdy jste se na Měsíc poprvé s potěšením podíval?**

Já osobně neznám člověka, kterého by pohled na Měsíc nefascinoval. I ti jeho nezarytější odpůrci si nejspíš vybaví, jak našeho kosmického souseda vnímali jako děti. Bylo to okouzlení, zvědavost, nadšení. Ano, chápu, že až z nadšených dětí vyrostou seriózní astronomové, začnou lunární svit nesnášet. Já jsem na tom byl podobně. Pozoroval jsem totiž jednu dobu objekty vzdáleného vesmíru, takže i pro mě byl Měsíc „nepřítelem“. Naštěstí ale ve mně přetrvaly pocity z dětství, a čím víc jsem později Měsíc poznával, tím víc mi přišel zajímavý. Na první pohled na Měsíc si už asi nevzpomenu, ale naprosto zřetelně se mi vybavuje moment, kdy jsem s pomocí Mapy Měsíce od Antonína Růkly vyhledal svůj první lunární dóm. V tu chvíli pro mě Měsíc přestal být jen přehlídkou různých velkých kráterů. Stal se pro mě úplně novým světem.

**Co nám o vzniku Měsíce říkají lunární horniny a kolik jich na Zemi v současné době máme?**

Bez nadsázky můžeme říct, že rozbor celkem 382 kg vzorků hornin dopravených v rámci mise Apollo přinesl ty nejcennější vědecké poznatky, jaké o Měsíci máme. Mezi dovezenými horninami převládaly bazalty a také brekcie, tvořené úlomky hornin z různých oblastí a z odlišných druhů matečných hornin. Geologové měli velký zájem o co nejpůvodnější materiál měsíční kůry. Takový fragment horniny se podařilo nalézt až expedici Apollo 15. Šlo o vzorek 15415, který získal předždivku *Genesis Rock*. Radiometrické datování potvrdilo jeho velké stáří: 4,1 miliardy roku. „Kámen stvoření“ ovšem nakonec nebyl nejstarším dovezeným vzorkem měsíčního materiálu. V brekci 67215, kterou z Měsíce odebrala expedice Apollo 16, se podařilo objevit minerály, které vykrytalizovaly již před 4,46 miliardami roků. A právě tento údaj se blíží současnému datování nejdůležitější události ve vývoji Měsíce: jeho vzniku.

**Proč je Měsíc ve vázané rotaci se Zemí a jak k tomu postupně došlo?**

Nejprve si musíme uvědomit, že synchronní neboli vázaná rotace, při které se satelit otáčí kolem své rotační osy za stejnou dobu, za jakou oběhne svou mateřskou planetu, je ve Sluneční soustavě běžná. Tento způsob oběhu vzniká díky vzájemnému slapovému působení planet a jejich měsíců, při kterém dochází ke zpomalování rotace obou těles a zároveň ke vzdalování satelitů od mateřských planet. Ke

zpomalování rotace velmi hmotných planet ovšem dochází podstatně pomalejším tempem, takže do vázané rotace jsou nejdříve polapeny jejich satelity. Po dostatečně dlouhém čase se však zpomalí i rotace mateřské planety a vznikne tak oboustranně vázaný pár, jakým je i Pluto s Charonem.

Podle numerických simulací vývoje systému Země-Měsíce se náš souputník dostal do synchronní rotace velmi brzy, dlouho před závěrečnými fázemi jeho akrece. To však ještě nemusí znamenat, že Měsíc k nám od té doby přivrací stále stejnou polokouli. Jestliže počítáme s velkou poloosou dráhy Měsíce, jaká je v současnosti, pak podle Marka A. Wieczorka a Mathieu Le Feuvera z Pařížského institutu fyziky Země, může vznik každého impaktního kráteru o průměru nad 300 kilometrů synchronní rotaci narušit. Po obnovení synchronní rotace se mohla orientace Měsíce vůči Zemi zase vrátit do předchozí polohy nebo se také mohla změnit až o 180°.

#### **Jak se od sebe liší přivrácená a odvrácená strana Měsíce?**

I když první fotografie odvrácené strany, které pořídila sovětská sonda Luna v říjnu roku 1959, byly velmi nekvalitní, připravily pro vědce velké překvapení. Ukázalo se totiž, že odvrácená strana se na první pohled liší od strany přivrácené k Zemi, a to téměř úplnou absencí tmavých čedičových výplní (měsíčních moří), které na přivrácené straně tvoří neodmyslitelný rys měsíčního povrchu. Pokud tento poměr vyjádříme podle současných poznatků číselně, tak tmavá měsíční moře tvoří 31,2% povrchu přivrácené strany, ale jen 2,6% povrchu strany odvrácené.

#### **Proč tomu tak je?**

Při hledání odpovědi na tuto otázku musíme začít s vysvětlením vzniku samotných měsíčních moří. Už při pohledu dalekohledem snadno zjistíme, že lávové výplně moří se soustřeďují do velkých kráterů a pánví – čili do pozůstatků po dopadech planetek. Nabízí se proto snadné vysvětlení, že láva zde vznikla díky impaktům, které roztavily měsíční kůru. Když ale porovnáme radiometrická datování stáří impaktních pánví a jejich lávových výpl-

ní, zjistíme, že se liší až o stovky milionů let! Ohnivé fontány žhavé lávy se tedy po měsíčním povrchu rozlévaly dávno po vzniku pánví. Magma roztavené teplem z pozdějšího rozpadu radioaktivních prvků v nitru Měsíce pouze využilo hlubokých trhlin způsobených impakty, skrze něž se mohla tavenina snadněji prodat k povrchu. A právě tím se vysvětluje i absence měsíčních moří na odvrácené straně! Už na základě měření v rámci misí Apollo geologové zjistili, že na přivrácené straně Měsíce je kůra tenčí než na odvrácené. Tavenina tak mohla z měsíčního pláště tenčí kůrou přivrácené strany pronikat snadněji než tlustší kůrou na straně odvrácené.

Pak už „jen“ zbývalo Proč má kůra na odvrácené straně větší mocnost než na přivrácené? Zdá se, že i tomuto problému jsou geologové na stopě. V roce 2011 publikovali odborníci na impakty Martin Jutzi a Erik Asphaug z Kalifornské univerzity teorii, podle níž došlo k nahromadění hmoty v kůře odvrácené strany tak, že se zde „přilepilo“ jiné komické těleso. Naše Země mohla mít v minulosti nikoli jeden, ale hned dva satelity! Oba satelity mohly být pozůstatkem obří srážky Země s jiným kosmickým tělesem, ke které došlo před více než 4 miliardami lety. Menší satelit o průměru asi 1300 km se však nedlouho po svém vzniku zřítíl na ten větší.

Je zřejmé, že menší sourozenec současného Měsíce se pohyboval kolem Země po velmi podobné dráze jako samotná luna. Díky tomu byla kolizní rychlost obou těles podstatně menší (jen asi 2 km/s) než v případě jiných srážek, například s planetkami nebo jádry komet. Tato srážka proto nevyvolala takovou destrukci, jakou způsobují běžné impakty o rychlostech kolem 30 km/s a více. Malý měsíc proto při srážce nevytvořil klasickou prohlubeň (impaktní pánev), ale spíše se „přilepil“ na dnešní odvrácenou stranu Měsíce a vytvořil tak bariéru, která zamezila snadnějšímu výstupu taveniny z měsíčního pláště na povrch.

#### **Mohl byste nám sdělit, jaké nejzajímavější krátery se na Měsíci nacházejí?**

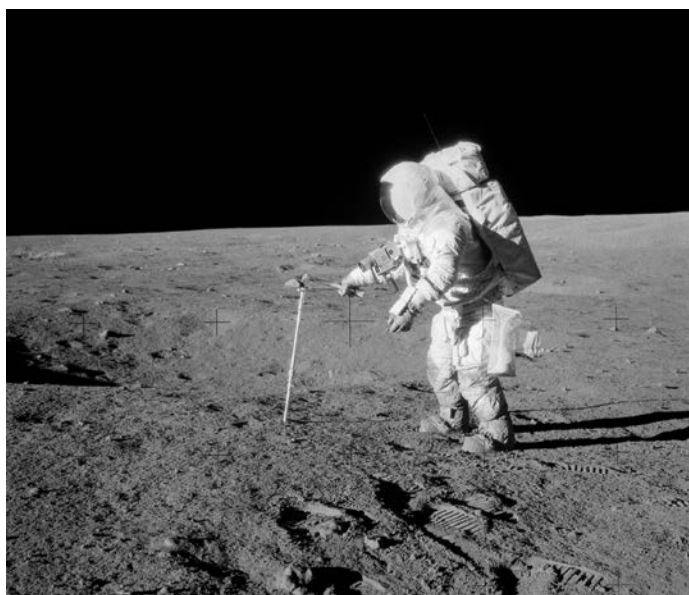
Každý lunární kráter je svým způsobem za-

jímavý. Každý je unikát. Pokud bych ale měl vybrat pouze jeden, nebyl by to dle správné nomenklatury kráter, ale rovnou impaktní pánev. A to pánev Orientale, která představuje jednu z nejlépe zachovalých stop po obřích srážkách v celé Sluneční soustavě. Tato gigantická impaktní struktura je Rosettskou deskou dávných katastrof. Pánev Orientale byla poslední, skutečně velkou impaktní událostí, která se na Měsíci odehrála. Odhaduje se, že vznikla při střetu s tělesem o průměru přibližně 60 km, před asi 3,80 miliardy let. Zní to tak dobře, že by člověk rád hned zamířil na tuto velkolepou strukturu dalekohled. Pánev Orientale ale v celé její velkoleposti ze Země nikdy nevidíme. Centrum celé struktury se totiž ke škodě pozemských pozorovatelů nachází až na 95. stupni západní selenografické délky, takže je viditelná jen za mimořádně příznivé librace v délce.

#### **U Měsíce se střídají různé fáze a periody jeho pohybu. Můžete je blíže vysvětlit?**

Pokud budeme měřit změny podob a poloh Měsíce stejně pečlivě jako naši předkové, objevíme řadu period. Jednou z nich je doba, za jakou náš souputník doputuje na stejné místo vůči hvězdám – proto se mu také říká siderický měsíc, neboť *sidus* znamená latinsky hvězda. Je to doba, za kterou Měsíc oběhne naši planetu. Vystřídání měsíčních fází (synodický měsíc) trvá našemu kosmickému sousedovi zhruba o dva dny déle než oběh kolem Země (siderický měsíc). Důvod je poměrně prostý. Za dobu jednoho oběhu Měsíce kolem Země se na své dráze kolem Slunce posune i Země, takže aby se Měsíc dostal do stejné polohy vůči Zemi a Slunci, musí se na své dráze ještě o něco posunout.

Při přesném určování poloh Měsíce je ale potřeba počítat i s dalšími periodami, které náš souputník absoluuje. Velmi pečlivá pozorování například ukazují, že poté, co Měsíc oběhne jednou Zemi, protne ekliptiku v bodě, který se nachází zhruba o 1,6° západně od místa předchozího protnutí. Je to způsobeno tím, že uzly čili místa, kde Měsíc kříží ekliptiku, se pohybují směrem na západ. Proto je také doba, za kterou Měsíc dojde ke stejnému uzlu



Odběr vzorků měsíčních hornin v rámci mise Apollo 12. (Foto: NASA)



Snímek, na kterém je vidět část přivrácené i odvrácené strany Měsíce, pořídila posádka kosmické lodi Apollo 11. (Foto: NASA)

kratší než siderický měsíc. Podle starověkých představ žil v uzlech drak, který požíral Slunce, proto tuto dobu označujeme jako drakonický měsíc.

Astronomové používají ještě tzv. tropický měsíc, který označuje oběh Měsíce od jarního bodu zpět k jarnímu bodu. A vzhledem k tomu, že i jarní bod se zvolna posouvá směrem k západu, je také tato doba o pár sekund kratší než měsíc siderický. Aby byl náš výčet měsíců kompletní, neměli bychom zapomenout ještě na anomalistický měsíc. Jedná se o dobu, která uběhne od průchodu Měsíce perigeem (přízemím). Anomalistický se mu říká proto, že úhel, který opiše průvodič Měsíce od okamžiku průchodu perigeem, se nazývá pravou anomálií.

**Sonda Clementine mimo jiné přispěla i ke zjištění, že se na Měsíci nachází největší impaktní kráter ve Sluneční soustavě. O který se jedná a kde bychom jej na Měsíci mohli nalézt?**

Potvrzení obrovské impaktní struktury, jež dostala označení Jižní pól-Aitken (název vychází z hraničních bodů pánve: jižního pólu Měsíce a kráteru Aitken) přišlo už v prosinci roku 1990, kdy kolem našeho nejbližšího vesmírného souseda proletěla americká sonda Galileo. Její snímky ukázaly, že na odvrácené

straně existuje velká tmavá skvrna, jejíž zbarvení způsobuje vyšší zastoupení sloučenin železa, než jaké má materiál okolní pevniny. Skutečný rozsah této pánve ovšem pomohla odhalit až výšková měření sondy Clementine v roce 1994. Na topografických mapách se objevila gigantická impaktní pánve s průměrem asi 2500 km a hloubkou zhruba 12 km. Po pánvi Utopia (průměr 3300 km) na Marsu, se tak měsíční pánve Jižní pól-Aitken stala dokonce druhou největší známou pánvi v celé Sluneční soustavě!

Pánve SPA (South pole-Aitken) je pozoruhodným útvarem nejen svou velikostí. Už samotný obrys pánve stojí za povšimnutí, protože okraje pánve jsou výrazně protáhlé. Podle dosud nepřesnějších topografických dat z laserového výškoměru (LOLA) na palubě americké sondy Lunar Reconnaissance Orbiter, jež uskutečnila již přes 7 miliard výškových měření, mají vnější valy pánve SPA tvar elipsy o rozměrech 2701 x 2372 km. Tak výrazné protažení může svědčit o šikmém impaktu.

**Napsal jste několik publikací, týkajících se Měsíce, které to jsou, a co se v nich veřejnost může dozvědět?**

S psaním o Měsíci jsem začal už v roce 1991, kdy jsem v rámci projektu Amatérská prohlídka oblohy vydával zpravodaj Terminátor, ur-

čený pro pozorovatele Měsíce. V roce 1997 následovala útlá knížka Měsíc v dalekohledu, kterou vydalo Sdružení hvězdáren a planetárií. Pak jsem pro nakladatelství Aventinum napsal dvě výpravnější publikace Měsíc (2006) a Měsíc známý i tajemný (2013). Poslední dobou jsem se zaměřil na literaturu pro děti. Ve spolupráci s nakladatelstvím B4U Publishing jsem připravil obrázkovou publikaci Všechno, co jste kdy chtěli vědět o Měsíci (2019) a Atlas měsíčních dobrodružství (2019), která vyšla v mnoha jazykových mutacích, včetně slovenské. Velkou radost mám z e-booku Lunární noci pro fajnšmekry (2020), který si z mé stránky mesic.astronomie.cz zdarma stáhlo již na 2 tisíce čtenářů. Jde o průvodce s proměnami vybraných útvarů v průběhu celých lunárních dní. Součástí publikace je i itinerář, který pozorovatelům nebo lovcům unikátních fotografií radí, co se za konkrétního osvětlení na Měsíci děje. Načasování je natolik přesné, že se jedná o světový unikát, který vznikl na základě stovek pozorování a tisíců fotografií. Průvodce se setkal u pozorovatelů s natolik nadšeným přijetím, že ve spolupráci s Hvězdárnou a planetáriem nyní připravujeme jeho rozšířenou tištěnou verzi.

*Zhovárala sa Jana Žďárská*



Postupné změny barev vycházejícího Měsíce. (Foto: P. Gabzdyl)



**Mgr. Pavel Gabzdyl (\*1974)** vystudoval geologii na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity v Brně. Jeho celoživotní vášní je Měsíc, o kterém napsal desítky knih. Působí na Hvězdárně a planetáriu v Brně, pro kterou vytvořil vzdělávací pořady a několik expozic. Spolupracuje rovněž s Ústavem teoretické fyziky a astrofyziky na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity v Brně. V roce 2007 po něm byla pojmenována planetka Gabzdyl (43971) a v roce 2013 mu byla za jeho popularizační činnost udělena Českou astronomickou společností cena Littera Astronomica. V rámci úspěšného projektu Neuvěřitelné Brno se věnuje pořizování neobvyklých záběrů města Brna.