

# POVĚTROŇ

Královéhradecký astronomický časopis

číslo 2/2006

ročník 14



SLOVO ÚVODEM. Značnou část květnového čísla věnujeme „detektivní“ rekonstrukci slunečních hodin na západní stěně Révového nádvoří v pražském Klementinu. Po mnoha desetiletích, kdy byly hodiny skryty, máme možnost opět spatřit původní práci jezuitského astronoma a malíře z přelomu 17. a 18. století.

Vpravdě dlouhá přestávka dělí druhý a třetí díl astronomického kurzu; tentokrát pojednáváme o vzniku planet z planetesimál. Konstruujeme jednoduchý model růstu planetesimál a probíráme i nejnovější scénář vývoje planetesimálního disku.

Pepa Kujal ve svých dvou článcích reflektuje březnové zatmění, které pozoroval z Turecka, a dubnovou rozpadající se vlasatici 73P, kterou fotografoval z domečku pomocí JST.

Nakonec jsme zařadili pravidelné rubriky *Děni na obloze* a *Ze starých tisků*.

Miroslav Brož



Obr. 1 — Révové nádvoří Klementina s osmero slunečními hodinami.

---

Povětroň 2/2006; Hradec Králové, 2006.

Vydala: **Astronomická společnost v Hradci Králové** (6. 5. 2006 na 182. setkání ASHK)

ve spolupráci s **Hvězdárnou a planetáriem v Hradci Králové**

vydání 1., 32 stran, náklad 100 ks; dvoměsíčník, MK ČR E 13366, ISSN 1213-659X

Redakce: Miroslav Brož, Martin Cholasta, Josef Kujal, Richard Lacko,

Martin Lehký a Miroslav Ouhrabka

Předplatné tištěné verze: vyřizuje redakce, cena 35,- Kč za číslo (včetně poštovného)

Adresa: ASHK, Národních mučedníků 256, Hradec Králové 8, 500 08; IČO: 64810828

e-mail: <ashk@ashk.cz>, web: <<http://www.astrohk.cz/ashk/>>

## Obsah

strana

Miroslav Brož, Martin Šolc, Jakub Kándl: <i>Gnómonická rekonstrukce slunečních hodin na Révovém nádvoří Klementina</i> . . . . .	4
Miroslav Brož: <i>Astronomický kurz (3) — Planetesimály a embrya</i> . . . . .	14
Josef Kujal: <i>Cesta za tureckým Sluncem</i> . . . . .	24
Josef Kujal: <i>Fotografování komety 73P</i> . . . . .	27
Petr Horálek, Martin Cholasta: <i>Dění na obloze v květnu a červnu 2006</i> . . . . .	29
Martin Lehký: <i>Ze starých tisků V.</i> . . . . .	31

Elektronická (plnobarevná) verze časopisu Povětroň  
ve formátu PDF je k dispozici na adrese:

<http://www.astrohk.cz/ashk/povetron/>

---

Titulní strana: Levé a pravé západní sluneční hodiny na Révovém nádvoří Klementina po rekonstrukci. Levé jsou fotografované 24. 4. 2006 ve 14 h 7 min SEČ. Na číselníku hodin lze číst údaj 14 h ( $5 \pm 3$ ) min PMSČ, což odpovídá situaci na konci dubna, kdy je oprava SEČ – PMSČ blízka nule (viz tab. 3). Pravé jsou fotografované ve 13 h 57 min SEČ. K článku na str. 4.

# Gnómonická rekonstrukce slunečních hodin na Révovém nádvoří Klementina

Miroslav Brož, Martin Šolc, Jakub Kándl

V září roku 2005 jsme pracovali na gnómonické rekonstrukci dvojích slunečních hodin na západní stěně Révového nádvoří Klementina, toho času sídla Národní knihovny České republiky [5], někdejší jezuitské koleje [8]. Hodiny byly více než 50 let ukryté pod bující révou<sup>1</sup>, pouze u pravých trčel z révy kolmý ukazatel, stále „připomínající“ jejich existenci. Při celkové revitalizaci nádvoří, která zahrnovala opravy střech, kašny, výzdoby, atd., iniciovali Pavel Dykast a Pavel Macenauer také renovaci slunečních hodin. Bylo postaveno 15 m vysoké lešení, réva sestřižena a číselníky hodin odkryty. Omítka byla již poškozena, byly patrné jen základní motivy výzdoby. Některé části číselníku, hodinové rysky, číslice nebo datové křivky a ukazatel levých hodin chyběly. Naším úkolem bylo spočítat oboje sluneční hodiny tak, aby opět správně „pracovaly“. Vlastní rekonstrukci malby prováděli JK a Petr Hájek.

Postupovali jsme následovně:

- 1) Důkladně jsme obhlédli číselníky, abychom zjistili, co mají ukazovat.
- 2) Změřili jsme souřadnice význačných bodů číselníku a ukazatele.
- 3) Metodou vrženého stínu (obr. 2) jsme změřili orientaci stěny vzhledem ke světovým stranám.
- 4) Spočítali jsme číselník teoreticky (programem SHC, [1]) a porovnali jej s měřenými body.
- 5) Když jsme dosáhli dobré shody, vynesli jsme uhlem na stěnu chybějící čáry a číslice a zvýraznili stávající, takže restaurátoři mohli malbu obnovit správně z hlediska gnómoniky.

Jednou za týden až 14 dní jsme se scházeli na lešení s restaurátory, zástupci Státního památkového ústavu a pracovníky Národní knihovny, abychom postup rekonstrukce konzultovali.

Zeměpisné souřadnice (v systému WGS-84) stanoviště pravých hodin jsou  $\lambda = 14^{\circ} 24' 56,5''$ ,  $\varphi = 50^{\circ} 5' 12,4''$ . Levé hodiny jsou o  $4''$  severněji. V databázi slunečních hodin [2] mají označení 01 1/16 (levé) a 01 1/15 (pravé).

Soudě podle podobného stylu výzdoby a datace jiných malovaných hodin v Klementinu, byly sluneční hodiny na západní stěně Révového nádvoří vytvořeny pravděpodobně ve druhé polovině 17. století nebo v 1. polovině století osmnáctého. Například sousední jižní levé hodiny na Révovém nádvoří (ev. č. 01 1/6), mají vročení „1662“ a východní hodiny na Studentském nádvoří (ev. č. 01 1/1) „1658“.

---

<sup>1</sup> Naposledy je zřejmě viděl Ernest Zinner ve 40. letech 20. století a zaznamenal jejich existenci v knize [12].

Západní hodiny na Révovém nádvoří zřejmě nikdy v minulosti nebyly přemalované, což je jistě unikátní příležitost vidět původní práci jezuitského astronoma a malíře. V kontrastu s tím například jižní pravé hodiny (ev. č. 01 1/8) byly přemalované v průběhu staletí snad desetkrát, čímž vznikla dnešní gnómonická chybnost: například z ladných „ostřejších“ hyperbol (obratníků na kalendáriu) se staly „tupější“ široké oblouky [9].

Autor těchto slunečních hodin, ani jiných hodin v Klementinu, není znám. Jisté je, že musel mít určité astronomické vzdělání. Astronom VALENTIN STANSEL SJ (1621–1705) pobýval v Klementinu příliš krátkou dobu, než aby stihl hodiny vytvořit. Dalším, kdo se zde věnoval astronomii byl THEODOR MORETUS (1601/2–1667). Pobýval v Praze od roku 1630 a jeho přednášky zahrnovaly i podstatnou část gnómoniky.

### Pravé západní hodiny

Jako jednodušší se ukázala rekonstrukce pravých hodin. Číselník obsahoval dvojí úsečky (obr. 4): pro hodiny počítané od východu slunce (babylónský čas), pro hodiny počítané od západu slunce předchozího dne (staročeský, italský čas) a také kalendárium vymezené dvěma datovými křivkami pro slunovraty (odpovídají obratníkům Raka a Kozoroha) a úsečkou pro rovnodennosti (která je obrazem rovníku). Výzdobu tvořily stuhy po stranách kalendária, motiv malby a případné nápisy nebylo možné rozpoznat. Hodiny od východu byly číslovány světlými arabskými číslicemi ve stuze, ale zcela chyběly číslice pro ty úsečky, které ke stuze nedosahovaly. Hodinám od západu příslušely tmavé arabské číslice, vepsané přes čáry dovnitř číselníku; některé číslice ovšem chyběly. Levá polovina číselníku byla velmi nezřetelná, nebylo jasné, kde čáry pokračují a kde jsou číslice.

Číselník (obdélník uvnitř rámu) měřil 357 cm krát 200 cm. Ukazatel byl kolmý ke stěně a střed kuličky (nodu) byl vzdálen od paty 46,25 cm. Dále jsme měřili polohu paty ukazatele, horizontu, konců datových křivek a několika hodinových úseček (tab. 1).

bod	$x/cm$	$y/cm$
<i>P</i>	0	0
<i>A</i>	-197	-170
<i>B</i>	-81	-170
<i>C</i>	-84	-170
<i>D</i>	-28	0
<i>E</i>	-7	-35
<i>F</i>	-303	-127

**Tab. 1** — Změřené souřadnice význačných bodů na číselníku pravých západních hodin. Počátek souřadnicové soustavy je v patě ukazatele *P*, kladné souřadnice jsou měřené doprava a nahoru. Bod *A* je průsečík rovnodennostní přímky a spodního okraje číselníku, *B* průsečík letní hyperboly a okraje, *C* průsečík hodinové úsečky pro 9 h od východu slunce s okrajem, *D* průsečík téhož s horizontem, *E* průsečík úsečky pro 20 h od západu slunce a letní hyperboly, *F* průsečík téhož s levým okrajem číselníku.



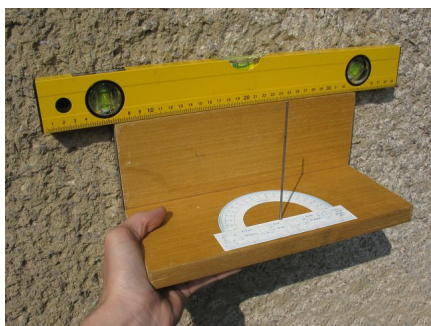
Jednoduchým stínovým zařízením s úhломěrem (obr. 2) jsme opakovaně (dvacetkrát, v různých denních dobách a na více místech číselníku) měřili úhel  $\alpha = A - A_{\odot}$  mezi azimutem  $A$  kolmice ke stěně a azimutem  $A_{\odot}$  Slunce. Podle teorie VSOP82 pohybu Země kolem Slunce [11] jsme spočetli azimuty Slunce  $A_{\odot}$  v daných okamžicích a prostými součty  $\alpha + A_{\odot} = A$  a aritmetickým průměrem přes všechna měření jsme určili průměrný azimut kolmice ke stěně  $\bar{A} = (90,4 \pm 0,2)^{\circ}$ .

Původní autor návrhu slunečních hodin zřejmě neznal orientaci stěny s takovou přesností a počítal s hodnotou  $90^{\circ}$ , tj. přesně západní stěnou; svědčí o tom i poloha paty ukazatele přesně na rovnodennostní přímce. Ušetřil si tím i komplikace při gnomonickém návrhu číselníku. (Ovšem mohl také celý číselník kreslit postupně během roku metodou vrženého stínu.) Pro nás sice není problém počítat s hodnotou  $90,4^{\circ}$ , ale naším cílem je rekonstruovat hodiny v původní podobě, tudíž budeme nadále počítat s hodnotou  $90^{\circ}$ . Odchytky od pravého místního slunečního času (PMSC) způsobené tímto zaokrouhlením azimutu jsou nejvýše řádu 1 min.

Číselník (obr. 5) vypočítaný pro danou délku ukazatele  $d = 46,25$  cm, orientaci stěny  $A = 90^{\circ}$  a zeměpisnou šířku Klementina  $\varphi = 50^{\circ} 5' 13''$  dobře odpovídá měřeným bodům (v rámci střední chyby měření 1 cm).

Nyní jsme mohli s jistotou vymezit hranice kalendária, doplnit hodinové úsečky ve zničené části číselníku a správně je ocejchovat. Díky této „náповědě“ jsme zpětně rozpoznali i zbytky číslic 19 a 20, příslušející času od západu slunce (obr. 3). Číslice hodin od východu jsme navrhli doplnit na okraj číselníku.

Restaurátoři nejprve ze slunečních hodin sejmuli vrstvu prachových nečistot. Dále byla provedena celoplošná konsolidace barevné vrstvy. Defekty v omítkové vrstvě byly doplněny tmelem na bázi odleželého vápna. Nakonec byla provedena finální retuš, která určila výslednou podobu hodin. Výsledek restaurování je dokumentován na titulním obrázku.



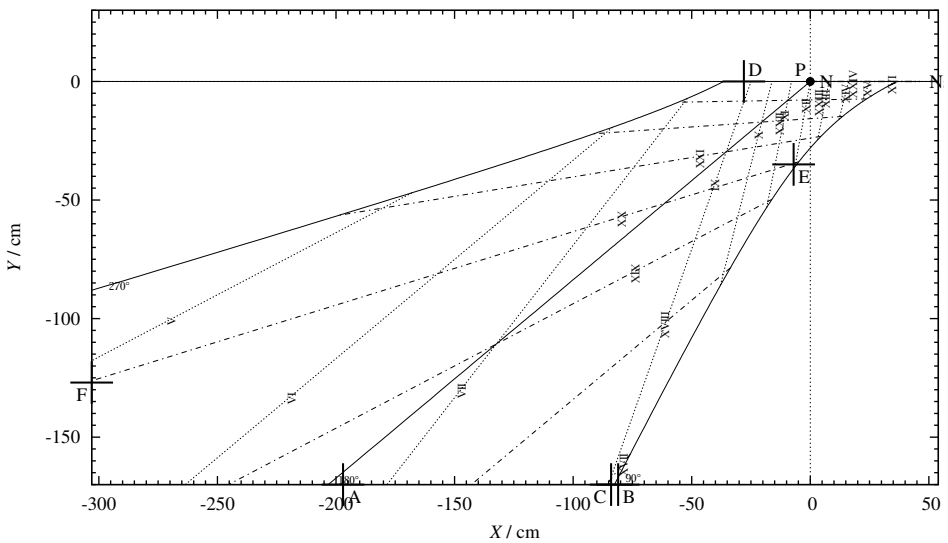
**Obr. 2** — Jednoduché stínové úhломěrné zařízení pro měření úhlu  $\alpha$ . Úhломěr přiložený ke stěně je vodorovný a svislá tyčka na něj vrhá stín. Na tomto obrázku je úhel  $\alpha \doteq -41^{\circ}$ .



**Obr. 3** — Zbytky číslice 20 (náležející úsečce pro hodiny od západu slunce) na číselníku praveých západních hodin.



Obr. 4 — Právě západní hodiny na Révovém nádvoří Klementina, stav na začátku rekonstrukce.



Obr. 5 — Číselník pravých západních hodin vypočítaný programem SHC [1]. Souřadnice a popis význačných bodů uvádí tab. 1.

## Levé západní hodiny

Levé hodiny se ukázaly býti takřka „detektivkou“. Především chyběl ukazatel, zůstal po něm jen otvor (obr. 6). Okolí otvoru tvořila omítka odlišné barvy, pravděpodobně známka nějaké předchozí opravy ukazatele. Potom osa otvoru neležela na rovnodennostní přímce, ale o 2 cm vlevo (severněji), což je ovšem chyba (předpokládáme-li azimut stěny  $90^\circ$  a ke stěně přesně kolmý ukazatel).

Na číselníku (obr. 8) bylo patrných 7 římsky číslovaných hodinových úseček pro PMŠČ a také 7 datových křivek. Některé datové křivky ale měly evidentně nesprávný tvar, byly zalomené u hodinové rysky I. Dokonce byly zřetelné i jakési retuše u levého (severního) okraje číselníku (obr. 7).

Výzdobu tvořil uprostřed nahoře velký letící anděl, s malými přesýpacími hodinami nad hlavou, zřejmě Chronos. Vpravo dole byly nezřetelné postavy dvou malých andílků. Kalendárium obklopovaly bohaté stuhy. Žádné známky pozdějších přemaleb nebyly na fresce nalezeny.



**Obr. 6** — Otvor po chybějícím ukazaleli levých západních hodin.



**Obr. 7** — Lomené datové křivky a retuše v levé části číselníku levých západních hodin.

Měření azimutu stěny (shrnuté v tab. 2) poskytlo výsledek  $\bar{A} = (90,4 \pm 0,2)^\circ$ , stejný jako u pravých hodin, a stejně jsme pro další výpočty použili zaokrouhlenou hodnotu  $90^\circ$ .



datum	čas UT	$\alpha/^\circ$	$A_\odot/^\circ$	$A/^\circ$
8. 9. 2005	11 h 44 min	76	15,5	91,5
	11 45	74,5	15,8	90,3
	11 46	75,5	16,1	91,6
	11 50	74	17,5	91,5
	11 51	73	17,9	90,9
	11 51	73,5	17,9	91,3
	12 19	63,5	27,1	90,6
	12 19	63	27,1	90,1
	12 20	63	27,5	90,5
	12 20	62,5	27,5	90,0
	12 21	63,5	27,8	91,3
	12 40	56,5	33,7	90,2
	12 41	56	34,1	90,1
	12 41	56	34,1	90,1
	13 29	42	47,8	89,9
	13 29	41,5	47,8	89,3
	13 29	42	47,8	89,9
	13 31	42	48,4	90,4
	13 31	41,5	48,4	89,9
	13 31	41,5	48,4	89,9
12. 9. 2005	13 h 34 min	41,5	48,6	90,1
	13 37	41	49,4	90,4
	13 37	41	49,4	90,4
	13 37	40	49,4	89,4
	13 38	40	49,7	89,7
	13 38	40,5	49,7	90,2

**Tab. 2** — Úhly  $\alpha = A - A_\odot$  měřené v různých okamžicích na různých místech číselníku levých západních hodin, příslušné azimuty Slunce  $A_\odot$  a výsledné azimuty  $A$  kolmice ke stěně.

Opět jsme změřili význačné body. Ze vzdálenosti  $|PA|$  paty ukazatele  $P$  od průsečíku  $A$  rovníku a hodinové úsečky pro I. hodinu jsme spočetli první odhad délky ukazatele

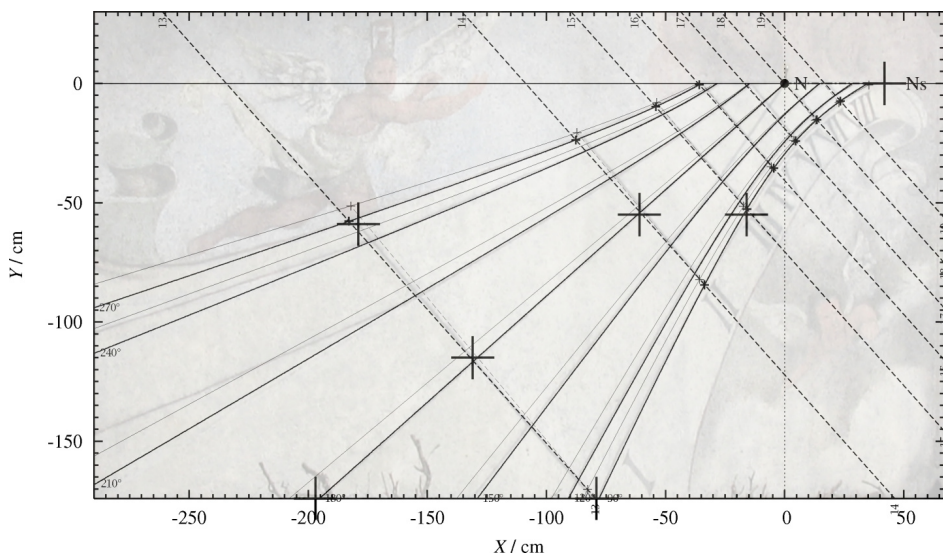
$$d = |PA| \sin t_\odot = (175 \pm 1) \text{ cm} \cdot \sin 15^\circ = (46,9 \pm 0,3) \text{ cm}.$$

Nastal ale problém: číselník vypočtený programem SHC systematicky nesouhlasil s měřeními body. Například rovník na kalendáriu měl sklon k vodorovné rovině odlišný od  $90^\circ - \varphi$ , jakoby odpovídal nějaké jiné zeměpisné šířce  $\varphi' = (48,5 \pm 0,2)^\circ$  a nikoli šířce Klementina.

Přepočteli jsme tedy nový číselník pro menší  $\varphi' = 48,5^\circ$  a zjistili jsme, že dobře odpovídá měřeným bodům v pravé části číselníku a také dvěma *retušovaným* datovým křivkám vlevo (obr. 9). Třetí retuš chybně spojuje dvě různé datové křivky (pro vstup do znamení Střelce nebo Vodnáře a pro obratník Kozoroha).



Obr. 8 — Západní hodiny po odstranění révy.



Obr. 9 — Gnomonická rekonstrukce číselníku levých západních hodin. Tenké čáry přísluší zeměpisné šířce  $\varphi = 50^{\circ} 5'$  (tj. poloze Klementina); tlusté čáry, které lépe odpovídají měřeným bodům (velkým křížkům), jsou počítané pro  $\varphi' = 48,5^{\circ}$ .

Lomené datové křivky (ležící ve vrstvě nad retušemi) naopak v oblasti mezi hodinovou úsečkou pro I hodinu a levým okrajem číselníku spojují teoretické křivky pro  $\varphi' = 48,5^\circ$  a  $\varphi = 50^\circ$ .

Vysvětlujeme si to zhruba takto: autor (malíř) sluneční hodiny okopíroval z nějakého stanoviště se zeměpisnou šířkou přibližně  $48,5^\circ$ ; snad proto, že výpočet mnoha datových křivek byl pro něj příliš složitý nebo vytyčení metodou vrženého stínu příliš zdouhavé. Při malbě „s hrůzou“ zjistil, že hodiny neukazují dobře, a snažil se situaci zachránit — retušoval dvě datové křivky (příslušné Štíru/Rybám a Střelci/Vodnáři), kde byla odchylka největší, a nahradil je jinými, které se více přibližují správným křivkám. Zmiňovaná třetí retuš byl asi autorův omyl.

Pátrali jsme zběžně, kde mohla být předloha těchto klementinských hodin. Na našem území je pouze jedno známé barokní stanoviště se zeměpisnou šířkou okolo  $48,5^\circ$ , a to cisterciácký klášter ve Vyšším Brodě. Tam sice nejsou zachované žádné západní hodiny, ale na rajském dvoře kláštera jsou jižní hodiny se sedmi datovými křivkami (dnes bohužel velmi nepěkně poškozené bezohledným prolomením okapu, viz obr. 10). Je dost pravděpodobné, že dříve bývaly hodiny i na západní (a východní) stěně, jak je na klášterních dvorech obvyklé, a snad měly také sedm datových křivek, čili mohly sloužit jako předloha hodin v Klementinu.



**Obr. 10** — Zbytky jižních hodin se sedmi datovými křivkami, umístěné v cisterciáckém klášteře ve Vyšším Brodě (ev. č. CK 24). Foto Jan Trebichavský (1998).

Kontrolovali jsme i katalogy hodin v Rakousku [7], Německu a Švýcarsku [6], ale nalezení „kadidáti“ (Altenburg, Zwettl) jsou podle fotografií našim hodinám zcela nepodobní.

Přemýšleli jsme, zda chybný chod hodin v levé části číselníku nevyrovnat vhodným přihnutím ukazatele. Zjistili jsme ale, že to nelze udělat tak, aby byla zachována přesnost chodu hodin v ostatních částech číselníku. (Zejména vpravo,

v okolí ukazatele, jsou číselníky pro obě zeměpisné šířky, správnou i chybnou, téměř shodné, takže sebemenší pohyb ukazatele by ihned způsobil velké odchylky času nebo data.)

Vzhledem k výše uvedené interpretaci jsme se rozhodli všechny čáry i retuše ponechat jak jsou, protože to nejspíš odpovídá tomu, jak hodiny tvořil jejich původní autor. Plochu číselníku, na níž réva zanechala „mapy“, jsme pouze doporučili barevně sjednotit, čáry zvýraznit a retuše zeslabit. Shrňme, že hodiny jsou konstruovány pro zeměpisnou šířku  $\varphi' = 48,5^\circ$ , azimut stěny  $A = 90^\circ$ , ukazatel dlouhý  $d = 46,9$  cm a na číselníku jsou úpravy vhodné pro  $50^\circ$  s. š. Výsledná podoba hodin je vidět na obrázku 11 a na titulní straně.

Závěrem dodejme, že v Klementinu víme ještě o dvojích nerekonstruovaných slunečních hodinách. Zbytkem jedné je šikmý ukazatel s nodem na západní straně Astronomické věže; zde v omítce však nebyla nalezena žádná stopa barvy číselníku. Druhé zobrazuje Langweilův model Prahy z let 1826 až 1837 na jižní stěně téže věže, i když dnes nejsou již vůbec patrné.



Obr. 11 — Dvojice slunečních hodin na západní stěně Révového nádvoří Klementina.



- [1] BROŽ, M. *SHC — Návrh číselníku slunečních hodin* [online]. [cit. 2005-07-05]. [http://www.astrohk.cz/slunecni\\_hodiny.html](http://www.astrohk.cz/slunecni_hodiny.html).
- [2] BROŽ, M., NOSEK, M., TREBICHAŤSKÝ, J. aj. *Sluneční hodiny v České republice a na Slovensku* [online]. [cit. 2006-04-25]. [http://www.astrohk.cz/slunecni\\_hodiny.html](http://www.astrohk.cz/slunecni_hodiny.html).
- [3] BROŽ, M., NOSEK, M., TREBICHAŤSKÝ, J., PECINOVÁ, D. (Eds.) *Sluneční hodiny na pevných stanovištích. Čechy, Morava, Slezsko a Slovensko*. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1204-4.
- [4] BROŽ, M., ŠOLC, M. *Baroque wall sundials at Prague Clementinum College — their gnomonics, pictorial decoration and recent restoration treatments*. in: *Bohemia Jesuitica 1556–2006* (Ed. Cemus, P.), sborník abstraktů, Praha, 2006.
- [5] *Národní knihovna České republiky* [online]. [cit. 2006-04-15]. <http://www.klementinum.cz>.
- [6] PHILIPP, H., ROTH, D., BACHMANN, W. *Sonnenuhren Deutschland und Schweiz*. Deutsche Gesellschaft für Chronometrie, Stuttgart, 1994.
- [7] SCHWARZINGER, K. *Katalog der Ortsfesten Sonnenuhren in Österreich*. Österreichischer Astronomischer Verein, Wien, 1993.
- [8] ŠÍMA, Z. *Astronomie a Klementinum*. Praha: Národní knihovna ČR, 2001.
- [9] ŠOLC, M. *Zpráva o rekonstrukci slunečních hodin na Révovém nádvoří Klementina*. Praha: Národní knihovna, 1991.
- [10] ŠOLC, M. *Zpráva o rekonstrukci slunečních hodin na Astronomické věži Klementina*. Praha: Národní knihovna, 1995.
- [11] WOLF, M. (Ed.) *Astronomická příručka*. Praha: Academia, 1992.
- [12] ZINNER, E. *Alte Sonnenuhren an europäischen Gebäuden*. F. Steiner Verlag, Wiesbaden, 1954.

### měsíc v roce

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
1.	+6	+16	+15	+6	-1	0	+6	+9	+2	-8	-14	-9
10.	+10	+17	+13	+4	-1	+2	+8	+8	-1	-11	-14	-5
20.	+13	+16	+10	+1	-1	+4	+9	+6	-4	-13	-12	0
30.	+16		+7	0	0	+6	+9	+3	-8	-14	-9	+5

oprava času v minutách pro Prahu, Klementinum [14° 25' v. d. 50° 5' s. š.]

**Tab. 3** — Korekční tabulka času udávaného slunečními hodinami v Klementinu. Pro daný den v roce uvání opravu v minutách, kterou musíme přičíst k údaji čtenému na slunečních hodinách, tedy pravému místnímu slunečnímu času (PMSC). Korekce zahrnuje vliv časové rovnice (tj. nerovnoměrného pohybu Slunce po obloze) i rozdílu zeměpisných délek pásmového poledníku (15° východní délky) a Klementina (14° 24' 55"). Výsledkem je středoevropský čas (SEČ).

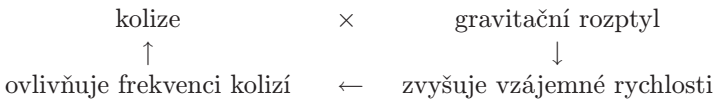


**Co je cílem?** Minule (v Povětroni 5/2004) jsme sledovali přeměnu plynu na kilometrové planetesimály. Nyní budeme zkoumat, jak se tato tělesa shlukují do větších planetárních embryí, terestrických planet a jak vznikají obří planety nabalováním okolního plynu.

## Kolizní růst na planetesimály

Připomeňme, že obíhající balvany brzdí tření o pomaleji obíhající plyn a že zrychlení klesá s rozměrem balvanu jako  $1/R$ . Na kilometrovou planetesimálu již tedy není vliv tření tak dramatický: velká poloosa se zmenšuje pomalu a těleso by spadlo na Slunce až za miliony roků. Poměrně rychleji ovšem klesají k nule výstřednosti a sklony drah, takže všechny planetesimály obíhají téměř po kružnicích, jejich vzájemné rychlosti jsou dosti malé a při srážkách se budou spíše spojovat než tříštit.

Jak rychle tedy planetesimály narůstají? To zřejmě závisí na tom, jak často se potkávají. Uvědomme si, že když se planetesimály těsně „netrefí“, gravitačně se rozptýlí a v průměru se zvyšuje jejich rychlost vzhledem k ostatním planetesimálám (což ovlivňuje frekvenci setkávání v budoucnu). Můžeme si pro názornost nakreslit takovéto schéma:



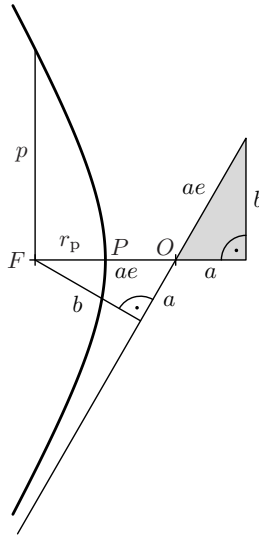
Zkusme přírůstek hmotnosti nějak jednoduše odhadnout: Jedna planetesimála mající poloměr  $R$  letí vzhledem ke všem ostatním průměrnou rychlostí  $v_{\text{rel}}$ . Ostatní planetesimály jsou rozmístěny v okolním prostoru, takže průměrná hustota látky je  $\rho$ . „Naše“ planetesimála za dobu  $dt$  proletěla vzdálenost  $v_{\text{rel}}dt$ . Všechna tělesa, která se nacházela blíž než  $R$ , se s ní srazila a hmotnost tedy narostla o  $dM = \rho v_{\text{rel}} dt \pi R^2$ .

Ovšem pozor! Zapomněli jsme na jednu důležitou věc: planetesimály se navzájem gravitačně přitahují, takže ve skutečnosti budou srážky častější. Během přiblížení ostatní planetesimály neletí vzhledem k té naší po přímce, ale po hyperbole (obr. 12), jak víme z problému dvou těles. Vzpomeňme, jak vypadá polární rovnice kuželosečky:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \varphi} \tag{1}$$

Geometrii by nám řekli, že hyperbola má tyto vlastnosti:  $r_p = a(1 - e)$ ,  $b^2 = a^2(e^2 - 1)$ ,  $p = \frac{b^2}{a} = \frac{h^2}{GM}$ ,  $h = b \cdot v_\infty$ . Jak souvisí parametr  $p$  ve třetí rovnici

s momentem hybnosti  $h$  vztaženým na jednotku hmoty, víme z řešení problému dvou těles. A tento moment hybnosti si ve čtvrté spočtu jako  $\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}$  v nekonečnu. Chci vyjádřit  $b$ . Vyjde:  $b^2 = r_p^2 + \frac{2GM r_p}{v_\infty^2}$ .



Obr. 12 — Schéma hyperboly.

Pro porovnání pohybu po přímce a po hyperbole dosadíme za  $r_p = R$ ,  $v_{\text{rel}} = v_\infty$  a spočteme poměr ploch  $\pi b^2 / \pi R^2$ . Shodou okolností vychází velmi pěkný výraz  $1 + (v_{\text{esc}}/v_{\text{rel}})^2$ , kde  $v_{\text{esc}} = \sqrt{2GM/R}$  je úniková rychlost z povrchu naší planetesimály. Je to vlastně docela logické: větší únikové rychlosti odpovídá větší přitažlivá síla, a tím více zakřivená dráha. Naopak při větší vzájemné rychlosti je méně času na to, aby se planetesimály k sobě přitáhly. Čili výsledný vztah pro rychlost růstu hmotnosti planetesimály má tvar

$$\frac{dM}{dt} = \varrho v_{\text{rel}} \pi R^2 \left[ 1 + \left( \frac{v_{\text{esc}}}{v_{\text{rel}}} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Chceme-li posoudit, které planetesimály porostou rychleji, jestli velké nebo malé, nezajímá nás přímo  $dM$ , tj. absolutní změna hmotnosti, ale  $\frac{dM}{M}$ , tj. relativní změna hmotnosti. Bude-li  $\frac{dM}{M}$  pro všechny stejné (nezávislé na  $R$ ), nebude se rozdělení hmotností nijak měnit. (Představme si, že bychom každé planetesimále přidali kousek hmotnosti právě úměrný její okamžité hmotnosti.) Bude-li však růst (klesat) s  $R$ , budou přibývat velké (malé). Rozlišíme dva případy:

- a)  $v_{\text{rel}} > v_{\text{esc}}$ , kdy můžeme zanedbat kulatou závorku ve vztahu (2), a pak  $\frac{dM}{dt} \doteq \rho v_{\text{rel}} \pi R^2$ . Protože  $M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{\text{kamení}}$ , vychází

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} \propto \frac{1}{R}.$$

Čili menší rostou rychleji a hmotnosti planetesimál se jakoby vyrovnávají. Vzájemné rychlosti jsou tak velké, že gravitace mezi planetesimálami nehraje velkou roli. Tomuto režimu říkáme *uspořádaný růst*.

- b)  $v_{\text{esc}} > v_{\text{rel}}$ , kdy naopak zanedbáme jedničku v hranaté závorce rovnice (2) a uvážíme, že  $v_{\text{esc}}^2 \propto \frac{M}{R} \propto R^2$ . Výsledkem je, že

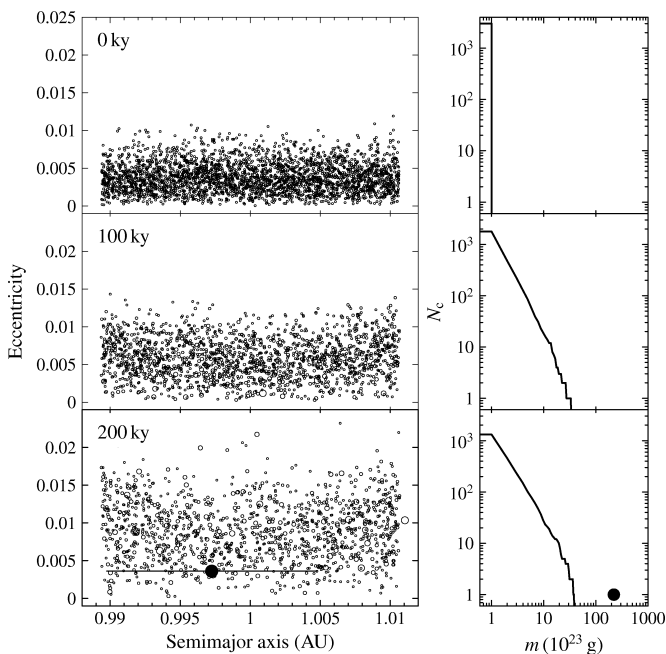
$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} \propto R,$$

velké planetesimály rostou rychleji a nabalují na sebe ty malé. Při malé vzájemné rychlosti mají dosti času, aby se gravitačně přitáhly. Situaci říkáme *překotný růst*.

Uvedený model pro růst planetesimál je opravdu velmi jednoduchý. Například nám vůbec nepředpovídá, jak se bude měnit  $v_{\text{rel}}$  s časem, nezahrnuje kolize, rozpady, atd. Podstatně složitější nestacionární modely růstu planetesimál nám říkají, že v disku postupně probíhal:

- 1) uspořádaný růst od metrových balvanů až na kilometrové planetesimály, trvající řádově  $10^4$  let. Posléze ale nepružné srážky, gravitační tření větších planetesimál a tření o plyn snížily  $v_{\text{rel}}$ , takže se růst stal překotným.
- 2) překotný růst planetesimál na planetární embrya, po dobu asi  $10^5$  let. Takové vzniknuvší embryo je řádově 100 krát hmotnější než okolní planetesimály (viz příklad na obr. 13). Typická hodnota parametru  $(v_{\text{esc}}/v_{\text{rel}})^2$  přitom dosahovala 1,5 až 2,5. Gravitační působení embrya v průměru zvyšovalo vzájemné rychlosti  $v_{\text{rel}}$  okolních těles; rovnice (2) nám napovídá, že se tím efektivně tlumil překotný růst a pokračoval už jen uspořádaný.
- 3) uspořádaný růst velkých planetesimál a embryí, nazývaný *oligarchický růst*, aby se nám nepletl s první fází. Přitom ještě zároveň pokračoval překotný růst menších planetesimál, takže se zvětšoval počet „oligarchů“.

Připomeňme, že překotný růst je lokální proces, nemůže nastat v celém disku najednou. Končí tak, že jedna planetesimála mnohonásobně převáží nad všemi ostatními v okolí. Maximální rozsah radiální vzdáleností  $\Delta r_i$ , z níž se mohou planetesimály navzájem přiblížit, odhadneme z velikosti Rocheova laloku (ze vzdálenosti Lagrangeových bodů  $L_1$  a  $L_2$ ). Podle řešení omezeného problému tří těles je přibližně  $\Delta r_i = 2\sqrt{3}r \left(\frac{M_i}{3M_{\odot}}\right)^{1/3}$ . Hmotnost  $M_i$  vymezená v disku prstencem



**Obr. 13** — Vznik planetárního embrya z planetesimál. Vlevo závislost excentricity  $e$  dráhy planetesimál na velké poloose  $a$ , vpravo rozdělení velikostí souboru planetesimál. Časová škála vývoje je  $10^6$  let. Převzato z [1], Kokubo a Ida (2000).

$r \pm \Delta r_i/2$  závisí na plošné hustotě  $\sigma$  jako  $M_i = 4\pi r \Delta r_i \sigma$  a z obou rovnic pak snadno vyjádříme

$$M_i = (8\sqrt{3}\pi)^{3/2} (3M_\odot)^{-1/2} r^3 \sigma^{3/2} \doteq 1,2 \cdot 10^{22} \text{ kg} \left(\frac{r}{\text{AU}}\right)^3 \left(\frac{\sigma}{\text{g/cm}^2}\right)^{3/2}. \quad (3)$$

Pro  $r = 1$  AU, kde  $\sigma \simeq 8 \text{ g/cm}^2$  (bez plynu), vychází  $M_i \doteq 2,8 \cdot 10^{23} \text{ kg} \doteq 0,05 M_\oplus$ , čili hmotnosti embryí v terestrické zóně (tj. ve vzdálenostech dnešního Merkuru po Mars) dosahovaly řádově hmotností dnešního Měsíce po Mars. V oblasti Jupitera při  $10 \text{ g/cm}^2$  dává náš jednoduchoučký model  $M_i \doteq 4,9 \cdot 10^{25} \text{ kg} \doteq 8 M_\oplus$ .

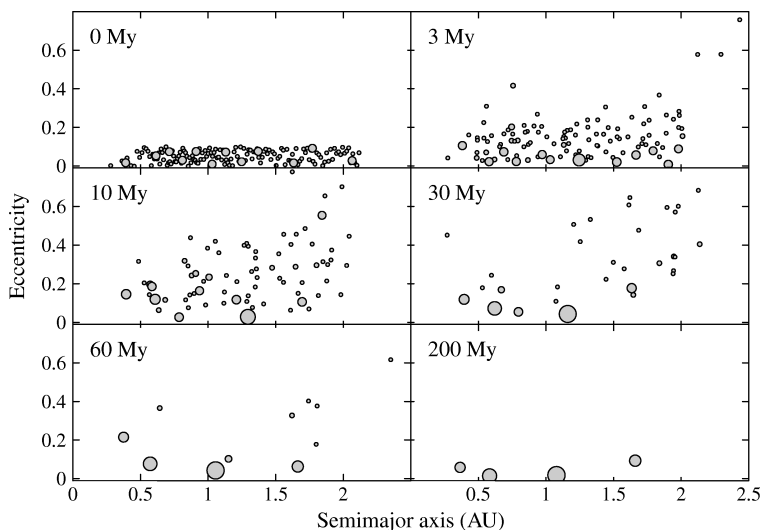
Rychlost tvorby embryí se podstatně mění se vzdáleností od Slunce — aby ne, když se vzdáleností klesá oběžná rychlost i hustota disku. Ve vzdálenosti 1 AU vyrostla embrya za  $10^5$  let, na 3 AU za  $10^6$  let, čím dál, tím pomaleji. Jednalo se o jakousi „vlnu“ vytváření embryí šířící se od Slunce.

### Terestrické planety

Na konci předchozí fáze existovalo v terestrické zóně 20 až 40 embryí; mezi nimi byly „mezery“ tak 0,05 AU,  $e$  a  $\sin i$  měly okolo 0,001 nebo 0,01. Hmotnost

zbylých planetesimalů byla přitom zanedbatelná. A to je přeci krása, protože další vývoj už lze řešit numerickými  $N$ -částicovými simulacemi.<sup>2</sup>

Na obr. 14 vidíme možný výsledek. Takovéto simulace nám říkají, že několik milionů let jsou dráhy embryí stabilní, ale pak se náhodou objeví jedno blízké přiblížení, které spustí kaskádu dalších. Embrya se pohybují chaoticky, jejich dráhy se kříží, dochází ke srážkám a za 100 milionů let zbydou nejčastěji 2 až 4 terestrické planety. Čili nevycházejí zákonitě čtyři, ale čtyři nejsou nijak výjimečným výsledkem. Jde o stochastický proces, když tolik záleží na počáteční náhodě, jaký bude výsledek. Mimochodem, velké poloosy planet statisticky často tvoří přibližně geometrickou řadu (neboli dříve známý Titiův–Bodeho „zákon“).



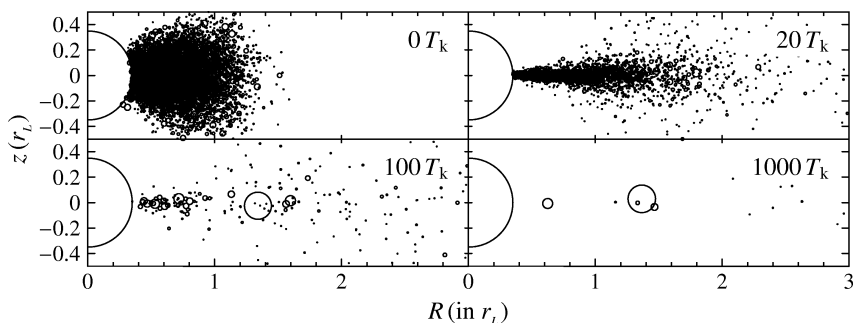
**Obr. 14** — Formování terestrických planet z planetárních embryí. Časová škála je zde asi  $10^6$  let. Převzato z [1], Chambers (2001).

V závěrečné fázi docházelo k velkým impaktům na protoplanety (projektily mohly mít 0,1 až 25 % hmotnosti terče), jenž měly za následek:

- (1) opětovné promíchání chemického složení (např. Venuše a Země jej dnes mají prakticky stejné), dopravu vody do terestrické zóny zpoza ledové hranice ( $\sim 3$  AU);
- (2) rotační osy planet se orientovaly náhodně;

<sup>2</sup> Máme řádově  $10^2$  částic, tj.  $10^4$  vzájemných interakcí, časovou škálu  $10^8$  yr, symplektické integrátory umožňují časový krok 0,1 yr, takže potřebujeme spočítat  $10^9$  kroků neboli  $10^{13}$  interakcí. Jedna interakce odpovídá řádově  $10^2$  výpočetních operací, při taktovací frekvenci procesorů  $10^9$  Hz to je  $10^6$  s = několik týdnů výpočetního času.





**Obr. 15** — Model vzniku Měsíce v protolunárním disku obklopujícím Zemi po velkém impaktu. Vzdálenosti na osách jsou v jednotkách Rocheových poloměrů  $r_L$ ; půlkružnice okolo počátku znázorňuje Zemi. Disk úlomků má zde hmotnost  $0,4 M_{\oplus}$  a rozkládá se v těsné blízkosti, jen několik zemských poloměrů daleko. Všech  $10^4$  částic je zobrazených v jedné rovině  $(R, z)$ , i když ve skutečnosti jsou rozptýlené okolo Země. Jednotka času  $T_k = 7$  h je keplerovská oběžná doba ve vzdálenosti  $r_L$ ; dá se tedy říci, že „Měsíc vzniknul asi za měsíc“. (Za následující miliardy let způsobily gravitační slapy mezi Zemí a Měsícem vzdálení Měsíce od Země až na současných  $60 R_{\oplus}$ .) Převzato z [1], Kokubo aj. (2000).

- (3) odpařila se voda a  $\text{CO}_2$  z hornin, čímž vznikly prvotní atmosféry, přispívající k izolaci pláště a jeho tavení;
- (4) vzniknul Měsíc (30 až 50 Myr po vzniku sluneční soustavy, soudě podle jeho hustoty a izotopového složení, viz obr. 15);
- (5) odtrhnul se silikátový plášť Merkuru (tudíž má dnes nadměrně velké železné jádro).

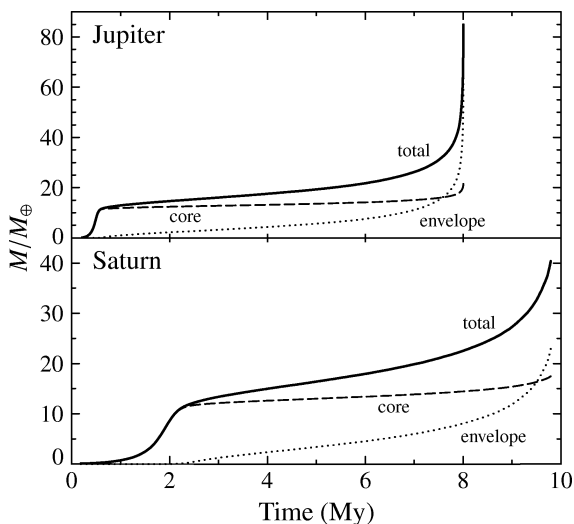
Nesmíme přitom zapomenout ani na formování velkých planet! To, co se dělo daleko od Sluníčka, ovlivňovalo i naše okolí.

## Plynní a ledoví obři

Plynné obři planety sluneční soustavy pravděpodobně vznikly ve dvou fázích: nejdříve vzniklo relativně malé kamenné embryo, na nějž posléze spadnul okolní plyn. Takovému scénáři říkáme *model nestabilního jádra*. Výsledek jednoho detailního modelu je na obr. 16.

V minimální mlhovině ve vzdálenosti 5 AU od Sluníčka umožní překotný růst vznik embrya o hmotnosti asi  $1,5 M_{\oplus}$ . Obvykle se však předpokládá trochu větší sloupcová hustota  $\sigma$  a hmotnost embrya pak vychází asi  $8 M_{\oplus}$ .

Pevné jádro samo vznikne z planetesimál velmi rychle, do 1 Myr. Plyn se zpočátku na pevné jádro nabaluje velmi pomalu; k jádru se dostává především přes Lagrangeovy body  $L_1$  a  $L_2$ . Když hmotnost plynu dosáhne zhruba hmotnosti jádra, tj. po 10 Myr, začne překotný kolaps a planeta na sebe přitáhne plyn z širokého okolí. V protoplanetární mlhovině tak vznikne široká mezera v okolí dráhy budoucí velké planety.



**Obr. 16** — Hmotnost Jupiteru a Saturnu v závislosti na čase. Odlišeno je jádro z pevných látek (čárkovaně) a plynná obálka (tečkovaně). Převzato z [1], Pollack aj. (1996).

Po kolapsu plynu je plynná obálka planety rozprostřena vlastně v celém jejím Rocheově laloku (ježto má pro Jupiter rozměr zhruba 0,7 AU), Na to, aby kolabovala dál a vytvořila kompaktní planetu, musí vyzářit tepelnou energii (v infračerveném oboru). Tento druhý „radiační“ kolaps je rychlý, když plynná obálka dosáhne hmotnosti okolo  $8 M_{\oplus}$ . Pomalu ale pokračuje dodnes a projevuje se jako přebytek energie, kterou Jupiter vyzáří, proti energii slunečního záření, kterou absorbuje.

Jádra Uranu a Neptunu se pravděpodobně formovala ve vzdálenosti okolo 15 AU. (Ve větších vzdálenostech, kde jsou dlouhé oběžné doby, totiž není dostatek času, aby své plynné obálky získaly před rozplynutím mlhoviny.) Uran ani Neptun nikdy nedosáhly takové hmotnosti, aby proběhlo překotné nabalení plynu.

### „Vyčištění“ disku od plynu

Intenzivní tlak záření a sluneční vítr způsobily, že z disku zmizel plyn asi 10 Myr po vzniku Sluníčka. Ne, že bychom to mohli zjistit měřením přímo v naší sluneční soustavě, ale vyplývá to z pozorování mladých hvězd a disků okolo nich — prakticky žádná hvězda s protoplanetárním plynným diskem není starší než 10 Myr. (Ostatně proto jsme tak usilovně hledali procesy, které umožnily rychlý vznik plynných obřích planet.)

Neznamená to ovšem, že disk zmizel úplně! Kolem Sluníčka samozřejmě nadále obíhaly planetesimály a embrya, které se ještě nespojily s novými planetami.

## Disk planetesimál a migrace planet; Jupiter a Saturn ve 2:1 rezonanci

Po odfouknutí plynu a ukončení intenzivní akrece, řádově 100 Myr od vzniku Sluníčka, obíhaly terestrické i obří planety po prakticky kruhových a neskloněných dráhách. Mezi nimi stále zůstávaly nějaké planetesimály, tvořící planetesimální disk o hmotnosti asi  $50 M_{\oplus}$  a končící asi na 30 AU od Slunce (viz nedávnou práci Tsiganis aj., 2005).

Sluníčko, planety i planetesimály na sebe gravitačně působily vzájemně, což mimo jiné vedlo ke změnám velkých poloos velkých planet — Jupiter se ke Slunci pomalu přibližoval, kdežto Uran, Neptun a Saturn se vzdalovaly. Za 700 Myr se poloosy touto pomalou migrací změnilы řádově o 0,1 AU. Samozřejmě se odpovídajícím způsobem měnily i oběžné doby. Okolo 3,85 Gyr před současností se tak Jupiter a Saturn dostaly do 2:1 rezonance; oběžná perioda Saturnu byla přesně dvakrát delší než Jupiterova. Pro planetesimály to byla katastrofa: „rozkývaný“ Jupiter a Saturn totiž velmi ruší jejich dráhy a více než 99 % jich bylo vymrštěno na excentrické dráhy, spadlo do Slunce nebo odletělo do vnějších částí sluneční soustavy. Dnešní populace asteroidů (hlavní pás a Trojané) jsou tedy pouhým zbytkem planetesimálního disku.

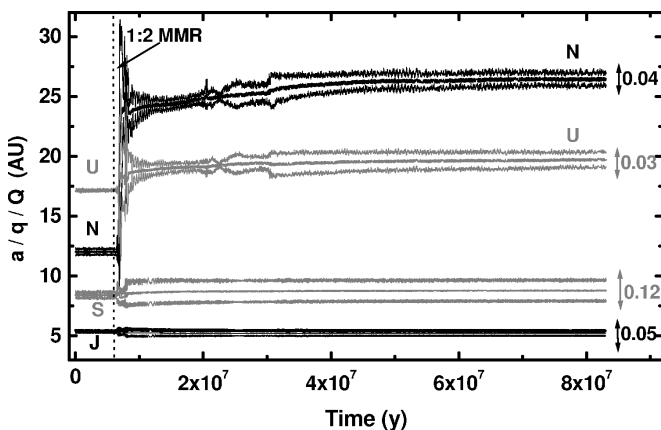
Další dodnes patrné důsledky dočasného rezonančního zachycení jsou:

- (1) Uran a Neptun se při blízkém přiblížení k Jupiteru dostaly na současné dráhy za Saturnem (mohly si přitom dokonce vyměnit pořadí); všechny velké planety získaly nenulové excentricity a sklony drah (obr. 17);
- (2) s Měsícem se právě před 3,85 Gyr srazilo mnoho planetesimál a zanechalo jeho povrch zcela posetý krátery (říkáme tomuto období *pozdní velké bombardování*);<sup>3</sup> radiometrická měření měsíčních hornin, přivezených loděmi Apollo, nám umožnila krátery přesně datovat, a zprostředkovaně tak víme, kdy vlastně došlo k oné rezonanci Jupiteru se Saturnem;
- (3) okolí Jupiterových libračních bodů  $L_4$  a  $L_5$  bylo v období rezonance velmi nestabilní a spousta planetesimál se volně pohybovala z oblasti ven i dovnitř; po skončení rezonance se oblast stala náhle opět stabilní a všechny planetesimály, které tudy zrovna proplouvaly, zde zůstaly „uzamčeny“ — dnes jim říkáme Trojané a tvoří velmi početnou populaci asteroidů (čítající  $10^7$  těles větších než 1 km). Takové zachycení po skončení rezonance Jupiteru a Saturnu dobře vysvětluje i velký průměrný sklon drah Trojanů.

Jupiter a Saturn, interagující s Uranem, Neptunem a zbylými planetesimály, se stále posouvaly ve velkých poloosách a rezonance zakrátko přestala. Od té doby byl orbitální vývoj ve sluneční soustavě už klidnější, soustava měla v hrubých rysech dnešní podobu.

---

<sup>3</sup> Velké impakty v závěru období velkého bombardování porušily kůru Měsíce, zpod které začala vytékat láva, a mezi 3,8 a 3,1 Gyr tak vznikla měsíční moře.



**Obr. 17** — Velká poloosa  $a$ , pericentrum  $q$  a apocentrum  $Q$  pro velké planety migrující v planetesimálním disku o hmotnosti  $50 M_{\oplus}$ . Po 700 Myr klidné migrace (zde není zobrazena celá) došlo k zachycení Jupiteru a Saturnu ve 2:1 rezonanci středního pohybu, což mělo mimo jiné za následek posun Uranu a Neptunu do vnější části sluneční soustavy. Migrace Neptunu končí asi na 30 AU, což odpovídá vnější hranici disku. Převzato z Tsiganis aj. (2005).

## Anglický terminologický slovníček

**2:1 resonance** [tu: tu uan rezənəns] — dva jedna rezonance

**core instability model** [ko: instəbiliti mo:dl] — model nestabilního jádra

**differentiation** [diferenšiejšn] — rozrůznění roztavených hornin v tělese planety podle hustoty

**free-fall time** [fri: fo:l taim] — doba trvání volného pádu

**gas envelope** [gæs envəloʊp] — plynná obálka

**gravitational enhancement** [græviteišnl en'ha:nsmənt] — gravitační zvětšení účinného průřezu při srážce

**impact crater** ['impækt 'kreitə] — dopadový kráter

**isolation mass** [ajsəlejfn ma:s] — omezená hmotnost

**Late Heavy Bombardment** [lejt hævi bom'ba:dmənt] — pozdní velké bombardování

**minimum-mass nebula** [minimum ma:s nebjulə] — mlhovina s minimální hmotností

**oligarchic growth** [oliga:chik grouθ] — oligarchický růst

**orderly growth** [o:dely grouθ] — uspořádaný růst

**planetesimal disc** [plænitisiml disk] — disk planetesimal

**Roche lobe** [roš loub] — rocheovský lalok (v omezeném problému tří těles)

**runaway growth** [ranəvej grouθ] — překotný růst

**Trojans** [troudžæns] — Trojané

[1] BERTOTTI, B., FARINELLA, P., VOKROUHLICKÝ, D. *Physics of the Solar System*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 1402014287.

[2] BROŽ, M. *Astronomický kurz Hvězdárny Hradec Králové* [online]. [cit. 2004-11-04]. (<http://www.astrohk.cz/kurz/>)

- [3] DE PATER, I., LISSAUER, J. J. *Planetary Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. ISBN 0521482194.
- [4] TSIGANIS, K., GOMES, R., MORBIDELLI, A., LEVISON, H. F. *Origin of the orbital architecture of the giant planets of the solar system*. *Nature*, **435**, s 459, 2004.

## Dodatky k prvním dvěma dílům kurzu

**Pád chuchvalce plynu z nekonečna na kruhovou dráhu.** V nekonečnu je gravitační potenciální energie  $E_G$  i kinetická energie  $E_K$  chuchvalce rovna nule. Necháme ho přitahovat Sluníčkem. Padá, padá, kinetická energie roste, potenciální energie klesá, celková  $E = E_G + E_K$  zůstává nulová. Ovšem pozor, už je jen 1 AU od Sluníčka (a letí přitom parabolickou rychlostí 42 km/s), když narazí do hustého disku plynu, který chuchvalec třením (rozuměj elektromagnetickými silami) „donutí“ usadit se na kruhové dráze s menší oběžnou rychlostí  $v_k \doteq 30$  km/s.

Na kruhových drahách v radiálním gravitačním poli totiž *vždycky* musí být  $E_K = -E_G/2$  (nikoli  $E_K = -E_G$  jako před srážkou).<sup>4</sup> To znamená, že celková energie už není nulová, ale záporná ( $E = -E_K = \frac{E_G}{2}$ ), protože disk mne zabrzdil a odebral mi přesně polovinu původní  $E_K$ , ježto se přeměnila na teplo (rozuměj kinetickou energii neuspořádaného pohybu jednotlivých atomů a molekul).

**O kolik se tedy zvýší teplota  $T$  chuchvalce?** Teplo se spotřebovalo na vzrůst vnitřní energie  $U$ , takže

$$U = N \frac{3}{2} k_B T = -\frac{E_G}{2} = \frac{GM_\odot m}{2r},$$

kde  $N = \frac{m}{\mu m_u}$  je počet molekul  $H_2$ .<sup>5</sup> Vyjádříme teplotu

$$T = \frac{GMm_u\mu}{3kr} \doteq \frac{6,7 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 2}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 150 \cdot 10^9} \text{ K} \doteq 7 \cdot 10^4 \text{ K}.$$

<sup>4</sup> Vzpomeňme, že  $E_G = -\frac{GM_\odot m}{r}$ ,  $v_k = \sqrt{GM_\odot/r}$  a tedy  $E_K = \frac{1}{2}mv_k^2 = -\frac{E_G}{2}$ . Obecněji dokonce platí, že v libovolném gravitačně vázaném systému (tj. s celkovou  $E < 0$ ), s libovolně složitými pohyby, jsou střední hodnoty energií (středované přes čas)  $\langle E_G \rangle = -2\langle E_K \rangle$ . Říkáme tomu *virialový teorém*.

<sup>5</sup> Klasický ekvipartiční teorém nám říká, že na každý mechanický stupeň volnosti dané molekuly připadá energie  $\frac{1}{2}k_B T$ . Dvouatomová molekula má celkem stupňů volnosti 12 (6 translačních, 4 rotační a 2 vibrační). V ideálním plynu ale nejsou se 3 souřadnicemi ani se 2 úhly otočení spojeny žádné potenciální energie, protože molekuly na sebe nepůsobí (s výjimkou vzájemné srážky). Podstatné jsou pouze rychlosti, s nimiž souvisí kinetické energie, a pro dvouatomové molekuly také vzdálenost atomů, s nimiž souvisí potenciální energie vibrací. Celkem tedy máme 7 stupňů volnosti a číselný faktor v  $U$  má být  $\frac{7}{2}$ . My jsme tam ale napsali  $\frac{3}{2}$  jako u ideálního jednoatomového plynu. To proto, že náš plyn je hodně řídký (a na začátku chladný), tudíž nedochází k snadnému přenosu energie do rotačních a vibračních stupňů volnosti.



Čili kdyby se tepelná energie nevyzářila, měl by disk teplotu až 70 000 K. Ve skutečnosti značná část zářením unikla a teplota na 1 AU dosahovala „jen“ 1 500 K.

**Jak dlouho kolaps trvá?** Pro odhad můžeme dobře použít 3. Keplerův zákon  $\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$ . Stačí si představit malou částičku na okraji oblaku o hmotnosti  $M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$ , jak se pohybuje po elipse s excentricitou blízkou 1 (neboli úsečce). Velká osa je  $2a = R$  a kýžená doba volného pádu je  $t_{\text{ff}} = \frac{T}{2}$ . Dosadíme a vidíme, že

$$t_{\text{ff}} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}} \quad (4)$$

závisí pouze na průměrné hustotě  $\rho$ , nikoli na hmotnosti nebo rozměru! Zkusme si to číselně. Velký molekulový oblak má  $\rho = 10^3 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \doteq 3 \cdot 10^{-18} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , jeho husté jádro až  $3 \cdot 10^{-15} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Tomu odpovídá  $t_{\text{ff}}$  asi 1 milion roků, resp. 40 000 roků. Protože jsme zanedbali gradient tlaku plynu působící odpudivě, skutečný kolaps bude trvat o něco déle (a samozřejmě se zastaví před dosažením  $R = 0$ ; vytvoří se hvězda a disk).

**Proč vzniká z kulového oblaku placatý disk?** Pro jednoduchost si představím homogenní kouli o poloměru  $R$ , hmotnosti  $M$ , točící se úhlovou rychlostí  $\omega$ . Připomeňme, že její moment setrvačnosti  $I = \frac{2}{5}MR^2$  vzhledem k ose procházející středem koule, kinetická rotační energie  $E_K = \frac{1}{2}I\omega^2$ , gravitační potenciální energie  $E_G = -\frac{3}{5}\frac{GM^2}{R}$  a moment hybnosti  $L = I\omega$ . Zploštění  $\varepsilon$  souvisí s poměrem rotační a gravitační energie

$$\varepsilon \simeq \frac{E_K}{E_G} \propto \frac{R^3\omega^2}{GM} \quad (5)$$

Protože při gravitačním kolapsu  $L = \text{konst.}$ ,  $M = \text{konst.}$ , je  $\omega \propto \frac{1}{R}$  a zploštění  $\varepsilon \propto \frac{1}{R}$  přirozeně vzrůstá.

## Cesta za tureckým Sluncem

Josef Kujal

Přípravy na cestu za úplným zatměním Slunce, které bylo pozorovatelné pro našince nejbliž v Turecku, začaly několik měsíců předem. Organizační záležitosti (dopravu a ubytování) měl na starosti Vašek Knoll z Hvězdárny barona Artura Krause, která byla hlavním organizátorem zájezdu.

Od podzimu loňského roku jsem byl rozhodnut, že se této expedice zúčastním. Proto jsem začal shromažďovat různé informace o klimatických podmínkách, zeměpisných polohách a přírodních zajímavostech v Turecku. Nejnáročnější částí přípravy byla volba pozorovacího stanoviště v pásu totality. Výsledkem bylo skloubení předpovědi počasí s možností ubytování. Cílem naší cesty bylo městečko Cirali, ležící na pobřeží Středozemního moře 50 km jihozápadně od města Antalya.

Prvním krokem mé osobní přípravy bylo zakoupení astronomického dalekohledu značky Sky-Watcher ED 80, spolu se sluneční folií. Jak bývá „dobrým zvykem“, všechny ostatní kroky zbyly na poslední den před odjezdem. S úpravou azimutální vidlice pro ED 80 jsem se rozčiloval až do pozdních sobotních hodin. Batoh s osobními věcmi a kartonem kvalitního českého piva značky Gambrinus jsem zabalil v neděli ráno. Odjezd byl naplánován na neděli 26. března v 9 hodin od pardubické hvězdárny. Kvůli drobným zpožděním českých vlaků jsme vyrazili směr Brno s mírným časovým deficitem proti původnímu plánu. Po zastávkách v Brně a Bratislavě se finální počet účastníků ustálil na čísle 49 lidí a dva řidiči.

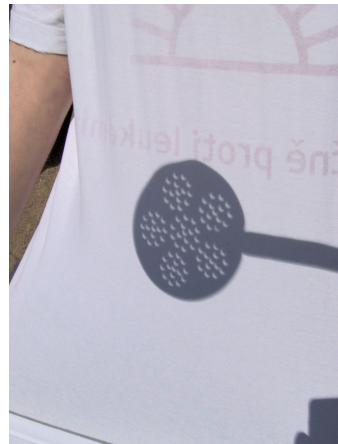
Cesta probíhala klidně až na celní kontrolu na maďarsko-srbských hranicích. Zde došlo k nepříjemnostem a střetu se srbskými celníky. Několik z nás se rozhodlo, že po dlouhé a únavné cestě nebudou investovat 40 centů do poplatků za toalety. Nepočítali však s tím, že budou za budovou záchodků přistizeni strážcem hranice. Ten je nechal předložit pasy a následně jim je odebral. Díky obratnosti a výřečnosti řidičů se podařilo hříšníkům vyváznout bez původně vymáhané pokuty 40 Euro za osobu. Dále cesta probíhala dosti strastiplně, neboť kvalita srbských a bulharských hlavních silnic není srovnatelná ani s našimi zanedbanými vozovkami. Trpělivostí jsme se museli obrnit na bulharsko-tureckém hraničním přechodě, protože hra „Člověče nezlob se“ nás zdržela tři hodiny. Jak se ta hra hraje? To se celá výprava přeposílá od jedné celní buňky k druhé, přičemž rozdává drobné úplatky. Nakonec jsme vše zvládli a frčeli dál.

První povinnou osmihodinovou pauzu jsme museli učinit již ve městě Edirne (oproti plánovanému Istanbulu). Zde jsme přišli do kontaktu s místními, pro nás netypickými zvyky a kulturou. Někteří navštívili největší tureckou mešitu, jiní zašli na večeri nebo čaj. Po uplynutí povinné pauzy jsme se v noci vydali přes Bospor do asijské části Turecka. Cesta přes náhorní plošiny trvala více jak dvanáct hodin. Na místo určení jsme dorazili 28. března kolem 17. hodiny našeho času.

Po vyčerpávající cestě nás optimisticky naladilo slunné a teplé počasí. Odpolední a večerní hodiny jsme využili k regeneraci organismu (formou piva, večere, ubytování). Po domluvě s majitelem bungalovu jsme mohli využít internetové připojení a zjistit aktuální stav počasí z družicových snímků. Všichni jsme byli ze zjištěných informací trochu nervózní, neboť jasné počasí nebylo stoprocentní.

Nastal den „D“. Od brzkých ranních hodin jsme připravovali techniku. Počasí k nám bylo vstřícné, nebe bylo jako vymetené. Po dokončení příprav se většina odhodlala ke koupeli v moři. Voda, jejíž teplota dosahovala 15 °C, příjemně osvěžila. Pro místní obyvatele jsme byli zajímavou atrakcí.

Krátce po půl jedenácté našeho času došlo k prvnímu kontaktu. Měsíc pomalu „ujídal“ kousky slunečního kotouče. Prozatím jsme zůstávali klidní; částečnou fází zatmění Slunce viděl každý z nás. Vzrušení začínalo silít od okamžiku, kdy Měsíc zakrýval více jak dvě třetiny slunečního kotouče. Teplota vzduchu pomalu klesala a začalo se šerit. Minuty ubíhaly čím dál rychleji a Měsíc již téměř zakrýval



celé Slunce. Obloha byla neustále bez mráčků a už jsme byli přesvědčeni, že vše vyjde podle našich představ. Krátce před druhým kontaktem jsme měli možnost pozorovat jev nazývaný letící stíny. A pak to přišlo. Totální zatmění Slunce. Na nebi se rozjasnila bílá sluneční koróna.

Byl to neskutečný pohled, který se slovy těžko popisuje. Ve zvláštním šeru se vysoko nad hlavou odehrával souboj světla a tmy. Současně jsme pozorovali jasné hvězdy a planety Merkur s Venuší. Nejdřív jsem pořídil řadu snímků slunečního disku (viz obr. 20). Pak jsem se začal kochat a nechal se unášet přírodním jevem a zvláštní atmosférou. Po třech a půl minutách zvítězilo světlo nad tmou a Měsíc začal ustupovat. S přibývajícím světlem se otepleval vzduch. Zároveň jsme mohli dobře pozorovat „srpečky“ pod stromy, na triku jedné z našich kolegyň, kam jsme vrhali stín cedníkem sebraným doma v kuchyni. Ještě jsem stihl pořídít několik snímků částečné fáze a byl konec.

Hlavním přístrojem k dokumentaci zatmění byl Sky-Watcher ED 80 (80/600,  $f/7,5$ ) s Canonem Eos 350 D; druhým, záložním systémem byl Rubinar 500 mm a Practica MTL 50 s diafilmem Fuji 100 ASA. Na obou přístrojích byla použita sluneční folie Baader.

Odpolední hodiny jsme trávili příjemným lenošením a přípravou na cestu domů. Odjezd byl plánován na 23 hodin našeho času. K večeru jsme se zašli ještě podívat na zajímavý přírodní výtvar do nedaleké Chimaery, kde ze země vyvěrá plyn a hoří. Podle rad od místních obyvatel je právě večer nejvhodnější pro návštěvu tohoto místa.



Za hluboké tmy jsme se vydali na cestu domů. Zpáteční cesta přes náhorní plošiny ubíhala rychleji než jsme plánovali. Druhá povinná osmihodinová přestávka byla v Istanbulu, kam jsme dorazili 30. března okolo 14. hodiny. Odjezd byl stanoven na 22. hodinu. Na prohlídku města by podle různých průvodců člověk potřeboval asi pět dní, ale navzdory tomu jsem si stihl prohlédnout sultánovu mešitu, velký bazar a přilehlé uličky.

Teď už to byl pouze boj s kilometry a časem. První narušení časového harmonogramu přišlo opět na bulharsko–tureckých hranicích. Bez drobných úplatků v podobě piva a několika Euro, bychom asi nevyvázli za dvě hodiny. Poté následovaly „kvalitní“ bulharské silnice. Největší časové zdržení nás ale teprv čekalo. Při přecházení bulharsko–srbských hranic jsme museli přetrpět pět hodin zbytečného čekání. Bulharští celníci se asi zdrželi na obědě. Následovala „příjemná“ projížďka Srbskem. Netrpělivě jsme očekávali maďarskou celnici, neboť tam končí a začíná Evropa — hlavně co se týká kvality silnic. Do kruté reality na hranicích nás vrátil maďarský celník, který v ranních hodinách 1. dubna, silně posilněn kvalitním destilátem, začal důkladně kontrolovat autobus. Nedokázal pochopit, asi myslel na apríla, že jsme byli na jeden den v Turecku. Výsledkem jeho snažení bylo vyskládání batožiny a důkladná kontrola, zda-li něco nepašujeme. Asi po půl hodině si všiml druhý celník svého kolegy a přišel mu domluvit. Následně jsme mohli batohy naložit a vjet do Evropy.

Pak již cesta ubíhala příjemně navzdory silné únavě. V ranních hodinách jsme vyložili některé spolucestující v Bratislavě, po zastávce v Brně jsme jeli s větrem o závod k Pardubicům. Zpět jsme tedy dorazili 1. dubna okolo 10 hodiny, zničení strastiplnou cestou autobusem, ale s příjemným pocitem, že se pozorování úkazu vydařilo. Ujeli jsme přes 5 000 km, v autobuse jsme strávili téměř šest dní, čemuž odpovídaly i moje nateklé nohy.

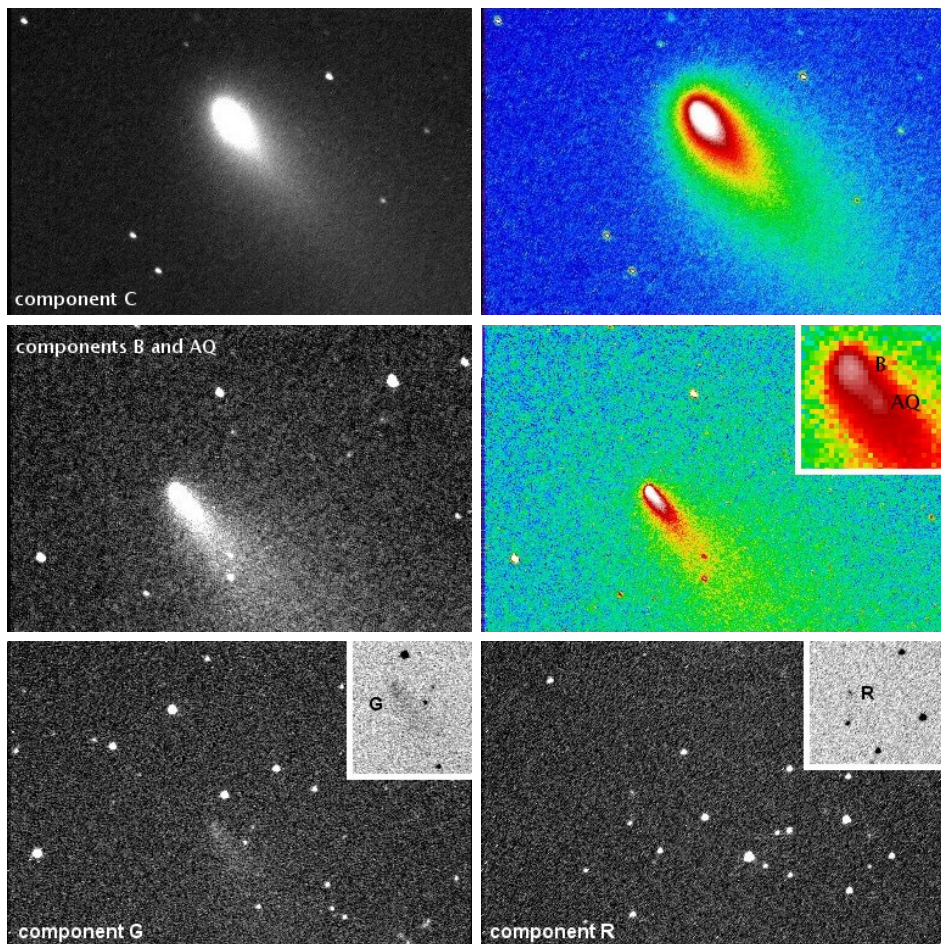
## Fotografování komety 73P

Josef Kujal

Po delší době se v noci z 25. na 26. dubna vyjasnilo, a proto jsme se Martinem Lehkým sešli v domečku, abychom se pokusili pozorovat a fotografovat části komety 73P/Schwassmann–Wachmann 3. Jelikož jsem před letošním odjezdem za zatměním Slunce do Turecka koupil dalekohled SkyWatcher ED 80, rozhodl jsem se vyzkoušet s ním fotografování komety. Prvním problémem bylo, jak připevnit onen dalekohled k montáži JST v domečku. Vyřešili jsme jej pomocí dvou pásků od kalhot, kterými jsem dalekohled připevnil k tubusu jedenáctky (refraktor 110/1650), která slouží jako hledáček JST. Druhý, podstatně větší problém vznikl při ostření ED 80 s fotoaparátem Canon Eos 350 D. Více jak hodinu mi trvalo, než jsem zaostřil podle mých požadavků. Způsob zaostřování byl jednoduchý: nejprve jsem vyfotil několik snímků a poté je šel prohlédnout na Martinův notebook, kde jsem zjistil, jak to doopravdy vypadá s kvalitou zaostření.



Průběžně s tím Martin pořizoval CCD snímky komety přes JST. Druhá fáze po fotografování nastala nazítří doma, neboť bylo třeba snímky poskládat. K tomuto účelu jsem použil program Iris. Výsledkem jsou dva složené snímky komety 73P/Schwassmann-Wachmann 3, fragmentů B a C (obr. 21). Snímek „běčka“ je složením šesti třicetisekundových expozičních a snímek „cěčka“ pěti třicetisekundových expozičních. Zda se snímky zdařili, už musíte posoudit sami. Nakonec dodám, že vizuální podmínky té noci nepatřili na hradecké poměry k těm dobrým.



**Obr. 18** — Kometa 73P/Schwassmann–Wachmann 3 v noci 25./26. 4. 2006 na snímcích z dalekohledu JST. Zorné pole je přibližně  $11' \times 7'$ . Fragment C byl snímán ve 21 h 31 min, pětkrát po 20 s. Zdá se být prozatím poměrně kompaktním tělesem. Podle vizuálních pozorování má jasnost 7,4 mag a chvost dlouhý 20' v pozičním úhlu  $220^\circ$ . Fragment B (23 h 45 min, 5 krát 20 s,

vizuálně 8,2 mag, chvost 10' s  $PA = 225^\circ$ ) je hodně difúzní s jasným jádrem. Na CCD snímcích je patrná přítomnost největších úlomku AQ, který se nedávno oddělil a byl příčinou náhlého zjasnění fragmentu B na počátku měsíce dubna. Úlomek G (60 s, 13,5 mag) začal slábnout, zcela ztratil centrální kondenzaci a zřejmě došlo k úplnému rozpadu. Na CCD snímcích je vidět jen obláček. Astrometrie už nebyla možná, nebylo vlastně co měřit. Úlomek R (60 s) se postupně zjasňuje, zdá se být nadějným fragmentem. Vizually jsme jej v Hradci ještě nezkoušeli nalézt. Foto Martin Lehký.

## Děni na obloze v květnu a červnu 2006

Petr Horálek, Martin Cholasta

Nejjasnějšími a nejočekávanějšími kometami by měly být segmenty rozpadající se vlasatice 73P/Schwassmann–Wachmann 3. V polovině května proletí ve velmi malé vzdálenosti od Země (kolem 0,08 AU) a nejjasnější z nich, označené písmenky „C“ a „B“, by měly být viditelné na nepřesvětlené obloze pouhým okem. K 13. dubnu 2006 bylo známo 20 komponent a není vyloučeno, že tento „kometární řetízek“ doplní při zmenšující se vzdálenosti od Slunce další úlomky. Vizually by mohlo být pozorováno 5 nejjasnějších. (Viz též Povětroň 1/2006, str. 14.)

Ve stínu slávy předchozí komety jsou stále ještě příznivé podmínky pro pozorování komety C/2006 A1 Pojmanski, která krátce zářila na březnové ranní obloze. Byť byla viditelná i okem, její rychle narůstající vzdálenost od Země i od Slunce způsobila, že koncem dubna zeslábla z 5. magnitudy na 9. magnitudu a viditelnost se stále zhoršuje. Nejlepší podmínky jsou stále časně z rána, kdy ji nalezneme v nápadném souhvězdí Kasiopeji. Do konce května její jasnost klesne asi na 12. magnitudu. Mapy, elementy, efemeridy i jasnosti komet naleznete shromážděné na stránce Seiichi Yoshidy (<http://aerith.net>).

Koncem dubna, po dubnových Lyridách, začíná vysoká aktivita meteorických rojů. Pravděpodobně nejnámější a neaktivnější v tomto období bývá roj  $\eta$  Aquarid, který souvisí s jarní větví dráhy komety 1P/Halley (s podzimní větví souvisí Orionidy). Bohužel pro pozorovatele střední Evropy je jeho radiant vidět jen před svítáním (nautický soumrak začíná přibližně ve 3 h 10 min, Měsíc v tuto dobu neruší). Při výšce  $h \doteq 15^\circ$  a obvyklé zenitové frekvenci  $f \doteq 40$  meteorů za hodinu spatříme nejspíš pouze  $\sim \frac{1}{2} f \sin h \doteq 5$  meteorů za hodinu. Maximum není ostré a nastává odpoledne 5. května.

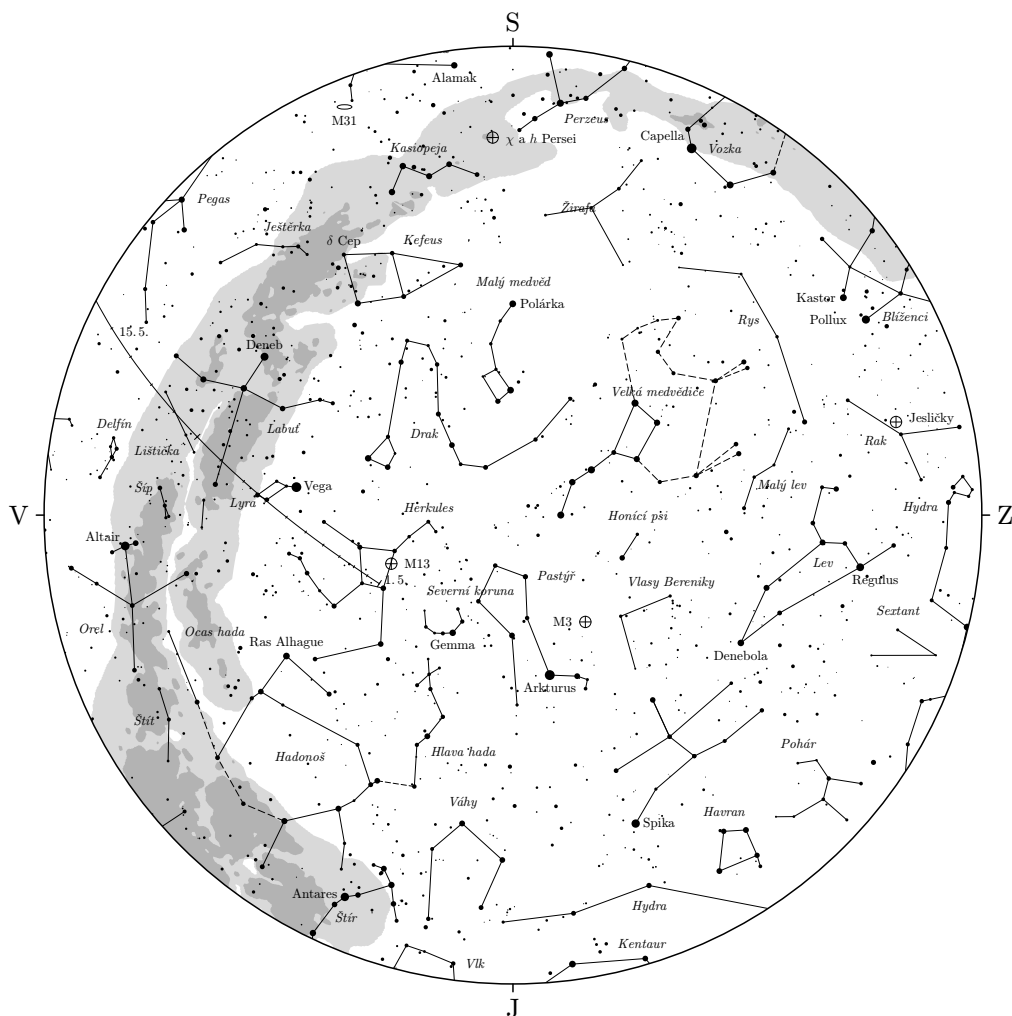
Měsíc nebude vůbec rušit červnové Bootidy, i jejich radiant je v první polovině noci vysoko. Frekvence je proměnlivá, v roce 1998 dosáhla náhle 100 meteorů za hodinu (jinak je kolem 10 meteorů za hodinu). Radiant je velmi široký (kolem  $20^\circ$ ) a maximum nastane večer 27. června.

V noci 5. června bude Saturn procházet jen 51' od otevřené hvězdokupy M 44 Jesličky. 14. 6. se k sobě na obloze přiblíží Saturn, Mars, hvězdokupa M 44 a planetka Vesta (ta bude  $2^\circ$  severně). 16. 6. bude Mars dokonce přes Jesličky procházet



a 17. 6. proběhne konjunkce Saturnu a Marsu. Obě planety se k sobě přiblíží na vzdálenost 34,6'. Tyto úkazy budou pozorovatelné večer nad západním obzorem.

[1] PŘÍHODA, P. aj. *Hvězdářská ročenka 2006*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 2005. ISBN 80-86017-43-5.



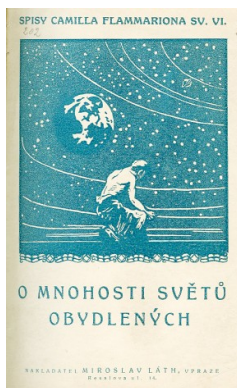
**Obr. 19** — Mapka oblohy pro 1. června, 22 hodin SEČ. Dráha komety 73P/Schwassmann-Wachmann 3 je značena od 1. 5. do 15. 5. 2006 (vzhledem ke hvězdám, nikoli k obzoru).

[.] Učení o Mnohosti Světů nás přivádí ku branám náboženské víry, zbudované na pravdivé soustavě světové; poslání této knihy není, aby vešla do zápisnice a rokovala o prvcích této víry; zastavíme se tedy zde, spokojeni, že jsme dospěli k říši náboženské a otevřeli její brány.

Astronomie má v ruce klíče této říše; ona položila základy filosofie budoucnosti; vyznáváme to s nadšením a děkujeme Vědě všehomíra, že nás přivedla až sem. Avšak není to úkolem této Vědy, aby stavěla města metafysiky; přišli filosofové, aby se uvázali v tento úkol a po nich přijdou jiní, aby pokračovali v díle a zapudili poslední tmy, pokrývající krajiny theologie a psychologie.

Avšak musíme vyznati, jak je to sladké, viděti vesmír tak, jak jej vidíme nyní, v jeho skutečné kráse, v jeho velikosti, v jeho účelu a určení. Mraky, které ho zakrývaly, se rozptýlily, oči naše byly zbaveny překážek, a my nyní pozorujeme v přirozeném jeho jase vznešené dílo stvoření. Toto vědecké odhalení má na sobě znaky pravdy; ono splnilo vrozené tužby naše, uspokojilo náklonnosti našeho srdce. To je výsada, která může náležeti pouze pravdě samotné. Když jsme získali jedenkrát tuto ideu o stvoření, nic nám ji více nevezme; my cítíme, že se ona dotýká nejvyšších osudů našich, našich zájmů nejdražších a všech výkonů naší duše a bytosti; my cítíme v ní svatý zákon, který nás ovládá všechny, nikoli těžkou vládou, které bychom se rádi zbavili, nýbrž vládou dobrodějnou, naši svobodu zajišťující; nová to výsada, která se měla přidružit ještě ku pravdě samotné. Tímto zákonem jsou nezvratné přívlastky Božství zachráněny zároveň se zájmy bytostí stvořených, a Svět, dílo boží, září v té své dvojí podobě celou velikostí svou. [.]

[1] FLAMMARION, Camille *O mnohosti světů obydlených*. Přeložil V. Rovinský. Praha: Nakladatel Miroslav Láth, 1924. 364 s. [Citováno ze stran 233–234].



**Obr. 20** — Zatmění Slunce 29. 3. 2006 fotografované dalekohledem Sky-Watcher ED 80 (80/600,  $f/7,5$ ) s Canonem Eos 350D. Jde o kombinaci čtyřech snímků s expozičními dobami 0,3 s, 1/6 s, 1/13 s a 1/25 s. Struktury v koróně byly zvýrazněny pomocí funkce radiálního rozmazání, odečtení od původního snímku a opětovným překrytím vrstvy; zpracování proběhlo v programu Adobe Photoshop CS. K článku na str. 24.

**Obr. 21** — Fragmenty komety 73P/Schwassmann–Wachmann 3 na snímku dalekohledem Sky-Watcher ED 80 s fotoaparátem Canon Eos 350D; zorné pole výřezu je přibližně  $1^\circ$ . Vlevo je fragment C (fotografovaný 25. 4. od 22 h 8 min do 22 h 10 min), vpravo B (22 h 36 min až 22 h 40 min), označeny jsou jasné hvězdy  $\gamma$  CrB a  $\theta$  CrB. Foto Josef Kujal. K článku na str. 27.

