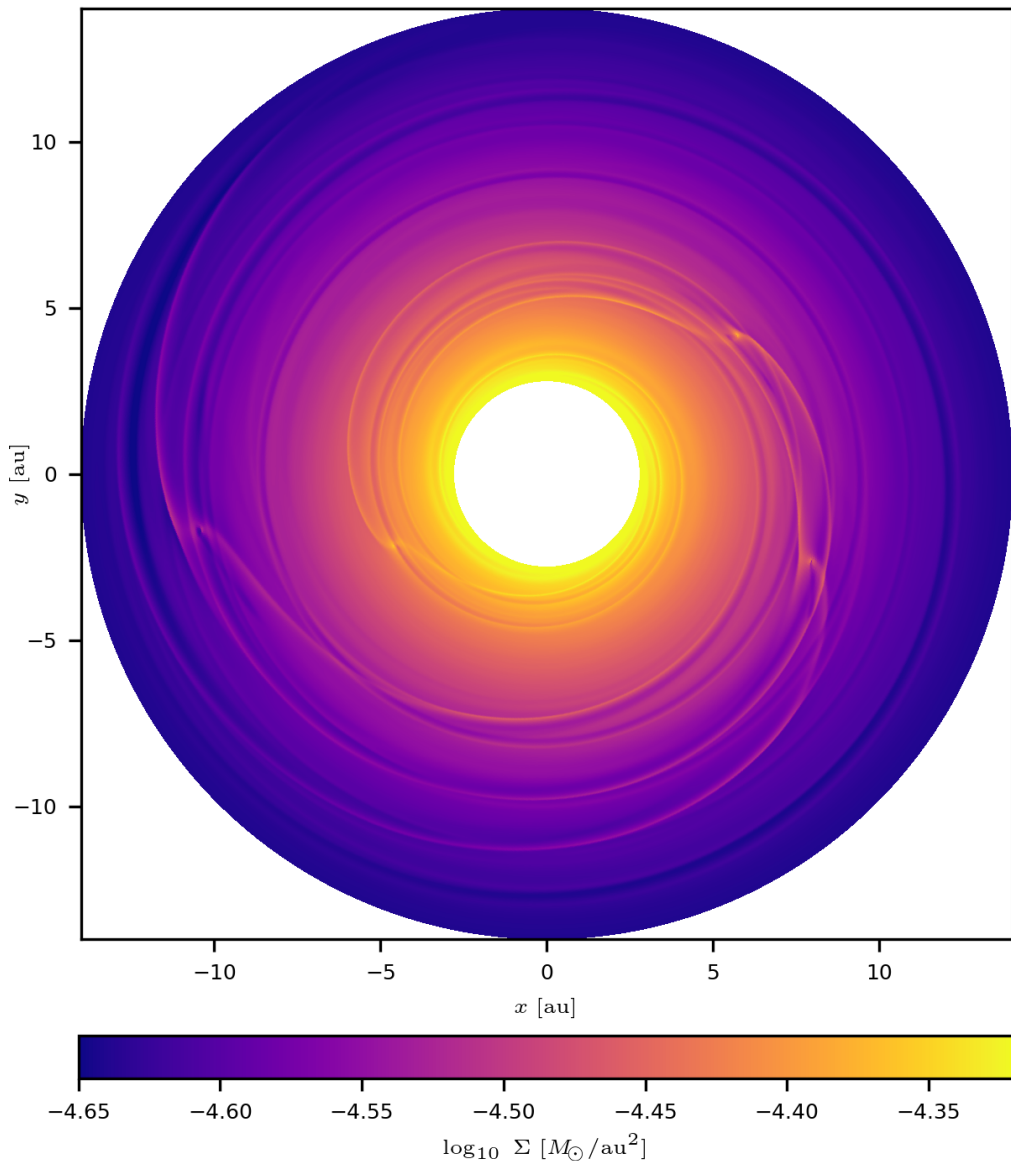


POVĚTROŇ

Královéhradecký astronomický časopis * ročník 25 * číslo 4/2017



SLOVO ÚVODEM. V Povětroni 4/2017 uveřejňujeme článek o objevu Ondřeje Chrenka, který mimochodem pochází z našeho kraje, konkrétně z Nového Hrádku pod Orlickými horami. Jeho význam ovšem poněkud přesahuje náš kraj! Má totiž zásadní důsledky pro dynamiku protoplanet, neboť zvýšení excentricity jejich drah zcela mění „pravidla hry“. Například se protoplanety nezachycují ve vzájemných rezonancích, což domyšleno do důsledků znamená rychlý vznik jádra planety Jupiter. Připojujeme též shrnutí Martina Lehkého o provedených pozorováních za rok 2017 a pojednání Jaromíra Ciesly o sluneční hodiny za (minulý) 4. kvartál.

Miroslav Brož

Obsah

strana

Miroslav Brož, Ondřej Chrenko: <i>Horká stopa v protoplanetárním disku</i>	3
Martin Lehký: <i>Přehled CCD pozorování za rok 2017</i>	15
Martin Lehký: <i>Přehled vizuálních pozorování za rok 2017</i>	16
Jaromír Ciesla: <i>Sluneční hodiny 4. kvartálu roku 2017</i>	18

Titulní strana — Povrchová hustota plynu Σ (v jednotkách $M_{\odot} \text{ au}^{-2}$) v disku se čtyřmi protoplanetami. Každá se vyznačuje soustředěním plynu v Hillově sféře, spirálními rameny, korotační zónou a také horkou (řídhou) stopou za planetou, která způsobuje růst excentricity. K článku na str. 3.

Povětroni 4/2017; Hradec Králové, 2017.

Vydala: **Astronomická společnost v Hradci Králové** (3. 11. 2018 na 333. setkání ASHK)
ve spolupráci s **Hvězdárnou a planetáriem v Hradci Králové**

vydání 1., 20 stran, náklad 100 ks; dvoměsíčník, MK ČR E 13366, ISSN 1213-659X

Redakce: Miroslav Brož, Miloš Boček, Martin Cholasta, Josef Kujal,

Martin Lehký, Lenka Trojanová a Miroslav Ouhrabka

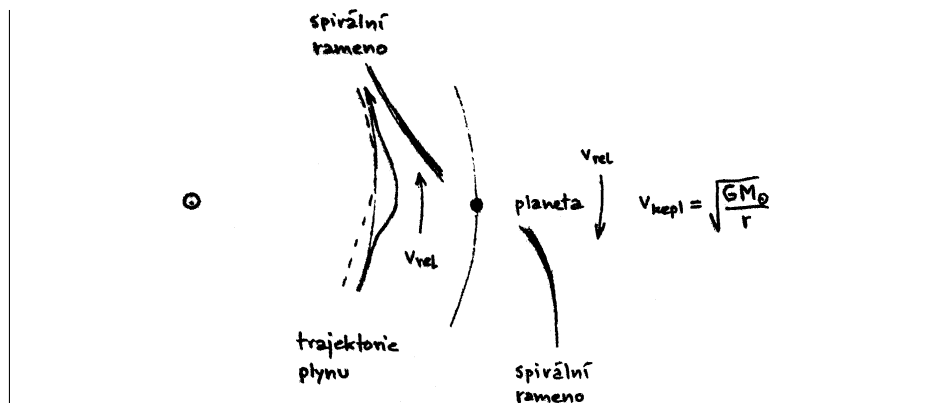
Předplatné tištěné verze: vyřizuje redakce, cena 35,- Kč za číslo (včetně poštovního)

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

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

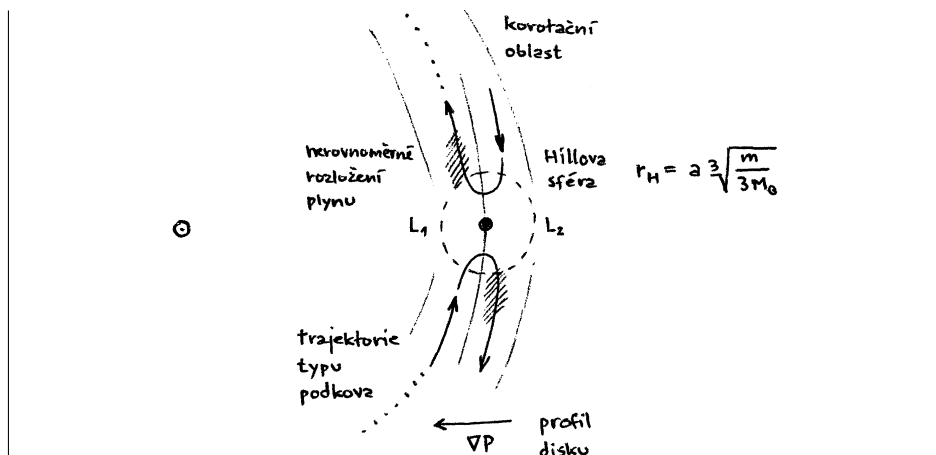
Chceme-li počítat pohyb protoplanet v protoplanetárním disku, musíme zohlednit celou řadu jevů. Úloha je totiž komplikovanější, než se zdá na první pohled. Samozřejmostí je gravitace Slunce a vzájemná gravitace planet (tj. problém N těles). Někdy je třeba zohlednit také slapy, křížové slapy (deformace 1. tělesa způsobené 2. tělesem působící na 3. těleso), zploštění, vyšší gravitační momenty, relativistické korekce (PPN) nebo negravitační jevy pro malá tělesa (asteroidy, komety). Všechny zmiňované jevy by fungovaly i bez přítomnosti plynu nebo prachu. V plynu je všechno jinak.

Lindbladovy rezonance. Především vznikají spirální ramena. Plyn na vnitřní orbitě, blíž ke Slunci má větší oběžnou rychlost než planeta, přibližně odpovídající keplerovskému vztahu $v_{\text{kepl}} = \sqrt{GM_{\odot}/r}$, předbíhá planetu, při průletu je jeho trajektorie vychýlena směrem k planetě a později se vrací zpět. Pro vícero trajektorií tak vzniká hustotní vlna před planetou (viz obr. 1). Obdobně bychom argumentovali v případě vnější orbity. Působení je obzvláště silné, je-li trajektorie v rezonanci s planetou. Tyto Lindbladovy rezonance jsou sice lokalizované, nastávají pro určité r , ale kontinuita plynu zajišťuje kontinuitu ramene. Plyn na planetu působí nezanedbatelnou gravitací, při nerovnoměrném rozložení plynu v okolí má zrychlení transversální složku (neboli nenulový moment). Blíže k planetě vychází vnější rameno, což brzdí planetu, planeta se proto pohybuje po spirále směrem dovnitř. Takovou migraci bez mezery v disku nazýváme typ I. Pro popis bychom evidentně potřebovali hydrodynamiku (HD).



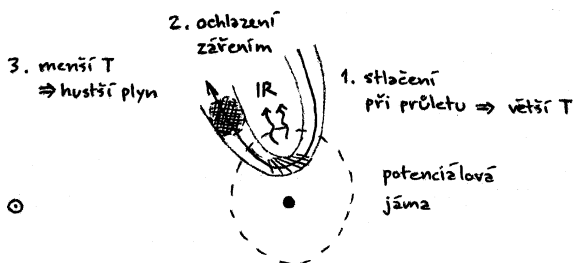
Obr. 1 — Planeta na oběžné dráze kolem Slunce ovlivňuje okolí. Díky Lindbladovým rezonancím se vychylují trajektorie plynu, čímž vznikají spirální ramena.

Korotační oblast. V Hillově sféře o poloměru $r_H = a \sqrt[3]{m/(3M_\odot)}$, tj. přibližně mezi Lagrangeovými body L_1 , L_2 , a podél trajektorie planety také dochází k významným pohybům, jak víme z problému 3 těles. Plyn na vnitřní orbitě se při těsném přiblížení přesune na vnější orbitu, posléze přiletí z druhé strany a prodělá opačný pohyb, čímž vzniká trajektorie ve tvaru podkovy. Disk má ovšem určitý profil tlaku a teploty (alternativně entropie), takže při přemístění plynu zevnitř ven, nebo opačně, se tento dostane do odlišného okolí. Vzniká opět nerovnoměrné rozložení a opět působí na planetu (obr. 2). Musíme ovšem rozlišovat stav saturovaný nebo nenasaturovaný, kdy se rozložení plynu ještě vyvíjí, což může trvat mnoho desítek oběžných period. Korotační moment bývá často větší než Lindbladův, jeho směr závisí na zmiňovaných profilech, nicméně protoplaneta se může pohybovat směrem ven. Pro určitý rozsah hmotností vzniká konvergentní zóna, kde se protoplanety přibližují navzájem.



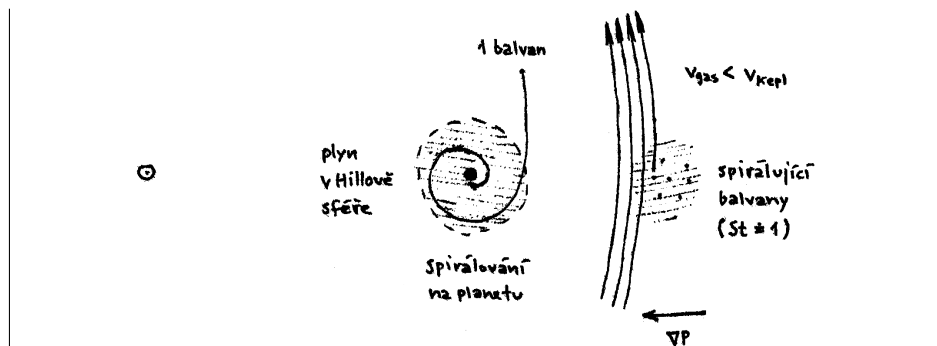
Obr. 2 — Korotační oblast okolo dráhy planety, ve které dochází k přesunu plynu z vnitřní trajektorie na vnější (a opačně). Přitom se plyn dostává do prostředí s jiným tlakem P , teplotou T , čímž vzniká nerovnoměrné rozložení v okolí planety.

Zářivé ochlazování. V blízkosti planety plyn ovšem vstupuje do potenciálové jámy, kde je stlačován, čímž se adiabaticky ohřívá, zároveň se chladí difuzí záření do okolí, takže vystupuje *chladnější* a hustší, než byl předtím. V rozložení plynu je pak patrný „studený prst“ (obr. 3), což posiluje působení směrem ven (Lega aj. 2014). Pro přesný popis je nezbytná hydrodynamika s přenosem záření (RHD).



Obr. 3 — Průlet plynu potenciálovou jámou planety, kdy dochází ke stlačení, adiabatickému ohřevu, zářivému ochlazení, takže se na výstupu objeví hustší oblast neboli „studený prst“.

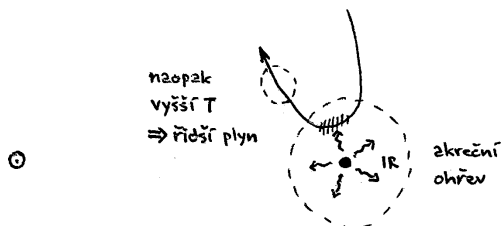
Akreční ohřev. Zároveň na protoplanetě probíhá akrece. Zejména na ni dopadají balvany (o rozměrech řádově cm, dm, m), které jsou ovlivňované aerodynamickým třením. Plyn se totiž pohybuje systematicky pomaleji, $v_{\text{gas}} < v_{\text{kepl}}$, balvany mají rychlost něco mezi tím, pocíťují tedy protivítr, spirálují hromadně směrem dovnitř a přitom potkávají planetu (viz obr. 4). V Hillově sféře, kde se plyn pohybuje převážně spolu s planetou, mohou spirálovat okolo planety a dopadnout na její povrch. Nejenže planeta zvětšuje svůj účinný průřez gravitačním fokusováním, tzn. faktorem $1 + (v_{\text{esc}}/v_{\text{rel}})^2$, ale aerodynamika balvanů pro určité parametry umožňuje akreci z celé Hillovy sféry.



Obr. 4 — Aerodynamické tření balvanů o plyn obíhající pomaleji vyvolává jejich spirálování a přísun k planetě. V Hillově sféře se pak plyn pohybuje společně s planetou, takže balvany spirálují až k ní a akretují.

Tyto srážky, při nichž se přeměňuje kinetická energie na teplo, protoplanetu zahřívají; sama se stává zdrojem tepelného záření. Při průletu plynu dojde naopak

k ohřevu, zředění, což obrací výše zmíněné působení směrem dovnitř (obr. 5; Benítez-Llambay aj. 2015).



Obr. 5 — Akreční ohřev způsobující, že planeta sama je zdrojem IR záření, ohřívá okolní plyn, čímž se na výstupu objeví naopak řídkší oblast.

Radiačně–hydrodynamické rovnice

*

Z výše uvedeného výčtu je zřejmé, že pokud chceme počítat pohyb planety, potřebujeme přinejmenším následující dvourozměrné rovnice (Chrenko aj. 2017):

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \overbrace{\mathbf{v} \cdot \nabla \Sigma}^{\text{advekce}} = \overbrace{-\Sigma \nabla \cdot \mathbf{v}}^{\text{expanze}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = \overbrace{-\frac{1}{\Sigma} \nabla P}^{\text{gradient tlaku}} + \overbrace{\frac{1}{\Sigma} \nabla \cdot \mathbf{T}}^{\text{viskozita}} - \overbrace{\frac{\int \rho \nabla \phi dz}{\Sigma}}^{\text{gravitace}} + \overbrace{\frac{\Sigma_p}{\Sigma} \frac{\Omega_K}{\tau} (\mathbf{u} - \mathbf{v})}_{\text{reakce}}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \overbrace{\mathbf{v} \cdot \nabla E}^{\text{konvekce}} = & \overbrace{-E \nabla \cdot \mathbf{v}}^{\text{práce}} - \overbrace{P \nabla \cdot \mathbf{v}}^{\text{práce}} + \overbrace{Q_{\text{visc}}}_{\text{viskózní ohřev}} + \overbrace{\frac{2\sigma T_{\text{irr}}^4}{\tau_{\text{eff}}}}^{\text{ozáření}} - \overbrace{\frac{2\sigma T^4}{\tau_{\text{eff}}}}^{\text{emise}} + \\ & \underbrace{+ 2H \nabla \cdot \frac{16\sigma \lambda_{\text{lim}} T^3 \nabla T}{\rho_0 \kappa_R}}_{\text{zářivá difuze}} + \sum_i \underbrace{\frac{GM_i \dot{M}_i}{R_i S_{\text{cell}} \delta(\mathbf{r}_i)}}_{\text{akreční ohřev}}, \end{aligned} \quad (3)$$



$$P = \Sigma \frac{RT}{\mu} = (\gamma - 1)E, \quad (4)$$

*

$$\frac{\partial \Sigma_p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \Sigma_p = -\Sigma_p \nabla \cdot \mathbf{u} - \overbrace{\left(\frac{\partial \Sigma_p}{\partial t} \right)_{\text{acc}}}^{\text{akrece}}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\int \rho_p \nabla \phi \, dz}{\Sigma_p} - \underbrace{\frac{\Omega_K}{\tau} (\mathbf{u} - \mathbf{v})}_{\text{aerodynamické tření}}, \quad (6)$$

$$\dot{M}_i = \iint \left(\frac{\partial \Sigma_p}{\partial t} \right)_{\text{acc}} r \, d\theta \, dr \quad \text{pro } \forall i, \quad (7)$$

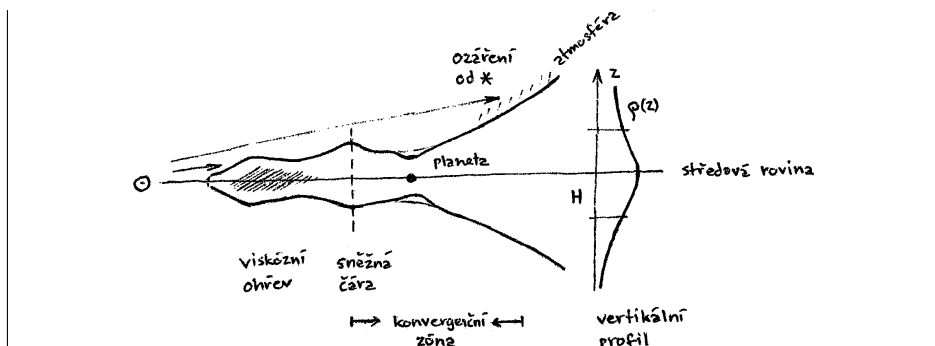
$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{r}}_i = & -\frac{GM_\star}{r_i^3} \mathbf{r}_i - \sum_{j \neq i} \frac{GM_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) + \overbrace{\iint \iint \frac{\rho \nabla \phi_i \, dz}{M_i} r \, d\theta \, dr}^{\text{gravitace disku}} + \overbrace{f_z \hat{z}}^{\text{tlumení}} \\ & + \underbrace{\iint \mathbf{u} \left(\frac{\partial \Sigma_p}{\partial t} \right)_{\text{acc}} r \, d\theta \, dr}_{\text{akrece}} \quad \text{pro } \forall i, \end{aligned} \quad (8)$$

kde rovnice v bílém poli platí pro plyn, v šedém pro balvaný, zatímco ve žlutém pro protoplanety. Značení veličin je následující: Σ je povrchová hustota plynu (v g cm^{-2} , resp. $M_\odot \text{ au}^{-2}$), \mathbf{v} rychlost plynu, P vertikálně integrovaný tlak, \mathbf{T} tenzor viskózního napětí, $\rho = \Sigma / (\sqrt{2\pi}H) \exp[-z^2/(2H^2)]$ objemová hustota plynu za předpokladu rovnovážného, izotermálního vertikálního profilu, $H = c_s / (\Omega_K \sqrt{\gamma})$ výšková (tlaková) škála, $c_s = \sqrt{\gamma P / \Sigma}$ rychlost zvuku, $\phi = \phi_\star + \sum \phi_i$ gravitační potenciál Slunce a protoplanet, hlazený kubickou funkcí kvůli konečné velikosti výpočetních buněk, z vertikální souřadnice, Σ_p povrchová hustota balvanů, \mathbf{u} rychlost balvanů, $(\partial \Sigma_p / \partial t)_{\text{acc}}$ člen popisující akreci balvanů na protoplanetu, která může probíhat v Bondiho režimu (s gravitačním fokusováním) nebo Hillově režimu (s aerodynamickým třením), $\Omega_K = \sqrt{GM_\odot / r^3}$ keplerovská úhlová rychlost, $\tau = \Omega_K t_s$ Stokesovo číslo balvanů, čili charakteristická doba do „zastavení“ vyjádřená v jednotkách oběžné periody, E vnitřní energie plynu, $Q_{\text{visc}}(\nu)$ viskózní ohřev, ν kinematická viskozita (v $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$), σ Stefanova–Boltzmannova konstanta, T_{irr} iradiační teplota, τ_{eff} efektivní optická tloušťka, T teplota plynu, λ_{lim} omezoč toku bránící příliš rychlé difuzi, ρ_0 hustota ve středové rovině, κ_R Rosse-landova opacita (v $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$), G gravitační konstanta, M_i hmotnost protoplanety, R_i poloměr protoplanety, S_{cell} plocha výpočetní buňky, ve které se právě nachází,

μ střední molekulová hmotnost, γ adiabatický index, $\ddot{\mathbf{r}}_i$ zrychlení tělesa i , f_z předpis pro tlumení vertikálními vlnami vyvolávanými planetou v disku (horizontální vlny jsou v modelu počítané přímo).

Z matematického hlediska se jedná o soustavu $9 + 4N$ nelineárních parciálních integro-diferenciálních rovnic 2. řádu pro $9 + 4N$ neznámých skalárních funkcí souřadnic a času, kde N označuje počet protoplanet, konkrétně $\Sigma(\mathbf{r}, t)$, \mathbf{v} , E , Σ_p , \mathbf{u} , $M_i(t)$, $\mathbf{r}_i(t)$. Ostatní veličiny P , T , ρ , H , ϕ , R_i , atd. jsou závislé na výše uvedených. Analytické řešení není známo.

Když si rovnice důkladně prohlédneme, uvidíme velmi zajímavé vazby, které jsou mezi nimi i mezi členy. Vertikální profil disku určují viskózní ohřev Q_{visc} převládající ve vnitřní části disku, kde je značný stříh rychlostí a kde tření zvyšuje T , potažmo c_s , H ; opacita $\kappa(\rho, T)$, která se značně zvyšuje při vzniku zrn (poklesu $T(r)$), čímž se ovšem lokálně zvýší T , a ozařování od hvězdy ve vnější části disku, kde se zvyšuje sklon jeho atmosféry vzhledem k paprskům od hvězdy. Na disku se projeví jako „hrby“ a „vzednutí“ (viz obr. 6). Mezi nimi se očekává určitá prohlubeň, což je *konvergenční zóna*, kde protoplanety určitých hmotností mohou migrovat směrem k sobě, což zní slibně.



Obr. 6 — Náčrt protoplanetárního disku z boku, odkud je patrná jeho vertikální škála $H(r)$. Ta je určena teplotou T , čili viskózním ohřevem, opacitními přechody (např. souvisejícími se sněžnou čarou), samotnými planetami nebo ozářením od hvězdy. Škále H odpovídá vertikální profil $\rho(z)$.

Přenos záření je značně zjednodušen, difuze (FLD) je totiž vhodným přibližním pouze pro opticky tlusté prostředí ($\tau > 1$) v rovině disku; ve směru z nicméně používáme jednoduchý model atmosféry (1D), která je nahoře (dole) opticky tenká ($\tau \ll 1$).

Planety ovlivňují strukturu disku plynu a balvanů (skrz ϕ), a naopak disk svou gravitací planety, čímž vznikají zmiňované silové momenty čili migrace. Rychlost migrace se pochopitelně liší pro různé M_i , což také posouvá planety blíž k sobě navzájem.

V modelu máme dvě proudění s vazbou, tj. situace vytvářející řadu důležitých jevů. Jednak se aerodynamickým třením zajišťuje celkové spirálování balvanů a jejich přísun k planetám. Posléze probíhá akrece balvanů v Hillově sféře, z níž se balvany odebírají dle předepsané účinnosti a přidávají se ke hmotnosti planety M_i . Přírůstek \dot{M}_i pak vystupuje v energetické rovnici pro plyn, neboť předpokládáme, že se uvolněná kinetická energie přemění na teplo, vyzáří se v IR, zahřeje okolní plyn a zářivou difuzí nebo konvekcí se odvede dál.

Je-li protoplaneta dosti hmotná, může ovlivnit proudění plynu natolik, že se za planetou stane super-keplerovské. Pak se ovšem obrátí znaménko zrychlení balvanů ($u_\theta < v_\theta$), které již nespíralují dovnitř, ale ven. Dochází tedy k izolaci planety od balvanů a jejich hromadění za planetou, kde pak mohou vytvářet prstence (zářící v IR nebo sub-mm oboru).

V neposlední řadě je v poslední rovnici vzájemná gravitace planet, zajišťující sekulární perturbace, gravitační rezonance a působení při blízkých přiblíženích, kdy se překrývají Hillovy sféry a mění se dráhy planet, případně dochází ke srážkám, tj. náhlému vzrůstu hmotnosti, který může být ve výsledku podstatnější než postupná akrece balvanů.

Diskretizace

*

Rovnice (1) až (8) jsme nuceni řešit numericky. Diskretizace v prostoru byla provedena metodou konečných objemů (FVM), která spočívá v integraci přes objem V , který však není infinitezimální, ale odpovídá objemu buňky, a nahrazení divergencí dle Gaussovy věty:

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{f} dV = \int_S \mathbf{f} \cdot d\mathbf{S},$$

kde \mathbf{f} je jedna z vektorových funkcí. Obvykle volíme 1 024 krát 1 536 buněk v radiálním \hat{r} a azimutálním $\hat{\theta}$ směru. Disk je sice dvourozměrný (2D), ale má určitou vertikální strukturu danou funkcí $H(\mathbf{r}, t)$, čili zohledňujeme důležité třírozměrné (3D) jevy, i když nejsme schopni zohlednit všechny, např. vertikální nerovnováhu, $T(z)$, různé proudění nad/pod protoplanetou, apod.

Diskretizace v čase byla provedena nejjednodušší Eulerovou metodou, čili nahrazení parciální derivace na levé straně za konečnou diferenci:

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta t},$$

odkud explicitně vyjádříme nové hodnoty f^{n+1} , pokud na pravé straně užijeme staré hodnoty f^n .

*

Metoda je stabilní pouze tehdy, splníme-li Courantovo kritérium:

$$\frac{(\Delta r, r\Delta\theta)}{\Delta t} \leq C(v_r, v_\theta),$$

kde v_r, v_θ jsou rychlosti v systému, konstanta $C \leq 1$. Kritérium omezuje Δt . Je třeba zdůraznit, že stabilita samozřejmě *neznamená*, že diskretizační chyba je nulová a numerické řešení přesné!

Při výpočtu používáme algoritmus Fargo (Masset 2000). Trik spočívá v tom, že rychlost je rozložena:

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{v}}(r) + \mathbf{v}'$$

a transport střední rychlostí na daném r se provede jednoduše posunem hodnot v buňkách v azimutálním směru. Zbývá pak řešit pouze relativně malé perturbace rychlosti \mathbf{v}' a Courantovo kritérium umožňuje větší Δt . Přenos záření v rovnici (3) se však řeší implicitně metodou postupné přehnané relaxace (SOR), abychom nemuseli dále omezovat časový krok Δt a zároveň byla zajištěna stabilita. Pohyb planet se počítá pomocí přesného integrátoru IAS15 (Rein & Spiegel 2015). Prakticky to vše můžeme provést pomocí programu FARGO–THORIN.¹

Výpočet je poměrně náročný, i když využijeme paralelizaci MPI (angl. message passing interface) a 10^2 procesorů (jader). Bohužel není možno jich volit více, protože pak by na 1 proces připadalo méně než 10 buněk v radiálním směru \hat{r} a další paralelizace by již ztrácela smysl, pokud bychom ji neprovedli i v $\hat{\theta}$. Za týden se v Metacentru spočte simulace dlouhá asi 50 kyr, což je o řád až dva méně než očekávaná doba života protoplanetárního disku.

Okrajové podmínky

*

Rovnice není možno řešit všude, dokonce i v nekonečnu bychom museli předsat okrajovou podmínku (BC), jinak nelze získat jednoznačné řešení. Vnitřní okraj disku volíme obvykle na 2,8 au, vnější na 14 au. Soustředíme se totiž pouze na oblast, kde očekáváme vznik obřích planet. Podle předchozích prací zde má být konvergentní zóna. Okrajová zóna je přitom ošetřena tak, aby se v ní tlumily vlny, neodrážely se od okraje, nevracely se zpět a nevytvářely tak artefakty.

Počáteční podmínky

*

Počáteční podmínky (IC) jsou nejvíce diskutabilní. Zatímco na diferenciálních rovnicích panuje v rámci použitých aproximací shoda, zřejmě nelze do rovnic dosadit pozorovaný stav v $t = \text{teď}$ a integrovat v čase zpět ($\Delta t < 0$), protože

1. (<http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~chrenko>)

*

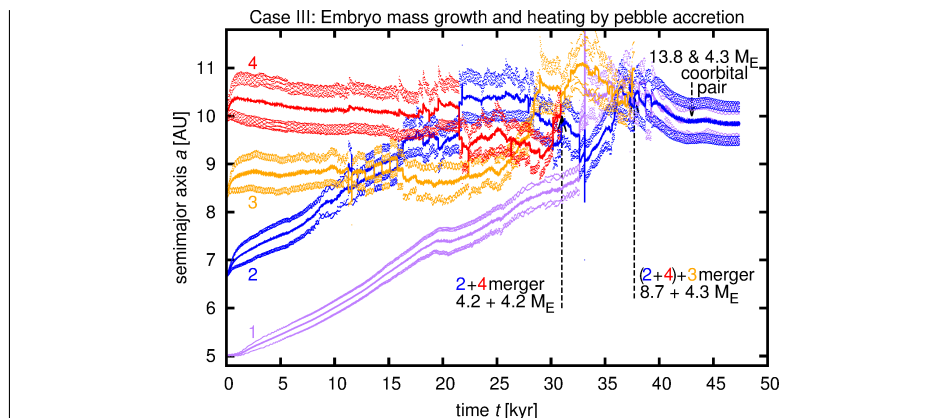
plynoprachový disk dávno zmizel a sám se neobjeví. Jinými slovy, proběhlo příliš mnoho termodynamicky nevratných dějů (difuze, turbulentní promíchání, disipativní srážky, únik IR záření, apod.). Celá fyzika je vlastně o tom jak volit IC.

My začínáme s několika protoplanetami o hmotnosti $3 M_{\oplus}$, které se jinak nazývají superzemě. Představujeme si, že před existencí obřích planet zde musely existovat nějaké zárodky. Bohužel nejsme schopni integrovat až do $t = \text{teď}$, mj. proto, že v našem popisu chybí celá řada jevů, zejm. konzistentní akrece plynu, izolace balvanů, rozplynutí disku, aktivita hvězdy apod. Simulaci prostě zastavíme poměrně brzy, čímž získáme „konečné podmínky“ (FC). V našem případě budeme spokojeni, vznikne-li jádro obří planety nebo dojde-li k zajímavému, dříve neznámému jevu.

Zvýšení orbitální excentricity

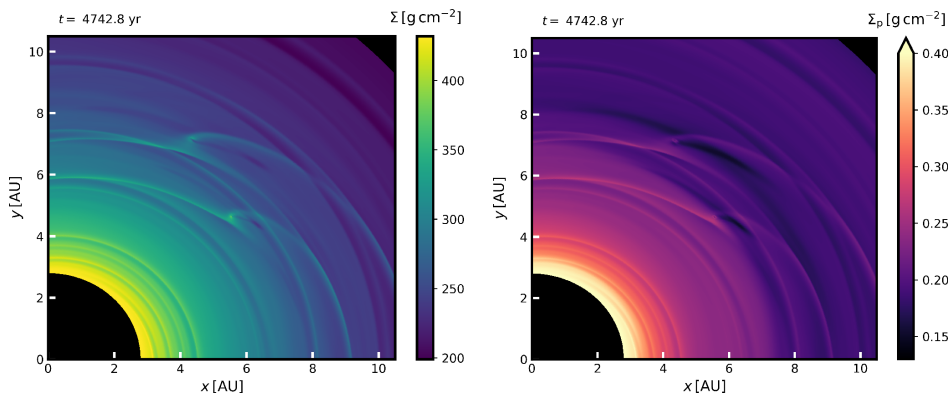
*

A právě k tomu došlo! V simulaci nastalo hned po začátku zvýšení orbitální excentricity protoplanet na hodnoty řádově $e \doteq 0,04$ (obr. 7). Jak je to možné? Po důkladném prostudování veličin Σ , T , zobrazení okolí planety, restartování simulací s detailním výstupem, změření perturbací, použití Gaussových rovnic, sledování vektoru zrychlení v závislosti na anomálii, přepočtu pro nekeplerovské trajektorie, rozlišení neustálené a ustálené fáze jsme zjistili, že princip je vlastně úplně jednoduchý: *horká stopa za planetou* (obr. 8).



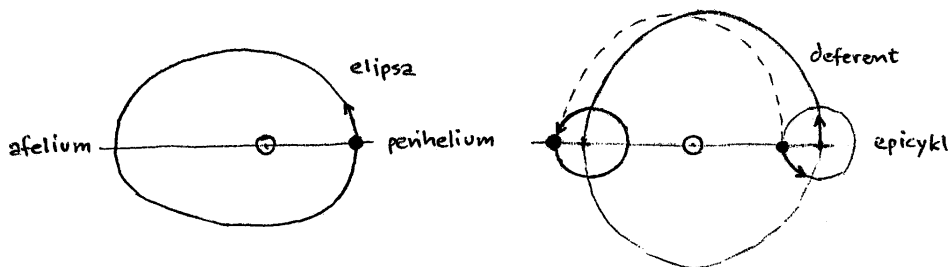
Obr. 7 — Závislost velké poloosy a , perihelia $q = a(1 - e)$ a afelia $Q = a(1 + e)$ na čase pro systém čtyř protoplanet s hmotnostmi $M_i = 3 M_{\oplus}$. Zvýšení excentricity působením horké stopy na $e \doteq 0,04$ se projevuje rozdílem mezi q a Q již během prvních 2 kyr. Planety migrují ke konvergenčnímu poloměru asi 10 au, kde spolu interagují, rozptylují se, vyměňují si pozice a srážejí se. Po dvou srážkách a při průběžné akreci balvanů vznikl koorbitální pár s hmotnostmi dosahujícími 13,8 a 4,3 M_{\oplus} . Převzato z [3].

*



Obr. 8 — Povrchová hustota plynu Σ (vlevo) a balvanů Σ_p (vpravo), se dvěma protoplanetami, za kterými je vidět horká (řidká) stopa. Spirální ramena jsou posunuta vzhledem k planetám, neboť tyto se již pohybují po excentrických drahách. Hustota Σ_p je přitom snižována probíhající akrecí balvanů. Převzato z [3].

Trajektorie protoplanety je zpočátku kruhová, ale nikoliv přesně. Vnoření do plynu způsobí migraci, což je vlastně spirála, mající malou nenulovou excentricitu. Takovou trajektorii si můžeme přiblížit pohybem po epicyklu (obr. 9).

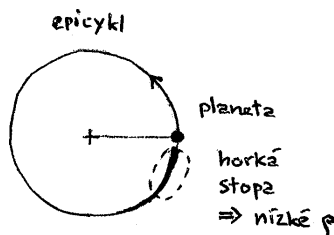


Obr. 9 — Přiblížení pohybu po elipse pohybem po epicyklu a deferentu.

Protoplaneta rozžhavená akrecí ohřívá plyn, vytváří za sebou horkou stopu, čili řidší plyn. Hustší plyn před ní ji táhne dále, epicyklus neboli excentricita se zvětšují. Nikoliv nade všechny meze — jakmile začne překračovat Lindbladova spirální ramena, jejich gravitační moment se obrátí, což růst zastaví (obr. 10).

Nezávisle jev objevili Eklund & Masset (2017). Když jeden z nás (OCh) zjistil, že se na Arxivu objevil preprint o zvýšení excentricity a sklonů planet, pokusily se o něj mráčky, 14 dní prakticky nespal a skoro hotový článek na jeden záťah dokončil. Autoři navíc zmiňují obdobný jev ve vertikálním směru, čili sklonu. Je

až s podivem, že na jev nepřišel nikdo dříve; ex post to zní tak logicky, že by jej měl člověk vymyslet i bez počítání. . .



Obr. 10 — Horká stopa a snížená hustota ρ za planetou pohybující se po epicyklu. Nesnížené ρ před planetou způsobuje zrychlení, které dále zvětšuje excentricitu (epicykl).

Důsledky pro vývoj planetárních systémů

*

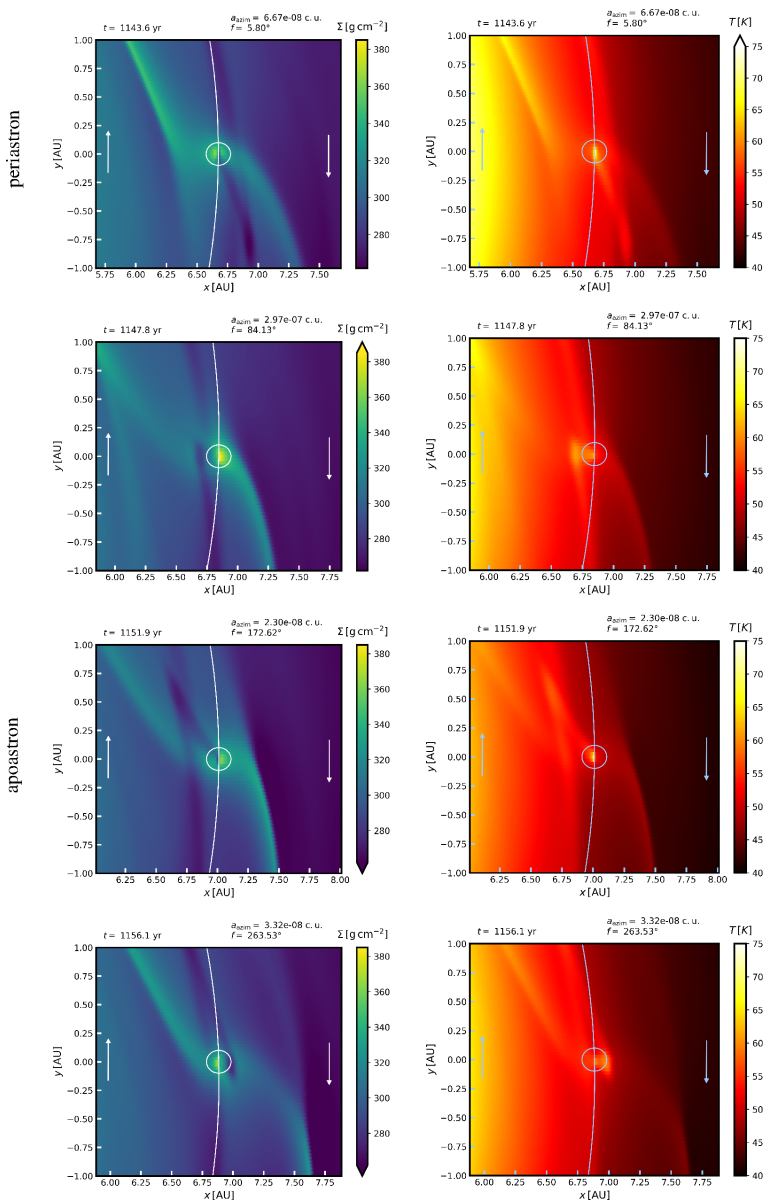
Zatímco v simulacích bez akrečního ohřevu protoplanety často tvoří „vláčky“, tzn. že se zachycují ve vzájemných gravitačních rezonancích středního pohybu, které pak brání jejich vzájemnému přiblížení, při zvýšené orbitální excentricitě se situace zásadně změní, neboť při $e \doteq 0,04$ je zmíněné zachycování málo pravděpodobné (Batygin 2015), čili superzemě se mohou přibližovat, rozptýlovat, srážet. Proto si myslíme, že se nám podařilo objevit jev, který vede k rychlému vzniku jádra planety Jupiter. Podle pravidla nejrychlejší vyhrává je tento způsob vzniku zatím nejlepším modelem.

Domyšleno do důsledků, hydrodynamika protoplanet možná určuje jejich „konečné“ excentricity, myšleno ty po rozplynutí plynu. Vzhledem k tomu, že migrace bez zachycování je efektivně rychlejší, možná naše planety vznikly dříve, než jsme si mysleli.

Na sympoziu IAU ve Vídni tento jev zaujal i naše japonské kolegy, kteří studují binární černé díry a kvasary. Možná se ukáže, že jev horké stopy hraje nějakou roli při růstu superhmotných černých děr?! Kdo ví?

- [1] BATYGIN, K. *Capture of planets into mean-motion resonances and the origins of extra-solar orbital architectures*. Mon. Not. R. Astron. Soc., **451**, 2589–2609, 2015.
- [2] BENÍTEZ-LLAMBAY, P., MASSET, F., KOENIGSBERGER, G., SZULÁGYI, J. *Planet heating prevents inward migration of planetary cores*. Nature, **520**, 63–65, 2015.
- [3] CHRENKO, O., BROŽ, M., LAMBRECHTS, M. *Eccentricity excitation and merging of planetary embryos heated by pebble accretion*. Astron. Astrophys., **606**, A114, 2017.
- [4] EKLUND, H., MASSET, F. S. *Evolution of eccentricity and inclination of hot protoplanets embedded in radiative discs*. Mon. Not. R. Astron. Soc., **469**, 206–217, 2017.
- [5] LEGA, E., CRIDA, A., BITSCH, B., MORBIDELLI, A. *Migration of Earth-sized planets in 3D radiative discs*. Mon. Not. R. Astron. Soc., **440**, 1, 683–695, 2014.

*



Obr. 11 — Povrchová hustota plynu Σ (vlevo) a teplota T (vpravo) pro různé orbitální fáze jedné z protoplanet. Souřadnicová soustava se otáčí a posunuje společně s planetou; směr proudění naznačují šipky. Slunce je vlevo. Horká stopa (nízké ρ , vysoké T) je zřetelná. Protože se jedná o plně rozvinutý jev, dosahuje stopa až ke spirálním ramenům. Převzato z [3].

- [6] MASSET, F. *FARGO: A fast eulerian transport algorithm for differentially rotating disks.* Astron. Astrophys. Suppl., **141**, 165–173, 2000.
- [7] REIN, H., SPIEGEL, D. S. *IAS15: a fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits.* Mon. Not. R. Astron. Soc., **446**, 1424–1437, 2015.

Přehled CCD pozorování za rok 2017

Martin Lehký

CCD měření byla získána pomocí čtyř různých přístrojů lokalizovaných na observatoři Ondřejov, na observační základně Astronomické společnosti v Hradci Králové (ASHK) a na hvězdárně v Úpici.

Pozorovací program dalekohledu Jana Šindela (JST, 0,40 m, $f/5$) byl zaměřen na sledování zákrytových dvojhvězd z projektu Sekce proměnných hvězd a exoplanet (SPHE) při České astronomické společnosti. Jejich výběr se stejně jako v letech minulých opíral o zajímavý $O-C$ diagram vykazující sinusoidální změny, stáčení přímky apsid nebo zkracování či prodlužování periody, případně se jednalo o zanedbané dvojhvězdné systémy. Všechny snímky z dalekohledu JST byly pořízeny CCD kamerou G2–1600 se sadou standardních filtrů BVRcIc. Do výběru se dostalo celkem 26 hvězd a výsledná fotometrie přinesla 130 okamžiků minim. Vedlejším produktem byla fotometrie jedné hvězdy bez určeného typu proměnnosti: ASAS J175019+0429.1 Oph (258 měření) a jedné pulsující hvězdy typu DSCT: GSC 4433-0827 Dra (326 měření).

Pod odsuvnou střechou Domečku — pozorovatelný Astronomické společnosti v Hradci Králové, vedle hlavního dalekohledu JST, byla po celý rok v činnosti sestava HK25: montáž EQ–6 nesoucí reflektor 0,25 m, $f/3,92$ vybavený CCD kamerou ST–7 se sadou filtrů BVRcIc. HK25 se zapojil do fotometrie 41 zákrytových proměnných hvězd z projektu SPHE a bylo získáno 74 okamžiků minim. Do zorného pole se dostala také jedna fyzicky proměnná hvězda typu SR: VV Boo (233 měření).

Pomocí VPN klienta jsem se během jasných nocí pravidelně připojoval k robotickému dalekohledu Blue Eye 600, který je umístěn na ondřejovské observatoři. Jedná se o ultra rychlou alt–azimutální montáž nesoucí teleskop RiLA (0,60 m, $f/5$) typu Ritchey–Chrétien s CCD kamerou osazenou citlivým senzorem e2v 42–40 NIMO. Právě díky ovládání přes internet může být pozorování spuštěno z libovolné lokace. Niže uvedená měření byla uskutečněna převážně z hvězdárny v Úpici a z pozorovatelný ASHK, část pozorování pak proběhla i z tepla domova a také z Českých Budějovic. Primárním úkolem teleskopu je fotometrie malých planetek. Získaná data pak slouží jako podklad pro modelování reálného tvaru těchto planetek metodou inverzní fotometrie. Z programu Astronomického ústavu MFF UK bylo sledováno celkem 70 objektů. Současně se do zorného pole dostalo dalších 16 objektů. Úhrnná doba fotometrie činí 387 hodin. Stovky pozic malých planetek

nejsou zatím proměřeny. Co se týká proměnných hvězd, byla pomocí Blue Eye 600 pozorována v jedné noci eruptivní zákrytová dvojhvězda GJ3236 Cas a současně s ní dalších 5 proměnných hvězd (5 okamžiků minim).

Během jedné noci pak byla na hvězdárně v Úpici v činnosti experimentální sestava ve složení historického refraktoru Mertz 0,16 m, $f/11$ a CCD kamery ST-2000. Pozorovány byly 2 zákrytové proměnné hvězdy (2 okamžiky minim).

Rodinně nových proměnných hvězd (HKV) objevených na observační základně Astronomické společnosti v Hradci Králové bylo letos věnováno více pozornosti. Dalekohled JST pozoroval HKV18 Boo (9 okamžiků minim) a 9 dříve nalezených a prozatím neregistrovaných a nepublikovaných proměnných hvězd (26 okamžiků minim). V dlouhých fotometrických řadách pořízených dalekohledem Blue Eye byly objeveny další desítky nových proměnných hvězd — avšak vzhledem k velkému množství budou k dalšímu studiu vybrány pouze zajímavější případy.

Suma sumárum se během roku 2017 pozorovalo 69 nocí. Konkrétně 66 nocí na Blue Eye 600, 34 nocí na JST, 31 nocí na HK25 a 1 noc na sestavě v Úpici. Když se do statistiky započítají i noci, kdy jsem pozoroval pouze vizuálně, vychází, že alespoň částečně bylo využito 85 nocí. To je na místní podmínky průměrné. Ve výsledku bylo sledováno celkem 83 zákrytových proměnných hvězd (246 okamžiků minim), 4 fyzicky proměnné hvězdy (1121 měření) a fotometrováno bylo 86 malých planetek (387 h).

Využití observačního času bylo maximální. Softwarové vybavení zůstalo bez větších změn. Ke zpracování fotometrických pozorování byl využíván CMunipack 1.1.26 a 2.1.6 (upravený pro matching pohybujícího se objektu) a Peranso 2.50. Velké poděkování patří za podporu především hvězdárně v Úpici, docentu Marku Wolfovi z MFF UK v Praze za zapůjčení CCD kamery G2-1600 se sadou filtrů BVRcIc, firmě ProjectSoft a celé řadě dalších lidí, bez jejichž přispění by nemohla být výše uvedená pozorování uskutečněna.

Většina fotometrických pozorování byla publikována v databázích BRNO a Meduza SPHE nebo zaslána vedoucím daných projektů. Veškeré zpracování CCD pozorování bylo uskutečněno na hvězdárně v Úpici.

Přehled vizuálních pozorování za rok 2017

Martin Lehký

Vizuální pozorování probíhala převážně na hvězdárně v Úpici a částečně na observační základně ASHK. Z přístrojového vybavení jsem využíval Newton na dobsonově montáži 420/2100, Cassegrain C 310/2750, Celestron T 280/2800, refraktor Mertz R 160/1785, binokulár Helios 20 × 100, Somet Binar 25 × 100 a triedr 10 × 50. Primárním programem bylo tradičně vizuální pozorování komet, kde bývá úkolem určení celkové jasnosti komy, úhlového průměru komy a stupně centrální kondenzace.

Během roku 2017 jsem spatřil celkem 7 komet a získal 81 odhadů celkové jasnosti komy. Ve většině případů se jednalo o jasné kometry. Kandidátů na pomyslný titul „Nejjasnější kometa roku“ se tak sešlo více a bylo poměrně těžké rozhodnout o vítězi. První polovina roku byla ve znamení velice příznivých návratů komet s československým otiskem. Ve vzdálenosti 0,084 AU od Země prolétla 11. února kometa 45P/Honda–Mrkos–Pajdušáková a počátkem dubna se kometa 41P/Tuttle–Giacobini–Kresák přiblížila k naší planetě na 0,149 AU. V obou případech dosáhly kometry značné jasnosti, 45P jsem spatřil během slábnutí jako objekt 7,9 mag a kometu 41P na konci března jako objekt 6,8 mag. Nicméně byly velice nevýrazné a dobře viditelné pouze na velmi tmavé obloze. Díky malé vzdálenosti od Země měly velký průměr a jasnost tak byla rozprostřena na velké ploše. Společně s nepatrnou centrální kondenzací to byla vskutku vražedná kombinace, znemožňující kvalitní pozorování a přesné odhady. Kometu C/2015 ER61 (PanSTARRS) jsem spatřil jen jednou jako objekt 7,7 mag. Byla ovšem velice nízko nad obzorem a sotva viditelná. Titul bych tedy za rok 2017 přídělil kometě C/2015 V2 (Johnson). Viditelná v binokuláru 25 × 100, respektive v triedru 10 × 50 byla po celou první polovinu roku. Přitom ke konci května dosáhla 7,6 mag a nacházela se ve velice příznivé poloze, vysoko nad obzorem v souhvězdí Pastýře.

jméno a označení komety	interval pozorování	počet pozorování
2P/Encke	13. 2. – 17. 2.	4
41P/Tuttle–Giacobini–Kresák	27. 2. – 21. 6.	29
45P/Honda–Mrkos–Pajdušáková	15. 2. – 28. 2.	3
71P/Clark	18. 5. – 19. 5.	1
rC/2015 ER61 (PanSTARRS)	25. 4. – 26. 4.	1
C/2015 V2 (Johnson)	26. 1. – 25. 6.	32
C/2017 O1 (ASASSN)	1. 8. – 8. 12.	11

Tab. 1 — Kometry pozorované během roku 2017.

Po započtení výše uvedených pozorování ukazuje celková statistika, že v období od 11. 12. 1987 do 31. 12. 2017 jsem spatřil 240 různých komet a získal 3 555 odhadů celkové jasnosti komy, plus 35 negativních pozorování a 10 samostatných popisů vzhledu komety, bez určení jasnosti.

Dále byla sledována tři aktivní galaktická jádra — NGC 4151 CVn, NGC 7469 Peg, MKN 421 UMa — získal jsem celkem 14 vizuálních odhadů jasnosti.

Pokračoval i doplňkový program — pozorování jasných fyzicky proměnných hvězd. Celkem jsem sledoval 16 pulzujících hvězd (538 odhadů jasnosti), 4 erupтивní hvězdy (97 odhadů jasnosti) a 1 supernovu (2017eaw v galaxii NGC 6946 Cep; 6 odhadů jasnosti). Suma sumárum 21 hvězd a 641 odhadů jasnosti.

Získaná pozorování komet byla tradičně odeslána do hlavní celosvětové databáze International Comet Quarterly (ICQ), dále do Comet Observation Database

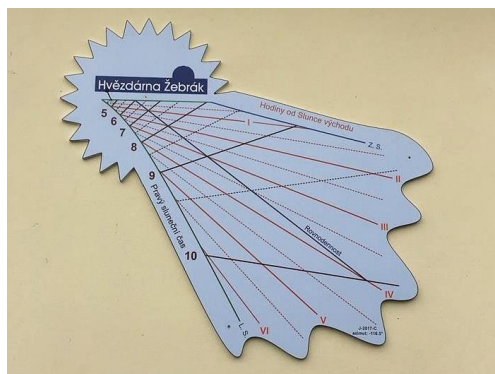
(COBS) a poskytnuta několika lokálním databázím. Vizuální pozorování aktivních galaktických jader a fyzicky proměnných hvězd byla publikována v databázi Meduza Sekce proměnných hvězd a exoplanet při České astronomické společnosti. K dispozici jsou také na webových stránkách spolu se CCD pozorováními. Veškeré zpracování vizuálních pozorování bylo uskutečněno na hvězdárně v Úpici.

Sluneční hodiny 4. kvartálu roku 2017

Jaromír Ciesla

Během 4. kvartálu bylo do našeho katalogu vloženo 59 nových záznamů. Domácích přibýlo 35 a zahraničních 24. Jak bylo vidět na hlasování jednotlivých kolegů, nehodnotilo se pouze samotné provedení slunečních hodin, ale i celková kompozice umístění číselníku. U některých hodin bylo hodnocení ovlivněno i kvalitou snímků v katalogu. Na prvním místě se nám v tomto kole sešly dvojce sluneční hodiny se stejným počtem 19 bodů. Jedny jsou instalované na budově hvězdárny v Žebráku a druhé se nacházejí na rodinném domku v Brně-Líšni.

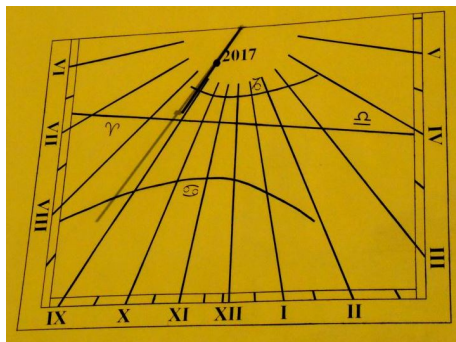
Číselník hvězdárny v Žebráku je vytištěn na hliníkové desce ve tvaru komety a je navržen pro azimut stěny -116° . Kromě místního pravého slunečního času je zde ještě sada čar udávajících čas, který uplynul od východu Slunce. Oba časové systémy jsou vyznačené s půlhodinovým dělením. Plocha vlastního číselníku je ohraničena hyperbolami slunovratů. Pro odečítání času je použit kolmý ukazatel. Autorem gnómonického a grafického návrhu je Jaromír Ciesla.²



Obr. 12 — Hvězdárna Žebrák, Pivovarská ulice (evidenční číslo BE 57).

- Hodnocení není zcela jednoznačné a může se stát, že z dvojice hodin, které jsou po stránce grafické i gnómonické velmi podobné, získají každé jiný počet bodů. A to se stalo i v případě sady slunečních hodin na hvězdárně v Žebráku. Rozdíl mezi oběma číselníky je v orientaci stěny a tím i v pracovním rozsahu číselníků. Liší se též v použitém druhém časovém systému; zde je měřen čas do západu Slunce.

Druhé hodiny z prvního místa jsou provedeny kresbou přímo na fasádu. Hodinové čáry jsou vyneseny v rozsahu VI–XII–V, s krátkými ryskami po půl hodině, které jsou spolu s číslicemi vyneseny v orámování číselníku. Číselník je doplněn o tři datové čáry s označením znamení zvěrokruhu. Jako ukazatel je použit polos s nodem. Autory jsou Miloš Nosek a Martin Vůjta.



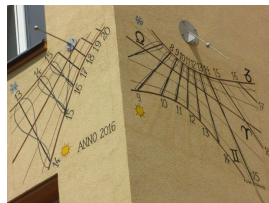
Obr. 13 — Brno-Líšeň, Leskauerova 34 (BM 30).

Na třetí příčce se pak umístily svislé hodiny na budově školy v Hoštejně. Když se realizovalo zateplení budovy, přemýšlelo se, jak zaplnit prázdnou stěnu. Volba padla na sluneční hodiny. Návrhu a zhotovení se zhostili Jindřich Traugott a Ondřej Pechálek, díky kterým vznikly tyto jednoduché, ale vzhledově zajímavé hodiny. U hodin je použito kulisového ukazatele, který měří čas od šesté hodiny ranní do čtvrté odpolední. Součástí číselníku jsou dvě datové křivky pro letní a zimní slunovrat a rovnodennostní přímka. Datová křivka pod přímkou rovnodenností představuje období konce srpna a začátku září, tedy konce prázdnin a začátku školního roku. Na kalendáři se řídíme podle polohy stínu špičky ukazatele.



Obr. 14 — Hoštejn 16, ZŠ a MŠ (SU 25).

Velice pěkné sluneční hodiny vznikly roku 2016 v Bratislavě, jsou k vidění na ulici Bezručova 1 na rohu domu. Jedná se sice o dvojici slunečních hodin, ale jelikož oba číselníky získaly stejný a nejvyšší počet bodů, zaujímají oba svorně první místo. Jižní číselník má pracovní rozsah 8–12–17 hodin a šikmý ukazatel s nodem. Na vedlejší stěně je západní číselník s pracovním rozsahem 14–20 hodin, s kolmým ukazatelem s nodem. Oba číselníky disponují sadou sedmi datových čar označených symboly zvěrokruhu. Co ale činí tyto hodiny zvláště zajímavými, je použití analem pro každou hodinu.



Asi 32 km západně od Frankfurtu nad Mohanem ve Wiesbadenu můžeme na místním kostele spatřit jednoduché svislé sluneční hodiny. Jako ukazatel je použit polos se dvěma podpěrami, díky čemuž je zvýšena jeho tuhost. Číselník obsahuje toliko hodinové čáry s označením hodin od VI do XVI. I přesto, že se jedná o jednoduchý číselník, jeho citlivé zakomponování mezi okny kostela značně zvyšuje uměleckou hodnotu hodin.



Velice hezké sluneční hodiny v Courthézon se ocitly až na třetím místě zahraniční soutěže. Je to možná i nízkou kvalitou snímku, ale tyto někdy vznikají za jízdy autem, kdy není čas na volbu kompozice. Hodiny jsou velmi zajímavé svým provedením. Jsou umístěné na stěně natočené skoro k východu. Jako ukazatel slouží polos s nodem, který je držen téměř rovnoběžně se stěnou na dvou podpěrách. Šipka ukazatele směřuje k severnímu světovému pólu. Hodinové čáry od 5. hodiny ranní do 11. před polednem jsou ohraničené křivkami slunovratových datových čar. Číselník je malován na eliptické desce a je bohatě zdoben. V horní části je patrný text.



A jak dopadlo hlasování o sluneční hodiny roku 2017? Zatímco v domácí části suverénně zvítězily dvouvláknové sluneční hodiny z Čeperky (ev. č. PA 58), v zahraniční části byly výsledky mnohem těsnější. Ze zahraničních hodin se na prvním místě s náskokem jediného bodu umístily hodiny typu skafé z Jižní Koreje (KR XX 2) před hodinami z Bratislavy a Krakova. Závěrem děkuji všem příznivcům za zaslání snímků do katalogu a také všem zúčastněným za jejich iniciativu při hlasování.