

## 0.1 Akrece prachu

Zásadní problém je, že v našem protoplanetárním disku *nebylo* splněno Jeansovo kritérium, tudíž planety nemohly vzniknout přímo gravitačním kolapsem. Zároveň víme, že hvězdný vítr mladé hvězdy ve fázi T Tauri je natolik mohutný, že během prvních 10 My „odfoukne“ z disku všechny plyn. Vznik Jupitera a Saturna, které mají objemné plynné pláště, je tímto časovým intervalem velmi omezen. Doposud se jako nejlepší jeví *teorie akrece*, podle které zárodky planet vznikly postupným spojováním mikroskopických prachových zrn.

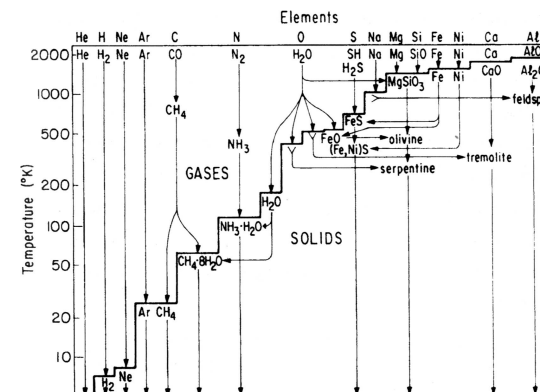
Všimněme si, že hmotnosti prvotních prachových zrníček a výsledných planet se liší o nějakých 30 až 40 řádů. Časová škála je přitom 10 až 100 My. Evidentně je zcela nemožné takový proces počítačově simulovat najednou. Musíme zkoumat třeba jen prachová zrnka v nepatrné části mlhoviny, jen pár tisíc planetesimál v omezeném objemu atp. Některé mikroskopické a lokální procesy v protoplanetárním disku nyní stručně popíšeme.

Je třeba se „bez mučení“ přiznat, že ani popisovaná teorie není dokonalá! Několik vnitřních rozporů, které zmiňujeme v textu, naznačuje, že v budoucnu by se teorie vzniku planet mohla nějakým způsobem změnit nebo upřesnit.

### 0.1.1 Kondenzace plynu

Kondenzace (neboli „vypršení“, tj. vznik shluků atomů a následně pevných částíček) začíná tehdy, když teplota plynu poklesne na 1 200 až 1 700 K. Nejprve se z plynu vylučují refraktorní (netěkavé) prvky, případně jejich sloučeniny: oxidy Al, Ca, Ti nebo kovy Fe, Ni (viz obr. 1). Při dalším poklesu teploty vznikají silikáty a minerály bohaté na vápník. Nejpozději kondenzuje voda (H<sub>2</sub>O) a vzniká směs ledů vody a amoniaku (NH<sub>3</sub>). Protože byl v disku nízký tlak, je kondenzační teplota vody nízká, pouze okolo 200 K. Nemohla se tedy vytvořit příliš blízko Slunci, protože tam teplota nikdy pod 200 K neklesla; hranice se pohybuje někde mezi 3 a 4 AU, tj. v dnešním pásu planetek. Ve větších vzdálenostech od Slunce, asi za 10 AU, mohou ještě vzniknout led metanu (CH<sub>4</sub>) a vodní led, v němž prostorově uspořádané molekuly H<sub>2</sub>O „uvězní“ molekuly CO nebo N<sub>2</sub> (takovým látkám se říká klatráty).

Proč vznikají právě tyto sloučeniny? Zřejmě proto, že jsou tvořeny těmi nejběžnějšími chemickými prvky, které byly obsaženy již v zárodečné mlhovině (tab. ??). Navíc za hustot a teplot, které v disku panovaly, dochází přirozeně k chemickým reakcím atomů a tvorbě molekul.



**Obr. 1** — Graf znázorňující nejdůležitější chemické reakce probíhající v protoplanetárním disku, počítané pro případ pomalého rovnovážného chladnutí. Nahoře je vyznačeno 15 prvků, jenž měly v mlhovině největší zastoupení. Tlustá „schodová“ čára odděluje plynné a pevné fáze látek. Převzato z [75].

Je dobře vidět, že kvůli závislosti stavu látky na teplotě vzniká v protoplanetárním disku *chemické rozrůznění*, čili v různé vzdálenosti od Slunce měl disk různé chemické složení. Vzpomeňme ale, že jsme minule, při odhadu celkové hmotnosti disku, předpokládali, že disk měl všude stejné složení jako Slunce a podle toho jsme také „doplňovali“ hmotnosti planet! Neprotiřečíme si tedy? Nikoli, jak uvidíme později, disk byl v pozdějších fázích, při pohybu planetesimál, opět dobře „promíchán“.<sup>1</sup>

### 0.1.2 Kolizní růst částic

Atomy a molekuly velmi rychle vytvářely shluky, které rostly až do makroskopických rozměrů. Za předpokladu úplné adsorpce (tzn. že se od shluku žádná částice neodrazí) je maximální rychlost růstu hmotnosti prostým součinem objemu, který částice proletí za 1 s, a hustoty pevné látky v mlhovině [5]:

$$\frac{dM_S}{dt} = 4\pi R_S^2 \frac{v_T}{\sqrt{A}} \cdot \alpha \rho, \quad (1)$$

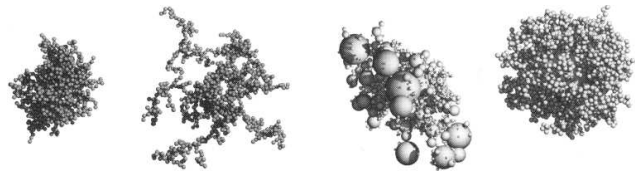
kde  $R_S$  označuje poloměr částice,  $v_T$  termální rychlost vodíkového plynu (dle  $\frac{1}{2}mv_T^2 = \frac{3}{2}kT$ ),  $A$  relativní atomovou hmotnost molekul pevné látky,  $\alpha$  hmotnostní podíl pevné látky a  $\rho$  hustotu plynoprachové mlhoviny. Dosadíme-li

<sup>1</sup> Ledové planetesimály, které mohly vzniknout pouze za hranicí 3 až 4 AU, přitom dopravily vodu do oblastí terestrických planet. Nebýt toho, zůstaly by všechny terestrické planety suché. Na Zemi by jistě nemohl vzniknout život v takové podobě, jak jej známe dnes.

za  $M_S = \frac{4}{3}\pi R_S^3 \rho_S$ , respektive  $\frac{dM_S}{dt} = \frac{4}{3}\pi 3R_S^2 \frac{dR_S}{dt} \rho_S$ , dostaneme pro rychlost růstu poloměru formuli:

$$\frac{dR_S}{dt} = \frac{v_T}{\sqrt{A}} \cdot \alpha \frac{\rho}{\rho_S} \simeq \frac{1,6 \cdot 10^3}{\sqrt{20}} \cdot 0,01 \frac{10^{-7}}{10^3} \text{ m/s} \simeq 0,6 \text{ cm/rok}, \quad (2)$$

kam jsme dosadili hodnoty typické ve vzdálenosti Jupitera. Během jediného roku tedy mohly narůst až milimetrové částčky! Měly pravděpodobně „fraktální“ strukturu (jako na obr. 2), takže dobře nabíraly další částčky, jež se pohybovaly vůči nim pomalu; na druhou stranu byly jistě velmi křehké a při kolizích s rychlými částčkami se rozpadaly.



**Obr. 2** — Možné tvary prachových částic v protoplanetárním disku podle výsledků numerických simulací. Převzato z [75].

Podle radiometrických dat byly tyto prvotní částice velmi záhy (do 1 My) přetaveny, staly se kompaktnější a vytvořily tak *vápnito-hlinité inkluze* (CAIs) a *chondry* (ty se dodnes zachovaly pouze v obyčejných chondritických meteoritech, které už nebyly později přetavené nebo jinak přeměněné). Jejich krystalická struktura naznačuje, že zahřátí a ochlazení muselo proběhnout velmi rychle, na časové škále několika minut nebo desítek minut. Snad se na tom podílely [57]:

1. blesky (elektrické výboje vyvolané třením v plynu a ionizací UV zářením);
2. rázové vlny (možná působené nerovnoměrnou akrecí, gravitační nestabilitami nebo planetesimálami letícími nadzvukovou rychlostí v plynu);
3. erupce (interakce disku a magnetického pole Protoslunce).

### 0.1.3 Pokles k rovině disku

Kdyby částice zůstaly rozptýlené v tlustém disku, nedocházelo by dost často k jejich setkávání a dalšímu rychlému růstu. (Mějme stále na paměti, že velké plynné planety musejí vzniknout do 10 My. Kdybychom měli dost času, třeba miliardu let, mohli bychom si počkat, až se zrníčka náhodou potkají.) Myslíme si proto, že částice rozptýlené nezůstaly, ale soustředily se poblíž středové roviny disku. Středová rovina, která je kolmá na vektor celkového momentu hybnosti, se nazývá *Laplaceova rovina*.

Jak bychom mohli odhadnout rychlost klesání k rovině disku? Jako obvykle zkusíme sestavit rovnici pro pohyb prachové částčky. Zrychlení ve směru  $z$  je rovno:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{GM_\odot}{r^2} \frac{z}{r} + \frac{F_D}{M_S}, \quad (3)$$

kde první část je zrychlení působené gravitační silou Slunce,  $M_S$  označuje hmotnost částčky a  $F_D$  třecí sílu, kterou na částčku působí okolní plyn. Pozor, nemůžeme použít obvyklý Stokesův zákon<sup>2</sup>  $F_D = -\frac{1}{2}CS\rho v^2$ , protože ten platí při Reynoldsově čísle<sup>3</sup>  $Re \gtrsim 1000$ , objektech mnohem větších než střední volná dráha molekul, velkých rychlostech objektů, malých viskozitách nebo velkých hustotách plynu. My jsme však v situaci opačné (malé zrnko v řídkém plynu), tudíž musíme použít *Epsteinův zákon*<sup>4</sup>:

$$F_D = -S\rho v_T v.$$

Po dosazení do (3) dostaneme:

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{S\rho v_T}{M_S} \frac{dz}{dt} + \frac{GM_\odot}{r^3} z = 0,$$

což je relativně složitá diferenciální rovnice druhého řádu (navíc s explicitní závislostí na čase, skrytém v  $S/M_S$ ) pro neznámou funkci  $z(t)$ . Naštěstí je druhá derivace  $\frac{d^2z}{dt^2}$  zanedbatelná oproti ostatním členům [5], čímž se rovnice redukuje na relativně jednoduchou diferenciální rovnici prvního řádu (přičemž dosadíme za  $S/M_S \simeq \frac{3}{4R_S(t)\rho_S}$  a za  $R_S \simeq \frac{dR_S}{dt} \cdot t$  dle (2)):

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{GM_\odot}{r^3} \frac{4R_S\rho_S}{3\rho v_T} z = -\frac{GM_\odot}{r^3} \frac{4v_T\alpha\rho\rho_S}{3\sqrt{A}\rho_S\rho v_T} z = -\frac{GM_\odot}{r^3} \frac{4\alpha}{3\sqrt{A}} t z,$$

<sup>2</sup> Tato úměra není nepochopitelná: za čas  $dt$  proletí těleso objem  $S \cdot vdt$ , narazí tak do plynu o hmotnosti  $Svdt \cdot \rho$ , který má průměrnou hybnost  $dp = -Svdt\rho \cdot v$ . Třecí síla  $F_D \propto \frac{dp}{dt} = -S\rho v^2$ , stačí jen doplnit nějakou účinnost  $\frac{C}{2}$ , protože ne všechna hybnost plynu se přenesla na těleso.

<sup>3</sup> Připomenutí: při proudění v trubce je  $Re = \frac{vd}{\nu}$ , kde  $v$  je rychlost proudění,  $d$  průměr trubky,  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  kinematická viskozita a  $\mu$  dynamická viskozita.  $Re$  také naznačuje rozměry vírů, které se při proudění objeví; jejich typický rozměr je od 1 do  $1/Re$  v jednotkách  $d$ .

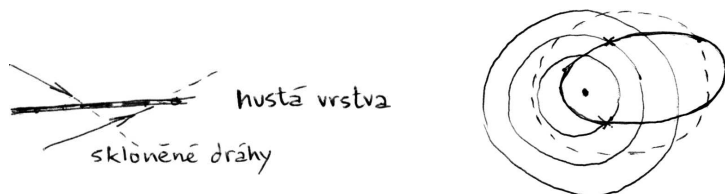
<sup>4</sup> Zde je hmotnost plynu, který se s tělesem sráží, dána především jednotlivými molekulami, nalétávajícími termální rychlostí  $v_T \gg v$ . Zpředu to je  $dm = \frac{1}{2}Sv_T d\rho$  a zezadu totéž. Změna hybnosti tělesa je pak ovšem  $F_D = \frac{dp}{dt} = dm \cdot [-(\frac{v_T}{2} + v) + (\frac{v_T}{2} - v)] = -S\rho v_T v$ . To je zcela obdobná úměra jako u *viskózního tření* popisovány vztahem  $F_D = -bv$ , kde pro kapalinu při  $Re < 1$  platí  $b = 6\pi\mu r$ .

kteřá má evidentní řešení:

$$z(t) = z(0) \exp\left(-\overbrace{\frac{GM_{\odot}}{r^3} \frac{2\alpha}{3\sqrt{A}} t^2}^{1/\tau_S^2}\right).$$

Typická časová škála vychází  $\tau_S \simeq 50$  y, čili za několik desítek let prachová zrna „sesednou“ k rovině disku a podle (2) za tuto dobu stihnou narůst až do rozměru  $R_S \simeq 30$  cm.

Soustředění částic ve středové rovině napomáhají také vzájemné *srážky*: částice letící „zhora nebo zdola“ při takových srážkách předávají hybnost ve směru z částicím v husté středové rovině (obr. 3). Podobně částice, které mají výstřednou dráhu, kříží dráhy ostatních a působením srážek se jejich dráhy postupně stávají kruhovými. Vlastně to funguje podobně jako v dnešních saturnových prstencích.



Obr. 3 — Zmenšování sklonů a výstředností drah při srážkách částic.

#### 0.1.4 Spirálování třením o plyn

Důležitá odbočka o *rychlosti obíhání plynu*: neboť tlak plynu klesá se vzdáleností od Slunce, bude na částičky plynu působit síla ve směru od Slunce, proti směru jeho gravitace. Gradient tlaku tedy jakoby efektivně zmenšil hmotnost Slunce. Ale pozor! To pak musí znamenat, že plyn obíhá *pomaleji* než kdyby žádný gradient tlaku nepůsobil a pomaleji než třeba planetesimály (obr. 4).<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Vzpomeňme, že má-li se hmotný bod o hmotnosti  $m$  pohybovat rychlostí o velikosti  $v$  po kružnici o poloměru  $r$  musí na něj působit síla o vhodné velikosti  $F_d = m \frac{v^2}{r}$  směřující do středu kružnice. To lze odvodit z docela jednoduché geometrické úvahy (obr. 5). Pokud je onou dostředivou silou  $F_d$  gravitace centra o hmotnosti  $M$ , tedy  $F_g = \frac{GMm}{r^2}$ , pak je pro daný poloměr přesně určena rychlost obíhání po kruhové dráze, tj. *keplerovská rychlost* nebo též 1. kosmická rychlost:

$$v_k = \sqrt{\frac{GM}{r}} \propto r^{-1/2}. \quad (4)$$

Víme-li, že tlak a hustota se mění jako:

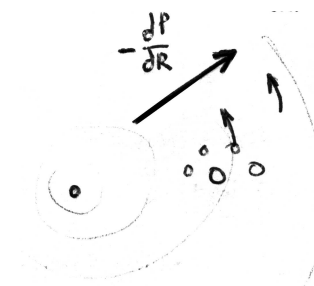
$$P = P_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-13/4}, \quad \rho = \rho_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-11/4},$$

pak zrychlení od gradientu tlaku vypočteme jako:

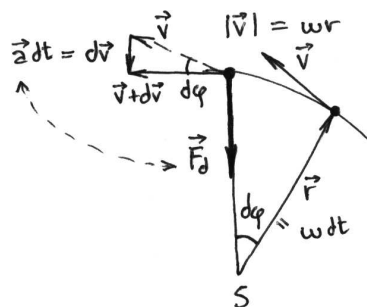
$$\begin{aligned} a_{\nabla P} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} = -\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{11/4} P_0 \left(-\frac{13}{4}\right) \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-17/4} \frac{1}{r_0} \\ &= \frac{13}{4} \frac{P_0}{\rho_0 r_0} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-3/2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Pro konkrétní hodnoty ve vzdálenosti Jupitera je  $a_{\nabla P} \simeq 10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>, tj. asi půl procenta gravitačního zrychlení od Slunce.

Proč tohle funguje pouze mezi atomy a molekulami plynu a nikoli mezi většími prachovými zrny, planetesimálami nebo planetami? Atomy, molekuly nebo jejich ionty se totiž mohou při vzájemných přiblíženích od sebe odpuzovat elektromagnetickými silami, a tím se jaksi „nadlehčovat“ v gravitačním poli Slunce. Planety ale nejsou elektricky nabitě, ani nemají na povrchu nerovnoměrně rozložený náboj, takže na sebe elektromagneticky působit nemohou. Pravda, malá zrníčka (o charakteristickém rozměru  $R_S$ ) mohou být plynem (resp. gradientem jeho tlaku) trochu nadlehčována, ale protože tlaková síla je povrchová, tento efekt klesá jako  $1/R_S$ .

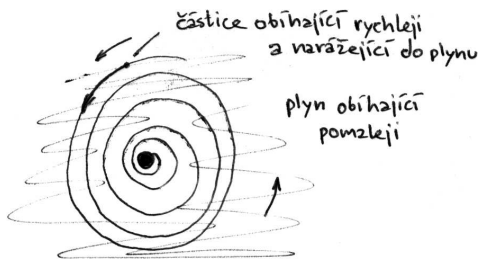


Obr. 4 — Silové působení gradientu tlaku v plynném oblaku a vnořené planetesimály obíhající rychleji než plyn.



Obr. 5 — Pohyb po kružnici a dostředivá síla.

Tření pevných částic o plyn, který obíhá pomaleji, vyvolává zrychlení pochopitelně působící proti směru pohybu částic, brzdí je, zmenšuje jejich kinetickou energii a následkem toho částice padají po spirále k Slunci (obr. 6).



Obr. 6 — Částice „spirálující“ k Slunci.

Do větších pevných částic, obíhajících rychleji než plyn, v průměru naráží „zpředu“ více molekul plynu než „zezadu“ a díky této výměně hybnosti vzniká třecí síla zpomalující pevné částice. Tato síla však nepůsobí proti směru gravitace, jako gradient tlaku, ale proti směru pohybu, kolmo ke gravitaci! Proto se pevné částice jednoduše nezpomalí na rychlost plynu, ale místo toho se pohybují po spirále a pokud jim v tom něco nezabrání, spadnou na Slunce.

Jak dlouho spirálování trvá? Podle (5) víme, že na plyn působí zrychlení  $a_{\text{gas}} = a_g - a_{\nabla p} = (1 - k)a_g$ , kde koeficient  $k \simeq 0,5\%$ ; rychlost obíhání je v takovém případě menší než keplerovská:  $v_{\text{gas}} = \sqrt{a_{\text{gas}} r} = \sqrt{1 - k} v_{\text{kepl}} \doteq (1 - \frac{1}{2}k) v_{\text{kepl}}$ . Rozdíl rychlostí mezi pevnými částicemi a plynem je tedy  $\Delta v = v_{\text{kepl}} - v_{\text{gas}} \doteq \frac{1}{2}k v_{\text{kepl}}$ , čímž vzniká třecí síla o velikosti:  $F_D = S \rho v_{\text{termální}} \Delta v$ . Podle vzoru Newtonova zákona  $F = \frac{dp}{dt}$  lze řádově odhadnout dobu spirálování jako  $\tau_D \simeq \frac{p}{F_D}$ , čili:

$$\tau_D \simeq \frac{M_S v_{\text{kepl}}}{S \rho \frac{v_T}{\sqrt{A}} (v_{\text{kepl}} - v_{\text{gas}})} = \frac{4}{3} R_S \rho_S \frac{2\sqrt{A}}{\rho v_T k}.$$

Pro metrové částice vychází  $\tau_D \simeq 10^3$  yr, tj. mnohem delší doba než pro pokles k rovině disku.

Uvědomme si ještě, že když plyn zpomaluje částice, pak zároveň částice urychlují plyn, a ten se od Slunce musí vzdalovat. Nemůže náhodou tento efekt plyn úplně „odfouknout“ od Slunce? To samozřejmě záleží na tom, jaký je poměr celkové hmotnosti plynu a pevných částic, jak je plyn hustý, jak je velký gradient tlaku apod. Soudě podle vzhledu současných planet, byl v našem disku plyn řádově hmotnější než pevné částice a k výraznému pohybu plynu pak nedošlo. Evidentně je to však jeden z procesů, kterým se v disku přenáší moment hybnosti.

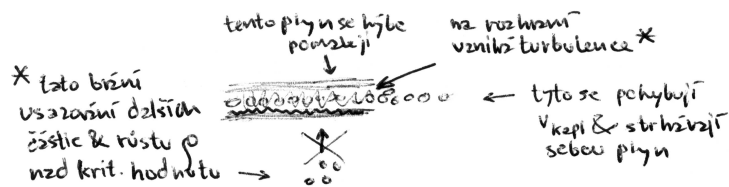
Rychlost pádu částic na Slunce se bude lišit podle velikosti částic. Bude existovat jistá „optimální“ velikost, pro kterou je pád nejrychlejší, což lze snadno nahlédnout: jedná o klasický případ povrchové síly (úměrné průřezu tělesa), takže pro větší tělesa klesá velikost zrychlení jako  $1/R_S$ . Naopak na menší tělesa již částečně působí rozdíl tlaků na stranu přivrácenou k Slunci a odvrácenou od Slunce — výsledkem je, že neobíhají kolem Slunce o tolik rychleji než plyn a tření pak není tak velké. Podrobnější výpočet ukazuje, že tření o plyn nejvýrazněji ovlivňovalo částice o poloměru  $R_S \simeq 5$  m.

Spirálování (radiální drift) přispívá k růstu částic, protože každá velikost spiráluje jinak rychle, takže se navzájem tělesa mohou přibližovat. Kdyby všechny částice v disku obíhaly „spořádaně“ po stabilních kruhových trajektoriích, neměly by tolik příležitostí k vzájemnému potkávání.

Problém spočívá v tom, že ony metrové balvany spirálují k Slunci příliš rychle! Pád trvá řádově  $10^3$  orbitálních period, to znamená tisíc let pro balvany v oblasti okolo 1 AU a asi sto tisíc let při počáteční vzdálenosti okolo 30 AU. Za tak krátkou dobu se většina balvanů nestačí srazit s jinými a vytvořit tak alespoň desetimetrová nebo stometrová tělesa, která by již na Slunce padala pomalu.

### 0.1.5 Turbulence

Druhou komplikací je následující turbulentní jev (obr. 7): ve středové rovině se soustředí tolik pevných částic, že sebou strhávají plyn. Avšak na vnějších stranách této husté vrstvy se nachází plyn obíhající pomaleji. Na rozhraní dochází k turbulenci, která může účinně bránit dalšímu usazování částic do středové roviny, růstu částic a případně překročení kritické hustoty pro gravitační kolaps.



Obr. 7 — Turbulentní jev brání dalšímu usazování částic ve středové rovině.

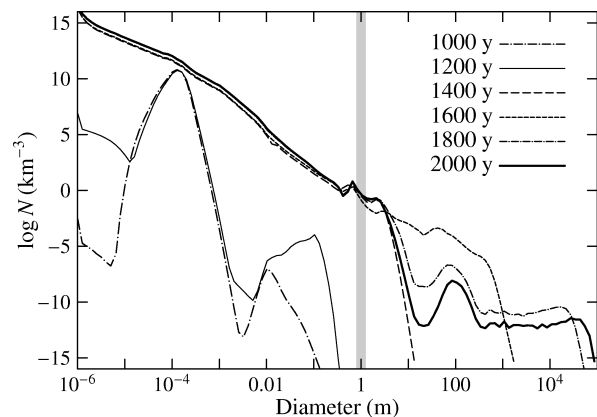
Turbulence však nemusí být vždy destruktivní jev, který brání zvětšování struktur. Zvláště „dvourozměrná“ turbulence (tj. odehrávající se v nějaké tenké vrstvě) může být stabilní a za jistých okolností může dokonce podpořit růst částic nebo jiných struktur. Příkladem takového jevu, který můžeme dnes pozorovat, je stálý vír v Jupiterově atmosféře — Velká rudá skvrna.

Podle některých modelů (Johansenn aj., 2007) by dokonce turbulence a strhávání prachu vírem plynu mohla způsobit takové zhuštění, že bylo *lokálně* splněno Jeansovo kritérium a došlo ke gravitačnímu kolapsu! Vzhledem k rozměru vírů mohla přímočaře vzniknout pevná tělesa o rozměru až 1 000 km (tj. velikost někde mezi planetesimálami a planetárními embryi, jak o nich budeme mluvit).

Podtrženo, shrnuto: současné komplexní modely vývoje prachových částic (Weidenschilling 2000) dávají výsledek znázorněný na obr. 8. Časová škála vzniku prvních kilometrových planetesimál je pouhých:

$$\tau_{1 \text{ km}} \simeq 1\,000 \text{ y.}$$

Stále však nejsou objasněné detaily tohoto procesu, problematický je například vývoj částic o rozměru řádu 1 m.



Obr. 8 — Rozdělení četnosti logaritmu koncentrace  $\frac{\log N}{\text{km}^3}$  částic ve středové rovině disku podle jejich velikosti  $D$ . Jsou znázorněny situace v čase  $t = 1\,000 \text{ y}$  a  $2\,000 \text{ y}$ . Číslicí v kroužku

je vyznačen proces, který rozdělení velikostí ovlivňuje nejvýrazněji: (1) usazování v rovině disku, (2) kolizní růst a (3) gravitační růst. Šrafovaná oblast značí problematickou velikost okolo 1 m. Podle Weidenschilling (2000).

# Literatura

- [1] ALVAREZ, L. W., ALVAREZ, W., ASARO, F., MICHEL, H. V.: *Extraterrestrial cause for the Cretaceous Tertiary extinction*. *Science*, **208**, s. 1095, 1980.
- [2] ARTEMIEVA, N., PIERAZZO, E., STÖEFFLER, D.: *Numerical modeling of tektite origin in oblique impacts: Implications to Ries-Moldavites strewn field*. *Bull. of the Czech Geological Survey*, **77**, 4, s. 303–311, 2002.
- [3] BEATTY, J. K., PETERSEN, C. C., CHAIKIN, A.: *The New Solar System*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [4] BERNARD, J. H., ROST, R. aj.: *Encyklopedický přehled minerálů*. Praha: Academia, 1992.
- [5] BERTOTTI, B., FARINELLA, P., VOKROUHLICKÝ, D.: *Physics of the Solar System*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN 1402014287.
- [6] BOČEK, M.: *Petrologické složení povrchu a kůry Měsíce*. *Povětroň*, **14**, S1, 3, 2006.
- [7] BOTTKE, W. F., CELLINO, A., PAOLICCHI, P., BINZEL, R. P. (editoři): *Asteroids III*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2002. ISBN 0816522812.
- [8] BOTTKE, W. F., RUBINCAM, D. P., BURNS, J. A.: *Dynamical evolution of main belt meteoroids: Numerical simulations incorporating planetary perturbations and Yarkovsky thermal forces*. *Icarus*, **145**, s. 301–331, 2000.
- [9] BOTTKE, W. F., VOKROUHLICKÝ, D., NESVORNÝ, D.: *An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor*. *Nature*, **449**, 7158, s. 48–53.
- [10] BOTTKE, W. F. aj.: *Debiased orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects*. *Icarus*, **156**, 2, s. 399–433, 2002.
- [11] BOWELL, T.: *AstOrb* [online]. [cit. 2008-09-30]. <ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>.
- [12] BROŽ, M.: *Impaktní kráter Steinheim*. *Povětroň* S1/2003, s. 3–10.
- [13] BROŽ, M.: *Impaktní krátery (2) — Ries*. *Povětroň* 5/2001, s. 6–13.
- [14] BROŽ, M.: *Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System*. Dizertační práce, Karlova univerzita, Praha, 2006.
- [15] BROŽ, M.: *Yarko-site* [online]. [cit. 2008-09-30]. <http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/yarko-site/>.
- [16] BROŽ, M. aj.: *Planetární stezka v Hradci Králové* [online]. [cit. 2008-12-10]. [http://www.astrohk.cz/planetarni\\_stezka/](http://www.astrohk.cz/planetarni_stezka/).
- [17] BROŽ, M., NOSEK, M., TREBICHAŤSKÝ, J., PECINOVÁ, D. Editoři : *Sluneční hodiny na pevných stanovištích. Čechy, Morava, Slezsko a Slovensko*. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1204-4.
- [18] BRUNS, H., *Acta Math.*, **11**, s. 25, 1887.
- [19] BURBINE, T. H. aj.: *Meteoritic parent bodies: their number and identification*. in *Asteroids III*, W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, a R. P. Binzel (eds), Tuscon: University of Arizona Press, 2002, s. 653–667.
- [20] BURNS, J. A., SAFRONOV, V. S.: *Asteroid nutation angles*. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, **165**, 403, 1973.
- [21] CALLIGAN, D. P., BAGGALEY, W. J.: *The radiant distribution of AMOR radar meteors*. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **359**, s. 551–560, 2005.
- [22] ČEPLCHA, Z.: *Geometric, dynamic, orbital and photometric data on meteoroids from photographic fireball networks*. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **38**, s. 222–234, 1987.
- [23] ČEPLCHA, Z. aj.: *Meteor phenomena and bolides*. *Space Science Reviews*, **84**, s. 327–471, 1998.
- [24] *Cryovolcanism and Geologic Analogies* [online]. [cit. 2009-04-30]. <http://mivo-sys.tripod.com/cryo.html>.
- [25] ČAPEK, D., VOKROUHLICKÝ, D.: *The YORP effect with finite thermal conductivity*. *Icarus*, **172**, s. 526–536, 2004.
- [26] FARINELLA, P., VOKROUHLICKÝ, D., HARTMANN, W. K.: *Meteorite delivery via Yarkovsky orbital drift*. *Icarus*, **132**, s. 378–387, 1998.
- [27] FERNÁNDEZ, J. A.: *Comets. Nature, dynamics, origin and their cosmogonical relevance*. Dordrecht: Springer, 2005.
- [28] FESTOU, M. C., KELLER, H. U., WEAVER, H. A. (ed.): *Comets II*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2004.
- [29] FRANKEL, C.: *Volcanoes of the Solar System*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1996. ISBN 0521477700.
- [30] GABZDYL, P.: *Prohlídka Měsíce* [online]. [cit. 2009-02-05]. <http://www.moon.astronomy.cz/>.
- [31] *Geologischer Wanderweg im Steinheimer Becken* [online]. [cit. 2003-1-1]. <http://www.pg.aa.bw.schule.de/aktiv/geoproj/sbecken/wanderfr.htm>
- [32] GRADY, M. M.: *Catalogue of meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 0521663032.
- [33] GROSCHOFF, P., REIFF, W.: *Der geologische Wanderweg im Steinheimer Becken*. Steinheim am Albuch, 1993.
- [34] HAGIHARA, Y.: *Celestial Mechanics I*. Cambridge: MIT Press, 1970.
- [35] HALODA, J.: *Meteority a jejich význam pro studium procesů vzniku a vývoje těles sluneční soustavy* [online]. [cit. 2009-01-29]. <http://astro.mff.cuni.cz/vyuka/AST021/index.html>.
- [36] HIRAYAMA, K.: *Groups of asteroids probably of common origin*. *Astron. J.*, **31**, 743, s. 185–188, 1918.
- [37] HOLMES, N.: *‘Shocking’ gas-gun experiments* [online]. [cit. 2008-11-13]. <https://www.llnl.gov/str/Holmes.html>.
- [38] HOLSAPPLE, K. aj.: *Asteroid spin data: no evidence of rubble-pile structures*. 36th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas, 2005.
- [39] HUTCHISON, R.: *Meteorites: A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0521035392.
- [40] CHESLEY, S. R., aj.: *Direct detection of the Yarkovsky effect by radar ranging to asteroid 6489 Golevka*. *Science*, **302**, s. 1739–1742, 2003.
- [41] CHLUPÁČ, I. aj.: *Geologická minulost České republiky*. Praha: Academia, 2002.
- [42] *International Earth Rotation and Reference Systems Service* [online]. [cit. 2008-11-13]. <http://www.iers.org/>.
- [43] IVEZIČ, Ž. aj.: *Solar System objects observed in the Sloan Digital Sky Survey commissioning data*. *Astron. J.*, **122**, 5, s. 2749–2784, 2001.
- [44] JENNISKENS, P.: *Meteor showers and their parent comets*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0521853491
- [45] JOHANSENN, A. aj.: *Rapid planetesimal formation in turbulent circumstellar disks*. *Nature*, **448**, 7157, s. 1022–1025, 2007.
- [46] JOHNSON, C.: *Precession of a gyroscope and precession of the Earth’s axis* [online]. [cit. 2008-09-10]. <http://www.mb-soft.com/public/precess.html>.
- [47] *JPL Horizons system* [online]. [cit. 2008-09-30]. <http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>.
- [48] *JPL planetary and lunar ephemerides, DE405* [online]. [cit. 2008-09-30]. <ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/>.

- [49] KAASALAINEN, M. aj.: *Acceleration of the rotation of asteroid 1862 Apollo by radiation torques*. *Nature*, **446**, 7134, s. 420–422, 2007.
- [50] KAVASCH, J.: *The Ries Meteorite Crater. A geological guide*. Donauwörth: Ludwig Auer GmbH, 1985.
- [51] KELLEY, M. S.: *Comet dust trails* [online]. [cit. 2009-01-31]. (<http://www.physics.ucf.edu/~msk/projects/trails/>).
- [52] KENKMAN, T. aj.: *Structure and formation of a central uplift: A case study at the Upheaval Dome impact crater, Utah*. in *Large Meteorite Impacts III*, s. 85, 2003. ISBN 0813723841. (<http://books.google.com/>).
- [53] KOZAI, Y.: *Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity*. *Astron. J.*, **67**, 9, 591, 1962.
- [54] KRING, D. A., BAILEY, J.: *Terrestrial impact craters* [online]. [cit. 2008-11-13]. ([http://www.lpi.usra.edu/science/kring/epo\\_web/impact\\_cratering/World\\_Craters\\_web/intromap.html](http://www.lpi.usra.edu/science/kring/epo_web/impact_cratering/World_Craters_web/intromap.html)).
- [55] KRONK, G.: *Cometography* [online]. [cit. 2009-01-20]. (<http://cometography.com/>).
- [56] LEVISON, H., DUNCAN, M.: *Swift* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<http://www.boulder.swri.edu/~hal/swift.html>).
- [57] MANNINGS, V. aj. (Ed.): *Protostars and planets IV*. Tuscon: The University of Arizona Press, 2000. ISBN 0816520593.
- [58] MARCAN, S.: *Phase diagram explanation* [online]. [cit. 2009-01-20]. (<http://bhs.smuhsd.org/science-dept/marcan/>).
- [59] MCFADDEN, L.-A., WEISSMAN, P. R., JOHNSON, T. V. (Ed.): *Encyclopedia of the Solar System*. San Diego: Academic Press, 2007. ISBN 012088589.
- [60] MCSWEEN, H. Y.: *Meteorites and their parent planets*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [61] *MIAC. Antarctic meteorites* [online]. [cit. 2009-01-28]. (<http://miac.uqac.ca/MIAC/antarc.htm>).
- [62] MILANI, A., KNEŽEVIĆ, Z.: *Asteroid proper elements and the dynamical structure of the asteroid main belt*. *Icarus*, **107**, 2, s. 219–254, 1994.
- [63] *Minor planet & comet ephemeris service* [online]. [cit. 2008-09-30]. (<http://www.cfa.harvard.edu/iau/MPEph/MPEph.html>).
- [64] MORBIDELLI, A., CRIDA, A., MASSET, F., NELSON, R. P.: *Building giant-planet cores at a planet trap*. *Astron. Astrophys.*, **478**, s. 929–937, 2008.
- [65] MORBIDELLI, A., LEVISON, H.: *Scenarios for the origin of the orbits of the trans-neptunian objects 2000 CR<sub>105</sub> and 2003 VB<sub>12</sub> (Sedna)*. *Astron. J.*, **128**, 2564, 2004.
- [66] MORBIDELLI, A. aj.: *Source regions and timescales for the delivery of water to Earth*. *Meteoritics & Planetary Science*, **35**, 6, s. 1309–1320, 2000.
- [67] MURRAY, C. D., DERMOTT, S. F.: *Solar System Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [68] *National Space Science Data Center* [online]. [cit. 2009-02-17]. (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/>).
- [69] NESVORNÝ, D., MORBIDELLI, A.: *Three-body mean motion resonances and the chaotic structure of the asteroid belt*. *Astron. J.*, **116**, 3029, 1998.
- [70] NESVORNÝ, D., VOKROUHLICKÝ, D.: *Analytic theory of the YORP effect for near-spherical objects*. *Astron. J.*, **134**, 5, s. 1750–1768, 2007.
- [71] NESVORNÝ, D. aj.: *Evidence for asteroid space weathering from the Sloan Digital Sky Survey*. *Icarus*, **173**, 1, s. 132–152, 2005.
- [72] NORTON, O. R.: *The Cambridge Encyclopedia of Meteorites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. ISBN 0521621437.
- [73] ÖPIK, E. J.: *Collision probability with the planets and the distribution of planetary matter*. *Proc. R. Irish Acad.*, **54**, s. 165–199, 1951.
- [74] OSTRO, S.J. aj.: *Radar imaging of binary near-Earth asteroid (66391) 1999 KW<sub>4</sub>*. *Science*, **314**, 5803, s. 1276–1280, 2006.
- [75] DE PATER, I., LISSAUER, J. J.: *Planetary Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. ISBN 0521482194.
- [76] PECINA, P., CEPLECHA, Z.: *New aspects of in single-body meteor physics..* *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **34**, 102, 1983.
- [77] PECINA, P., NOVÁKOVÁ, D.: *Meteorický radar v Ondřejově. Povětroň*, **10**, 6, s. 4, 2002.
- [78] PETERSON, C.: *A source mechanism for meteorites controlled by the Yarkovsky effect*. *Icarus*, **29**, s. 91–111, 1976.
- [79] POKORNÝ, Z.: *Astronomické algoritmy pro kalkulátory*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 1988.
- [80] PÖSGES, G., SCHIEBER, M.: *The Ries Crater – Museum Nördlingen*. München: Dr. Friedrich Pfeil, 1997.
- [81] PRAVEC, P. aj.: *Two-period lightcurves of 1996 FG<sub>3</sub>, 1998 PG, and (5407) 1992 AX: One probable and two possible binary asteroids*. *Icarus*, **146**, 1, s. 190–203, 2000.
- [82] PRAVEC, P. aj.: *Ondřejov Asteroid Photometry Project* [online]. [cit. 2008-09-09]. (<http://www.asu.cas.cz/~ppravec/>).
- [83] PŘÍHODA, P. aj.: *Hvězdářská ročenka 2008*. Praha: Hvězdárna a planetárium hl. m. Prahy, 2007. ISBN 978-80-86017-47-1
- [84] QUINN, T. R., TREMAINE, S., DUNCAN, M.: *A three million year integration of the earth's orbit*. *Astron. J.*, **101**, s. 2287–2305, 1991.
- [85] *Rieskrater–Museum Nördlingen* [online]. [cit. 2001-1-1]. (<http://www.iaag.geo.uni-muenchen.de/sammlung/Rieskrater/RieskraterMuseum.html>)
- [86] RUBIN, A. E.: *Mineralogy of meteorite groups*. *Meteoritics and Planetary Science*, **32**, 231, 1997.
- [87] RUBINCAM, D. P.: *Polar wander on Triton and Pluto due to volatile migration*. *Icarus*, **163**, 2, s. 63–71, 2002.
- [88] RUSSEL, C. T. aj.: *Dawn mission and operations*. Asteroids, Comets, Meteors 2005, editoři Lazzaro, D., Ferraz-Mello, S., Fernandez, J. A., Cambridge: Cambridge University Press, 2006, s. 97–119.
- [89] SEIDELMAN, P. K. (editor): *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. U. S. Naval Observatory, Washington, 1992.
- [90] SEPKOSKI, J. J.: *Ten years in the library: New data confirm paleontological patterns*. *Paleobiology*, **19**, s. 43–51, 1993.
- [91] SKÁLA, R.: *Impact process: An important geological phenomenon*. *Acta Mus. Nat-Pragae*, Ser. B., Hist. Nat., **52**, s. 111–156, 1996.
- [92] SPURNÝ, P.: *Fotografické sledování bolidů ve střední Evropě*. *Corona Pragensis*, 2, 2001, (<http://praha.astro.cz/crp/0101a.phtml>).
- [93] *Stardust, JPL, NASA* [online]. [cit. 2006-06-01]. (<http://stardust.jpl.nasa.gov>).
- [94] STAUDACHER, T. aj.: *<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages of rocks and glasses from the Noerdlinger Ries crater and the temperature history of impact breccias*. *J. of Geophysics*, **51**, 1, 1982, s. 1–11.
- [95] STUART, J. S.: *A Near-Earth asteroid population estimate from the LINEAR Survey*. *Science*, **294**, 5547, s. 1691–1693, 2001.
- [96] SUNDMAN, K. E.: *Memoire sur le probleme de trois corps*. *Acta Math.*, **36**, s. 105–179, 1912.

- [97] ŠIDLICHOVSKÝ, M., NESVORNÝ, D.: *Frequency modified Fourier transform and its applications to asteroids. Cel. Mech. Dyn. Astron.*, **65**, 1–2, s. 137–148, 1996.
- [98] TILLOTSON, J. H.: *Metallic equations of state for hypervelocity impact*. General Atomic Report GA-3216, 1962.
- [99] *The Ries/Steinheim impact crater field trip* [online]. [cit. 2001-1-1]. (<http://www.-earthsciences.ucl.ac.uk/research/planetaryweb/field/knodle.htm>)
- [100] 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.
- [101] TUČEK, K.: *Meteority a jejich výskyty v Československu*. Praha: Academia, 1981.
- [102] VOKROUHLICKÝ, D.: *A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments. Astron. Astrophys.*, **344**, s. 362–366, 1999.
- [103] VOKROUHLICKÝ, D., FARINELLA, P.: *Efficient delivery of meteorites to the Earth from a wide range of asteroid parent bodies. Nature*, **407**, 6804, 606, 2000.
- [104] VOKROUHLICKÝ, D., NESVORNÝ, D.: *Pairs of asteroids probably of a common origin. Astron. J.*, **136**, 1, s. 280–290, 2008.
- [105] VOKROUHLICKÝ, D., aj.: *Yarkovsky/YORP chronology of asteroid families. Icarus*, **182**, 1, s. 118–142, 2006.
- [106] WEIDENSCHILLING, S. J.: *Formation of Planetesimals and Accretion of the Terrestrial Planets. Space Science Reviews*, **92**, 1/2, s. 295–310, 2000.
- [107] *Wikipedia* [online]. [cit. 2008-04-10]. (<http://www.wikipedia.org/>).
- [108] WHIPPLE, F.: *A comet model. I. The acceleration of Comet Encke. Astrophys. J.*, **111**, s. 375–394, 1950.
- [109] WOLF, M. aj.: *Astronomická příručka*. Praha: Academia, 1992. ISBN 802000467X.
- [110] ZEĽDOVITCH, Ya. B. aj.: *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena*. 1966. ISBN 0486420027. (<http://books.google.com>).