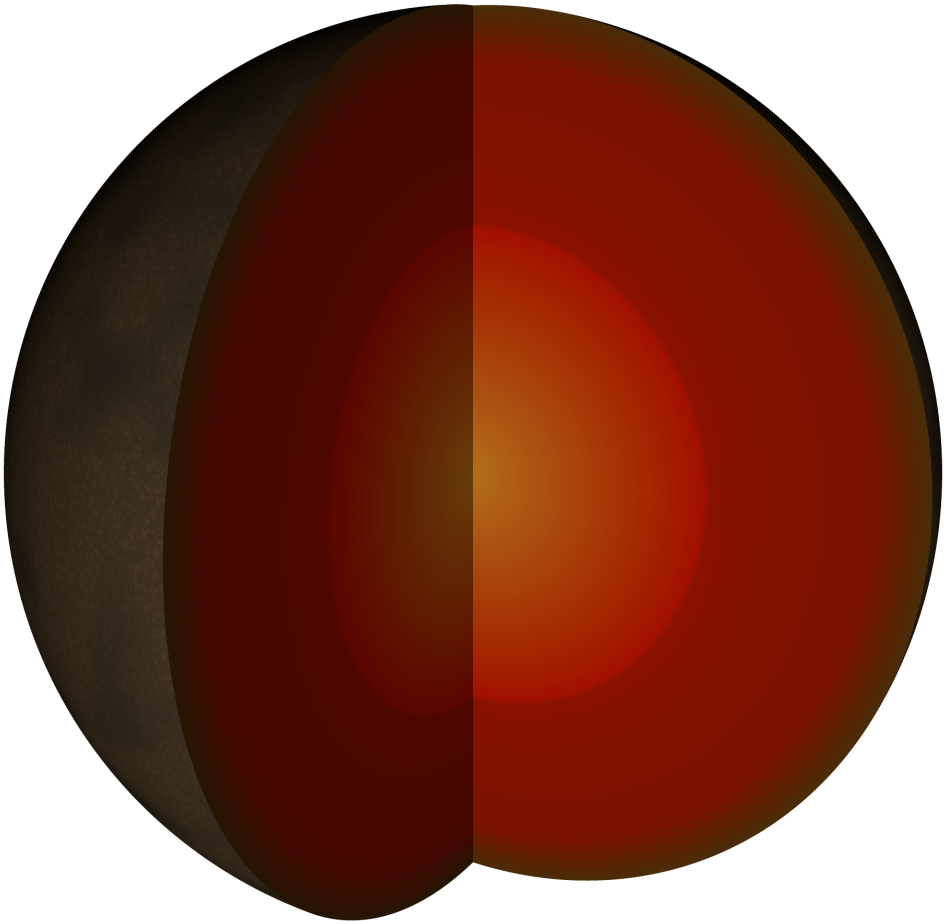
POVĚTROŇ

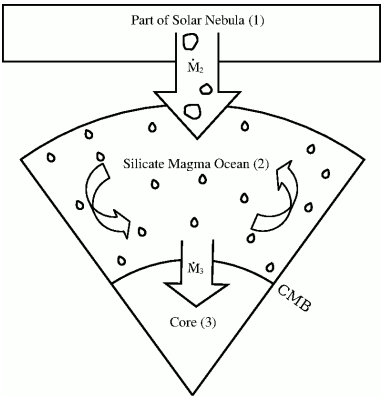
Královéhradecký astronomický časopis * ročník **27** * číslo **2/2019**



Obsah

strana

Miroslav Brož: *Geochemie a radiometrie* 3
Rostislav Brož: *Zatmění Měsíce 27. 7. 2018* 17
Jaromír Ciesla: *Sluneční hodiny 4. kvartálu roku 2018* 18



Obr. 1 — Tři uvažované rezervoáry: 1 .. mlhovina, 2 .. prvotní plášť, 3 .. jádro. Převzato z [13].
K článku na str. 3.

Titulní strana — Náčrt diferenciace Země, při níž dochází k oddělení jádra, pláště a kůry.
K článku na str. 3.

Povětroň 2/2019; Hradec Králové, 2019.
Vydala: **Astronomická společnost v Hradci Králové** (2. 11. 2019 na 344. setkání ASHK)
ve spolupráci s **Hvězdárnou a planetáriem v Hradci Králové**
vydání 1., 20 stran, náklad 100 ks; dvouměsíčník, 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 poštovného)
Adresa: ASHK, Národních mučedníků 256, Hradec Králové 8, 500 08; IČO: 64810828
e–mail: ⟨ashk@ashk.cz⟩, web: ⟨http://www.ashk.cz⟩

Bohužel se ukazuje, že hydrodynamické modely skýtají příliš mnoho volnosti. Různé počáteční podmínky mohou vést k týmž konečným podmínkám, které vyhovují pozorování (orbitám planet, planetek, komet apod.). Jak pak rozhodnout, co je pravda? Jedním ze způsobů je použít vícero pozorování, nejlépe z jiných oborů fyziky, anebo ještě lépe z *chemie*. Jedná se zejména o měření chemického složení planet, planetek, komet apod., izotopového složení, a to včetně radiometrického datování. Vzhledem k tomu, že dnešní měření běžně dosahují přesnosti 1 ppm (parts per million; částic na milion částic), jedná se o data, kterým je třeba rozumět.

Vezměme si konkrétní příklad: systém **hafnium/wolfram**. Oba tyto chemické prvky mají společné to, že patří mezi silně refraktorní, to jest takové, které kondenzují z plynu o složení sluneční mlhoviny za extrémně vysokých teplot (mezi prvními). Protože se vypařují jen za těchto teplot, jejich zastoupení v Zemi jako celku se blíží zastoupení v nejprimitivnějších (uhlíkatých) chondritech nebo sluneční fotosféře.

Zásadní rozdíl mezi těmito chemickými prvky ovšem je, že wolfram je značně **siderofilní** (vázající se se železem, v němž je snadno rozpustný, takže při gravitační diferenciaci Země klesá spolu s ním do zemského jádra), kdežto hafnium je výhradně **litofilní** (tzn. vázající se na silikáty; zůstává v plášti nebo stoupá do kůry). Zároveň existují nestabilní izotopy (^{182}Hf), s vhodným poločasem rozpadu (10^0 až 10^1 Myr), přeměňující se na stabilní dceřinné izotopy (^{182}W). To ovšem znamená, že lze pomocí nich studovat utváření samotné Země!

Mějme proto následující rezervoáry, číslo: 1 .. mlhovina, 2 .. prvotní plášť[1], 3 .. jádro. Pod slovem „mlhovina“ si ovšem nepředstavujme plyn, nýbrž pevné částice, které z plynu deponují (nespr. kondenzují). Dnes bychom tento materiál našli v chondritických meteoritech, ale vzledem ke zmiňované radioaktivitě není jeho chemické složení konstantní. Odtud název **chondritický uniformní rezervoár** (CHUR); někdy se počáteční složení značí „sluneční“, někdy se užívá CAI (vápenato-hlinité inkluze), protože vycházíme z *prvotních* pevných částic, které jsou dodnes zachovány v chondritických meteoritech.

Označme si veličiny: N počet atomů, M hmotnost, $C \equiv N/M$ koncentrace, $\gamma \equiv M_3/M$ hmotnostní poměr jádra (pro Zemi 0,325), $D \equiv C_3/C_2$ rozdělovací koeficient[2]. Velmi důležitou roli přitom hrají fyzikálně–chemické podmínky právě na rozhraní jádro/plášť (angl. core/mantle boundary; CMB).[3]

1. tzn. dnešní plášť a kůra
2. je-li $D(t)$ a $\dot{M} > 0$, neplatí to neustále, ale jen pro přírůstek $\dot{M}$
3. též Guttenbergova plocha diskontinuity

Geochemické rovnice *

Studujme nejprve transport stabilních izotopů mezi zmiňovanými rezervoáry. Jedná se o jednoduchý zákon zachování atomů wolframu (viz Jacobsen 2009; obr. 1):

$$\dot{N}_1 + \dot{N}_2 + \dot{N}_3 = 0\,. \tag{1}$$

První časovou derivaci vyjádříme jako:

$$\dot{N}_1 = -C_1\dot{M}\,, \tag{2}$$

kde $\dot{M}$ označuje přírůstek hmoty, která akretovala z „mlhoviny“ na Zemi. Uvozovky jsou zde proto, že se nejedná nutně o plyn, nýbrž o pevnou složku mlhoviny (v podobě prachových zrn, balvanů, planetesimál apod.). Z (1) plyne:

$$\dot{N}_2 = -\dot{N}_1 - \dot{N}_3 = C_1\dot{M} - DC_2\dot{M}_3 = (C_1 - \gamma DC_2)\dot{M}\,, \tag{3}$$

kde jsme úbytek hmoty z pláště do jádra popsali pomocí rozdělovacího koeficientu. Odpovídalo by tomu také:

$$\dot{N}_3 = \gamma DC_2\dot{M}\,. \tag{4}$$

Nás však zajímají měřitelné veličiny, tj. především koncentrace wolframu v zemském plášti, respektive horninách z pláště vyvřelých:

$$C_2 = \frac{N_2}{M_2}\,,$$

jejíž derivace:

$$\dot{C}_2 = \dot{N}_2\frac{1}{M_2} - N_2\frac{1}{M_2^2}\dot{M}_2 = \frac{C_1 - (\gamma D + 1 - \gamma)C_2}{(1-\gamma)M}\dot{M}\,. \tag{5}$$

Dále *frakcionace* hafnia a wolframu, způsobená přerozdělením prvků mezi plášť a jádro, definovaná jako:

$$f_2 \equiv \frac{\cancel{N_{\mathrm{Hf},2}}/N_{\mathrm{W},2}}{\cancel{N_{\mathrm{Hf},1}}/N_{\mathrm{W},1}} - 1 = \frac{N_{\mathrm{W},1}}{N_{\mathrm{W},2}} - 1 = \frac{N_{\mathrm{W},1} - N_{\mathrm{W},2}}{N_{\mathrm{W},2}} = \frac{N_{\mathrm{W},3}}{N_{\mathrm{W},2}}\left(= \frac{N_3}{N_2}\right)\,,$$

neboť Hf je litofilní ($N_{\mathrm{Hf},3} \doteq 0$). Poměřovat ji lze třeba stabilními izotopy ^{180}Hf, ^{183}W, kterých je v obou rezervoárech dost, ale musíme mít na paměti poměry izotopů v rámci všech Hf, resp. všech W. Příslušná derivace:

$$\dot{f}_2 = \frac{\dot{N}_3}{N_2} - N_3\frac{1}{N_2^2}\dot{N}_2$$

a dle (3), (4):

$$\dot{f}_2 = \gamma D \cancel{C_2} \dot{M} \frac{1}{\cancel{C_2} M_2} - \frac{N_3}{N_2} \frac{1}{C_2 M_2} (C_1 - \gamma D C_2) \dot{M} = \frac{\gamma D - f_2 \left(\frac{C_1}{C_2} - \gamma D \right)}{(1-\gamma) M} \dot{M} \,. \quad (6)$$

Konečně *anomálie*, též „epsilon“, které je mírou zvýšeného výskytu *radiogenního* izotopu ^{182}W oproti mlhovině, důsledně normované ^{183}W, aby bylo měření relativní:[4]

$$\varepsilon_2 \equiv 10^4 \left(\frac{N_{182\mathrm{W},2}/N_{183\mathrm{W},2}}{N_{182\mathrm{W},1}/N_{183\mathrm{W},1}} - 1 \right) .$$

Hodnota se mění radioaktivními rozpady:

$$^{182}\mathrm{Hf} \to {}^{182}\mathrm{Ta} + \mathrm{e}^+ + \nu \,,$$
$$^{182}\mathrm{Ta} \to {}^{182}\mathrm{W} + \mathrm{e}^+ + \nu \,,$$

s poločasy $T_{1/2} = 9\,\mathrm{Myr}$ a $144\,\mathrm{d}$, přičemž záleží na dlouhém. Změny popisujeme rozpadovými zákony:

$$\dot{N}_{182\mathrm{Hf}} = -\lambda N_{182\mathrm{Hf}} \,,$$
$$\dot{N}_{182\mathrm{W}} = +\lambda N_{182\mathrm{Hf}} \,,$$

jejichž řešením je:

$$N_{182\mathrm{Hf}} = N_{182\mathrm{Hf}}(0)\, \mathrm{e}^{-\lambda t} \,,$$
$$N_{182\mathrm{W}} = N_{182\mathrm{W}}(0) + N_{182\mathrm{Hf}}(0)(1 - \mathrm{e}^{-\lambda t}) \doteq N_{182\mathrm{W}}(0) \,,$$

neboť rozdíl činí jen několik ppm. Pak lze odvodit (Jacobsen 2005):

$$\dot{\varepsilon}_2 = Q^\star f_2 - \frac{C_1}{C_2 (1-\gamma) M} \dot{M} \varepsilon_2 \,, \quad (7)$$

kde jsme si označili:

$$Q^\star = 10^4 \lambda\, \mathrm{e}^{-\lambda t} \frac{C_{182\mathrm{Hf},1}(0)}{C_{180\mathrm{Hf},1}(0)} \frac{C_{180\mathrm{Hf},1}(0)}{C_{182\mathrm{W},1}(t)}$$

a kde $C_{182\mathrm{W},1}(t) \doteq C_{182\mathrm{W},1}(0)$.

4. pokud se užije písmeno μ, je číselný faktor 10^6

Odvození je následující:

$$\begin{aligned}
\dot{N}_{182\mathrm{W},2} &= +\lambda N_{182\mathrm{Hf},2} + (C_1 - \gamma D C_2)\dot{M}\,,\\
\dot{N}_{182\mathrm{W},1} &= +\lambda N_{182\mathrm{Hf},1} - C_1\dot{M}\,,\\
\dot{N}_{183\mathrm{W},1} &= -C_1\dot{M}\,,\\
\dot{N}_{183\mathrm{W},2} &= (C_1 - \gamma D C_2)\dot{M}\,,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_2 &= 10^4 \overbrace{\frac{N_{182\mathrm{W},2}}{N_{182\mathrm{W},1}}\frac{N_{183\mathrm{W},1}}{N_{183\mathrm{W},2}}}^{\doteq 1}\left(\frac{\dot{N}_{182\mathrm{W},2}}{N_{182\mathrm{W},2}} - \frac{\dot{N}_{182\mathrm{W},1}}{N_{182\mathrm{W},1}} + \frac{\dot{N}_{183\mathrm{W},1}}{N_{183\mathrm{W},1}} - \frac{\dot{N}_{183\mathrm{W},2}}{N_{183\mathrm{W},2}}\right) =\\
&= \ldots\left(\lambda\frac{N_{182\mathrm{Hf},2}}{N_{182\mathrm{W},2}} + \frac{C_{182\mathrm{W},1}\dot{M}}{N_{182\mathrm{W},2}} - \frac{\cancel{\gamma D C_{182\mathrm{W},2}\dot{M}}}{\cancel{N_{182\mathrm{W},2}}} - \lambda\frac{N_{182\mathrm{W},1}}{N_{182\mathrm{W},1}} + \frac{\cancel{C_{182\mathrm{W},1}\dot{M}}}{\cancel{N_{182\mathrm{W},1}}} -\right.\\
&\quad\left. - \frac{\cancel{C_{183\mathrm{W},1}\dot{M}}}{\cancel{N_{183\mathrm{W},1}}} - \frac{C_{183\mathrm{W},1}\dot{M}}{N_{183\mathrm{W},2}} + \frac{\cancel{\gamma D C_{183\mathrm{W},2}\dot{M}}}{\cancel{N_{183\mathrm{W},2}}}\right) =\\
&= \ldots\lambda\left(\frac{N_{182\mathrm{Hf},2}}{N_{182\mathrm{W},2}} - \frac{N_{182\mathrm{W},1}}{N_{182\mathrm{W},1}}\right) + \ldots\dot{M}\left(\frac{C_{182\mathrm{W},1}}{N_{182\mathrm{W},2}} - \frac{C_{183\mathrm{W},1}}{N_{183\mathrm{W},2}}\right) =\\
&= 10^4\lambda\frac{C_{182\mathrm{Hf},1}(0)\,\mathrm{e}^{-\lambda t}}{C_{182\mathrm{W},1}(t)}\frac{C_{180\mathrm{Hf},1}}{C_{180\mathrm{Hf},1}}\left(\frac{N_{182\mathrm{Hf},2}}{N_{182\mathrm{W},2}}\frac{N_{182\mathrm{W},1}}{N_{182\mathrm{Hf},1}} - 1\right) +\\
&\quad + 10^4\frac{C_{183\mathrm{W},1}}{C_{183\mathrm{W},2}}\frac{1}{(1-\gamma)M}\dot{M}\left(\frac{C_{182\mathrm{W},1}}{C_{182\mathrm{W},2}}\frac{C_{183\mathrm{W},2}}{C_{183\mathrm{W},1}} - 1\right) =\\
&= Q^\star f_2 + \frac{C_1}{C_2(1-\gamma)M}\dot{M}\varepsilon_2 \qquad \text{c. b. d.}
\end{aligned}$$

Počáteční podmínky ($t = 0$) vycházejí z rovnováhy ($\dot{C}_2 = 0$, $\dot{f}_2 = 0$), respektive ze skutečnosti, že na začátku materiál odpovídá mlhovině:

$$C_2 = \frac{C_1}{\gamma D + 1 - \gamma}\,,$$

$$f_2 = \frac{\gamma D}{1-\gamma}\,,$$

$$\varepsilon_2 = 0\,.$$

Je třeba si dát pozor, k čemu se ε_2 přesně vztahuje! Obvykle tj. CHUR závisející na t, ale může to být též: CHUR dnes, BSE (angl. bulk silicate Earth; silikátová část Země = prvotní plášť = dnešní plášť a kůra), BSM (totéž pro Měsíc) atd., což se značí za ε v závorce.

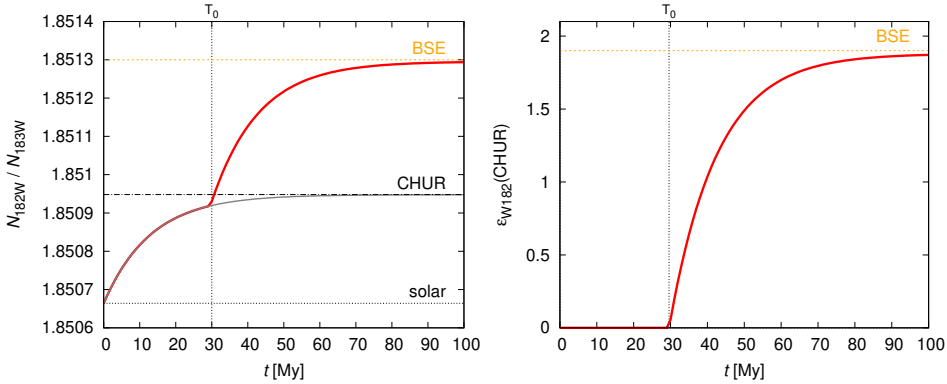
Diferenciace Země *

Nejjednodušším geochemickým modelem je popis diferenciace Země jako 1 náhlé události odehrající se v čase T_0, kdy dojde k přerozdělení Hf a W mezi plášť a jádro (dle D nebo ekvivalentně f_2):

$$\left(\frac{N_{182\mathrm{Hf},2}}{N_{183\mathrm{W},2}}\right)' = (1+f_2)\frac{N_{182\mathrm{Hf},2}}{N_{183\mathrm{W},2}}\,.$$

Jinak probíhají pouze rozpady.

Vyneseme-li do grafu přímo poměr počtů atomů $N_{182\mathrm{Hf},2}/N_{183\mathrm{W},2}$ a zároveň poměr $N_{182\mathrm{Hf},1}/N_{183\mathrm{W},1}$, obdržíme obr. 2a. Vidíme, že zpočátku plášť kopíruje mlhovinu. Po $T_0 \doteq 30\,\mathrm{Myr}$ plášť roste strmě, protože byl značně obohacen o ^{182}Hf. Vyneseme-li poměr poměrů, neboli ε_2, obdržíme obr. 2b. Nevidíme mlhovinu (tj. osa x), pouze plášť. V každém případě model směřuje k měřeným hodnotám (CHUR; BSE). Pokud by T_0 bylo menší, „vystřelilo“ by ε_2 výš, protože by existovalo ještě mnoho ^{182}Hf (a naopak). Obdobně pro frakcionaci f_2 platí, čím větší, tím výš.



Obr. 2 — Poměry $N_{182\mathrm{W}}/N_{183\mathrm{W}}$ pro mlhovinu (rezervoár 1) a plášť (2), v závislosti na čase t (vlevo). Dnes měřené hodnoty jsou vyznačeny jako sluneční (tzn. vápenato-hlinité inkluze), CHUR (chondritický uniformní rezervoár) a BSE (silikátová část Země). Obohacení pláště oproti mlhovině $\varepsilon_{182\mathrm{W},2}(\mathrm{CHUR}) = 10^4\left[(N_{182\mathrm{Hf},1}/N_{183\mathrm{W},1})/(N_{182\mathrm{Hf},2}/N_{183\mathrm{W},2}) - 1\right]$ (vpravo).

Předměsíční impakt *

Předtím, než něco dopadne, definujme:

$$a \equiv \frac{1}{1-\gamma}\frac{C_1}{C_2} = \frac{\gamma D + 1 - \gamma}{1-\gamma} = \frac{\gamma D}{1-\gamma} + 1 = f_2 + 1\,.$$

Při dopadu se mění veličiny „okamžitě“, neboť děj probíhá na škále 10^2 yr, pokud zohledníme i viskózní vývoj protolunárního disku (Canup aj. 2019). Rovnice (5), (6), (7) pak lze integrovat a vyjádřit změněné (čárkované) veličiny.

Za prvé vezměme ε_2, ovšem bez radioaktivity:

$$\dot{\varepsilon}_2 \doteq -a\frac{\dot{M}}{M}\varepsilon_2\,,$$

čili:

$$\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\varepsilon_2} = -a\frac{\dot{M}}{M}\,.$$

Neurčitý integrál je:

$$\ln\varepsilon_2 = -a\ln M + C\,,$$

odkud:

$$\varepsilon_2 = C'M^{-a}\,.$$

Integrační konstanta před impaktem musí být $C' = \varepsilon_2 M^a$, aby vyšlo ε_2, čili po impaktu:

$$\varepsilon_2' = \varepsilon_2\left(\frac{M}{M'}\right)^a\,. \tag{8}$$

Obdobně vezměme koncentraci:

$$\dot{C}_2 = \left(\frac{C_1}{1-\gamma} - aC_2\right)\frac{\dot{M}}{M} \tag{9}$$

a najděme partikulární řešení pro druhý člen:

$$\dot{C}_2 = -aC_2\frac{\dot{M}}{M}\,,$$

což je totéž jako pro ε:

$$C_2 = C'M^{-a}\,.$$

Užijme variaci konstant:

$$C_2 = C'(M)M^{-a}$$

a derivujme dle parametru (zde hmotnosti M):

$$\frac{\mathrm{d}C_2}{\mathrm{d}M} = \frac{\mathrm{d}C'}{\mathrm{d}M}M^{-a} + C'(-a)M^{-a-1} = \left(\frac{C_1}{1-\gamma} - aC'M^{-1}\right)M^{-1}\,,$$

kam jsme dosadili (9). Pak lze vyjádřit:

$$\frac{\mathrm{d}C'}{\mathrm{d}M} = \frac{C_1}{1-\gamma}M^{a-1}$$

a neurčitě integrovat:

$$C'(M) = \frac{C_1}{1-\gamma}\frac{M^a}{a} + C''\,,$$

kde C'' je druhá integrační konstanta. Obecné řešení je:

$$C_2 = \left(\frac{C_1}{1-\gamma} \frac{M^a}{a} + C'' \right) M^{-a} .$$

Zbývá vyčíslit C''. Má-li pro M vyjít právě C_2, pak:

$$C'' = C_2 M^a - \frac{C_1}{1-\gamma} \frac{M^a}{a} ,$$

což po dosazení:

$$C_2' = \left(\frac{C_1}{1-\gamma} \frac{M'^a}{a} + C_2 M^a - \frac{C_1}{1-\gamma} \frac{M^a}{a} \right) M'^{-a}$$

a úpravě dá:

$$C_2' = \frac{C_1}{1-\gamma} \frac{1}{a} \left[1 - \left(\frac{M}{M'} \right)^a \right] + C_2 \left(\frac{M}{M'} \right)^a . \tag{10}$$

Obdobně obdobně:

$$\dot{f}_2 = \frac{\gamma D - f_2 \left(\frac{C_1}{C_2} - \gamma D \right)}{(1-\gamma) M} \dot{M} ,$$

partikulárně:

$$\frac{\dot{f}_2}{f_2} = -b \frac{\dot{M}}{M} ,$$

kde $b \equiv (\frac{C_1}{C_2} - \gamma D)/(1-\gamma)$, čili:

$$f_2 = C' M^{-b} ;$$

variabilně:

$$f_2 = C'(M) M^{-b}$$

a:

$$\frac{\mathrm{d}f_2}{\mathrm{d}M} = \frac{\mathrm{d}C'}{\mathrm{d}M} M^{-b} - \cancel{C' b M^{-b-1}} = \cancel{-f_2 b M^{-1}} + \frac{\gamma D}{1-\gamma} M^{-1} ,$$

odkud:

$$\frac{\mathrm{d}C'}{\mathrm{d}M} = \frac{\gamma D}{1-\gamma} M^{b-1} ,$$

čili:

$$C' = \frac{\gamma D}{1-\gamma} \frac{M^b}{b}$$

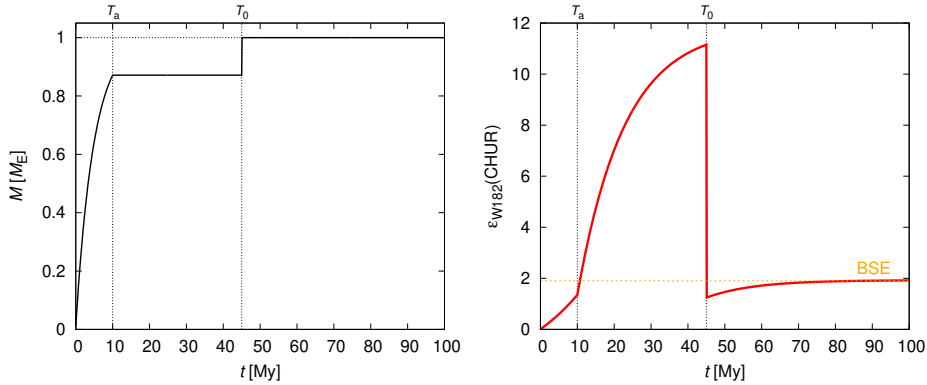
a:

$$f_2 = \frac{\gamma D}{1-\gamma} \frac{M^b}{b} M^{-b} = \frac{\gamma D}{\cancel{1-\gamma}} \frac{\cancel{1-\gamma}}{\frac{C_1}{C_2} - \gamma D} = \frac{\gamma D}{\frac{C_1}{C_2} - \gamma D} ,$$

což nezávisí na M, čili $f_2' = f_2$.

Když máme připravené rovnice, můžeme studovat impakt, při němž vznikl Měsíc (Hartmann a Davis 1975). Ve své klasické podobě má Země před impaktem hmotnost $M_1 \doteq 0{,}9\, M_\oplus$, impaktor pak $M_2 \doteq 0{,}1\, M_\oplus$, aby vycházelo

$M = M_1 + M_2 = 1\,M_\oplus$ a zároveň na orbitě (v protolunárním disku) zůstalo $m = 0{,}0125\,M_\oplus$, což odpovídá hmotnosti Měsíce. Na obr. 3 vidíme příslušný geochemický model (Yu a Jacobsen 2011). Akrece $M(t)$ zde zpočátku probíhá rychle a končí brzy ($T_\mathrm{a} = 10\,\mathrm{Myr}$). Protože diferenciace probíhá průběžně, s konstantním $D = 31$ tak, aby vyšlo $f_2 = 15$ jako v BSE, hodnota ε_2 se zvýší na 12, tj. vysoko nad pozorovanou. Pozdější impakt v čase $T_0 = 45\,\mathrm{Myr}$ ji však opět sníží, až k pozorované hodnotě $\varepsilon_{^{182}\mathrm{W},2}(\mathrm{CHUR}) = 1{,}9 \pm 0{,}1$. Samozřejmě se *nejedná* o unikátní řešení, neboť lze měnit T_a, T_0; existují však jisté meze. Například $T_\mathrm{a} < 40\,\mathrm{Myr}$ (samo o sobě), jinak by $\varepsilon < 1{,}8$ a impakt by ho dál snížil; $T_0 > 30\,\mathrm{Myr}$, jinak $\varepsilon > 2{,}0$; $T_0 < 60\,\mathrm{Myr}$, jinak $\varepsilon < 1{,}8$.



Obr. 3 — Předpokládaný průběh růstu hmotnosti $M(t)$ neboli akrece (vlevo). Do $T_\mathrm{a} = 10\,\mathrm{Myr}$ naroste Země na $M = 0{,}87\,M_\oplus$; pak nastává období, kdy se neděje nic (vyjma radioaktivity) neboli *hiát*. Až v $T_0 = 45\,\mathrm{Myr}$ dojde k poslednímu velkému impaktu $m = 0{,}13\,M_\oplus$. Odpovídající průběh obohacení prvotního pláště Země $\varepsilon_{^{182}\mathrm{W},2}(\mathrm{CHUR})$ (vpravo).

Navíc musíme přiznat nějaké neřešené problémy. První problém je **ekvilibrace**, neboli vyrovnání chemického a izotopového složení mezi materiálem Země a impaktorem. My jsme mlčky předpokládali úplnou, ale může býti *částečná*. Úplná totiž vyžaduje rozmělnění materiálu až na škálu cm (!), čili malé kapky. Snad by to bylo možné ve vysoce turbulentním zemském magmatickém oceánu (EMO), anebo při rozpadu železných těles při jejich pádu skrz EMO dolů.

Druhý problém je, že Země i impaktor mohou mít v principu až $M_1 = M_2 = 0{,}5\,M_\oplus$ (Canup 2012). Dříve se myslelo, že to vždy vede k příliš velké hmotnosti disku a momentu hybnosti Měsíce. Avšak v případě, že by Země rotovala rychle, dráha Měsíce by pak precedovala rychle (s $P_\mathrm{p} \simeq 1\,\mathrm{yr}$), došlo by k **evekční rezonanci** s oběžným pohybem soustavy Země–Měsíc kolem Slunce ($P_\mathrm{o} = P_\mathrm{p}$), tím se ovšem Měsíc v pericentru vyskytuje ve stále stejném směru vzhledem ke

Slunci, Slunce tuto „nebodovou“ soustavu systematicky táhne dopředu nebo dozadu, čímž dochází k přenosu momentu hybnosti $L_{\mathbb{C}}$ z orbitálního pohybu Měsíce na heliocentrický orbitální pohyb soustavy Země–Měsíc (Ćuk a Stewart 2012).

Třetí problém je…

Variabilní rozdělování *

Rozdělovací koeficient $D \neq$ konst. (viz Cottrell aj. 2009). Naopak se ukazuje, že je složitou funkcí stavových veličin, tlaku P, teploty T v daném místě, kde přerozdělování probíhá, což je v našem případě rozhraní jádro/plášť (CMB). Též jej ovlivňuje detailní chemické složení (nejenom Hf, W), což se obvykle popisuje **fugacitou** f_{O2}, neboli parciálním tlakem kyslíku, který je k dispozici pro chemické reakce. Tato může vyjádřena relativně k souboru minerálů s kyslíkem a bez kyslíku, například železo – wüstit (Fe – FeO; angl. iron – wüstite; IW), které se vyskytují dosti často a je v nich vlastně zaznamenáno, kolik O_2 bylo kdysi k dispozici. Zkratkovitě by snad bylo možné říci, že jde o množství vody H_2O, které bylo akretováno jako led a dostalo se do magmatického oceánu.[5]

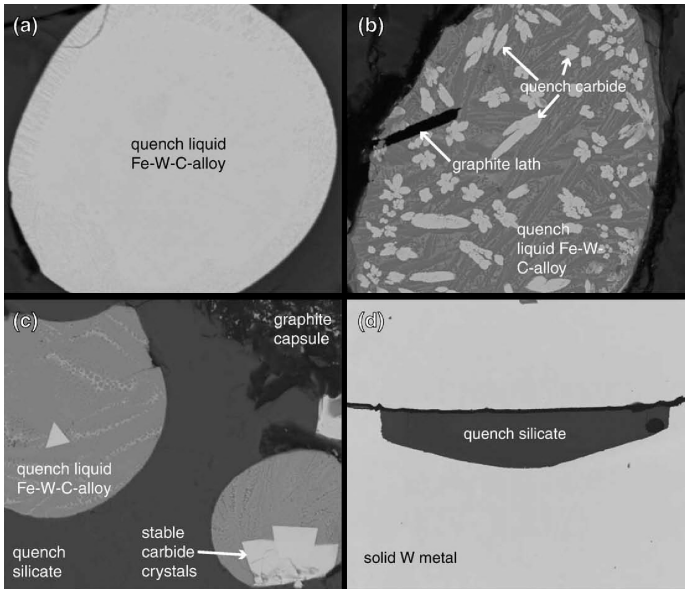
Magma v daném místě krystalizuje, vznikají přitom různé minerály, což se studuje laboratorně (viz obr. 4). Sice se používají tlaky nižší, které se extrapolují do vyšších, ale i tak je možno měřit závislost $D(P, T, f_{O2})$ (viz obr. 5). Poznamenejme, že k přerozdělování obecně dochází i jinými procesy než frakční krystalizací, po níž zůstávají vypuzené kapalné slitiny; například stratifikací při odlišných hustotách.[6]

Tlak ani teplota také nejsou konstantami; rostou s hmotností $M(t)$ tělesa přibližně jako $P_{\mathrm{CMB}} = 136\,\mathrm{GPa}\,(M/M_{\oplus})^{2/3}$, $T_{\mathrm{CMB}} = 1973\,\mathrm{K} + 28{,}57\,\mathrm{K\,GPa^{-1}}\,P_{\mathrm{CMB}}$, odpovídající fázovému přechodu peridotitu. Těsně po měsíčním impaktu však není jisté, že $P = P_{\mathrm{CMB}}$, $T = T_{\mathrm{CMB}}$. Země totiž může být v jakémsi expandovaném stavu. Ostatně podle přerozdělování jiných prvků se zdá, že ekvilibrace proběhla za podmínek, které by odpovídaly takovému D, jaké by experimenty daly při $P \simeq 40\,\mathrm{GPa}$ (Yu a Jacobsen 2011).

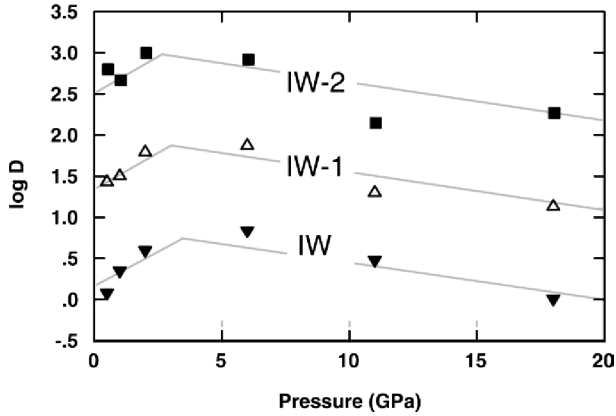
Izotopická dichotomie NC a CC *

Různé skupiny meteoritů mají pochopitelně různé anomálie ε. Co je ale pozoruhodné, že skupiny skupin meteoritů mají *podobné* anomálie! Warren (2011) konkrétně zavedl 2 rezervoáry: NC .. neuhlíkaté chondrity, CC .. uhlíkaté chondrity, které vykazují systematicky odlišné $\varepsilon_{46\mathrm{Ti}}$, $\varepsilon_{48\mathrm{Ti}}$, $\varepsilon_{50\mathrm{Ti}}$ atd. (viz obr. 6). Totéž

5. naopak se nejedná o plynný O_2 v mlhovině
6. není tedy nutné, aby byl systém v pevném stavu, aby se „resetovaly“ radiometrické hodiny



Obr. 4 — Snímky elektronovým mikroskopem (rozměr řádově 0,1 mm), na nichž jsou vidět různé slitiny v kapalném stavu nebo minerály v pevném stavu, které krystalizovaly již za vysokých tlaků a teplot a do kterých různou měrou vstoupil wolfram, odkud je možno odvodit jeho rozdělovací koeficient D_{W}. Převzato z [5].



Obr. 5 — Logaritmus rozdělovacího koeficientu wolframu $\log D$ v závislosti na tlaku P pro tři různé hodnoty fugacity f_{O2}, vztažené k souboru železo – wüstit, kde $\Delta\mathrm{IW} = 2\log(x_{\mathrm{FeO}}/x_{\mathrm{Fe}}) + 2\log(\gamma_{\mathrm{FeO}}/\gamma_{\mathrm{Fe}})$, x označuje molární koncentraci a γ koeficient aktivity. Převzato z [5].

platí pro řadu dalších prvků: Sr, Ca, Cr, Ni, Zr, Mo, Ru, Ba, Nd, Sm, Hf, W, Os. Otázka je, co může způsobit takové odlišnosti a podobnosti.

Obecně může jít o míchání 2 rezervoárů, přičemž bychom asi měli vědět, jak směs na grafech ε vs ε vypadá. Závisí to na relativních koncentracích příslušných prvků (Langmuir aj. 1978):

$$\text{stejné koncentrace} \rightarrow \text{přímka}\,,$$
$$\text{různé koncentrace} \rightarrow \text{hyperbola}\,.$$

Pokud by to body na grafu nesplňovaly, mohlo by jít o míchání 3 rezervoárů anebo o zcela odlišný proces.

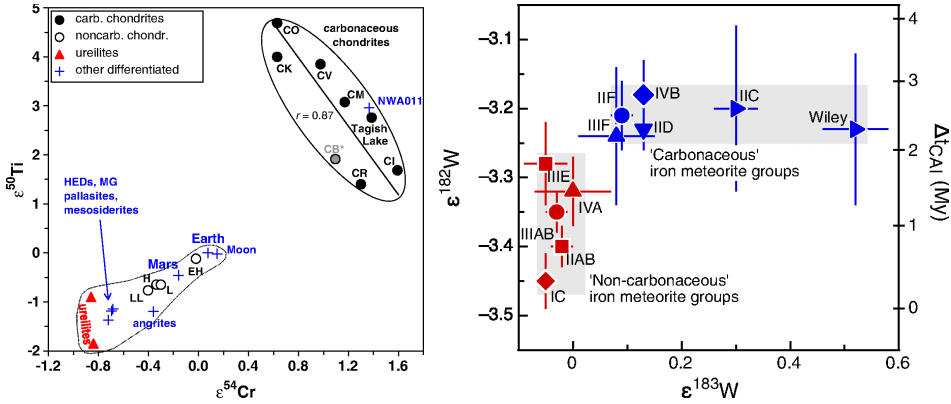
Pro zmiňované rezervoáry byla nalezena „rovnice“ (Burkhardt aj. 2019):

$$\text{„CC} = \text{NC} + \text{CAI“}\,,$$

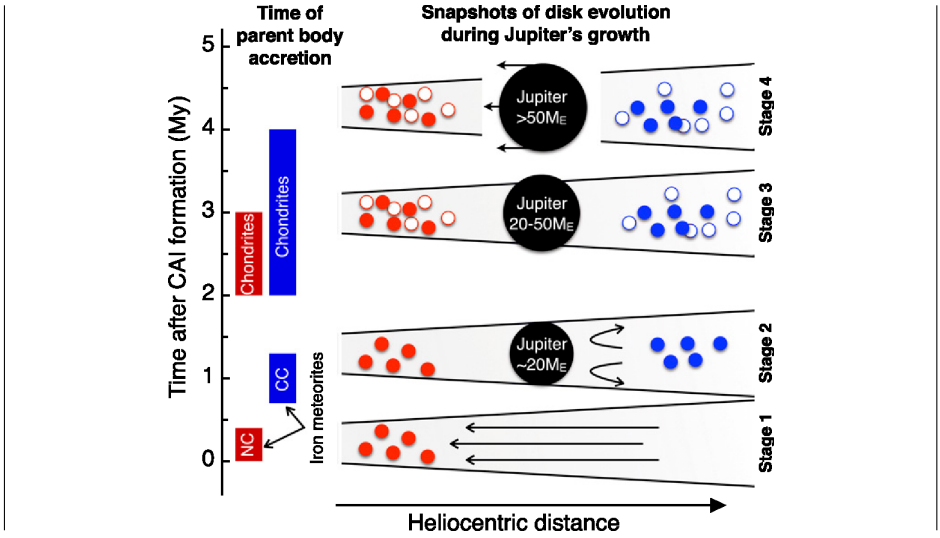
kde rezervoár CAI znamená „jako inkluze“, tzn. izotopicky CAI, ale chemicky chondritický. Slovně to znamená, že uhlíkaté chondrity získáme mícháním neuhlíkatých chondritů a materiálu vztahujícímu se k vápenato-hlinitým inkluzím (zejm. z chondritů CV3). Systematický posun NC $\rightarrow$ CC $\rightarrow$ CAI je zřejmě způsoben obohacením prvky z r-procesů, tj. rychlého zachycování neutronů (ze supernov). Náhodný rozptyl v rámci CC (NC) je způsoben prvky z s-procesů (pomalého; z * AGB); nikoliv jedinou reakcí.

Výše uvedené svědčí o akreci *heterogenního* materiálu přímo z jádra molekulárního oblaku. Naopak je v rozporu s tepelným přepracováním v protoplanetárním disku (vytvořilo by nechondritické chemické složení a vyžadovalo by specifické P, T) nebo s akrecí presolárních zrn (trend NC $\rightarrow$ CC by byl odlišný). Průběh lze předpokládat následující: (i) akrece blízko Slunce, a to materiálu izotopicky podobného CAI; (ii) viskózní rozpínání disku od Slunce; (iii) akrece materiálu izotopicky podobného NC; (iv) pouze částečné přepracování/přeprava/promíchání v disku; (v) rozšíření akrece do větších vzdáleností, přidání nepřepracovaného materiálu; (vi) oddělení rezervoárů NC & CC vznikajícím Jupiterem, což by zabránilo jejich promíchávání. Vyplývá odsud, že jádro Jupiteru o hmotnosti asi 20 $M_\oplus$, které blokuje driftující balvany vytvářením obráceného gradientu tlaku ∇P, muselo vzniknout brzy (asi do 5 Myr).

Co se týká datování, vznikly postupně (viz obr. 7): (i) železné meteority odpovídající neuhlíkatým chondritům mezi 0 až 0,5 Myr po CAI; (ii) železné odpovídající uhlíkatým mezi 0,7 až 1,3 Myr; (iii) NC 2 až 3 Myr; (iv) CC 2 až 4 Myr. Stále přitom platí, že železa musela vzniknout diferenciací v hloubce svých mateřských těles, neboť jejich krystalická struktura (Widmanstättenovy obrazce) svědčí o velmi pomalém chladnutí, 1 až 1 000 °C Myr^{-1}, a existenci první generace planetesimál?



Obr. 6 — Izotopická dichotomie na grafu ($\varepsilon_{54\mathrm{Cr}}, \varepsilon_{50\mathrm{Ti}}$) pro dvě odlišné skupiny skupin meteoritů: uhlíkaté chondrity (CC; zahrnuje CO, CK, CV, CM, CB, CR, CI) a neuhlíkaté chondrity (NC; EH, H, L, LL, též ureility, ostatní diferencované, Zemi, Měsíc, Mars) (vlevo). Graf ($\varepsilon_{183\mathrm{W}}, \varepsilon_{182\mathrm{W}}$) společně s časovou osou t (od CAI), pro železné meteority odpovídající CC (IIIF, IIF, IID, IVB, IIC) a NC (IC, IIAB, IIIAB, IVA, IIIE) (vpravo). Převzato z [12] a [9].



Obr. 7 — Schematická časová osa t postupného vzniku skupin skupin meteoritů: železné odpovídající neuhlíkatým, železné odpovídající uhlíkatým, chondrity NC, chondrity CC. Rezervoáry musejí být brzy odděleny vznikajícím Jupiterem, aby nedošlo k promíchání, které by smazalo izotopickou dichotomii. Převzato z [9].

Systém U/Pb *

Nakonec jsme si nechali důležitou otázku. Kolik je 0? Samozřejmě $0 \neq 0$. Všechny předchozí metody totiž měřily čas *relativně* k CAI, protože jsme jako počáteční složení uvažovali právě CAI. Pro absolutní datování CAI se používá systém U/Pb, respektive **Pb/Pb**, kde jsou poločasy rozpadu naopak dostatečně dlouhé. Protože v CAI není prakticky žádný zirkon ($ZrSiO_4$, obsahující stopově U), nelze užít U/Pb za předpokladu vypuzení všeho Pb (viz např. Brož a Šolc 2013, str. 354). Nicméně poměry olov $^{207}Pb/^{206}Pb$, $^{204}Pb/^{206}Pb$ je možné měřit pomocí loužení kyselinou s přesností až 1 ppb!

Příslušné rozpadové zákony jsou:

$$\frac{[^{207}\mathrm{Pb}]}{[^{204}\mathrm{Pb}]} = \left(\frac{[^{207}\mathrm{Pb}]}{[^{204}\mathrm{Pb}]}\right)_0 + \frac{[^{235}\mathrm{U}]}{[^{204}\mathrm{Pb}]}(\mathrm{e}^{\lambda_{235\mathrm{U}}t} - 1)\,,$$
$$\frac{[^{206}\mathrm{Pb}]}{[^{204}\mathrm{Pb}]} = \left(\frac{[^{206}\mathrm{Pb}]}{[^{204}\mathrm{Pb}]}\right)_0 + \frac{[^{238}\mathrm{U}]}{[^{204}\mathrm{Pb}]}(\mathrm{e}^{\lambda_{238\mathrm{U}}t} - 1)\,.$$

Převedeme-li členy s počátečními obsahy $()_0$ vlevo a podělíme, získáme měřící rovnici:

$$\frac{\dfrac{[^{207}\mathrm{Pb}]}{[^{204}\mathrm{Pb}]} - \left(\dfrac{[^{207}\mathrm{Pb}]}{[^{204}\mathrm{Pb}]}\right)_0}{\dfrac{[^{206}\mathrm{Pb}]}{[^{204}\mathrm{Pb}]} - \left(\dfrac{[^{206}\mathrm{Pb}]}{[^{204}\mathrm{Pb}]}\right)_0} = \frac{[^{235}\mathrm{U}]}{[^{238}\mathrm{U}]}\,\frac{\mathrm{e}^{\lambda_{235\mathrm{U}}t} - 1}{\mathrm{e}^{\lambda_{238\mathrm{U}}t} - 1}\,,$$

kde poměr $[^{235}\mathrm{U}]/[^{238}\mathrm{U}]$ je znám (1/137,88). Jedná se o rovnici přímky, $(y_i - y_0)/(x_i - x_0) = b$, která je přeurčena měřeními mnoha minerálů, s různými obsahy (x_i, y_i). Směrnici b (tzn. stáří) vypočteme metodou nejmenších čtverců.

Poměry olov se vynášejí jako izochrona, i když stabilním izotopem je zde ^{204}Pb a radiogenní jsou ^{206}Pb, ^{207}Pb. Amelin aj. (2002) takto změřil CAI z meteoritu Efremovka; výsledek je (viz obr. 8):

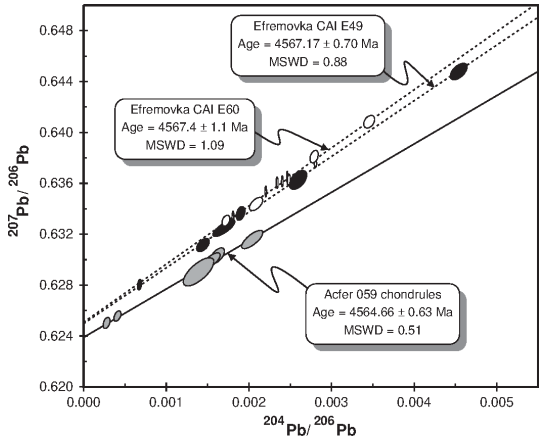
$$t_{\mathrm{CAI}} = (4{,}567 \pm 0{,}001)\,\mathrm{Gyr}\,,$$

což je opravdu snadné si pamatovat („4567“). A opravdu to *není* „asi čtyři a půl miliardy let“.

[1] Amelin, Y., Krot, A. N., Hutcheon, I. D., Ulyanov, A. A. *Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminium rich inclusions.* Science, **297**, 5587, s. 1678–1683.

[2] Brož, M., Šolc, M. *Fyzika sluneční soustavy.* Praha: Matfyzpress, 2013.

[3] Burkhardt, Ch., Dauphas, N., Hans, U., Bourdon, B., Kleine, T. *Elemental and isotopic variability in solar system materials by mixing and processing of primordial disk reservoirs.* Geochim. Cosmochim. Acta, **261**, s. 145–170, 2019.



Obr. 8 — Izochrona Pb/Pb pro vápenato-hlinité inkluze (CAI) z meteoritu Efremovka, vykazující stáří (4,567 ± 0,001) Gyr. Pro porovnání jsou zobrazeny chondrule z meteoritu Acfer 059, se stářím asi o 0,003 Gyr menším. Převzato z [1].

[4] Canup, R. M., Righter, K., Dauphas, N., Pahlevan, K., Ćuk, M., Lock, S. J., Stewart, S. T., Rufu, R., Nakajima, M., Magna, T. *Origin of the Earth and Moon.* in New views of the Moon II, 2019.

[5] Cottrell, E., Walter, M. J., Walker, D. *Metal-silicate partitioning of tungsten at high pressure and temperature: Implications for equilibrium core formation in Earth.* Earth Planet. Sci. Lett., **281**, s. 257–287, 2009.

[6] Fischer, R. A., Nimmo, F. *Effects of core formation on the Hf-W isotopic composition of the Earth and dating of the Moon-forming impact.* Earth Planet. Sci. Lett., **499**, s. 257––265, 2018.

[7] Hartmann, W. K., Davis, D. R. *Satellite-sized planetesimals and lunar origin.* Icarus, **24**, s. 504–515, 1975.

[8] Jacobsen, S. B. *The Hf-W isotopic system and the origin of the Earth and Moon.* Annu. Rev. Earth Planet. Sci., **33**, s. 531–570, 2005.

[9] Kruijer, T. S., Burkhardt, Ch., Budde, G., Kleine, T. *Age of Jupiter inferred from the distict genetics and formation times of meteorites.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **114**, 26, s. 6712–6716, 2017.

[10] McSween, H. Y., Moersch, J. E., Burr, D. M., Dunne, W. M., Emery, J. P., Kah, L. C., McCanta, M. C. *Planetary geoscience.* Cambridge: Cambridge University Press, 2019.

[11] Rudge, J. F., Kleine, T., Bourdon, B. *Broad bounds on Earth's accretion and core formation constrained by geochemical models.* Nat. Geosci., **3**, s. 439–443, 2010.

[12] Warren, P. H. *Stable-isotopic anomalies and the accretionary assemblage of the Earth and Mars: A subordinate role for carbonanceous chondrites.* Earth Planet. Sci. Lett., **311**, s. 93–100, 2011.

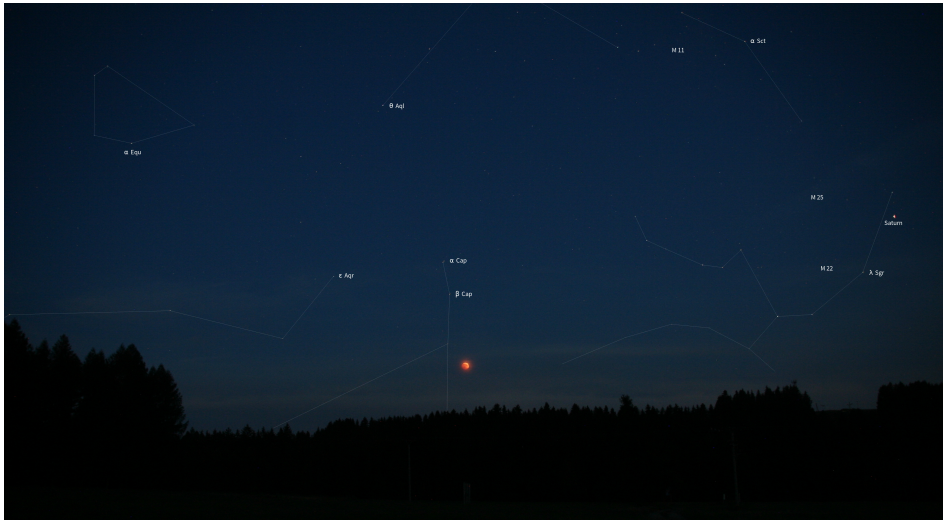
[13] Yu, G., Jacobsen, S. B. *Fast accretion of the Earth with a late Moon-forming giant impact.* Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **108**, 43, s. 17604–17609, 2011.

Zatmění Měsíce 27. 7. 2018

Rostislav Brož

Úplné zatmění Měsíce je astronomický jev, který jsem měl možnost vidět o letních prázdninách na severním Slovensku. Na tuto událost jsem se těšil už dlouho. Zatmění jsme chtěli nejdříve pozorovat z hradecké hvězdárny, ale možnost pozorovat ho pod hřebeny Tater bez světelného znečištění jsem si nemohl nechat ujít.

Když nastala noc, při které mělo zatmění proběhnout, vydali jsme se na louku, ze které mělo být perfektně vidět. Avšak počasí nám moc nepřálo. Když jsme přišli na zmíněnou louku, viděli jsme v dáli pouze svit města, na opačné straně temný les, ale po Měsíci nebylo ani stopy. Myslel jsem, že půjdeme domů s prázdnou, když tu se cosi snažilo prosvítit mraky. Mlhavá skvrna, která se nacházela přesně na souřadnicích Měsíce, zářila medově oranžovým světlem. Až po chvíli čekání se těleso prodralo skrz ciry a rozpoznali jsme přivrácenou stranu Měsíce.



Obr. 9 — Momentka z dlouhého úplného zatmění Měsíce 27. 7. 2018, pozorovaného v Západních Tatrách, obci Žiar.

Viditelnost se postupně zlepšila. První kontakt s polostínem v 18 h 14,8 min jsme sice neviděli, ani první kontakt se stínem v 19 h 24,5 min, ale úplnou fázi už ano. Tento úžasný jev jsme pozorovali zhruba 1 hodinu, přičemž jsme pořídili pár zajímavých fotografií (obr. 9 a 10). Byl to nezapomenutelný zážitek.



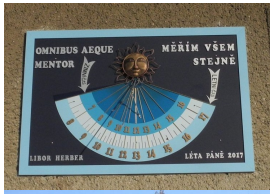
Obr. 10 — Detail zatmění Měsíce 27. 7. 2018 v 19 h 46 min UT, po zpracování nepointované expozice. Přístroj Canon Eos 350D, objektiv Sigma DC 18–200, ohnisko $f = 200$ mm, clona $f/6{,}3$, expozice $t = 10$ s; Richardsonova-Lucyho dekonvoluce s empirickou (hvězdnou) PSF, 50 iterací, rozmazání selektivním Gaussovým filtrem (20 pxl, $\Delta = 15$ ADU) a úprava přenosové křivky.

Sluneční hodiny 4. kvartálu roku 2018

Jaromír Ciesla

Během čtvrtého kvartálu roku 2018 přibylo do katalogu slunečních hodin 32 nových záznamů. Z tohoto počtu jich 22 pochází z domova a 10 ze zahraničí.

V domácí části soutěže se jako třetí umístily svislé sluneční hodiny z Holasovic, které leží asi 10 km západně od Opavy; získaly 9 bodů. Číselník je provedený na hliníkové desce s nalepenými hodinovými čarami a číslicemi. Číslování hodin je v horní části v pravém místním slunečním čase, ve spodní části je číslování posunuto o jednu hodinu, aby se přiblížilo letnímu času. Autorem a realizátorem hodin je pan Libor Herber.





Na druhém stupínku se ziskem 12 bodů se umístily vodorovné sluneční hodiny z letohrádku v Lemberku na Českolipsku. Velkou výhodou slunečních hodin je to, že mohou být vhodně zakomponované téměř do jakéhokoliv prostředí. Při procházce mezi sochařskými díly v zahradě Bredovského letohrádku můžete narazit na umělecké dílo Roberta Lee Adzema. Jedná se o tvarově zajímavě provedený šikmý ukazatel horizontálních slunečních hodin. Po krátkém pátrání naleznete i hodinové rysky. Hodiny

vznikly při příležitosti Mezinárodního sochařského sympozia v roce 1990 a jsou přístupné jen v několika dnech roku, kdy se v zahradě konají kulturní akce.

První místo obsadily polární sluneční hodiny, které byly instalované v Ostravě-Porubě v Porubském lesoparku. Ve výsledném součtu získaly 13 bodů. Jsou to velice zajímavě provedené sluneční hodiny. Jejich základ tvoří část mohutného kmene, jehož horní šikmo seříznutá strana je bohatě zdobená mozaikou. Na obvodu kmene je runový nápis určený pro hloubavé k luštění. Číselník těchto hodin je vyřezán do ocelového pásu stočeného do půloblouku umístěného rovnoběžně s rovníkem. Při dopadu slunečních paprsků na plochu číselníku se jednotlivé číslice promítají na šikmou projekční plochu, která je naopak rovnoběžná s polární osou. Jelikož se zde promítá číselník na plochu s ukazatelem, můžeme takovéto sluneční hodiny nazývat jako polární projekční. Sluneční hodiny vznikly v rámci projektu s názvem Sluneční stezka Porubou, dotačního programu na estetizaci veřejného prostoru. Autory jsou Romana Vaverová a Tereza Juchelková.



V zahraniční části skončily na třetím místě se ziskem 12 bodů sluneční hodiny z Bratislavy Dúbravky. Na fasádě rodinného domku jsou z ulice dobře viditelné svislé sluneční hodiny. Jejich šikmý stínový ukazatel vychází ze středu květu, kolem kterého krouží skupina motýlů. Ve spodní části číselníku se nachází stuha s čísly v rozsahu VIII–XII–XV hodin.





Na druhém stupni se díky zisku 13 bodů usadily polární prstencové hodiny z městečka Gohrisch. Stanoviště těchto hodin se nachází asi 4 km jižně od města Bad Schandau, v areálu bývalého pionýrského tábora. Na první pohled zcela běžné provedení, které má ale malé vylepšení. Na polární ose je názorná ukázka souřadnicové soustavy s vyznačeným rovníkovým a poledníkovým kruhem, který je navíc doplněn značkami pro obratníky a horizont. Na prstenci hodin je malovaná časová stupnice v rozsahu V–XII–XIX hodin.

První místo získaly s výrazným náskokem svislé sluneční hodiny z Paříže. Díky hlasování naší poroty obdržely 24 bodů. Nacházejí se na budově střední školy, nedaleko centra Paříže. Číselník je citlivě zakomponován do architektury budovy a umístěn pod římsou. Jako ukazatel slouží polos, který je zakončený stínovým terčíkem ve tvaru hvězdy s otvorem v jejím středu. Zatímco čas lze odečítat podle polohy stínu ukazatele, polohu Slunce mezi obratníky ukazuje paprsek procházející otvorem ve středu stínítka a dopadající na plochu číselníku. Rozsah číselníku je VI–XII–III.



Závěrem děkuji všem přispěvatelům a také hodnotící porotě.