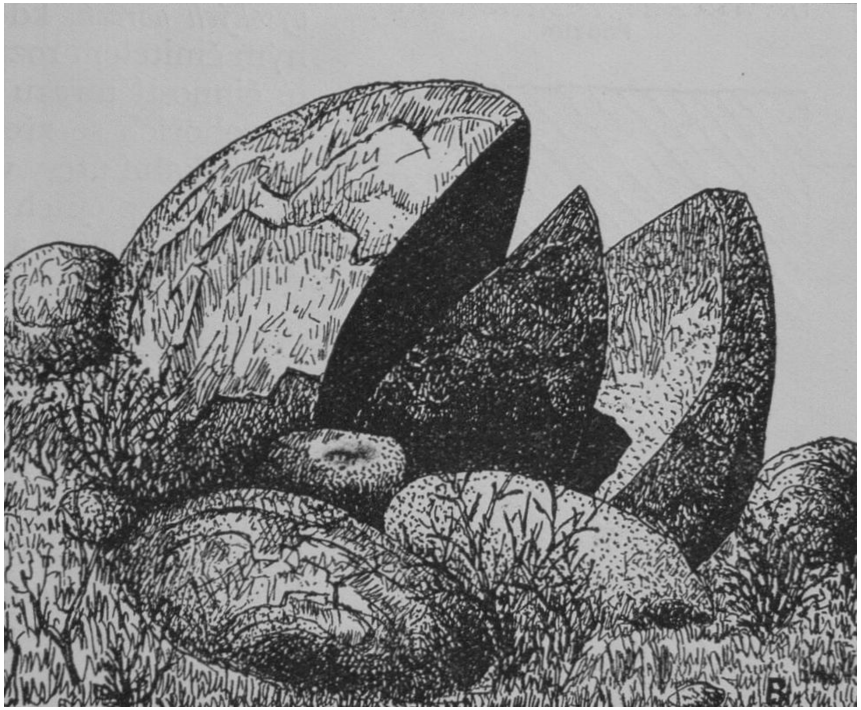
Tepelné napětí v meteoroidech

David Čapek[1] a David Vokrouhlický[2]

1 – Astronomický ústav AV, Ondřejov,
2 – Astronomický ústav Univerzity Karlovy

Tepelné napětí – pozemské příklady



Pukání a loupání povrchu balvanů v pouštích díky prudkým změnám teplot

převzato z Bouček, B. a Kodym, O., 1958: *Všeobecná geologie*

Pukliny způsobené tepelným napětím v chladných aridních oblastech

$dT/dt > 2°C/min$

převzato z Hall, K., 1999, *Geomorphology* **31**, 47-53

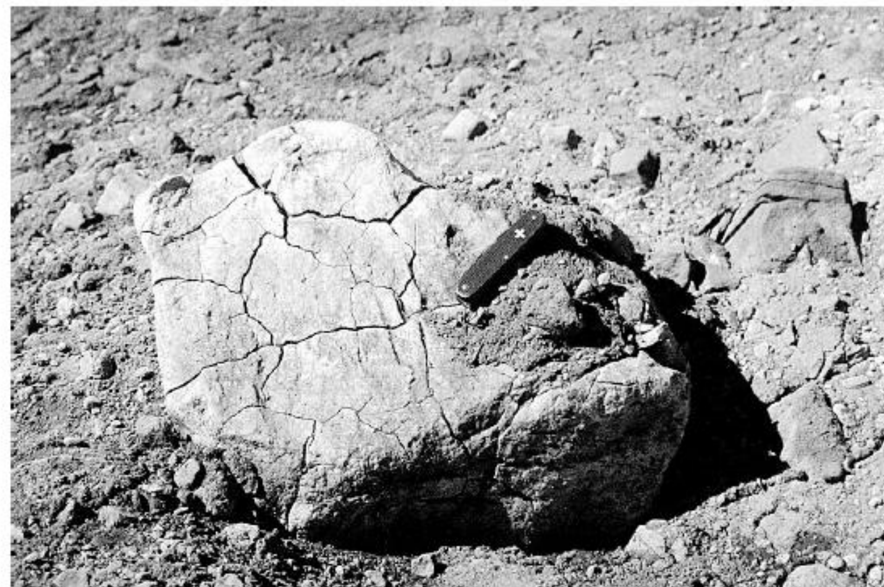
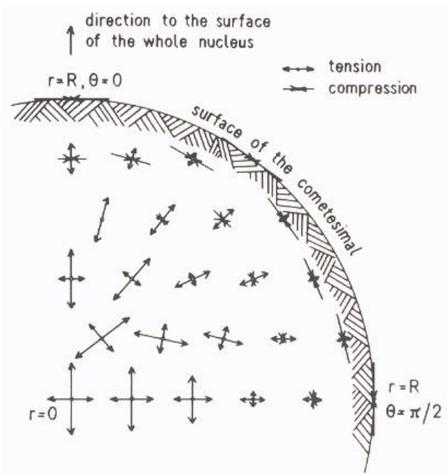


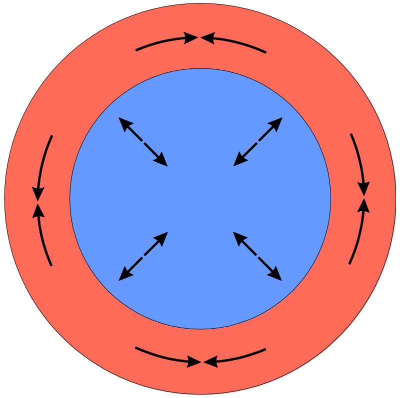
Fig. 1. Examples of fracture patterns, thought to be due to thermal stress, found on a rock at 4000 m altitude in the Argentinean Andes.

Tepelné napětí v malých tělesech sluneční soustavy

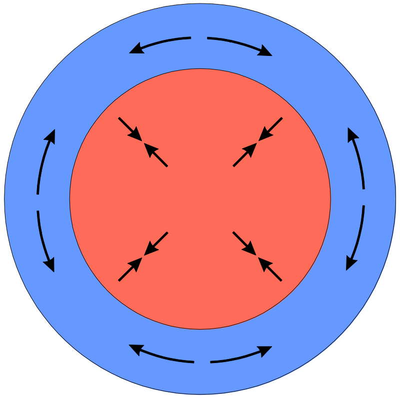
- Jádra komet
  - pukliny na povrchu
  - rozštěpení celého jádra
  - vysvětlení častějších rozpadů po průchodu perihelem



Tauber, F. and Kührt, E., 1987, *Icarus* **69**, 87-90



Ohřev – povrch namáhán tlakem, jádro tahem



Chladnutí – povrch namáhán tahem, jádro tlakem

Tepelné napětí - malá tělesa sluneční soustavy

- Meteoroidy na parabolických drahách
  (Shestakova & Tambovtseva, 1999)
  - destrukce velkých meteoroidů v blízkosti Slunce
  - menší tělesa jsou „izotermální“
- Meteoroidy při průletu ovzduším

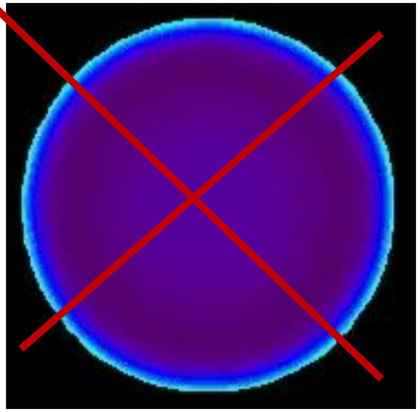
odprýskávání povrchu při letu po temné dráze

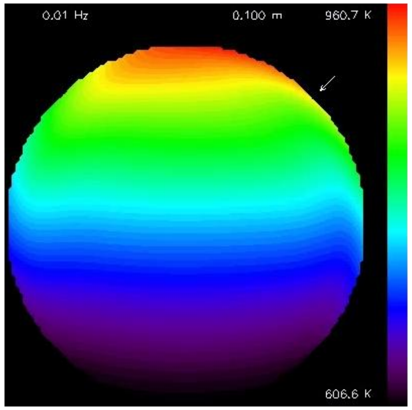
síť kontrakčních trhlin v kůrce tavení

na meteoritu Nuevo Mercurio (H5)

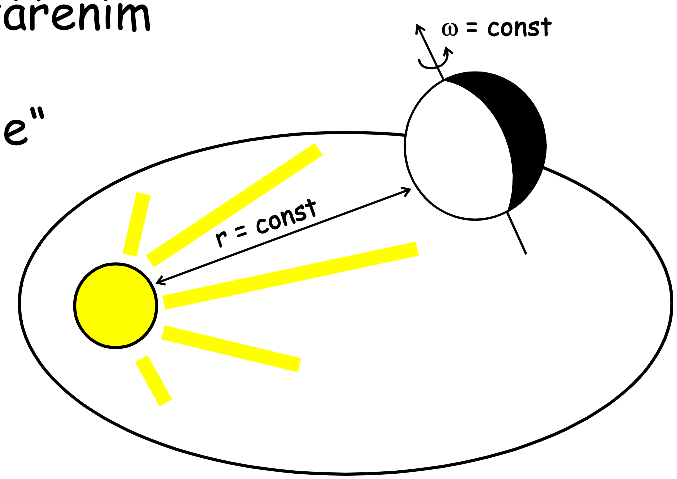
Tepelné napětí v meteoroidech – předpoklady našeho modelu

Cíl: Analytické vyjádření tenzoru napětí v malých meteoroidech bez omezujícího předpokladu radiální symetrie.





- kulový tvar (ale ne sfér. sym. T)
- materiál:
  - homogenní izotropní
  - elastické deformace (Hookův zákon)
- jednoduchá rotace
- teplota
  - ohřev (**neizotropní!**) dopadajícím slunečním zářením
- neměnná heliocentrická vzdálenost a „výška slunce"
  - **velikost menší než pár metrů**



Rovnice vedení tepla

- kontinuum bez deformací :

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = K \Delta T + Q$$

$\ldots$ parabolická pdr 2. řádu,
$\rho \ldots$ hustota ($\mathrm{kg\,m^{-3}}$),
$c_v \ldots$ měrná tepelná kapacita ($\mathrm{J\,kg^{-1}K^{-1}}$),
$K \ldots$ tepelná vodivost ($\mathrm{W\,m^{-1}K^{-1}}$).
$Q \ldots$ produkce tepla ($\mathrm{W\,m^{-3}}$).

- homogenní kontinuum bez vnitřních zdrojů tepla:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = K \Delta T$$

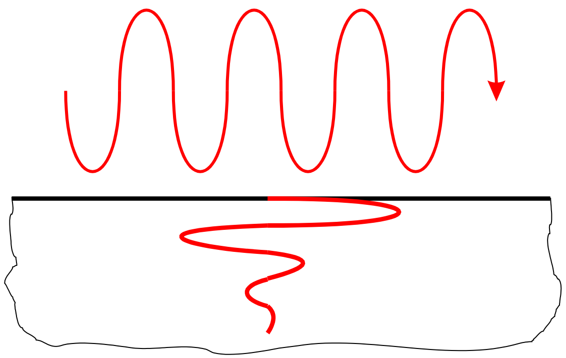
- počáteční podmínka: $T(t = \tau, \mathbf{r}) = f_1(\mathbf{r})$
- periodická okrajová podmínka: $T(t, \mathbf{r}) = T(t + P, \mathbf{r})$
- Dirichletova okrajová podmínka: $T(t, \mathbf{r}) = f_2(t, \mathbf{r})$
- Neumannova okrajová podmínka: $\nabla T(t, \mathbf{r}) = f_3(t, \mathbf{r})$
- smíšené a další okrajové podmínky...

Hloubka průniku variací teploty

• Příklad – šíření tepla v polonekonečném prostoru

$$\rho\, c \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

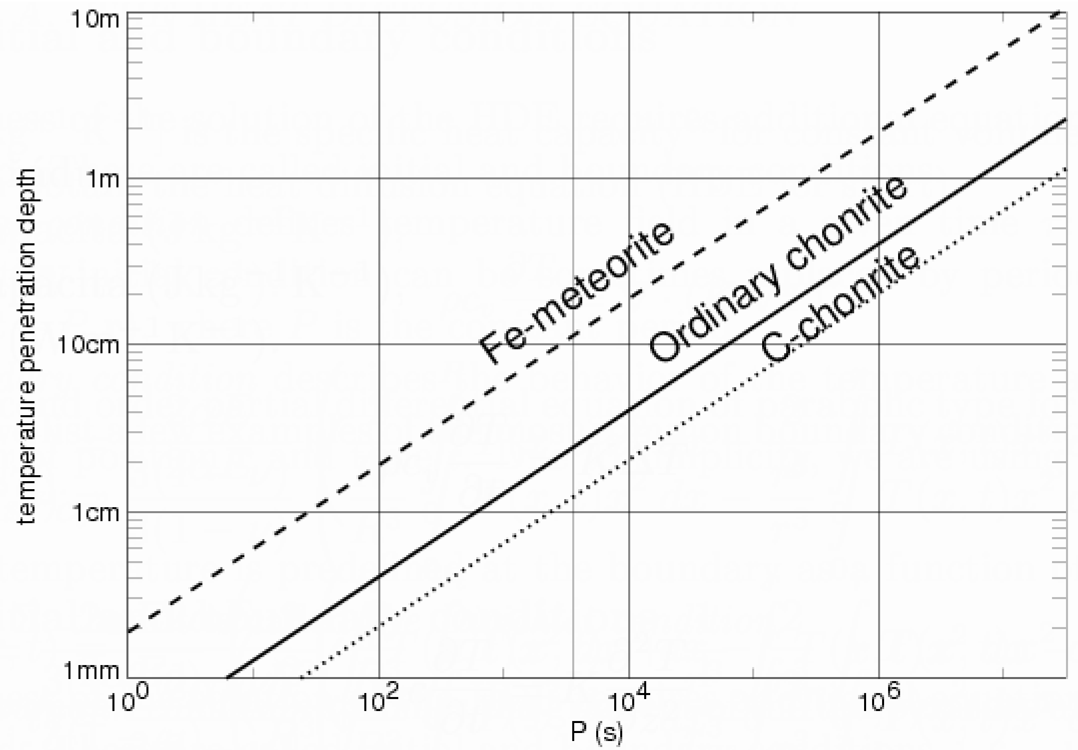
$$T(z=0,t) = T_0 \, \exp(i\Omega t)$$



• řešení: $$T(z,t) = T_0 \, e^{-z/\ell} e^{i(\Omega t + z/\ell)}$$

$$\ell = \sqrt{\frac{2K}{\rho c \Omega}}$$

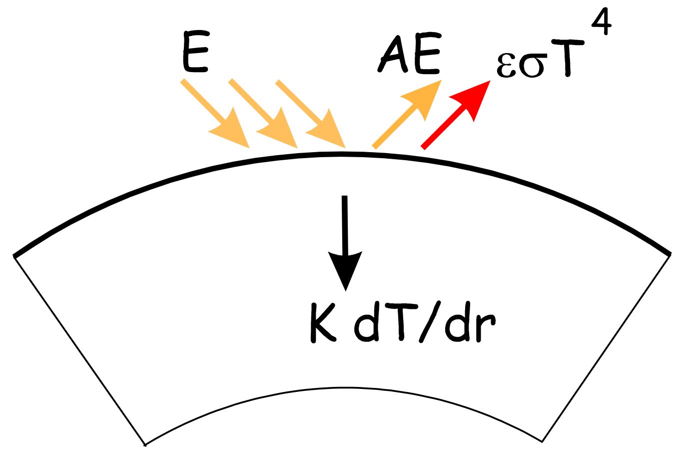
• hloubky průniku teplot. variací v O-chondritu pro různé periody: 1s…0.4mm, 10s…1.3mm, 1h…24mm, 1rok…2.27m



Teplota meteoroidů v meziplanet. prostoru

• Okrajová podmínka – ZZE na povrchu:

$$K\frac{\partial T}{\partial r} + \epsilon\sigma T^4 = (1-A)\mathcal{E}.$$



- nelineární rovnice (T^4), provádí se její linearizace: $T=T_{av}+\delta T$, $\delta T \ll T$

$$T^4 \simeq T_{\rm av}^4 + 4T_{\rm av}^3\,\delta T$$

- hledáme δT...

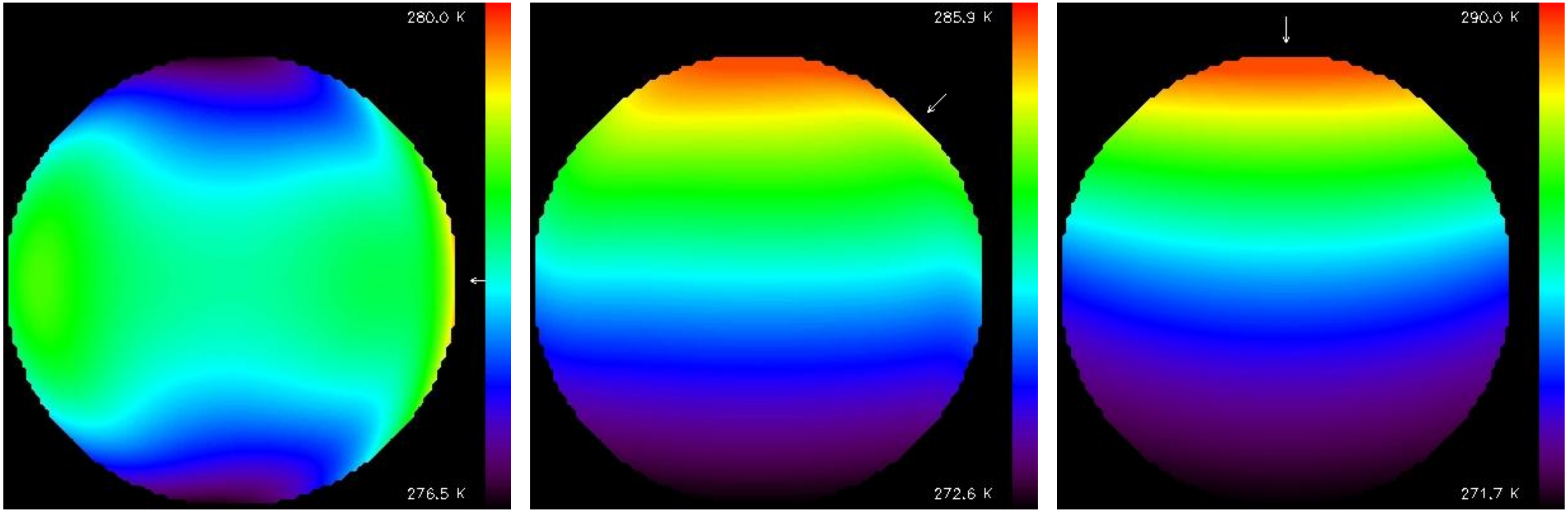
• linearizované analytické řešení rovnice vedení tepla: Vokrouhlický, 1998, *A&A* **335**

- teplota má tvar: $$T(t,r,\vartheta,\varphi) = T_{\rm av} + \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{k=-n}^{n} c_{nk}(r)\,\exp(ik\omega t)\,Y_{nk}(\vartheta,\varphi)\;,$$

kde Y_{nk} jsou „kulové funkce“.

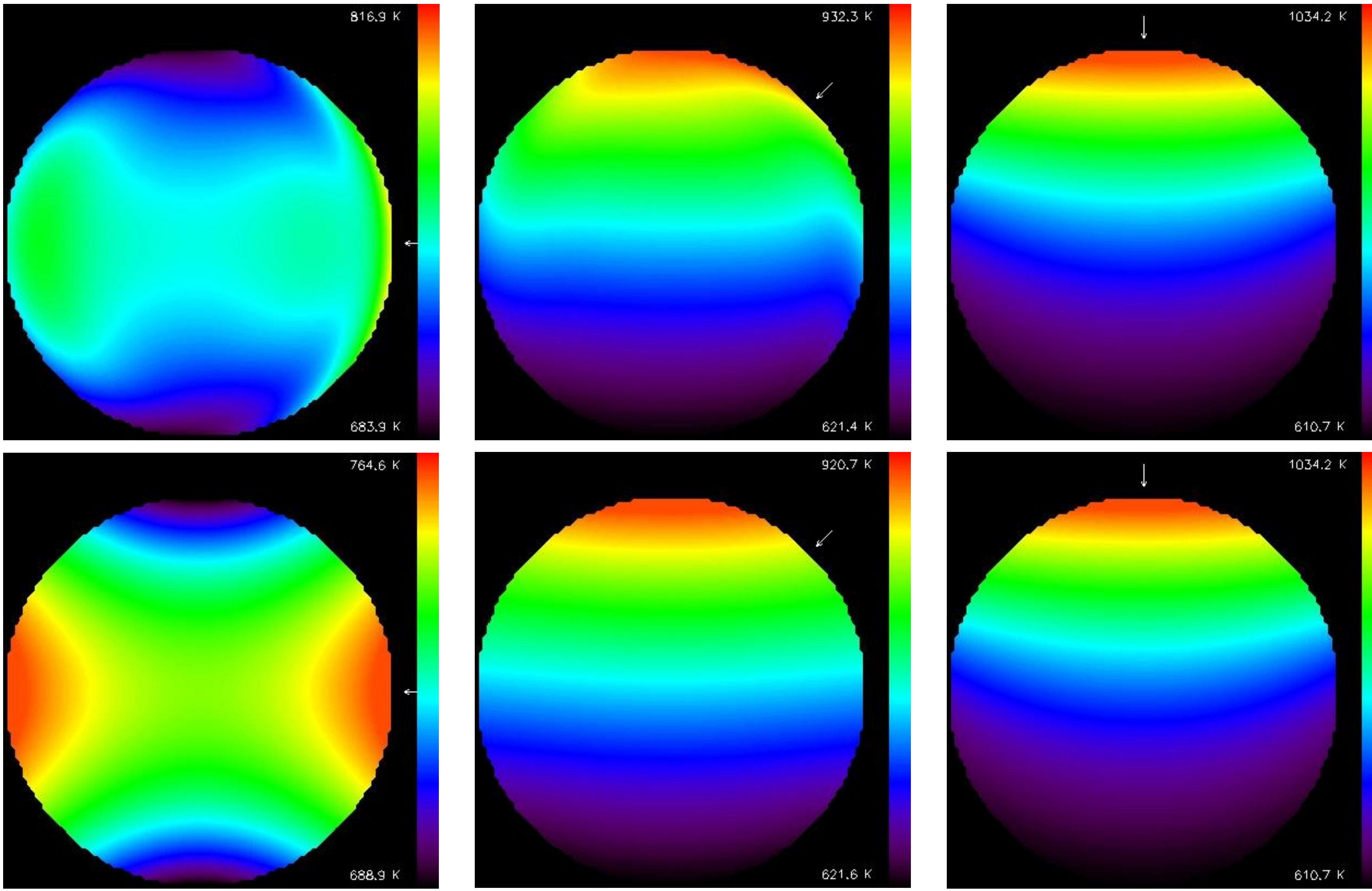
Teplota meteoroidů v meziplanet. prostoru - příklady

- heliocentrická vzdálenost: 1 AU
- průměr: 10cm
- frekvence: **0,01Hz**
- různé výšky Slunce



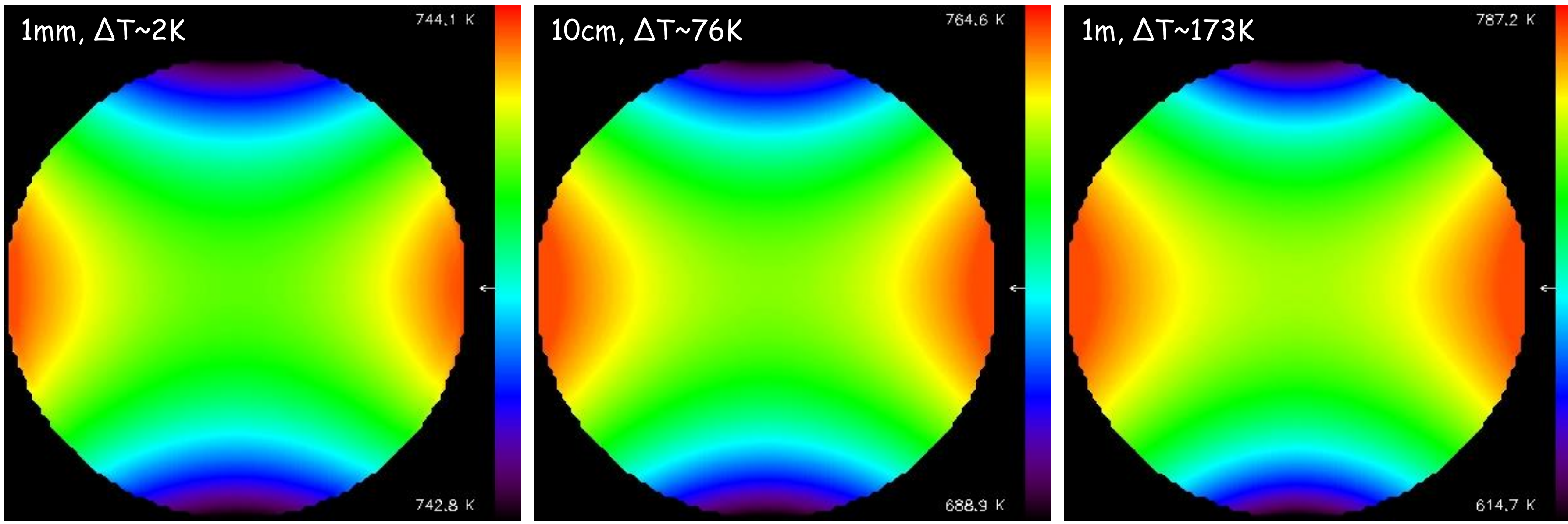
Teplota meteoroidů v meziplanet. prostoru - příklady

- heliocentr. vzdálenost: 0,14 AU, průměr: 10cm, frekvence: **0,01Hz**, nebo **30Hz**



Teplota meteoroidů v meziplanet. prostoru - příklady

- Různé velikosti těles



Rovnice mechaniky kontinua

• tenzor malých deformací (symetrický, 2. řádu, 6 nezávislých složek):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}[\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^{\mathrm{t}}],$$

u... vektor posunutí

• Hookův zákon – lineární vztah mezi tenzorem napětí a tenzorem malých deformací. Pro izotropní kontinuum:

$$\tau_{ij} = \lambda\delta_{ij}\varepsilon + 2\mu\varepsilon_{ij} \qquad \boldsymbol{\tau} = \lambda(\nabla\cdot\boldsymbol{u})\mathbf{1} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon}$$

ε... stopa tenzoru malých deformací
λ, μ... Lamého parametry (Pa)

• deformace způsobené variacemi teploty:

$$\varepsilon^{\mathrm{t}}_{ij} = \delta_{ij}\,\alpha(T - T_0)$$

α... lineární koeficient teplotní roztažnosti (K^{-1})

• zobecněný Hookův zákon:

$$\tau_{ij} = \lambda\delta_{ij}\varepsilon + 2\mu\varepsilon_{ij} - \alpha(3\lambda + 2\mu)(T - T_0)\delta_{ij} \qquad \boldsymbol{\tau} = \lambda(\nabla\cdot\boldsymbol{u})\mathbf{1} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon} - \alpha(3\lambda + 2\mu)(T - T_0)\mathbf{1},$$

Rovnice mechaniky kontinua

• dosazením do pohybové rovnice kontinua obdržíme **Duhamel-Neumannovu rovnici** umožňují určit vektor posunutí $\mathbf{u}_i$:

$$\boxed{\mu \Delta \vec{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \vec{u} - \alpha (3\lambda + 2\mu) \nabla T + \vec{f} = \rho \ddot{\vec{u}}}$$

• okrajová podmínka (volný povrch tělesa):

$$\boxed{\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{e}_{\mathrm{n}} = \mathbf{0},}$$

$\mathbf{e}_n$... vnější normála k povrchu tělesa

• Lze dokázat, že: $\nabla T = \mathrm{konst.} \ldots \quad \tau_{ij} = 0$

Řešení Duhamel-Neumannových rovnic

- předp. kulové těleso, volný povrch, žádné vnější síly

$$\boxed{\mu\Delta\vec{u} + (\lambda+\mu)\nabla\nabla\cdot\vec{u} - \alpha(3\lambda+2\mu)\nabla T + \cancel{\vec{f}} = \rho\ddot{\vec{u}}}$$

- rozklad vektoru posunutí do sférických harmonik:

$$\boldsymbol{u} = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{k=-n}^{n}\left(\boldsymbol{u}_{nk}^{\mathrm{S}} + \boldsymbol{u}_{nk}^{\mathrm{T}}\right)\exp(\imath k\omega t),$$

$$\boldsymbol{u}_{nk}^{\mathrm{S}} = \begin{pmatrix} U_{nk}(r) \\ V_{nk}(r)\frac{\partial}{\partial\theta} \\ V_{nk}(r)\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\phi} \end{pmatrix} Y_{nk}(\theta,\phi)\,,$$

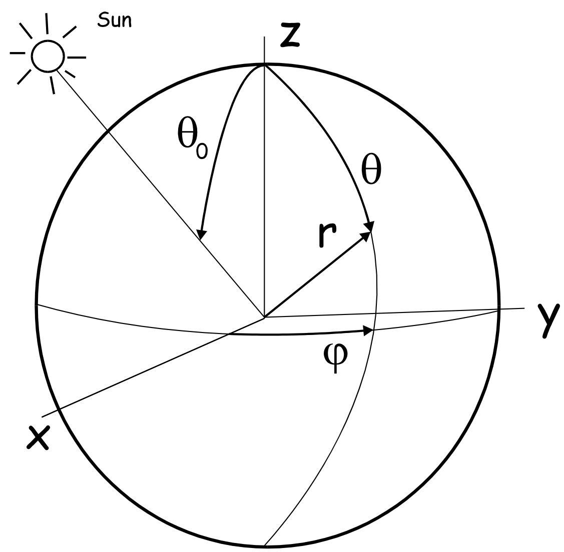
$$\boldsymbol{u}_{nk}^{\mathrm{T}} = W_{nk}(r)\begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\phi} \\ \frac{\partial}{\partial\theta} \end{pmatrix} Y_{nk}(\theta,\phi)$$

- Dosadíme do Duhamel-Neumannovy rovnice a hledáme funkce $U_{nk}(r)$ a $V_{nk}(r)$

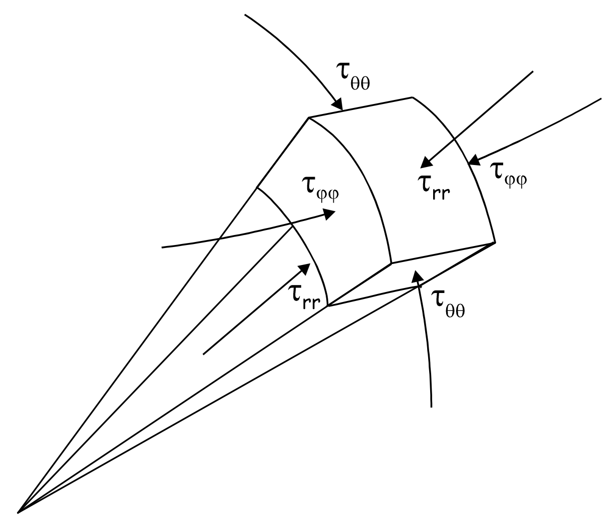
$$\begin{aligned}
&(\lambda+2\mu)\,r^2\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}r^2}U_{nk}(r) + 2(\lambda+2\mu)\,r\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}U_{nk}(r) \\
&\quad -n(n+1)(\lambda+\mu)\,r\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}V_{nk}(r) + n(n+1)(\lambda+3\mu)\,V_{nk}(r) \\
&\quad -\left[2(\lambda+2\mu)+\mu\,n(n+1)-k^2\omega^2r^2\rho\right]U_{nk}(r) \\
&= \alpha\,(3\lambda+2\mu)\,r^2\,\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}T_{nk}(r),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\mu\,r^2\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}r^2}V_{nk}(r) + 2\mu\,r\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}V_{nk}(r) + (\lambda+\mu)\,r\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}U_{nk}(r) \\
&\quad -\left[n(n+1)(\lambda+2\mu)-k^2\omega^2r^2\rho\right]V_{nk}(r) \\
&\quad +2(\lambda+2\mu)\,U_{nk}(r) = \alpha\,(3\lambda+2\mu)\,r\,T_{nk}(r).
\end{aligned}$$

Tenzor (tepelného) napětí



$$\begin{pmatrix} \tau_{rr}, & \tau_{r\theta}, & \tau_{r\phi}, \\ \tau_{r\theta}, & \tau_{\theta\theta}, & \tau_{\theta\phi}, \\ \tau_{r\phi}, & \tau_{\theta\phi}, & \tau_{\phi\phi} \end{pmatrix}$$

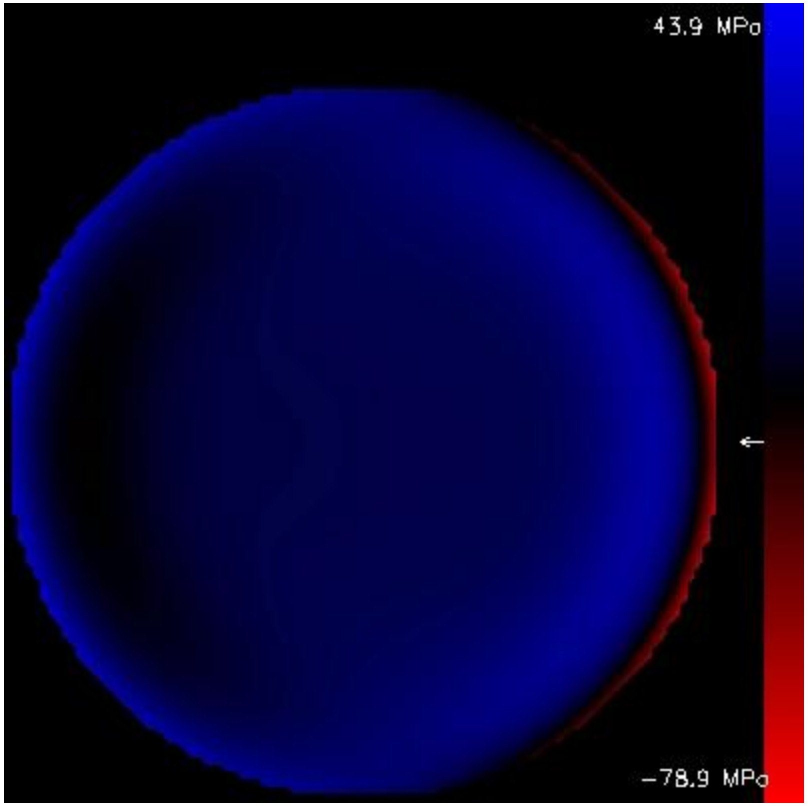


$$\tau_{ij} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=-n}^{n} f_{nk}^{ij}(r) \ \exp(\imath k\omega t)\, Y_{nk}(\theta, \phi)$$

$$f_{nk}^{ij} \sim r^n, \ j_n(z_k)$$

Stopa tenzoru (tepelného) napětí

stopa tenzoru napětí ~ tlak/tah



tah

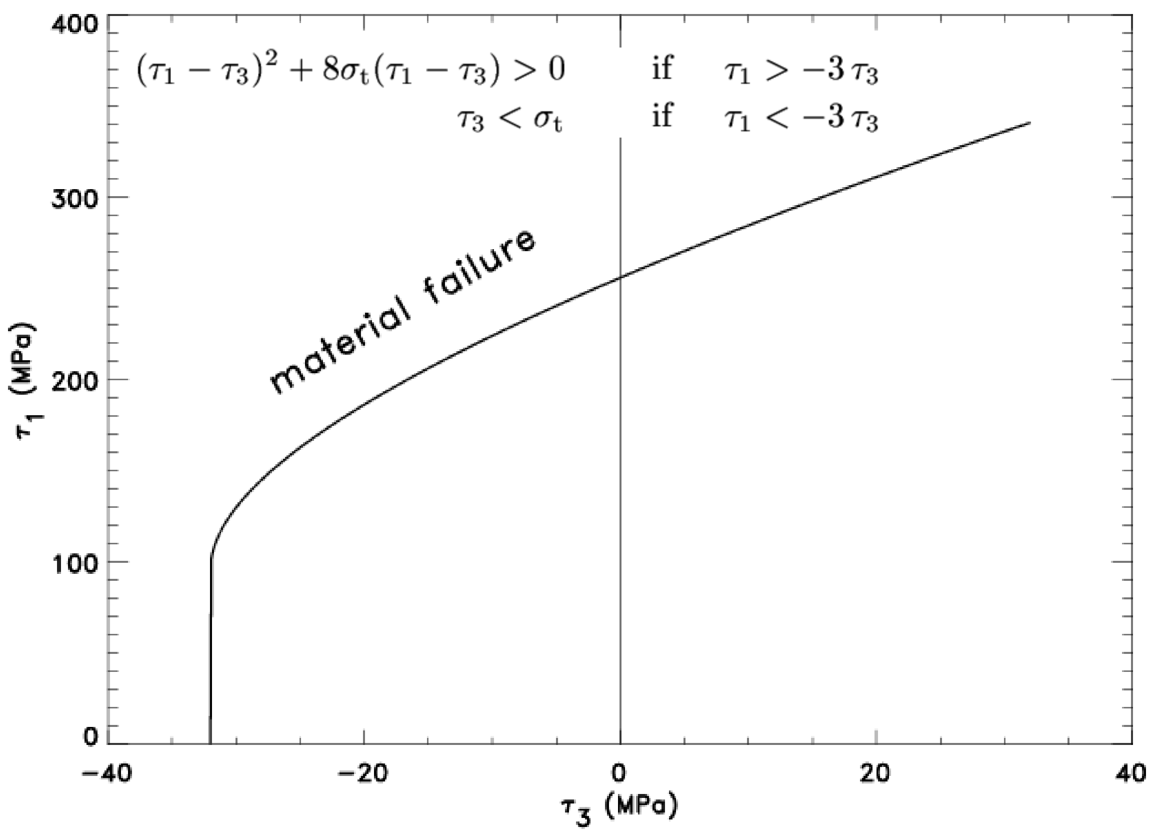
tlak

Podmínka křehkého porušení materiálu: Griffithovo kritérium

$$\begin{pmatrix} \tau_{rr}, & \tau_{r\theta}, & \tau_{r\phi}, \\ \tau_{r\theta}, & \tau_{\theta\theta}, & \tau_{\theta\phi}, \\ \tau_{r\phi}, & \tau_{\theta\phi}, & \tau_{\phi\phi} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \tau_1, & 0, & 0, \\ 0, & \tau_2, & 0, \\ 0, & 0, & \tau_3 \end{pmatrix}, \qquad \tau_1 \geq \tau_2 \geq \tau_3$$

V praxi většinou testujeme:

$$\tau_3 > \sigma_{\mathrm{P}}$$



Materiálové parametry - pokojová teplota

1. Obyčejný chondrit (~ Putulsk H5)

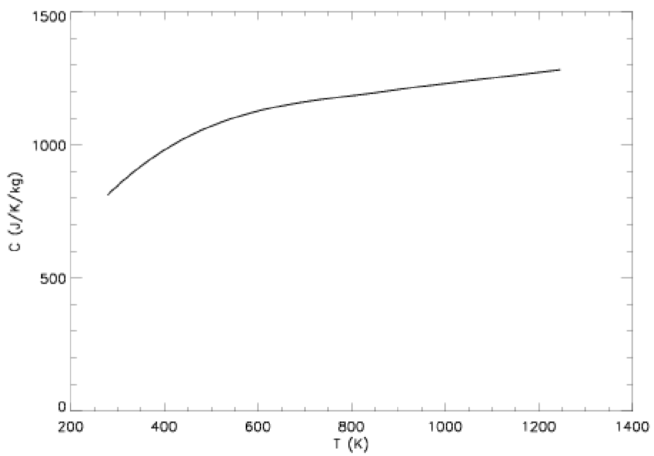
$$\begin{aligned}
\rho &= 3560 \quad \mathrm{kg\,m^{-3}} \\
\lambda &= 36.2 \quad \mathrm{GPa} \\
\mu &= 29.1 \quad \mathrm{GPa} \\
K &= 3.05 \quad \mathrm{W\,m^{-1}K^{-1}} \\
\sigma_{\mathrm{T}} &= -32 \quad \mathrm{MPa} \\
\alpha &= 8.49 \times 10^{-6} \quad \mathrm{K^{-1}} \\
c &= 847 \quad \mathrm{J\,K^{-1}kg^{-1}}
\end{aligned}$$

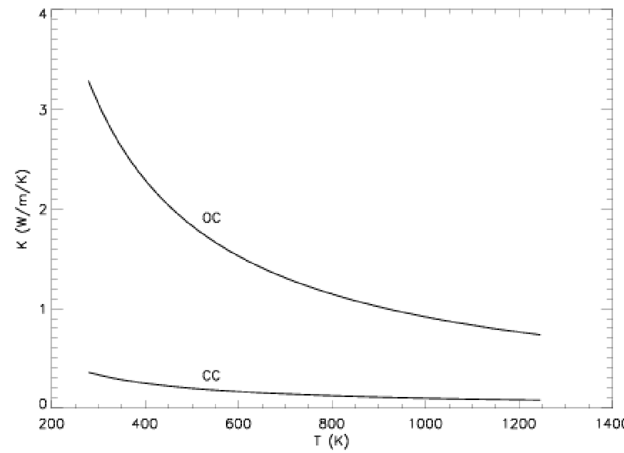
2. Uhlíkatý chondrit (~ Axtell CV3, Cold Bokkeveld CM2)

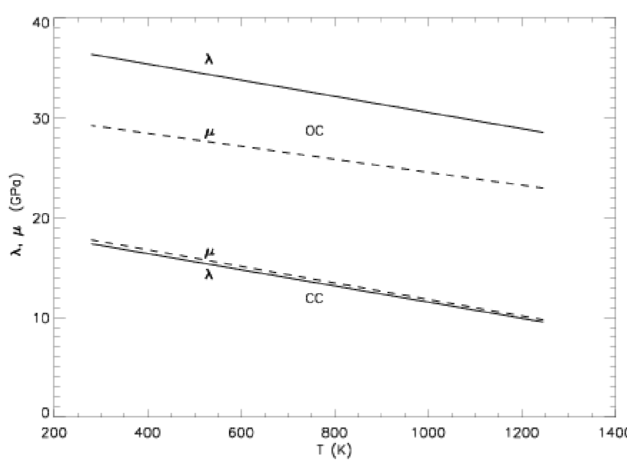
$$\begin{aligned}
\rho &= 2260 \quad \mathrm{kg\,m^{-3}} \\
\lambda &= 17.2 \quad \mathrm{GPa} \\
\mu &= 17.6 \quad \mathrm{GPa} \\
K &= 0.5 \quad \mathrm{W\,m^{-1}K^{-1}} \\
\sigma_{\mathrm{T}} &= -2 \quad \mathrm{MPa} \\
\alpha &= 8.49 \times 10^{-6} \quad \mathrm{K^{-1}} \\
c &= 847 \quad \mathrm{J\,K^{-1}kg^{-1}}
\end{aligned}$$

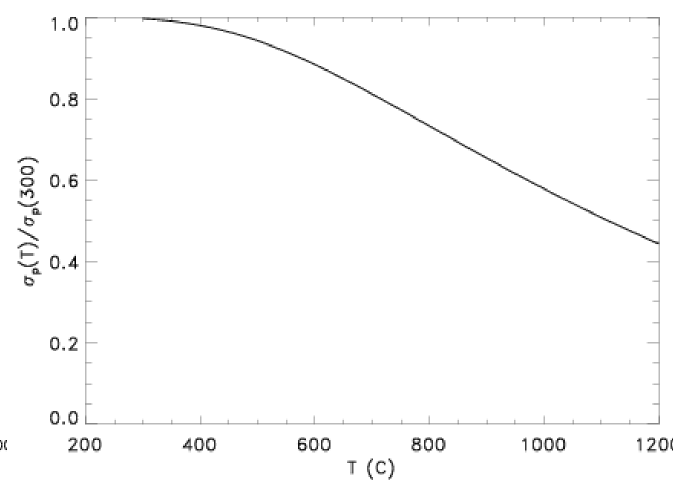
Materiálové parametry – teplotní závislost

1. Obyčejný chondrit (Putulsk H5)
2. Uhlíkatý chondrit (Axtell CV3, Cold Bokkeveld CM2)

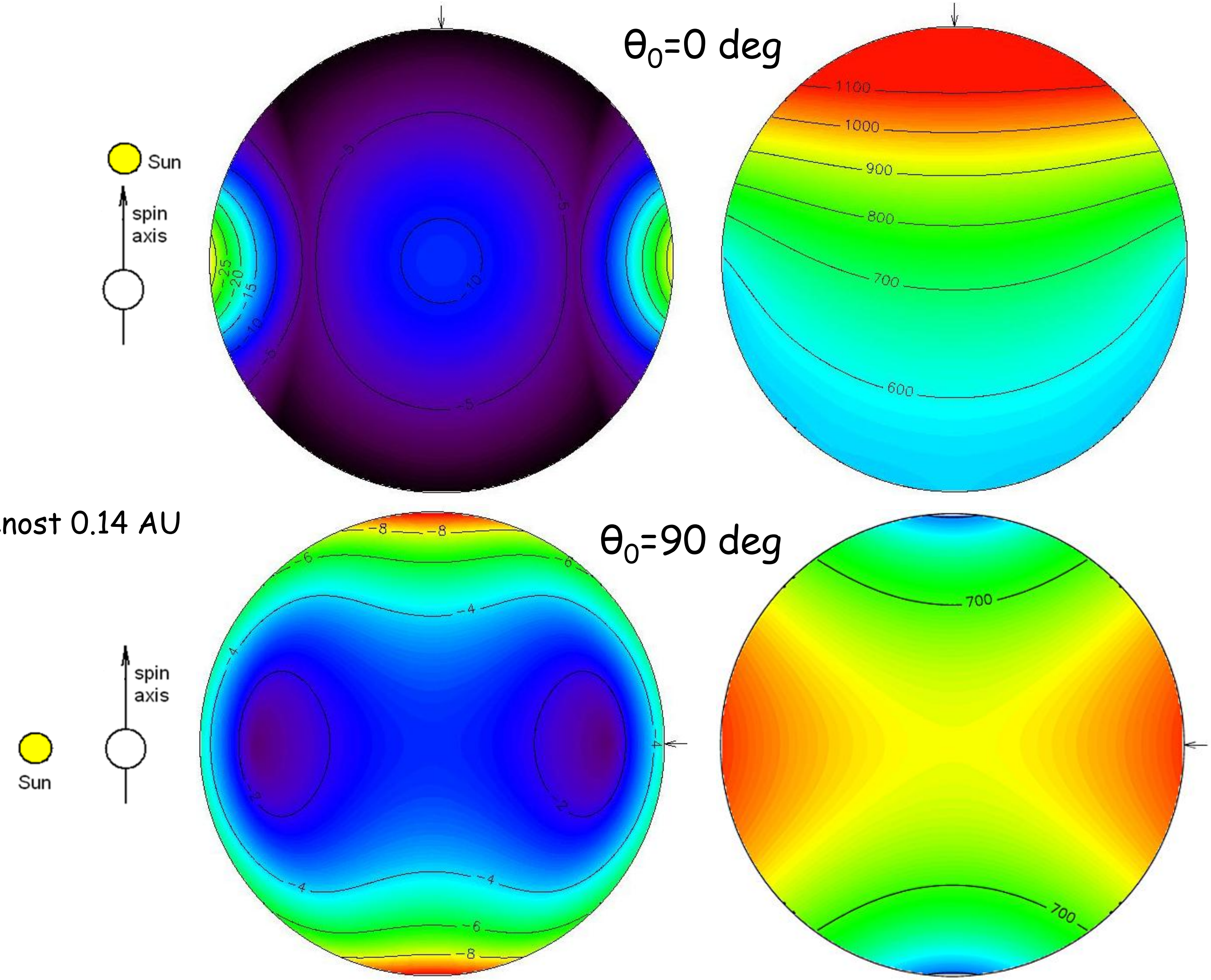








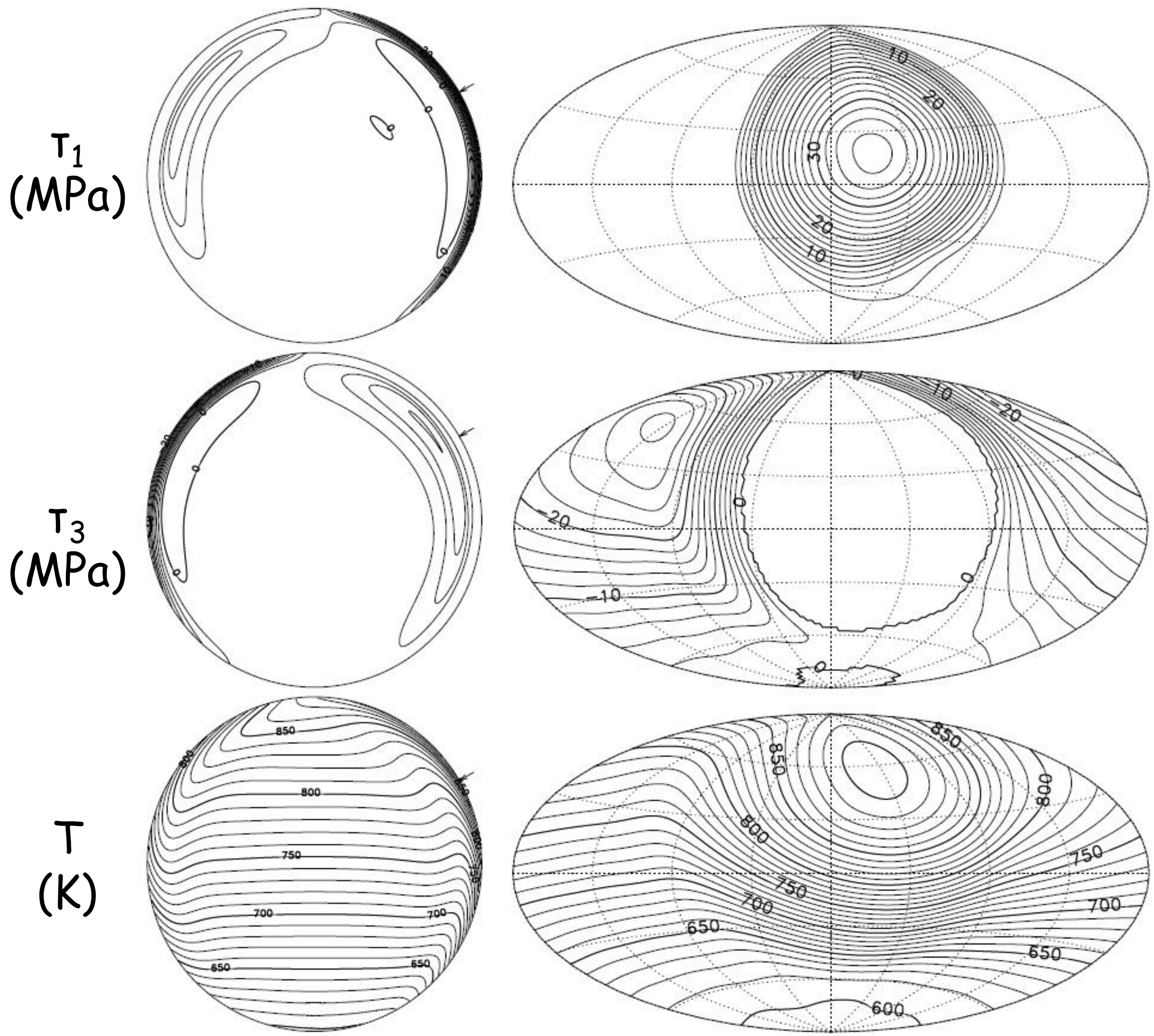
Hlavní napětí τ_3 (MPa) a teplota (K)- poledníkový řez



- uhlíkatý chondrit
- průměr 1 cm
- heliocentr. vzdálenost 0.14 AU

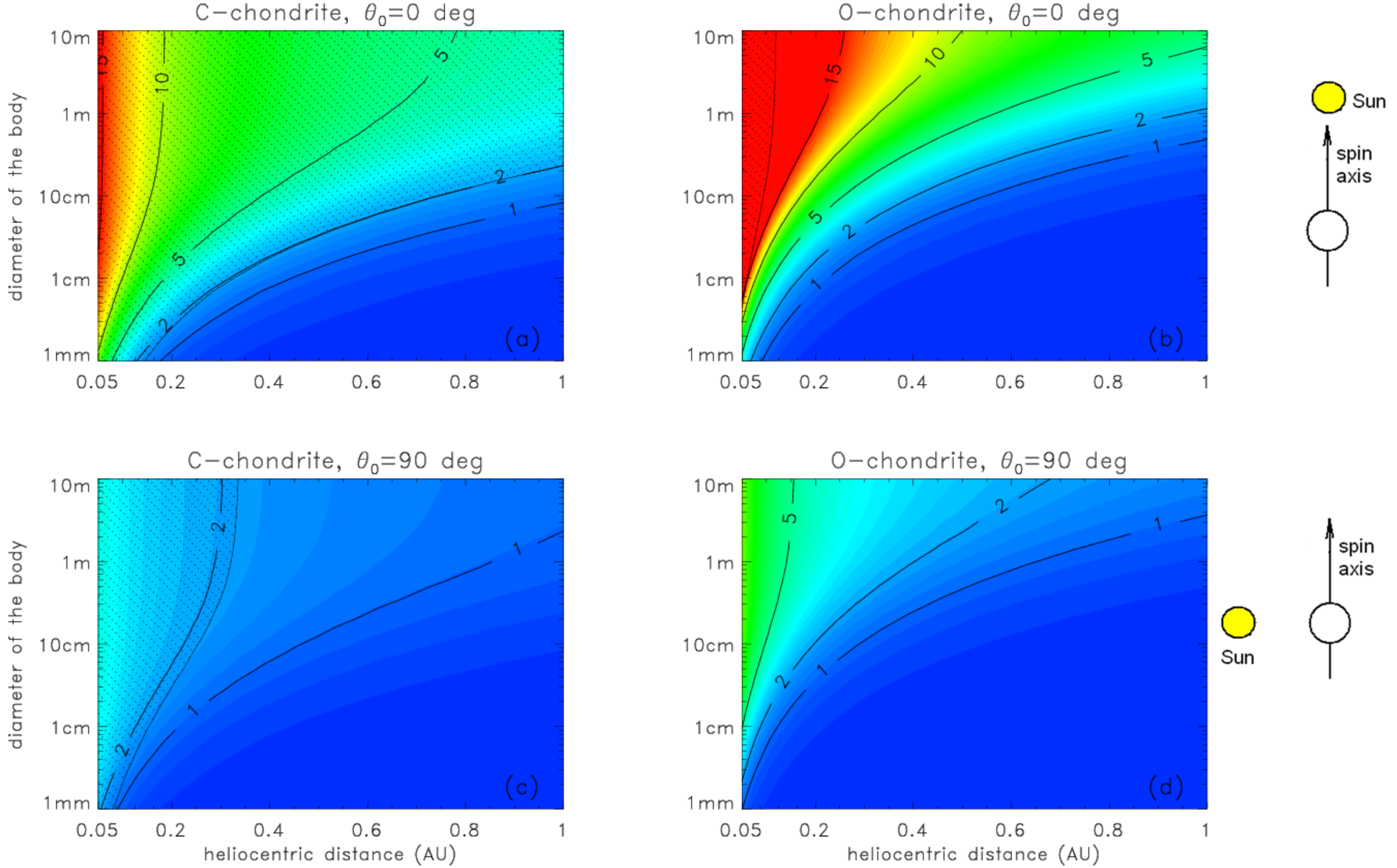
Hlavní napětí a teplota – pomalu rotující meteoroid

- uhlíkatý chondrit
- velikost 1 cm
- f = 0.1 Hz
- 0.14 AU



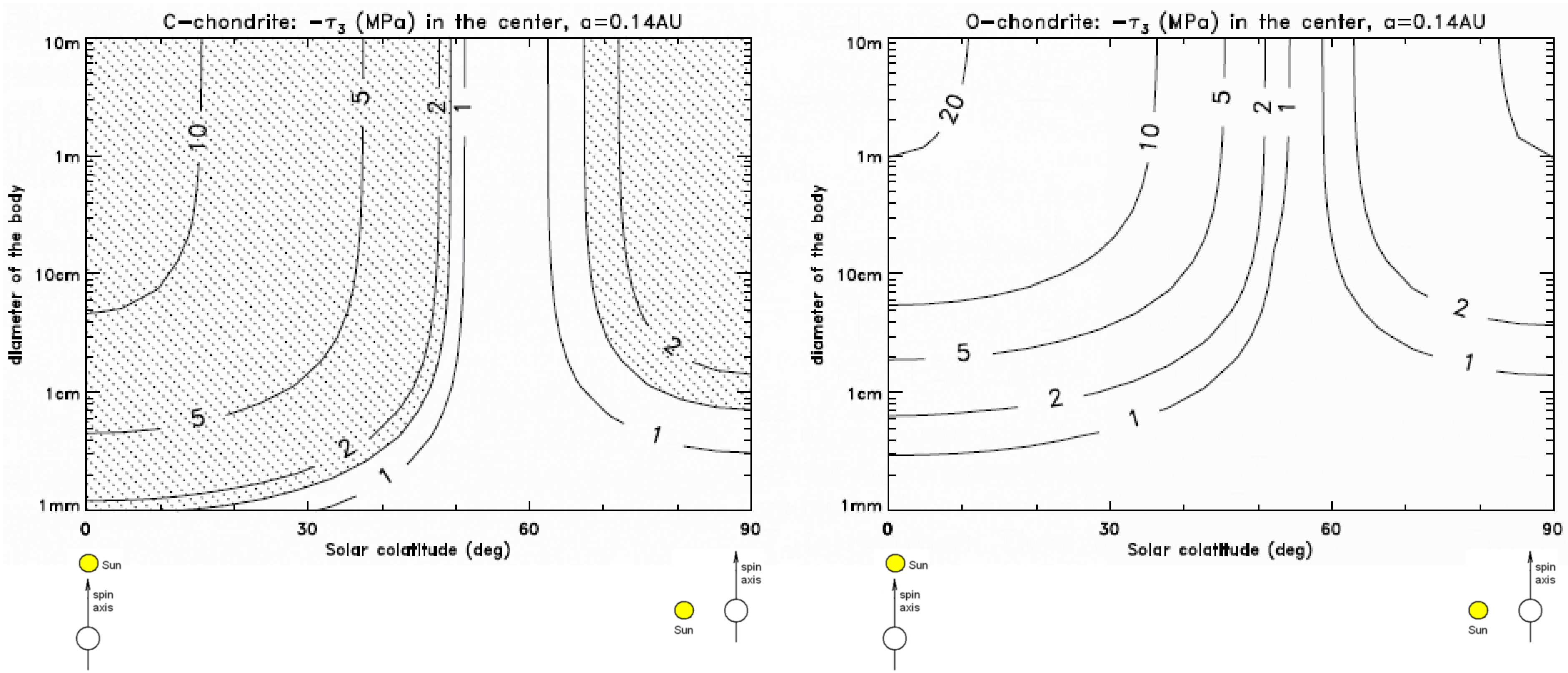
Hlavní napětí τ_3 (MPa) v centru homogenního meteoroidu (heliocentrická vzdálenost – průměr tělesa)

- f(Hz) = 3 / D(m)
- dashed area – break-up due to thermal stress

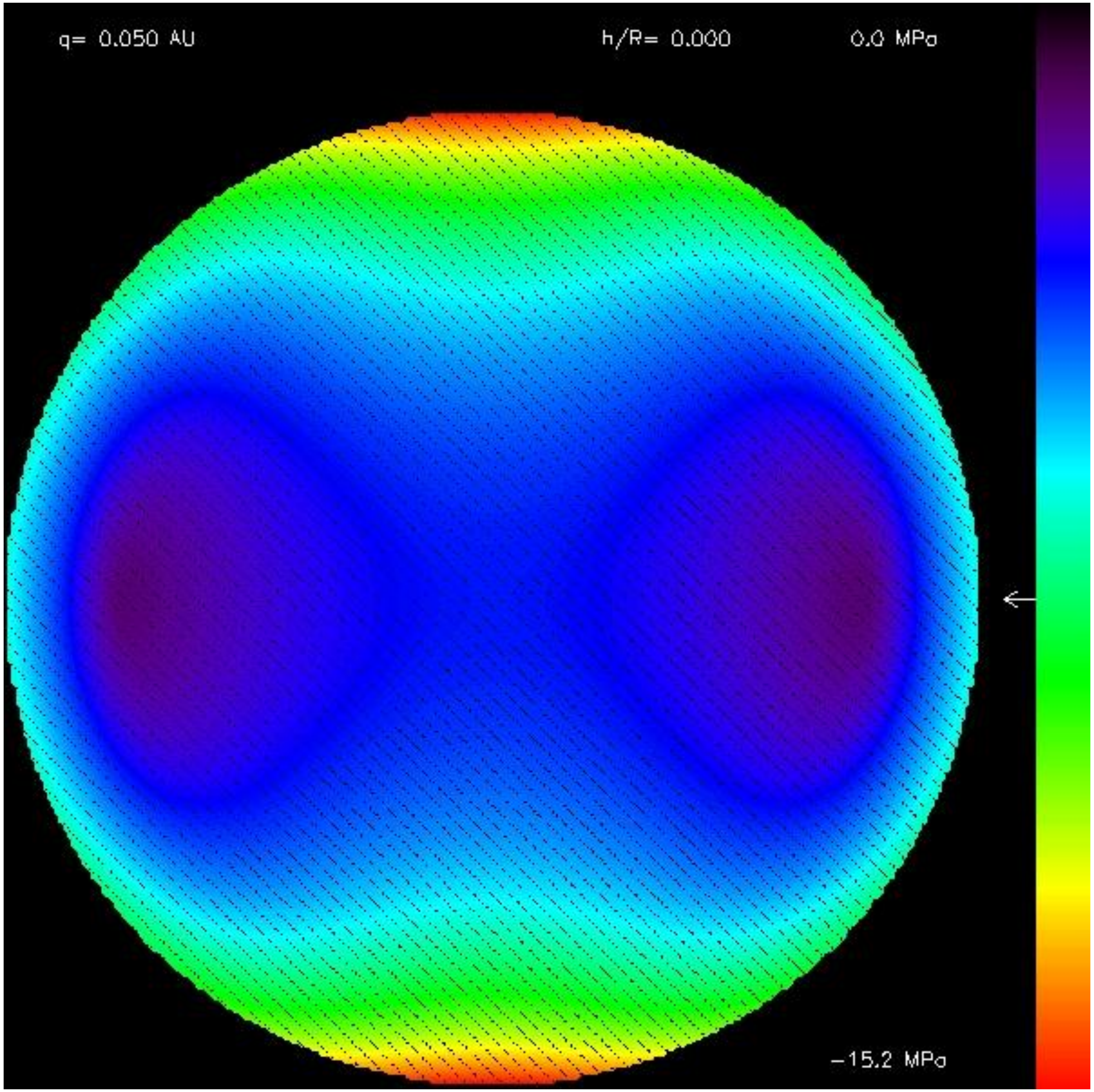


Hlavní napětí τ_3 (MPa) v centru homogenního meteoroidu (výška Slunce – průměr tělesa)

- f(Hz) = 3 / D(m)
- 0.14 AU



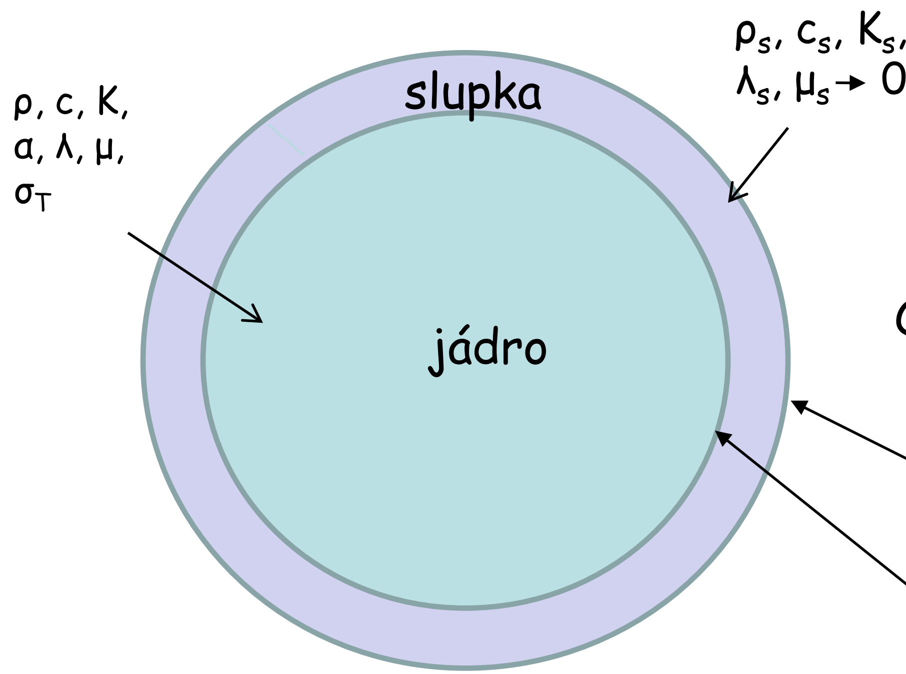
Tepelné napětí a destrukce při pádu ke Slunci, D=10cm



Meteoroid s monolitickým jádrem a rozpukaným povrchem

Jádro: - monolitické

Povrchová slupka: ~ regolit
- nižší tep. vodivost K
- nulové napětí



Okrajové podmínky:

$$K\frac{\partial T}{\partial r} + \epsilon\sigma T^4 = (1-A)\mathcal{E}.$$

$$(T)_{\mathrm{shell}} = (T)_{\mathrm{core}}$$

$$(K\,\nabla T)_{\mathrm{shell}} = (K\,\nabla T)_{\mathrm{core}}$$

$$T_{\mathrm{surf}} \sim r^n,\; r^{-n},\; j_n(z_k),\; y_n(z_k)$$

τ_3 (MPa) a T(K) pro různé šířky povrchové vrstvy

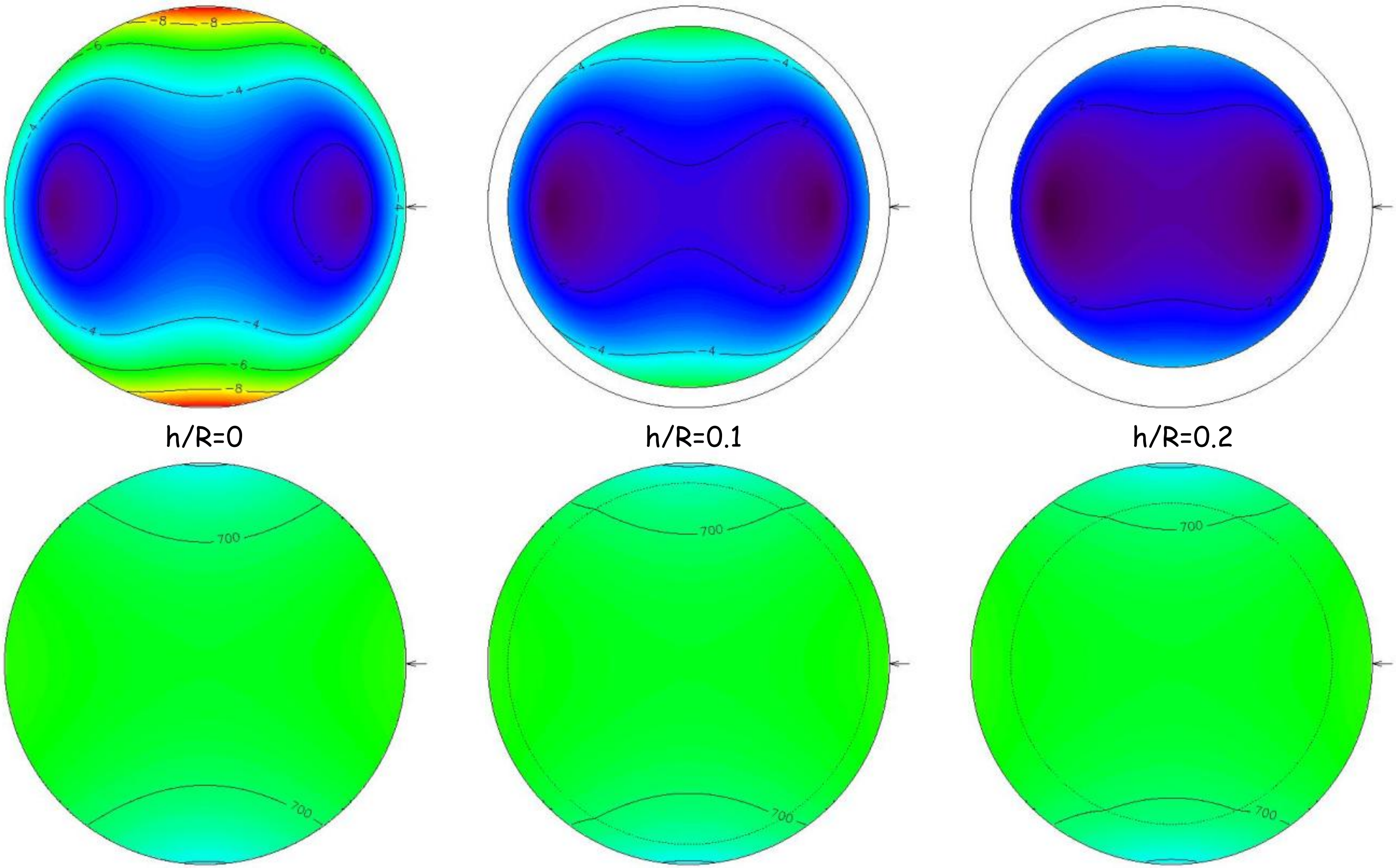
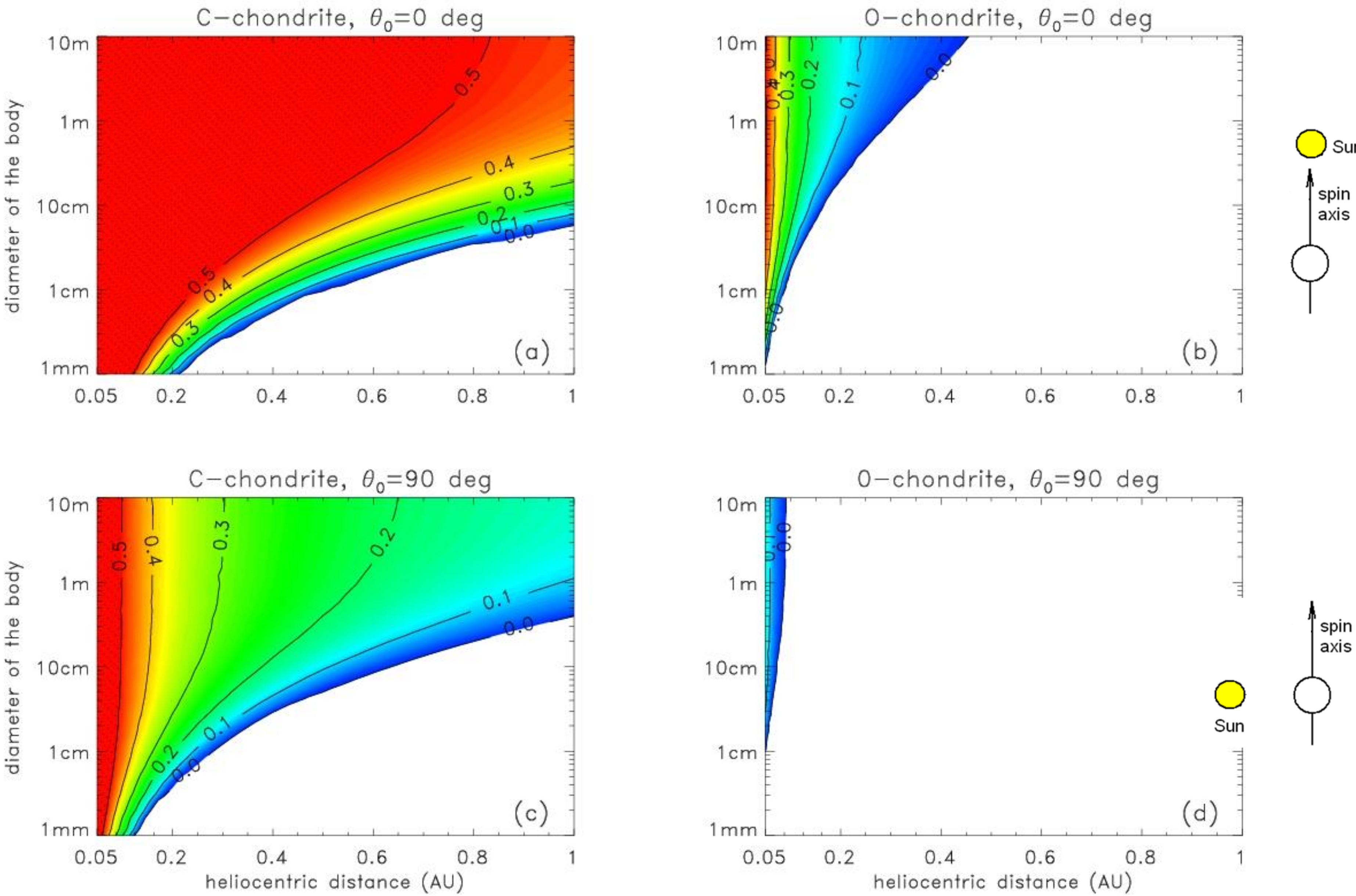
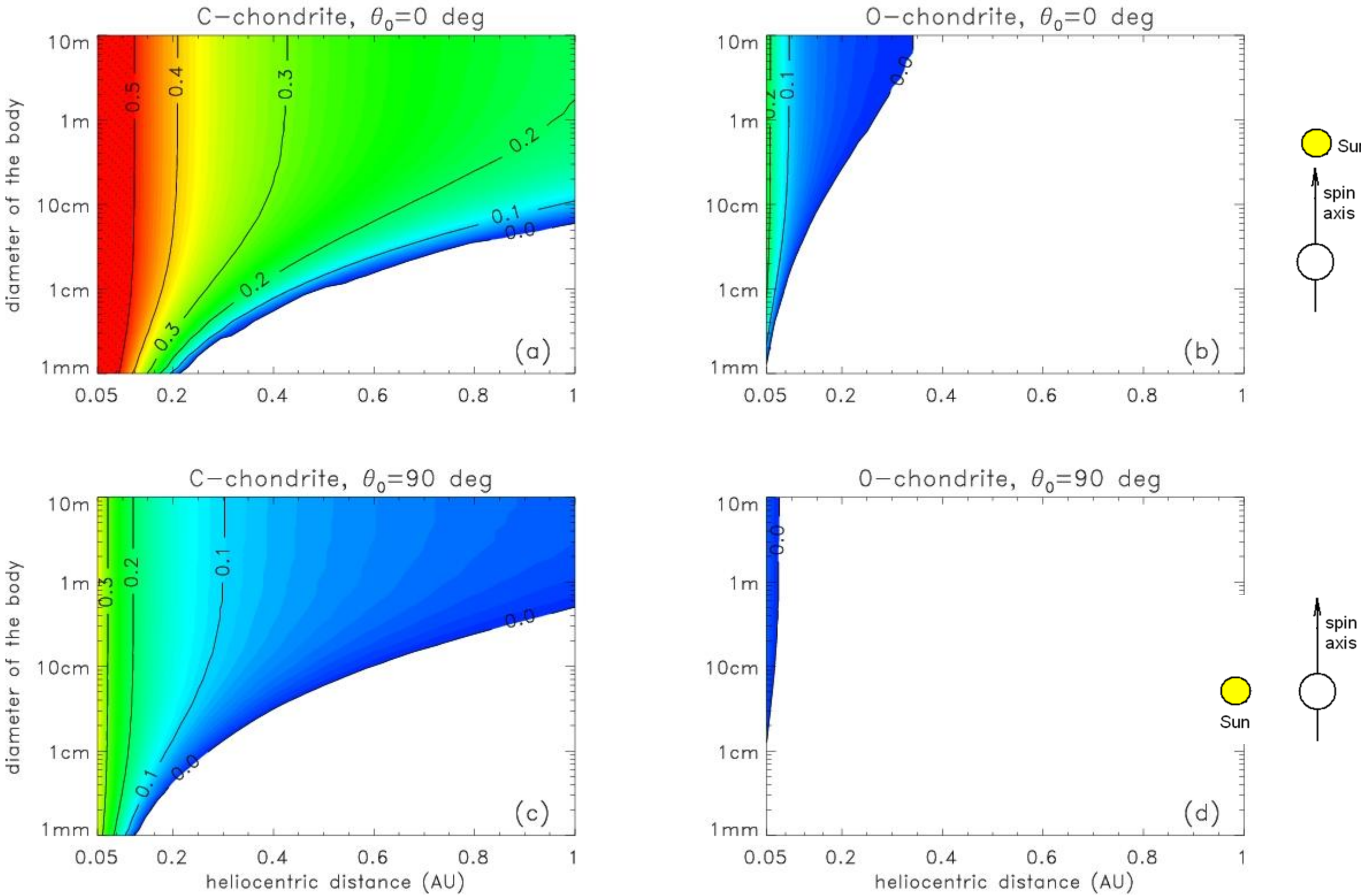


Figure 3: τ_3 (MPa) and T (K) for C-chondrite, $D = 1\,\mathrm{cm}$, r=0.14 AU, $K_{\mathrm{surf}}/K_{\mathrm{core}} = 1/2$, $\theta_0 = 90°$

Šířka povrchové vrstvy (h/R) pro $K_{surf}/K_{core}=1/2$



Šířka povrchové vrstvy (h/R) pro K_{surf}/K_{core}=1/10



Závěr a diskuse

- Destrukce malých meteoroidů v blízkosti Slunce
  - povrch i celý objem
  - větší, křehčí, pomalu rotující, s osou mířící ke Slunci

Možné implikace:

1. Rozdělení velikostí částic v proudech meteoroidů v závislosti na q,…
   (δ-Aquaridy $q = 0.07$, Geminidy $q = 0.14$, Monocerotidy $q = 0.19$)

2. Rozdělení drah a velikostí těles v sporadické populaci

3. Změna materiálových vlastností meteoroidů
   - rozpukání, nižší efektivní pevnost (jedno z možných vysvětlení fragmentace bolidů při nízkých dynamických tlacích?)

Únik sodíku z meteoroidů v blízkosti Slunce

David Čapek a Jiří Borovička

Astronomický ústav AV, Ondřejov,

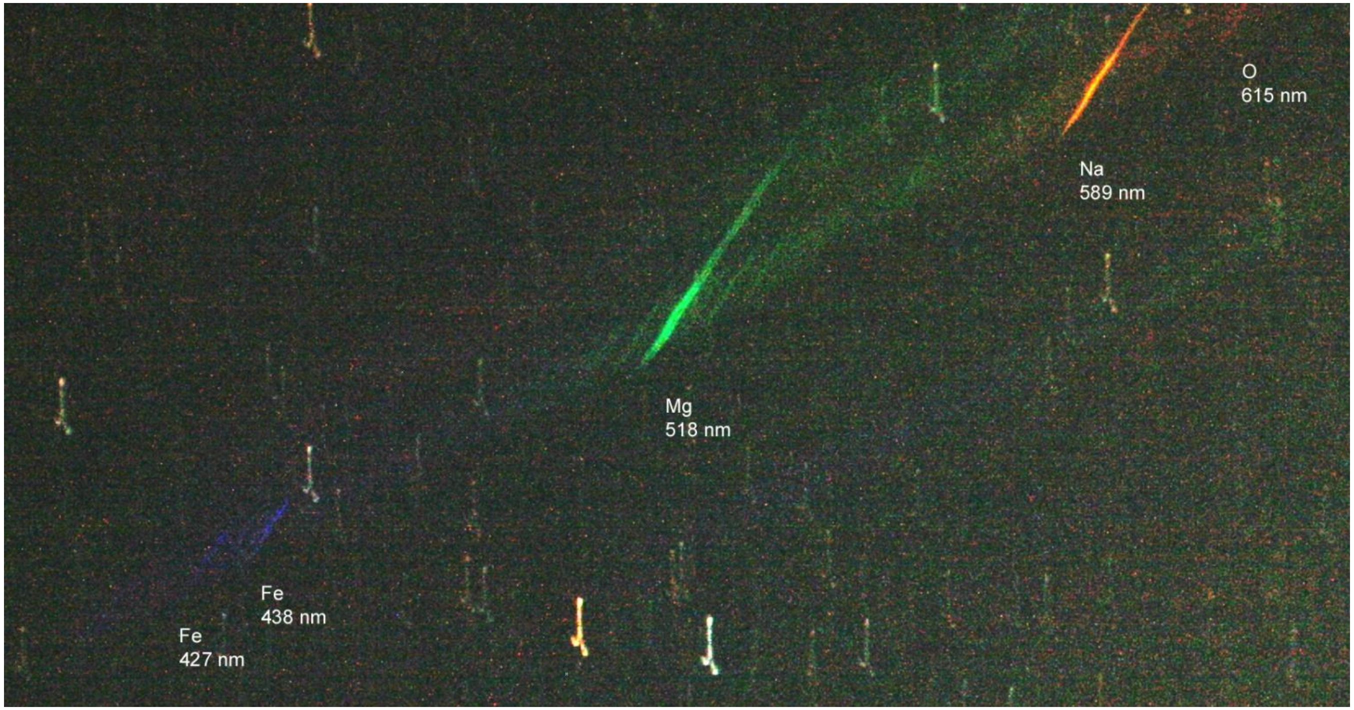
Spektra meteorů

- Většina záření je v emisních čarách materiálu meteoroidu
- Nejjasnější čáry:

  - hořčík Mg

  - sodík Na

  - železo Fe

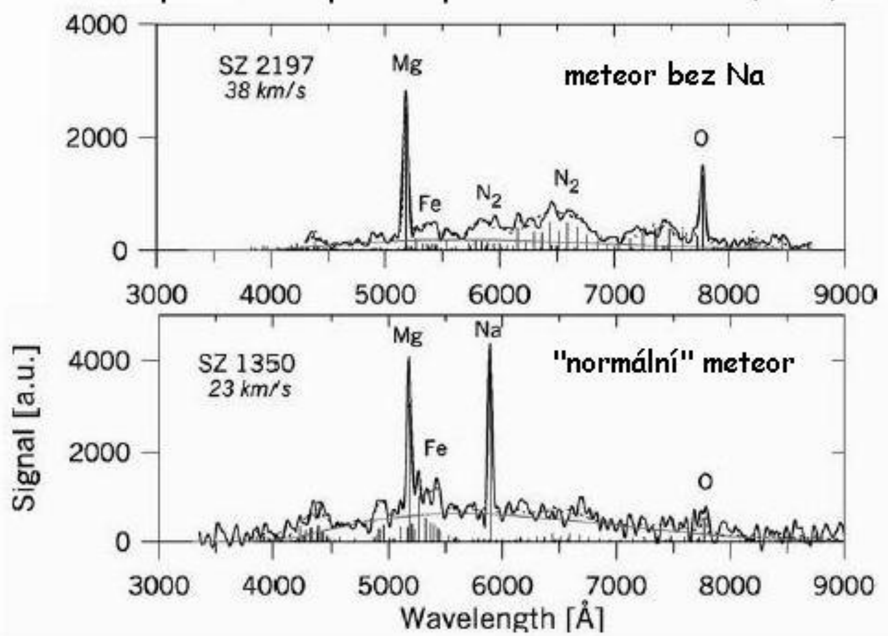


Sporadické meteory ochuzené o Na

(Borovička, Koten, Spurný, Boček, Štork, (2005). Icarus 174... 97 spekter, ~1-10mm)

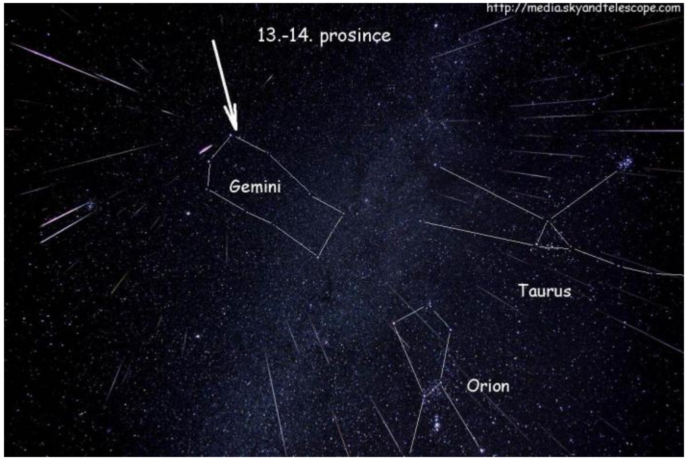
- jen čára Fe ~ Fe-meteoritům
  - ochuzení při magmatické diferenciaci
- dráhy typu Halleyovy komety
  - kosmické záření
- perihelium q<0.2 AU
  - ohřev v blízkosti Slunce

převzato a upraveno podle Borovička et al. (2005)



Ochuzení meteoroidů z roje Geminid o Na

- Geminidy
  - perihelium 0,14AU
  - oběžná perioda 1,5 roku
  - pevnější materiál ()
  - hustota 2.5g/cm^3
  - mateřské těleso: (3200) Phaethon
  - stáří ~ 2000 let



Borovička, (2006): 89 spekter, 1-15mm

- poměry intenzit čas Fe/Mg a Na/Mg
  - 2-10x nižší poměr intenzit Na/Mg vůči chondritickému složení
  - velký rozptyl poměrů intenzit Na/Mg

- vysvětlení:
  1. uvolňování meteoroidů po delší dobu
  2. z různých hloubek Phaethonu
  3. nehomogenita složení na mm škálách

Tři otázky

- pro meteoroidy 1 mm – X cm:

1. Jaké procesy se podílí na úniku Na z Geminid a jsou tyto procesy schopné odstranit Na v pozorovaném množství?
2. Jak vysvětlit pozorovaný rozptyl obsahu Na?
3. Jaké ochuzení o Na i u jiných rojů a sporadických meteorů lze očekávat?

hypotéza: Únik spojený s ohřevem v blízkosti Slunce

- Teplota meteoroidu
- Struktura meteoroidu
- Procesy uvolňování Na

Teplota

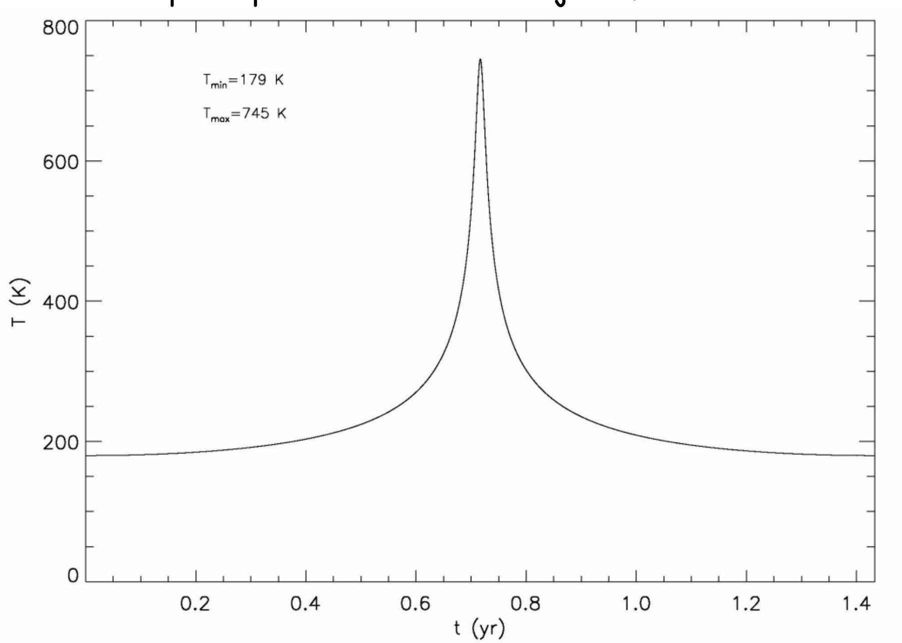
- Sféricky symetrický průběh teploty, δT ~ oběh okolo Slunce

$$\rho\, c\, \frac{\partial T}{\partial t} = K \left(\frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right)$$

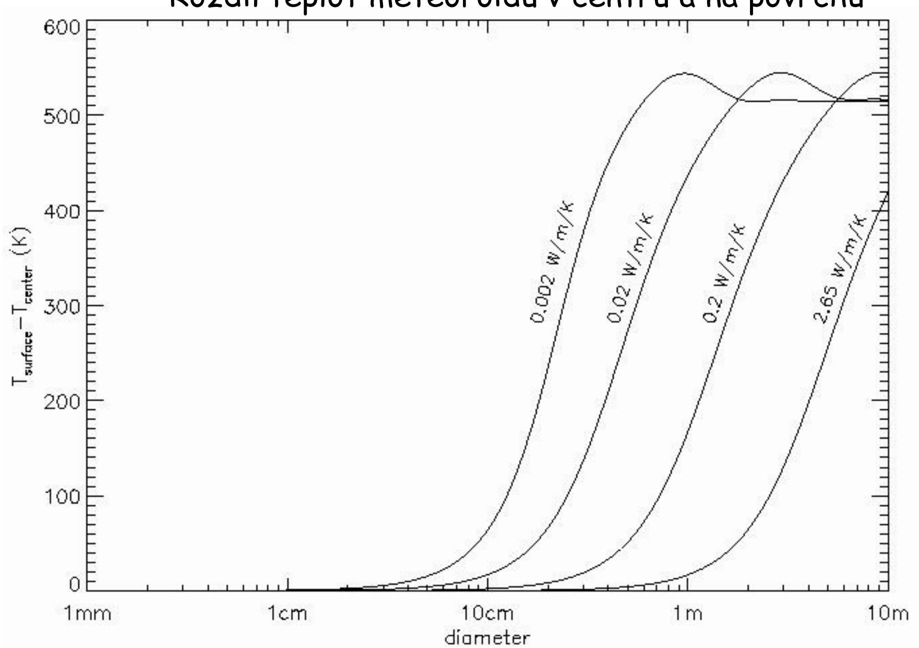
- teploty 179-745K
- tělesa <10cm jsou izotermální
- teplotu lze aproximovat takto:

$$T_{\mathrm{surf}} = \left(\frac{(1-A)\mathcal{E}_0}{4\, \epsilon\, \sigma\, d^2} \right)^{1/4},$$

Teplota povrchu meteoroidu jako funkce času



Rozdíl teplot meteoroidu v centru a na povrchu

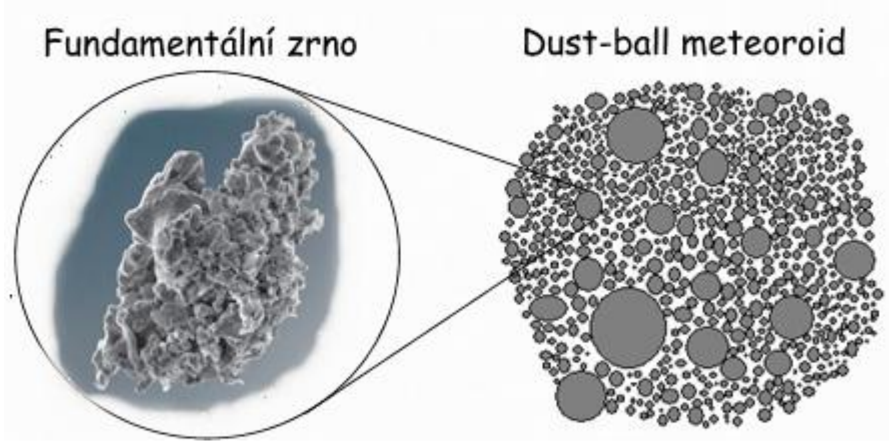


Struktura

- Meteoroid – „prachová koule“, ale i hornina s hustou sítí trhlin

  - kompaktní fundamentální zrna

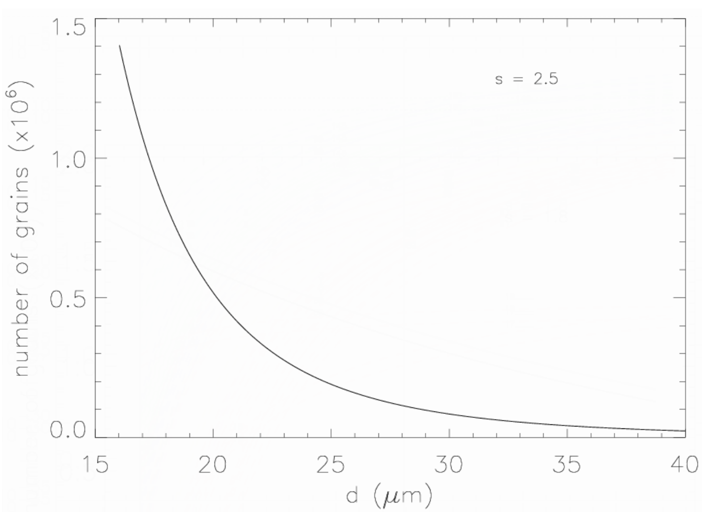
  - systém pórů komunikující s povrchem



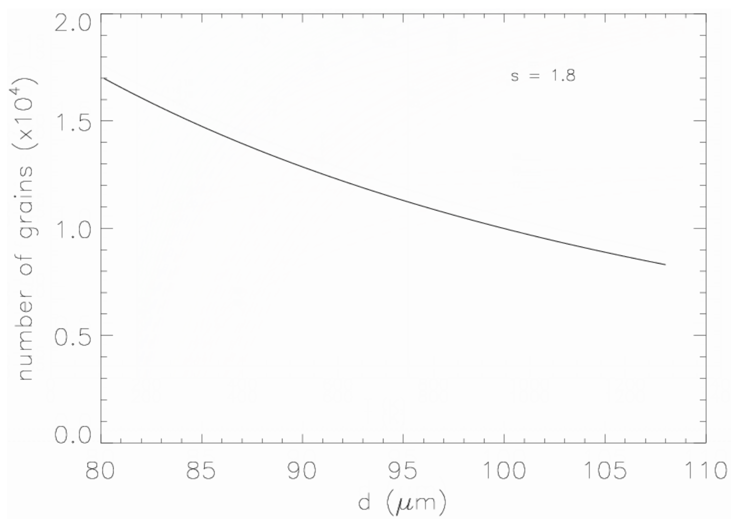
Struktura

- rozdělení velikostí fundamentálních zrn – fitováním modelů eroze meteoroidů na jejich světelné křivky
- parametry d_{min}, d_{max}, s $$dn \propto m^{-s} dm,$$
- Drakonidy, Leonidy: 20-100 μm
- Geminidy, Kvadrantidy: 80-300 μm

„jemnozrnná“ struktura

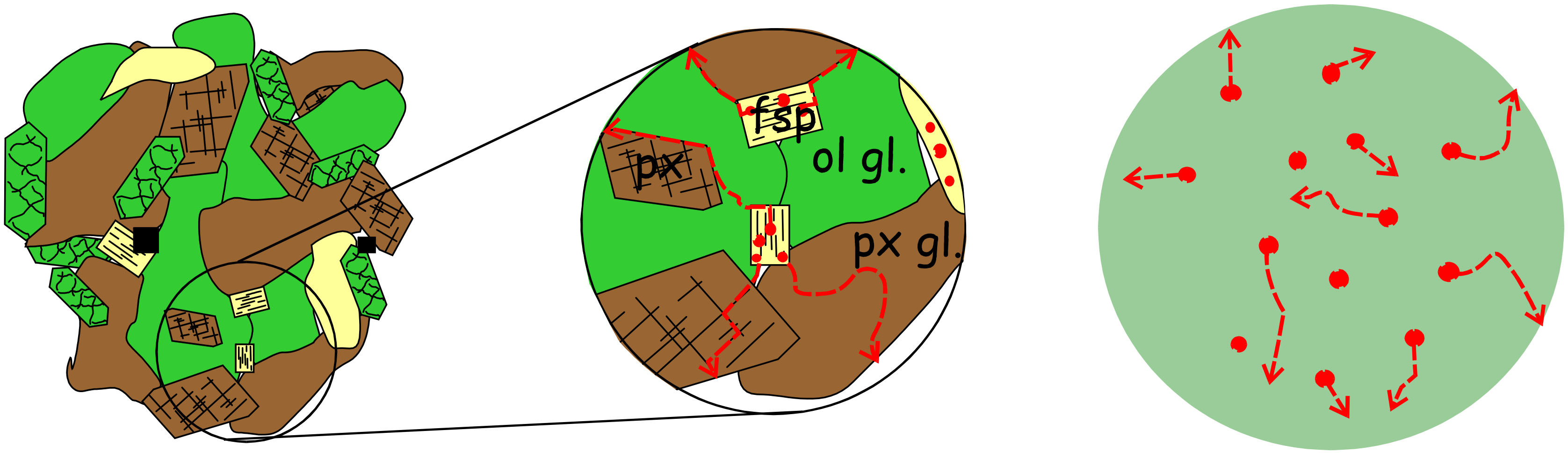


„hrubozrnná“ struktura



Procesy úniku sodíku:
1. Difuze z nitra zrna na jeho povrch

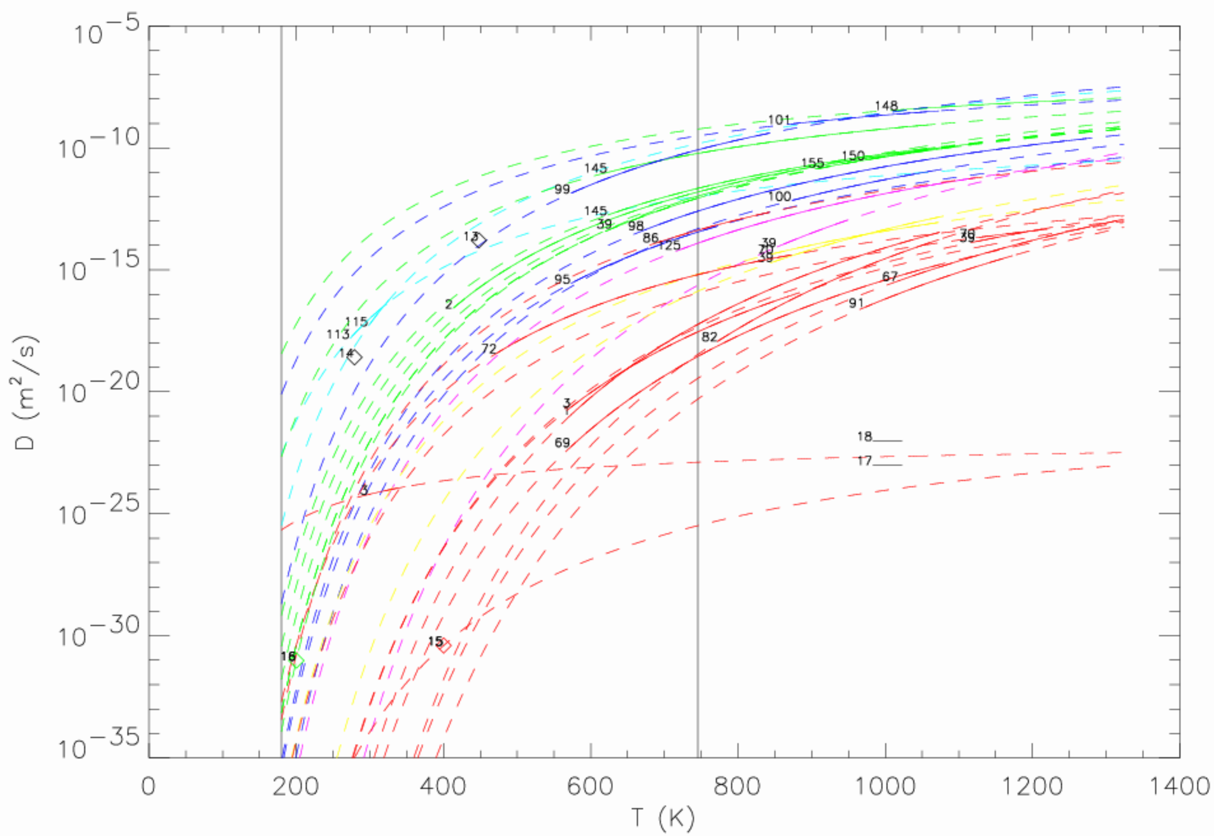
fundamentální zrno | reálná difuze sodíku | idealizované zrno a difuze



- Objemová difuze - přez xx mřížku, díky bodovým defektům (vysokoteplotní)
- Grain-boundary – podél hranic zrn a plošných defektů (nízkoteplotní)
- Difuzní rovnice: $$\frac{\partial C}{\partial t} = D \Delta C.$$

Procesy úniku sodíku:
1. Difuze z nitra zrna na jeho povrch

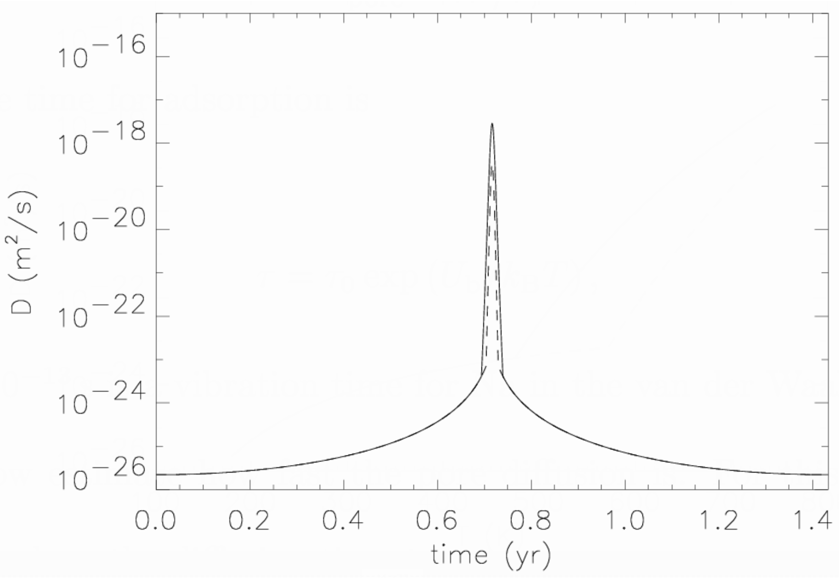
Difuze sodíku v pozemských materiálech

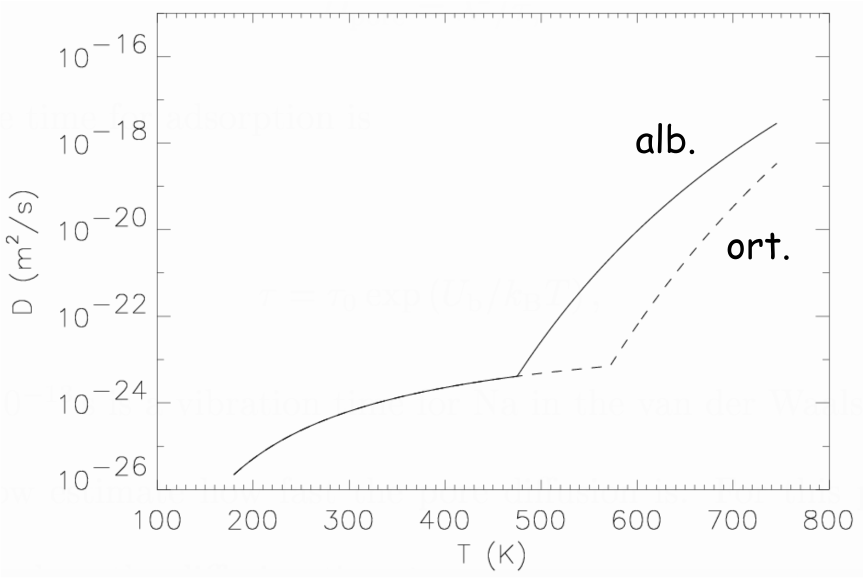


$D_0 (m^2/s)$	Q(kJ/mol)	T_{min}(K)	T_{max}(K)	$D_{char} (m^2/s)$	reference
		analcite $NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$			
1.4×10^{-5}	71.	298	326	1.1×10^{-12}	115
2.35×10^{-9}	48.	273	323	9.7×10^{-15}	113
		rhyolitic, albitic, orthoclasic and basaltic glasses and obsidians			
1.29×10^{-6}	84.5	413	1123	1.0×10^{-14}	Jambon (1982)
5.30×10^{-7}	56.4	623	1068	5.0×10^{-13}	145
8.00×10^{-7}	79.4	623	1068	1.5×10^{-14}	145
5.00×10^{-7}	41.8	1018	1258	6.2×10^{-12}	148
4.40×10^{-6}	95.7	630	758	5.3×10^{-15}	39
2.11×10^{-6}	89.9	918	1103	6.7×10^{-15}	155
4.40×10^{-6}	95.7	973	1073	5.3×10^{-15}	150
		quartz SiO_2			
3.6×10^{-7}	100.	573	773	2.1×10^{-16}	95
3.8×10^{-6}	102.4	673	1273	1.5×10^{-15}	98
6.8×10^{-5}	84.4	573	843	5.5×10^{-13}	99
4.0×10^{-6}	113.	873	1063	2.7×10^{-16}	100
7.1×10^{-7}	48.	873	1073	2.9×10^{-12}	101
		sodalite $Na_8(Al_6Si_6O_{24})Cl_2$			
6.6×10^{-4}	177.7	853	948	1.0×10^{-18}	39
1.2×10^{-6}	114	723	1123	6.8×10^{-17}	125
		nepheline $NaAlSiO_4$			
1.2×10^{-6}	142.1	849	1073	6.4×10^{-19}	39
6.0×10^{-9}	99.3	849	1073	3.9×10^{-18}	70
		albite $NaAlSi_3O_8$			
1.25×10^{-5}	176.	573	1073	2.5×10^{-20}	Yund (1983)
1.22×10^{-7}	149.	1123	1213	2.1×10^{-20}	39
2.31×10^{-10}	79.4	473	873	4.3×10^{-18}	72
5.70×10^{-7}	175.6	573	1073	1.2×10^{-21}	69
1.0×10^{-22}	12.6	298	348	4.8×10^{-25}	Bailey (1971)
5.3×10^{-8}	146.5	573	868	1.4×10^{-20}	Bailey (1971)
6.0×10^{-10}	96.0	1123	1213	6.8×10^{-19}	70
		orthoclase $KAlSi_3O_8$			
8.90×10^{-4}	220.0	773	1073	1.3×10^{-21}	Foland (1974)
3.0×10^{-5}	213.0	1018	1324	1.4×10^{-22}	67

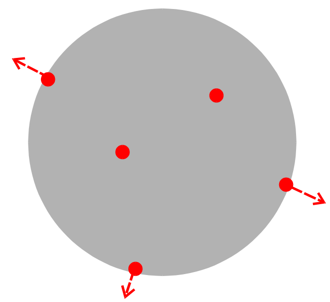
Procesy úniku sodíku:
1. Difuze z nitra zrna na jeho povrch

Difuze probíhá pouze v okolí perihelu, pak „zamrzá“





Procesy úniku sodíku:
2. Tepelná desorpce z povrchu zrna do systému pórů



- Atom Na na povrchu obdrží dostatečnou energii k uvolnění z mřížky prostřednictvím tepelných vibrací sousedních atomů

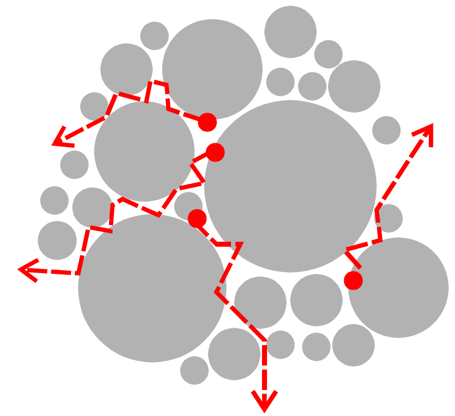
- Rychlost desorpce (tok) Na atomů:

$$R_{vap} = c_{surf}\, \sigma\, \nu_0 \exp\left(-U/kT \right),$$

$\nu_0 = 10^{13}$ Hz, U = 1.85 eV (Yakshinskiy et al., 2000), $\sigma = 1{,}9 \times 10^{19}$ atomů/m^2,

- Okrajová podmínka na povrchu zrna:
  1. $D\nabla C_{surf} = - R_{vap}$… „Fourierova okrajová podmínka“
  2. $C_{surf} = 0$ …tepelná desorpce je okamžitá!

Procesy úniku sodíku:
3. Difuze systémem pórů a únik do prostoru



- Popis difuzní rovnicí, difuzní koeficient:

$$D_{\mathrm{pore}} = \lambda^2/\tau,$$

- Pomalejší v jemnozrných meteoroidech,

- Difuze Na v zrnech, nebo v pórech?
  - V pórech: $p = 3\%$, $d_{grain} = 18\mu m$, $\lambda = 6\mu m$

ϕ meteoroidu	10cm	1cm	1mm
t_{dif} (s)	10^9	10^7	10^5

  - V zrnech: 18μm albit. zrno… $t_{dif} = 10^9$ s

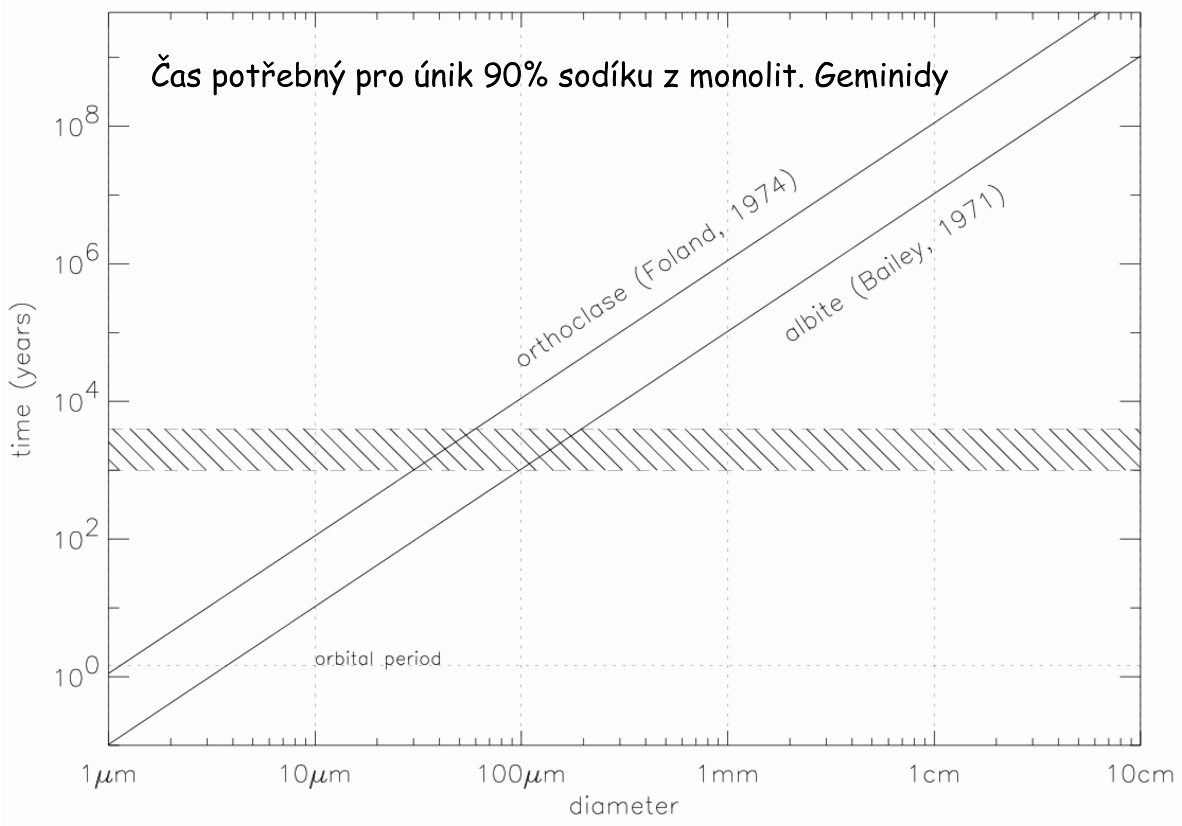
- Geminidy < 10cm… čas pro difuzi v pórech << difuzní čas pro zrna

Difuze v pórech je „okamžitá“

Geminidy – monolitická tělesa?

- Únik 90% z původního obsahu Na je možný pro
  - ortoklas: ϕd < 30-60 μm
  - albit: ϕd < 100-200 μm

- Podstatný únik Na pro těleso ~ mm-cm… **NE!**



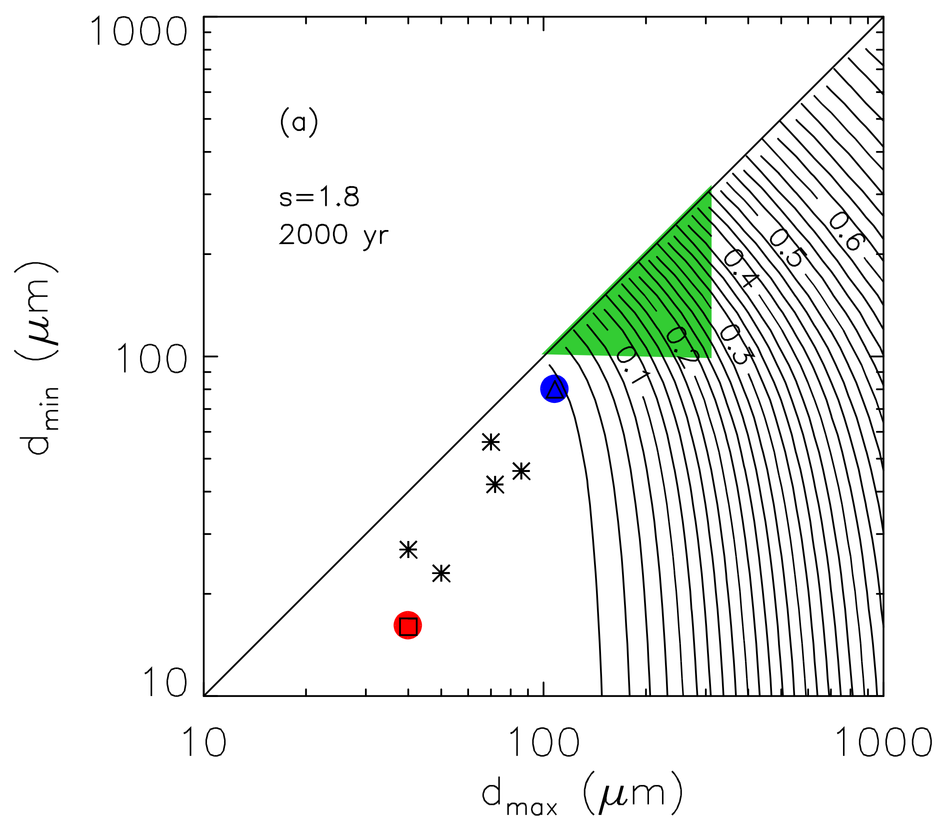
Geminidy – prachové koule

- Pro rychlejší difuzi (albit)
- Stáří 2000 let

- Zrnitost Drakonid (16-108 μm):
  - Téměř bez Na

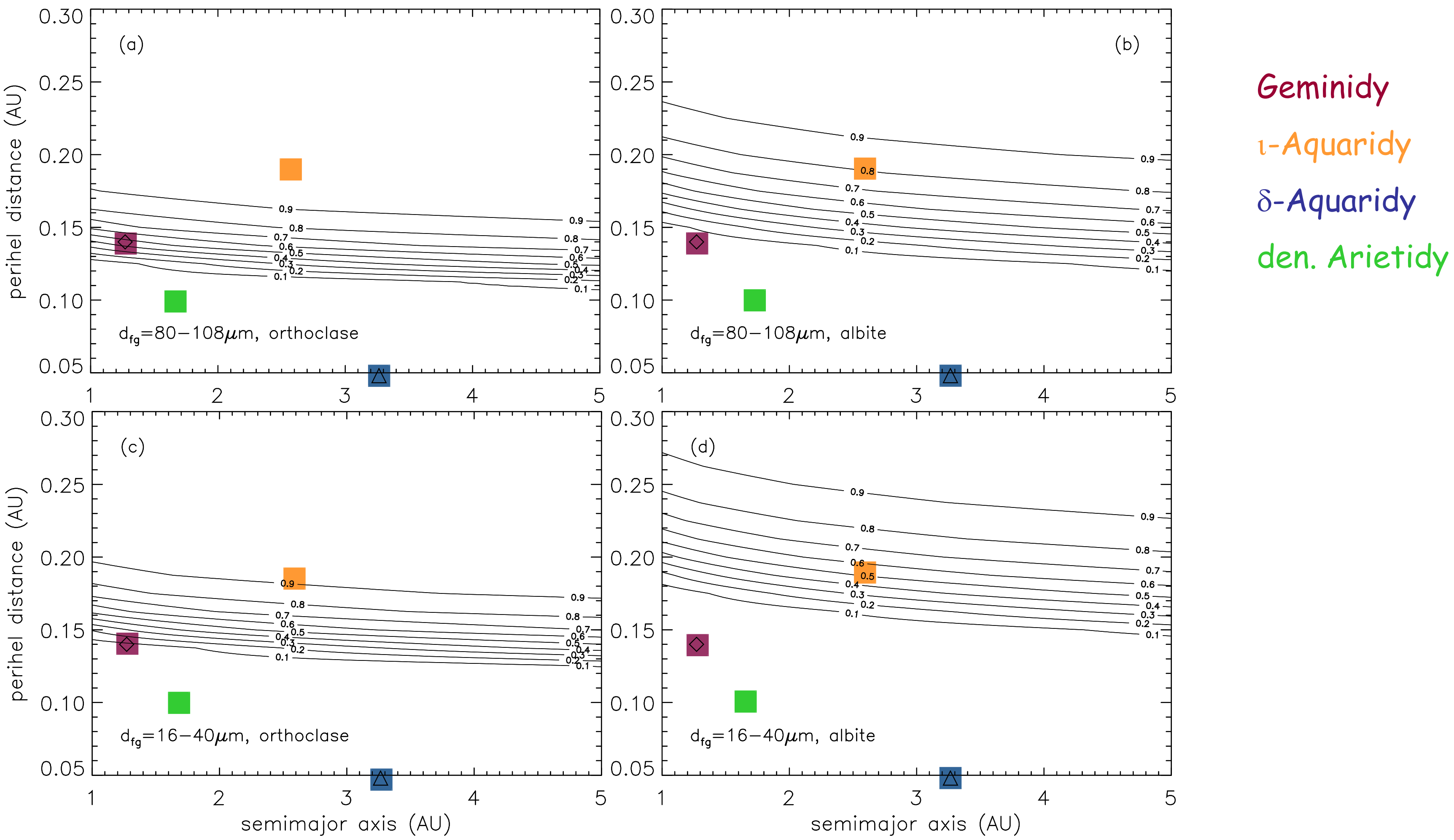
- Zrnitosti Gem. (100-300 μm):
  - C(t)/C(0) odpovídá pozorování

Poměr obsahu Na / počáteční hodnotě (ALBIT)



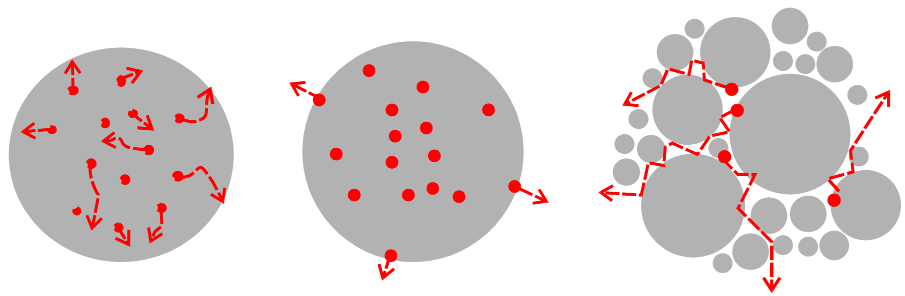
Jiné roje

Obsah Na pro stáří 2000 let - závislost na **q** a **a**



Závěr

1. Procesy vedoucí k ochuzení Geminid o Na:
   - difuze z fundamentálních zrn
   - tepelná desorpce z povrchu zrn
   - difuze systémem pórů meteoroidu



   - 2000 let, 100-300 μm, D~albitu... obsah Na – konzistentní s pozorováním

2. Variace obsahu Na u Geminid ~ různé zrnitosti jednotlivých meteoroidů.

3. Ztrátu Na lze očekávat u meteoroidů, které mají:
   - ↓q (vysoká teplota),
   - ↓a (vysoká frekvence návratů),
   - ↑stáří
   - ↓ zrnitosti (rozdělení velikostí fundamentálních zrn)
   - složení (difuzní model)

   - <u>nezávisí</u> na velikosti meteoroidu (< ~10cm)

Otázky do testu - příklady

- Ve kterém typu meteoritů budou nejlépe patrné chondry?

  a) LL5 b) H3 c) L6
- Widmanstättenovy obrazce se objevují v

  a) oktaedritech b) hexaedritech c) ataxitech
- Eucrity patří mezi

  a) nediferencované meteority b) primitivní achonrity c) diferencované achondrity
- Jmenujte dva hlavní minerály železných meteoritů
- Měřením obsahu prvků vzniklých interakcí kosmického záření s materiálem meteoritu lze určit:

  a) stáří meteoritu b) preatmosferickou velikost meteoroidu
- Který prvek **nelze** použít pro určování stáří meteoritů?

  a) ^{14}C b) ^{87}Sr c) ^{187}Os
- Běžné meteority dopadají na zemský povrch zpravidla rychlostmi

  a) <10m/s c) 10-100m/s d)100-1000m/s e) >1000m/s
- Jak se označuje část trajektorie meteoroidu v ovzduší po skončení ablace?
- Ochuzení meteoroidů s malým perihelem o sodík je způsobeno

  a) vysokou teplotou b) kosmickým zářením