

Meteority, meteory, meteoroidy II.

David Čapek

capek@asu.cas.cz

Astronomický ústav AV, Ondřejov

Osnova:

1. Určování stáří meteoritů
2. Nálezy, pády, meteority s rodokmenem
3. Základní pojmy z fyziky meteorů
4. Materiál meteoroidů

Literatura, zdroje informací:

- <http://petrol.natur.cuni.cz/~janousek/izokurz/index.html>
 - přednáška Izotopová geochemie a geochronologie
 - skripta Košler, Jelínek, Pačesová: Základy izotopové geochemie a geochronologie
- Z. Ceplecha, J. Borovička, W.G. Elford, D.O. ReVelle, R.L. Hawkes, V. Porubčan and M. Šimek, Meteor phenomena and bodies, *Space Sci. Rev.* **84** (1998), pp. 327-471
- O. Eugster, G.F. Herzog, K. Marti and M.W. Caffee, Irradiation records, cosmic-ray exposure ages, and transfer times of meteorites. In: D.S. Lauretta and H.Y. McSween Jr., Editors, *Meteorites and the Early Solar System II*, University of Arizona Press, Tucson (2006), pp. 829-851.
- A.J.T. Jull, Terrestrial ages of meteorites. In: D.S. Lauretta and H.Y. McSween Jr., Editors, *Meteorites and the Earth Solar System II*, University of Arizona Press, Tucson, Arizona (2006), pp. 889-905.

1

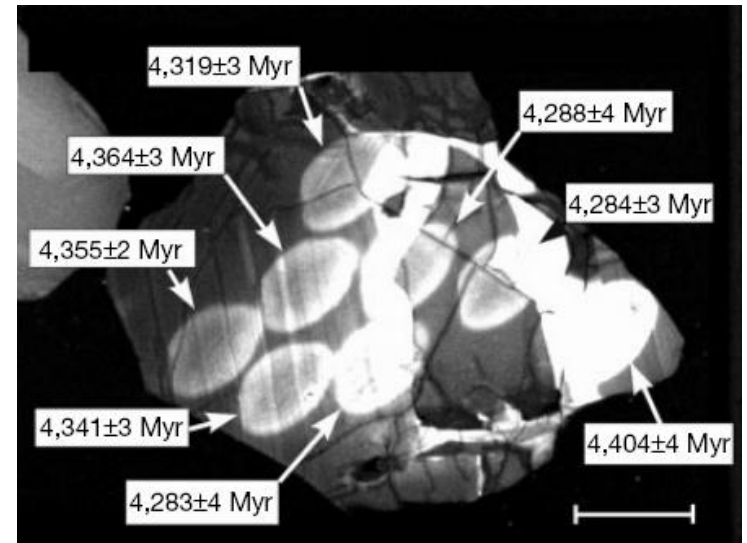
Nejstarší horniny

Nejstarší hornina ČR: světlická ortorula - 2.1 Gyr

Nejstarší horniny na Zemi: acastská rula (Acasta gneiss, Kanada) - 4.031 ± 0.003 Gyr

Nejstarší pozemská materiál: zirkon z Jack Hills (Austrálie) - 4.404 ± 0.008 Gyr

Stáří sluneční soustavy ~ stáří nediferencovaných meteoritů (chondritů)

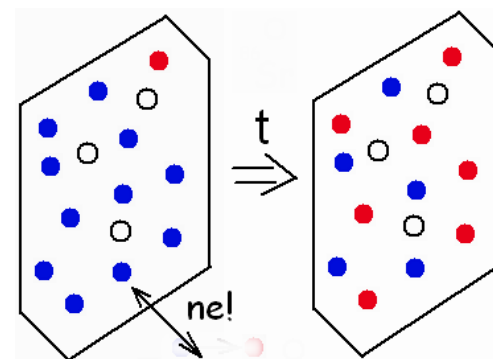


nejstarší pozemský materiál - zirkon z Allan Hills

Radiometrické určování stáří meteoritů

- **Princip:** Měření poměrů radioaktivní izotopů a dceřinných (radiogenních) izotopů.

- **Stáří meteoritu** - čas od kterého se daný vzorek chová jako izolovaný systém (neprobíhá výměna izotopů s okolím). Zpravidla se datuje pokles pod „blokuující teplotu“. Lze datovat i metamorfní události.



- **blokuující teplota** (pro daný minerál a daný prvek)
= teplota pod kterou již nedochází k výměně daného prvku s okolím (difuzí) a minerál se stává pro tento prvek uzavřeným systémem.

difuzní koeficient $D = D_0 \exp(-E/kT)$

radioaktivní izotop	dceřiný (radiogenní) izotop	poločas rozpadu (Gyr)
^{40}K	^{40}Ar	1.25
^{87}Rb	^{87}Sr	48.8
^{147}Sm	^{143}Nd	106
^{176}Lu	^{176}Hf	35.9
^{187}Re	^{187}Os	43
^{232}Th	^{208}Pb	14
^{235}U	^{207}Pb	0.704
^{238}U	^{206}Pb	4.47

Radiometrické určování stáří meteoritů

Příklad:

Metoda ^{87}Rb - ^{87}Sr (rozpad β^-), $T_{1/2} = 48.813 \times 10^9$ let

- počet atomů radioaktivního izotopu ^{87}Rb v čase t

$$(^{87}\text{Rb})_t = (^{87}\text{Rb})_0 e^{-\lambda t}$$

- počet radiogenních atomů dceřiného ^{87}Sr v čase t

$$(^{87}\text{Sr})_t = (^{87}\text{Rb})_0 - (^{87}\text{Rb})_t = (^{87}\text{Rb})_t (e^{\lambda t} - 1)$$

- celkový počet atomů dceřiného ^{87}Sr v čase t

$$(^{87}\text{Sr})_t = (^{87}\text{Sr})_0 + (^{87}\text{Rb})_t (e^{\lambda t} - 1)$$

$$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 + (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_t (e^{\lambda t} - 1)$$

$$y = y_0 + x k$$

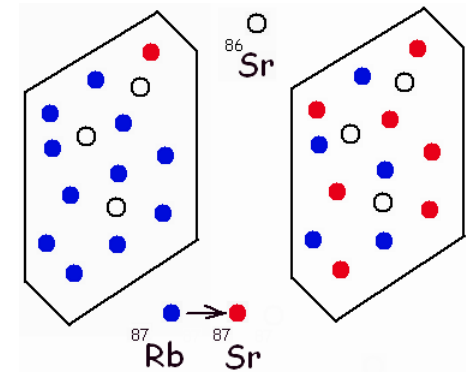
...řešení **metodou izochron**

Rubidium: ^{85}Rb , ^{87}Rb

... často zastupuje K

Stroncium: ^{84}Sr ^{86}Sr ^{87}Sr ^{88}Sr

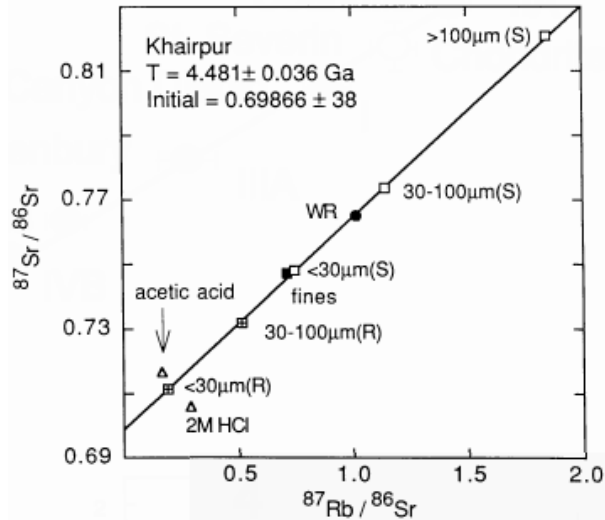
... často zastupuje Ca



λ ... rozpadová konstanta $\lambda = (\ln 2) / T_{1/2}$

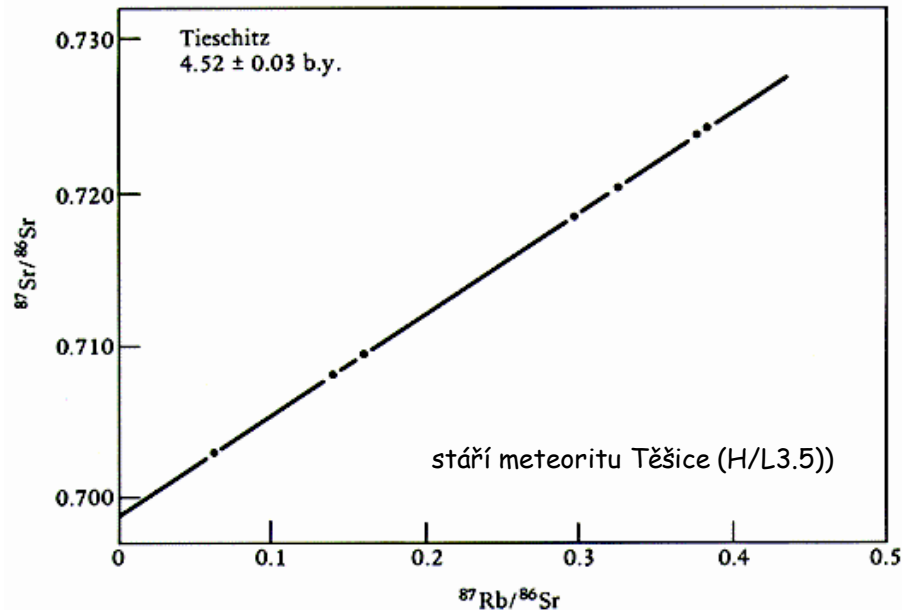
Radiometrické určování stáří meteoritů - izochrony

stáří meteoritu Khairpur (EL6)

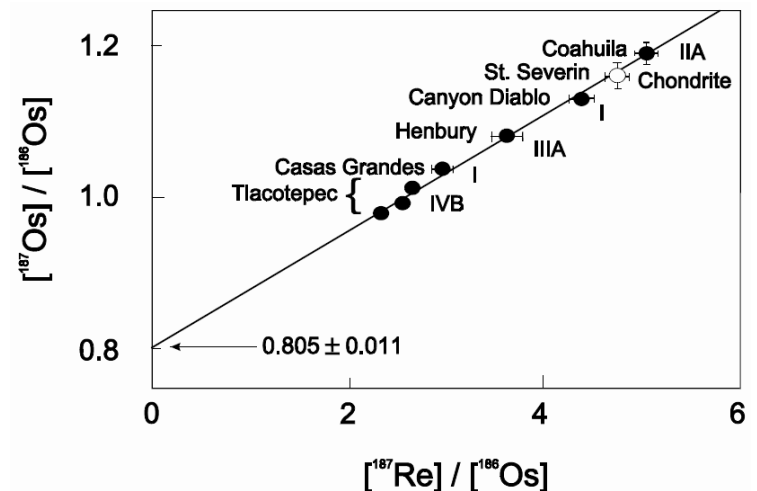


Používají se:

- celé horniny (WR-whole rock)
- chondry, CAI, plg, ol, px, sklo, Fe, FeS,...

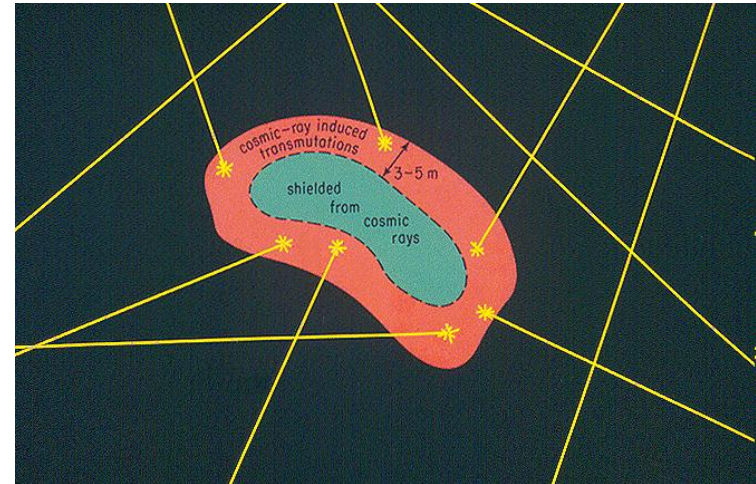


izochrona pro 5 Fe-meteoritů a 1 chondrit; 4,55 Gy



Cosmic-ray exposure age

- meteoroid je v meziplanetárním prostoru bombardován částicemi kosmického záření
- kosmické záření (galaktické, sluneční) - především p, α -částice
- energie > několik MeV... jaderné reakce v materiálu meteoritu
- studium obsahu produktů štěpení umožňuje stanovit:
 - dobu pobytu v meziplanetárním prostoru
 - preatmosferickou velikost meteoroidu
 - pozici (hloubku pod povrchem) daného vzorku v mateřském meteoroidu



Nuclide	Half-Life (yr)	Main Targets
^3H	12.26	O, Mg, Si, Fe
^3He , ^4He	S*	O, Mg, Si, Fe
^{10}Be	1.51×10^6	O, Mg, Si, Fe
^{14}C	5730	O, Mg, Si, Fe
^{20}Ne , ^{21}Ne , ^{22}Ne	S	Mg, Al, Si, Fe
^{22}Na	2.6	Mg, Al, Si, Fe
^{26}Al	7.17×10^5	Si, Al, Fe
^{36}Ar , ^{38}Ar	S	Fe, Ca, K
^{36}Cl	3.01×10^5	Fe, Ca, K
^{37}Ar	35 d	Fe, Ca, K
^{39}Ar	269	Fe, Ca, K
^{40}K	1.251×10^9	Fe, Ni
^{39}K , ^{41}K	S	Fe, Ni
^{41}Ca	1.034×10^5	Ca, Fe
^{53}Mn	3.74×10^6	Fe, Ni
^{54}Mn	312 d	Fe, Ni
^{59}Ni	7.6×10^4	Ni
^{60}Co	5.27	Co, Ni
^{81}Kr	2.29×10^5	Rb, Sr, Y, Zr
^{78}Kr , ^{80}Kr , ^{82}Kr , ^{83}Kr	S	Rb, Sr, Y, Zr
^{129}I	1.57×10^7	Te, Ba, La, Ce
$^{124-132}\text{Xe}$	S	Te, Ba, La, Ce, (I)
^{150}Sm	S	Sm
^{156}Gd , ^{158}Gd	S	Gd

Cosmic-ray exposure age

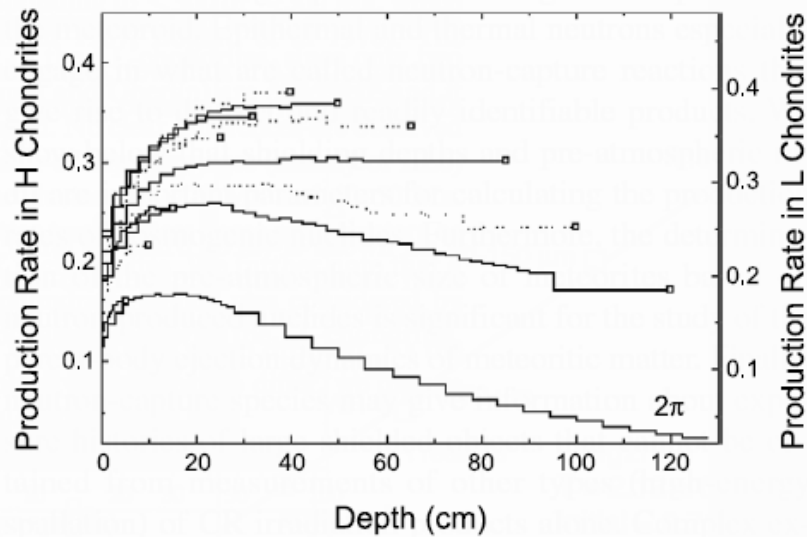


Fig. 2. Calculated production rates (in units of $10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ STP/g m.y.}^{-1}$) of ^{21}Ne for ordinary chondrites, shown for several radii vs. depth of an irradiated sample (from *Leya et al., 2000*).

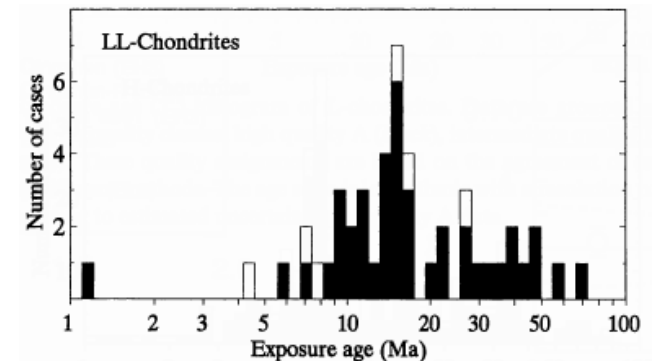
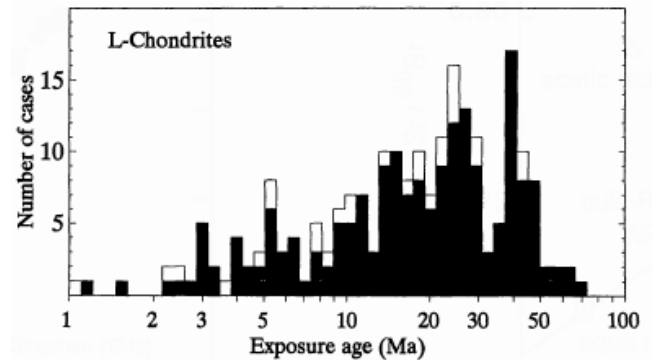
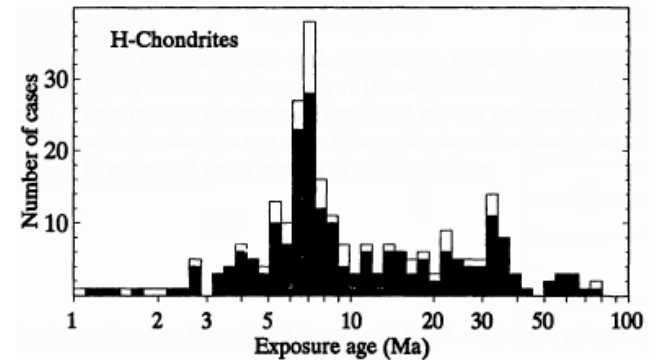
Některé metody:

$^{81}\text{Kr}/^{83}\text{Kr}$

$^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$

$^{36}\text{Cl}/^{36}\text{Ar}$

$^{40}\text{K}/^{41}\text{K}$



Doba pobytu na Zemi (Earth residence time)

Princip metody:

- kosmické záření → radioaktivní izotopy, jejich produkce a rozpad jsou v rovnováze (pro nižší poločasy rozpadu)
- po dopadu na povrch Země produkce ustává
- z obsahu radiogenních izotopů lze (po korekci na stínění v mateřském meteoroidu) určit „dobu pobytu na Zemi“
- často se používají ^{14}C , ^{36}Cl
- většina meteoritů z pouští: $t < 50\,000$ let, v Antarktidě i déle
- nejstarší meteorit: Lake Murray (železo IIAB), 120 000 let
- fosilní meteority: Österplana (chondrit), Švédsko, 480 000 let

TABLE 1. Radionuclides of interest for terrestrial-age studies.

	Half-life	Phase	Saturated Activity (dpm/kg)		References
			L	H	
^{39}Ar	269 yr	metal	25	21	<i>Begemann et al. (1969)</i>
^{14}C	5.73 k.y.	bulk	51	46	<i>Jull et al. (1998b); Jull (2001)</i>
^{41}Ca	100 k.y.	metal	24		<i>Fink et al. (1991); Herzog et al. (1997)</i>
^{59}Ni	108 k.y.*	metal	~350		<i>Schnabel et al. (1999a)</i>
^{81}Kr	229 k.y.	bulk	0.003–0.0045†		<i>Freundel et al. (1986); Eugster (1988a)</i>
^{36}Cl	300 k.y.	metal	22.8		<i>Nishizumi et al. (1989a); Herzog et al. (1997)</i>
^{26}Al	700 k.y.	bulk	60	56	<i>Evans et al. (1982); Vogt et al. (1990)</i>
^{60}Fe	1.49 m.y.				<i>Knie et al. (1999); Goel and Honda (1965)</i>
^{10}Be	1.5 m.y.	bulk	22	20	<i>Nishizumi et al. (1989a); Nishizumi (1995)</i>
^{53}Mn	3.7 m.y.	metal	434		<i>Nishizumi et al. (1977, 1989a)</i>

Data adapted from *Jull (2001)*.

2

Nálezy, pády, meteority s rodokmenem

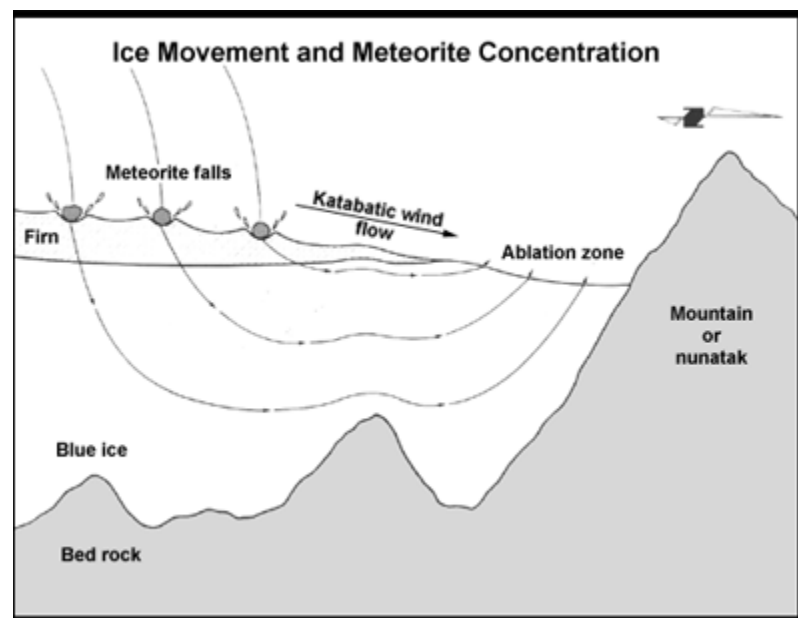
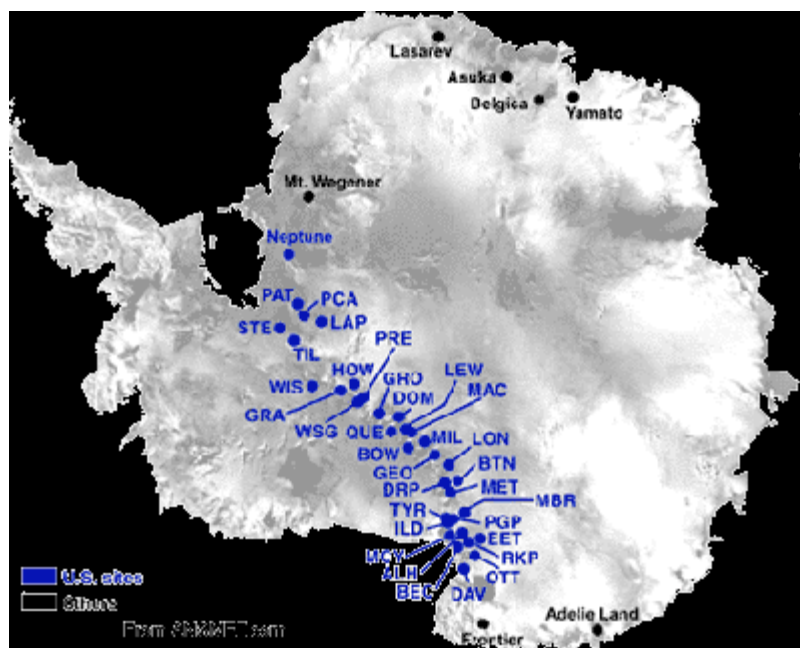
- nález - neexistuje očitě svědectví, či záznam pádu
- pád - pozorovaný průlet meteoroidu atmosférou
- „meteorit s rodokmenem“ - meteorit s určenou drahou ve sluneční soustavě

stav k 1. 10. 2010:

- 39 476 mezinárodně uznaných názvů meteoritů
- 1 089 pádů

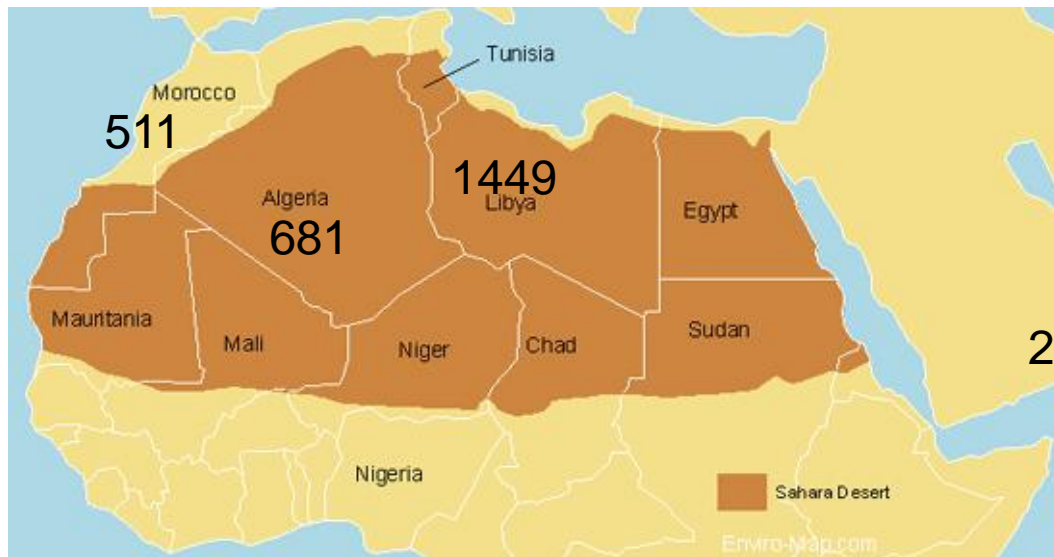
Nálezy meteoritů - Antarktida

- 27 613 nálezů



Nálezy meteoritů - Sahara, Omán,...

- kamenité pouště - hamady
(např. Hamada al Hamra)
- Sahara, Omán



2345



Pády v ČR (Československu) - 16 případů

1.	Loket	(1400)	IID
2.	Ploskovice	(1723)	L5
3.	Tábor	(1753)	H5
4.	Lysá nad Labem	(1808)	L6
5.	Stonařov	(1808)	EUC-mmict
6.	Žebrák	(1824)	H4
7.	Veselí nad Moravou	(1831)	H5
8.	Blansko	(1833)	H6
9.	Broumov	(1847)	IIA
10.	Těšice	(1878)	H/L3.6
11.	Sazovice	(1934)	L5
12.	Příbram	(1959)	H5
13.	Ústí nad Orlicí	(1963)	L6
14.	Suchý důl	(1969)	L6
15.	Morávka	(2000)	H5
16.	Košice	(2010)	H5

Meteority s rodokmenem (stav květen 2010)

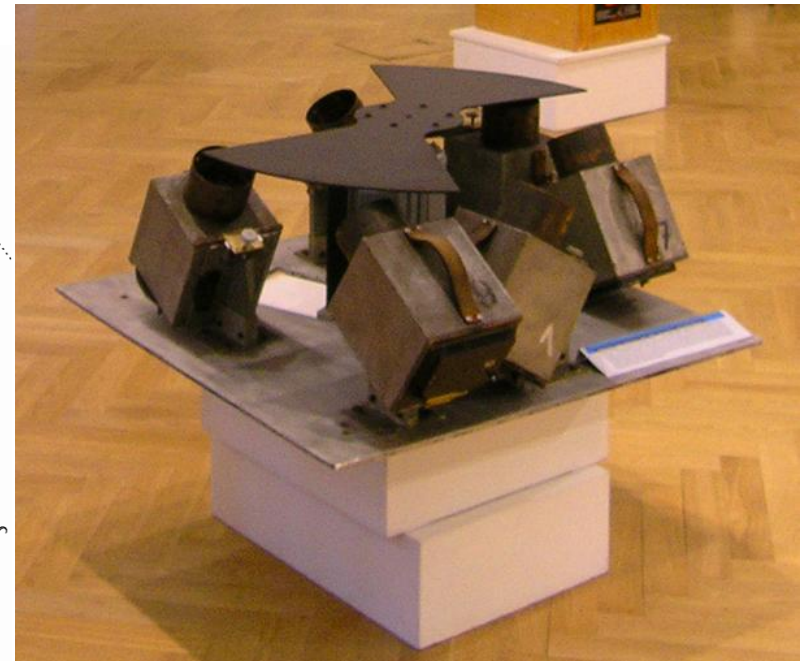
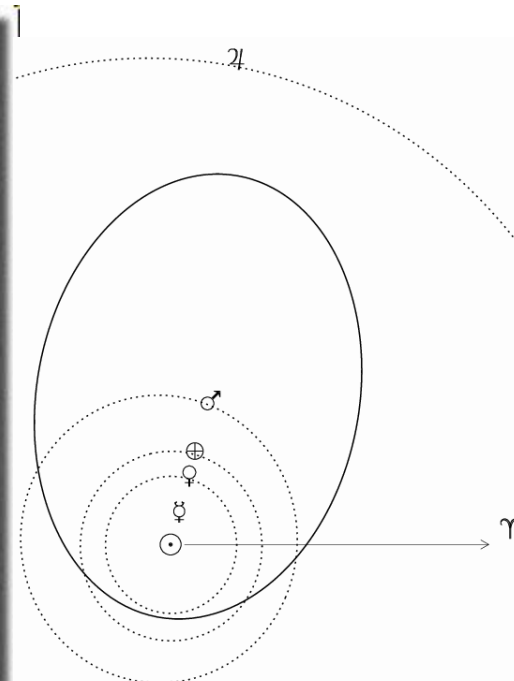
1. Příbram	(1959)	H5	Československo
2. Lost City	(1970)	H4	USA
3. Innisfree	(1977)	LL5	Kanada
4. Peekskill	(1992)	H6	USA
5. Tagish Lake	(2000)	C2-ung	Kanada
6. Morávka	(2000)	H5-6	ČR
7. Neuschwanstein	(2002)	EL6	Německo
8. Park Forest	(2003)	L5	USA
9. Villalberto de la Pena	(2004)	L6	Španělsko
10. Bunburra Rockhole	(2007)	EUC	Austrálie
11. Almahatta Sitta	(2008)	URE-an	Súdán
12. Buzzard Coulee	(2008)	H4	Kanada
13. Jesenice	(2009)	L6	Slovinsko
14. Grimsby	(2009)	H5	Kanada
15. Košice	(2010)	H5	Slovensko

Pády zaznamenané vědeckými přístroji (stav květen 2010)

1. Příbram	(1959)	H5	Československo
2. Lost City	(1970)	H4	USA
3. Innisfree	(1977)	LL5	Kanada
4. Neuschwanstein	(2002)	EL6	Německo
5. Bunburra Rockhole	(2007)	EUC	Austrálie
6. Jesenice	(2009)	L6	Slovinsko

Příbram (H5) - první „meteorit s rodokmenem“

- 7. dubna **1959**, 20:30
- záznam bolidovými kamerami: Ondřejov, Prčice (40km)
- určení dráhy ve sluneční soustavě i místa dopadu
- $m_0=1300$ kg, $m_f=53$ kg, $m_m=5,8$ kg, $v_\infty=21$ km/s
- úlomky Luhy, Velká, Hojšín, Dražkov (4/16)



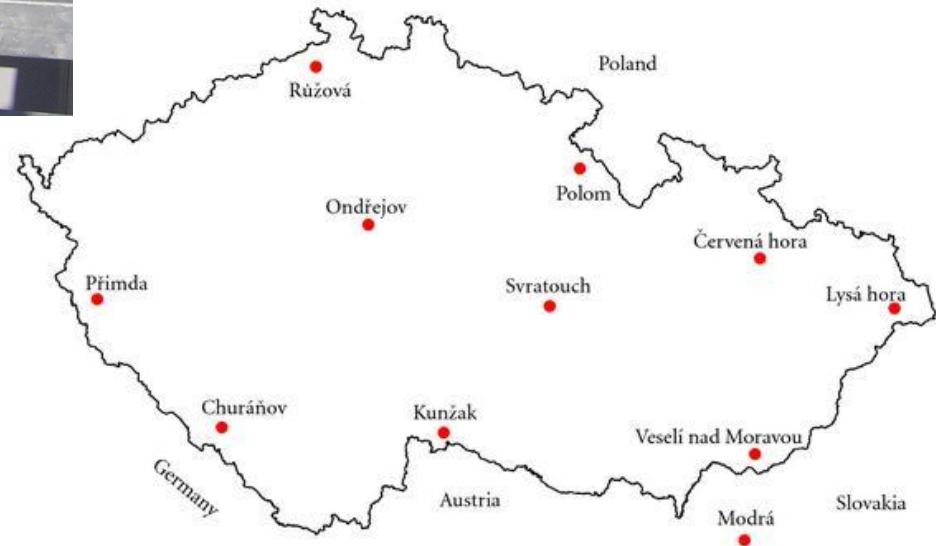
Evropská bolidová síť



Automatická bolidová kamera (12 stanic)

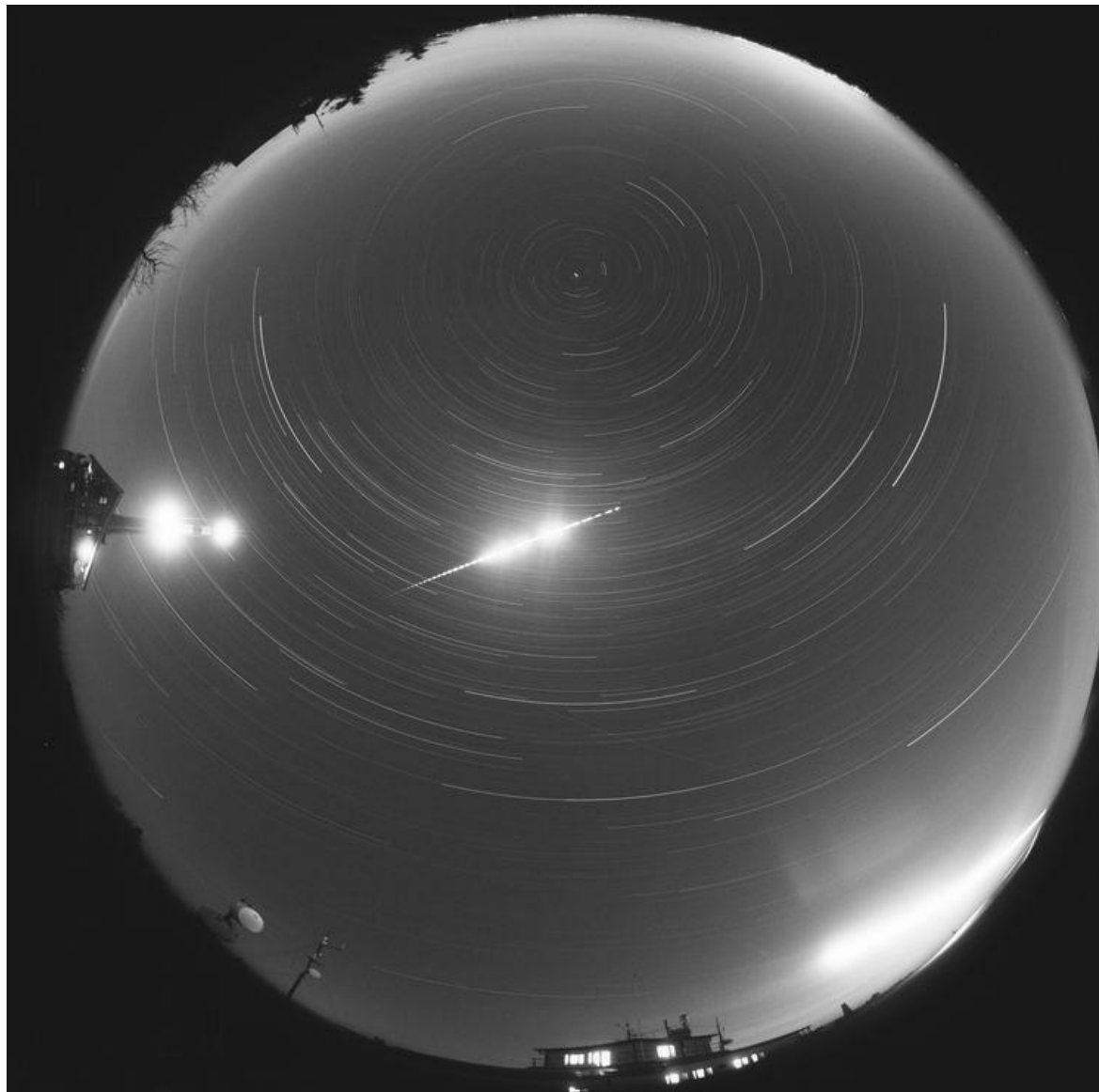
- objektiv Zeiss Distagon 30mm f/3.5 (32 fotograf. desek)
- rotující sektor (15Hz)
- čidlo jasu oblohy
- přehledová CCD kamera
- detektor srážek
- mikrofon
- chlazení/ohřev, připojení na internet,...

- Australská bolidová síť (3 stanice)
- Kanadská bolidová síť - nefunguje
- Americká bolidová síť - nefunguje



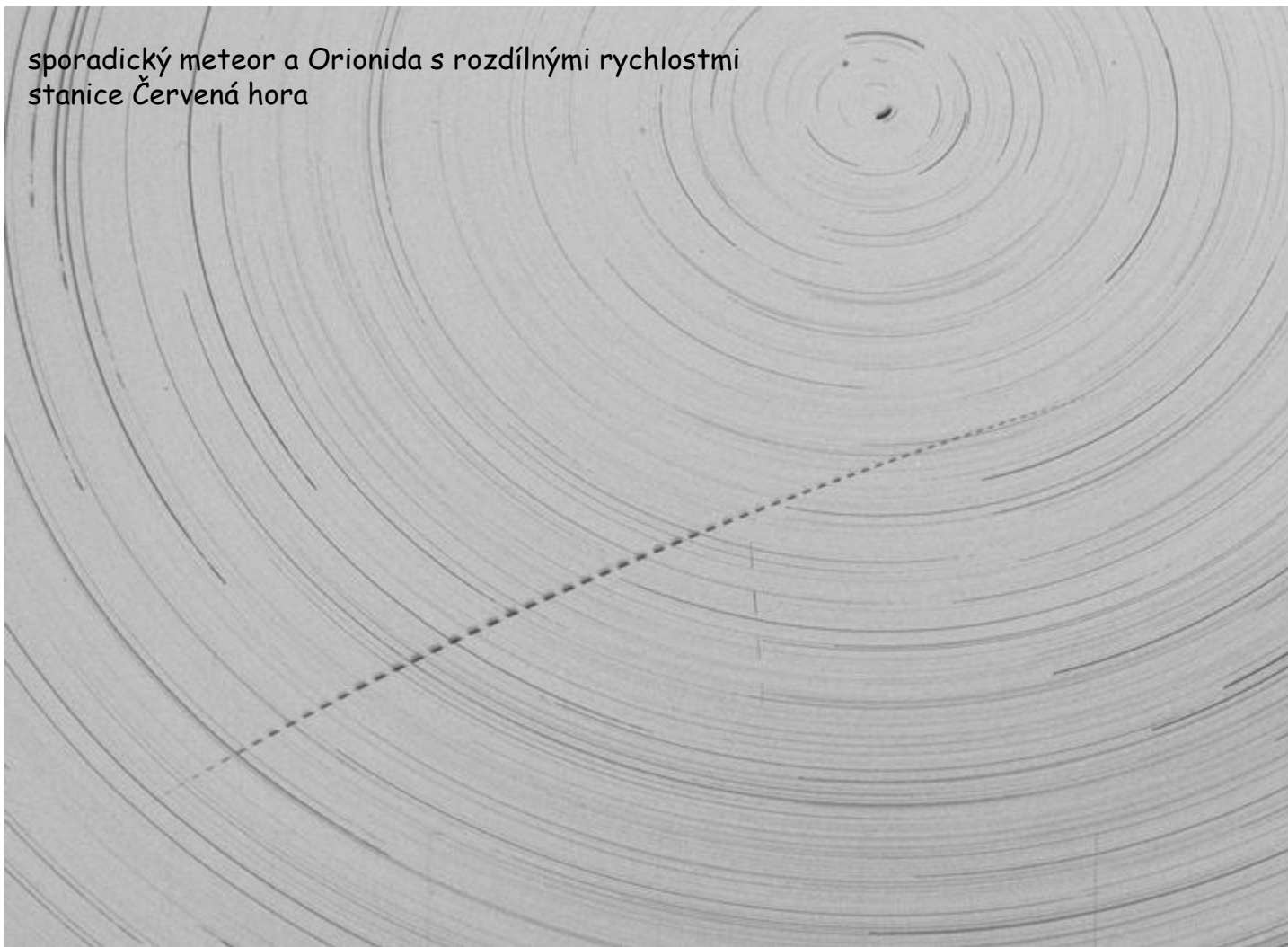
Snímek bolidu

příklad fotografie bolidu z roje Taurid, stanice Lysá hora

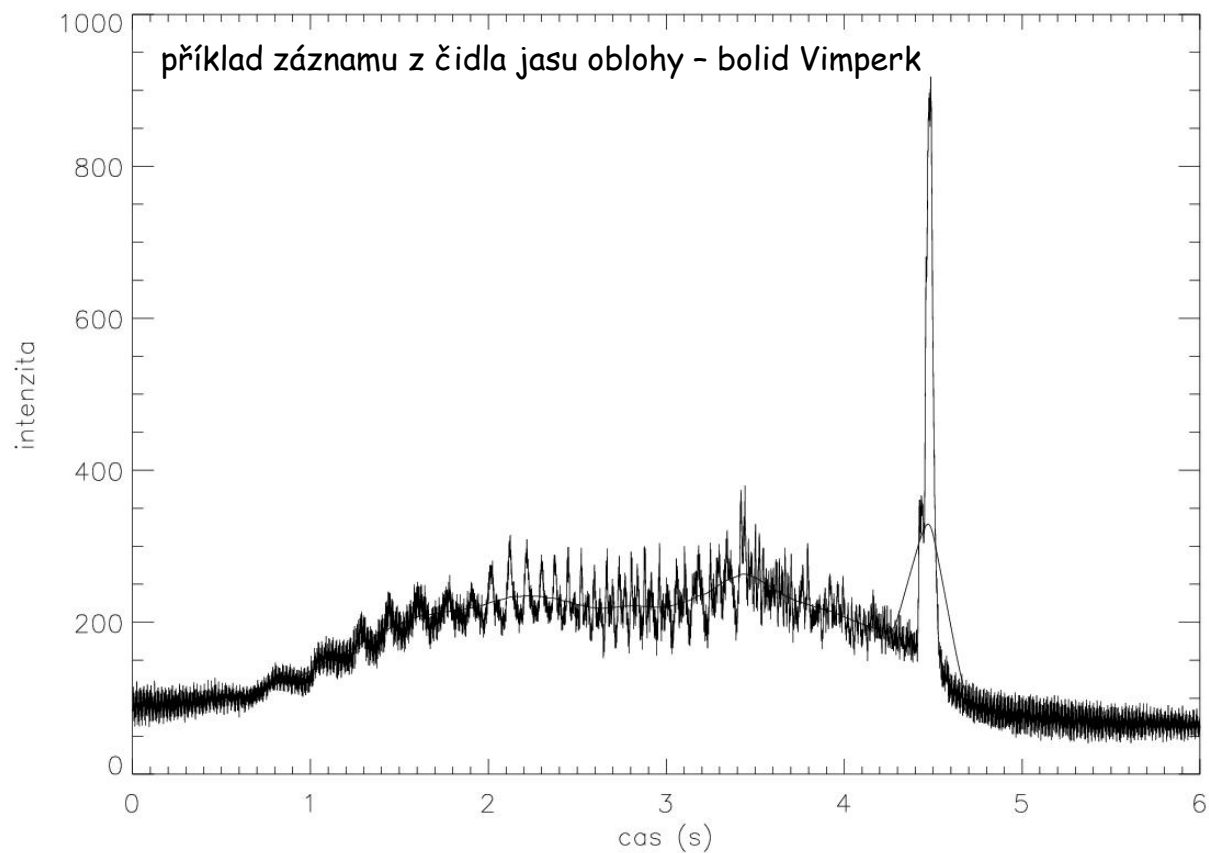


Snímek bolidu

sporadický meteor a Orionida s rozdílnými rychlostmi
stanice Červená hora



Světelná křivka bolidu

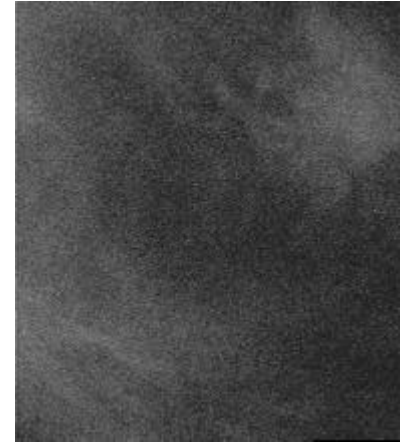


3

Meteory

Základní pojmy

- Meteor = světelný jev doprovázející průlet meteoroidu ovzduším
- Bolid = meteor jasnější než -3 (-4) magnitudy
- velikost ~0.01mm - ~10m
- geocentrické rychlosti: 11.2 - 72.8 km/s
(volný pád z ∞ ; $v_{\text{parab}} + v_{\text{Země}}$ v perihelu)
- Meteory - rojové
 - sporadické



Rojové meteory

- Radiant
- ZHR - počet meteorů do +6,5mag, je-li radiant roje v zenitu
- D - kritérium dráhové podobnosti

$$[D_{SH}]^2 = [e_B - e_A]^2 + [q_B - q_A]^2 + \left[2 \cdot \sin \frac{I_{BA}}{2} \right]^2 + \left[\frac{e_B + e_A}{2} \right]^2 \left[2 \cdot \sin \frac{\pi_{BA}}{2} \right]^2,$$

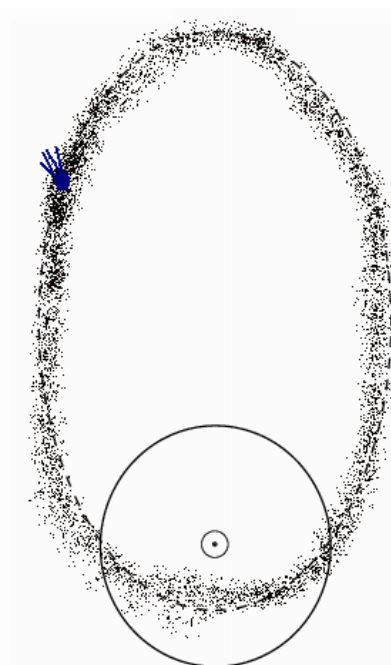
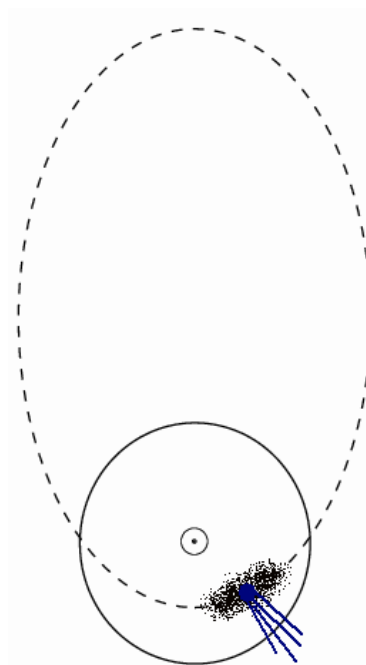


jméno	maximum	v (km/s)	mateřské těleso
Quadrantidy	3.1.	41	2003 EH1
Eta - Aquaridy	6.5.	66	1P/Halley
Arietidy	7.6.	38	96P/Machholz
Perseidy	12.7.	59	109P/Swift-Tuttle
Orionidy	21.10.	66	1P/Halley
Leonidy	17.11.	71	P55/Tempel-Tuttle
Geminidy	14.12.	35	3200 Phaethon

Rojové meteory

- vznik:
 - ejekce z komet;
 - rozpad mateřského tělesa
 - impakt na mateřské těleso
- ejekční rychlosti závisí (mimo jiné) na:
 - heliocentrické vzdálenosti
 - velikosti komety
 - velikosti meteoroidu

př. 1AU, 1mm částice...~25-150 m/s



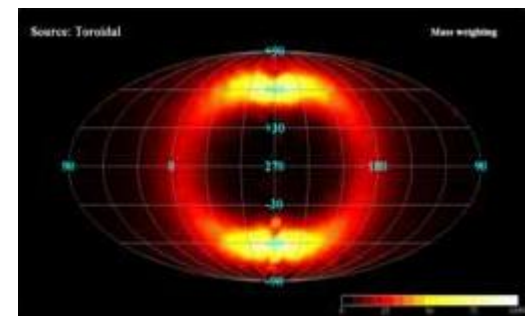
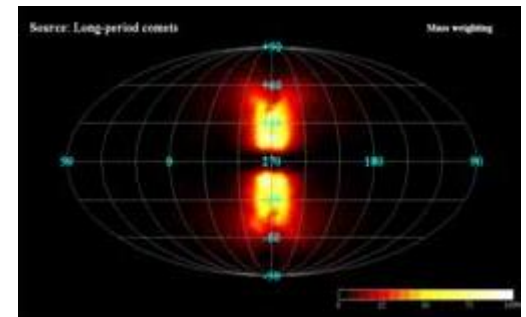
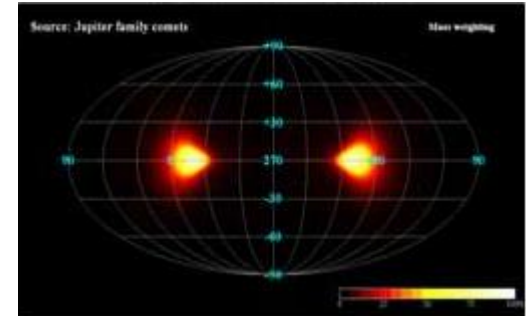
rozpad komety 73P/Schwassmann-Wachmann 3



jádro komety 1P/Halley

Meteory sporadické

- nepřísluší k žádnému roji
- tvoří okolo ~75% pozorovaných meteorů
- rozdělení hustoty radiantů:
 - helion, antihelion
 - apex (S, J)
 - toroidální (S, J)
- denní variace počtu sporadických meteorů
- roční variace



Průlet meteoroidu ovzduším

1. Ohřev (sekundy-desítky s.)

- Srážky s částicemi atmosféry (300-100km)... růst teploty povrchu
- Ztráta těkavých složek (Na) z povrchu, počátek eroze meteoroidu

2. Ablace (sekundy)

- Dosažení $T \sim 2200-2500\text{K}$ - tavení a odpařování povrchu meteoroidu i jeho fragmentů. Teplota v podstatě dále neroste. Excitace a ionizace atomů.
- Excitované atomy (materiálu meteoroidu) při přechodech do základního stavu emitují fotony -> **vznik meteoru**

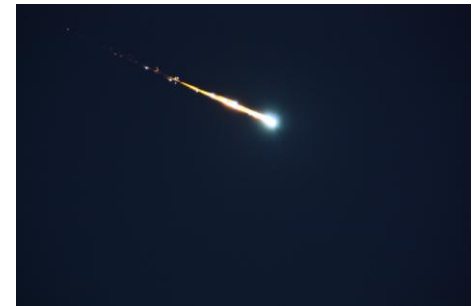
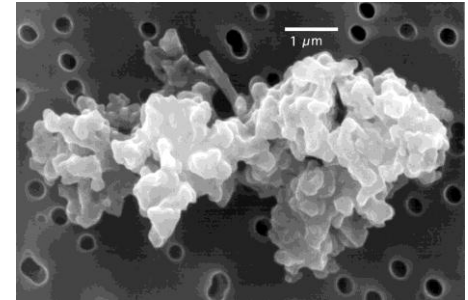
3. Temná dráha (minuty)

- zbrzdění pod $v \sim 3\text{km/s}$... ustává ablace
- pád tělesa se zbylou hmotností po „temné dráze“, dopad na zemský povrch volným pádem ($v \sim 10-100\text{m/s}$)

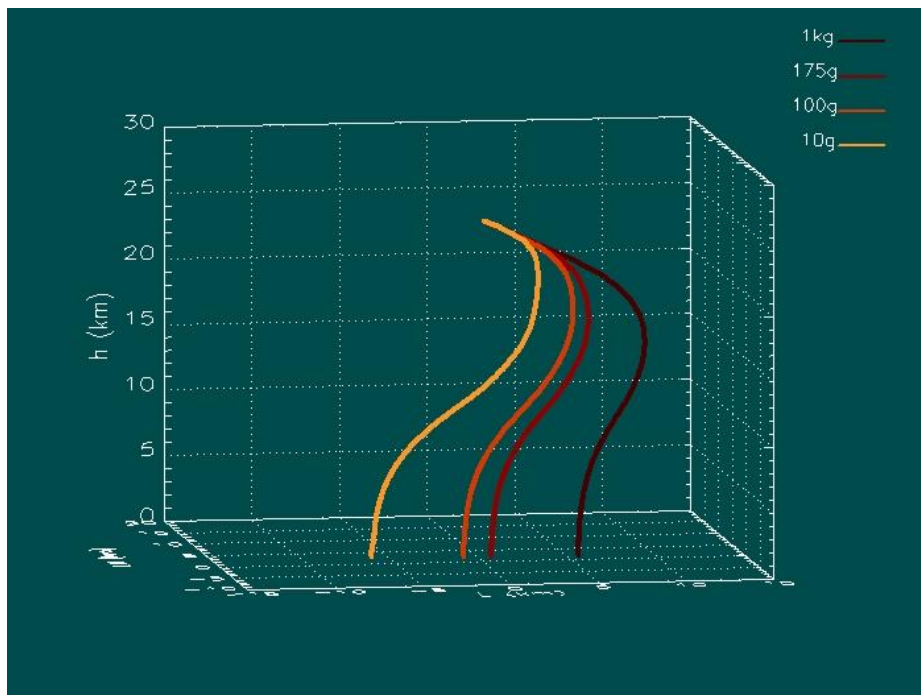
Průlet ovzduším

Poznámky:

- meteoroidy $< \sim 0.01\text{mm}$: rychlé zbrzdění - nedosáhnou teploty sublimace, sedimentují jako **mikrometeority**
- meteoroid $\sim 0.01\text{mm}$ - 20cm : ztratí všechnu hmotu a zaniká (většina meteorů)
- fragmentace, exploze

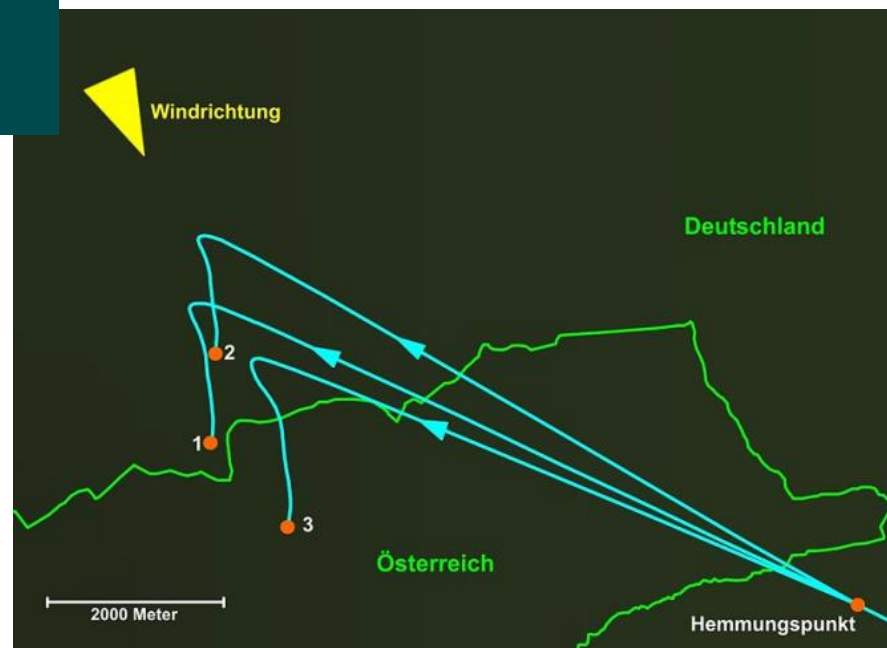


Temná dráha



temná dráha meteoritu Bunburra Rockhole

temná dráha meteoritu Neuschwanstein



Průlet ovzduším - teorie jednoho tělesa

předpoklad: *Nedochází k fragmentaci, či erozi meteoroidu.*

• rovnice brždění $m \frac{dv}{dt} = -\Gamma S \rho_a v^2,$

Γ ... součinitel odporu (koule...0,25)

S ... čelní průřez

ρ_a ... hustota atmosféry

• ablační rovnice $\frac{dm}{dt} = -\Lambda \frac{S \rho_a}{2Q} v^3,$

Λ ... koeficient přenosu tepla

Q ... energie potřebná k odpaření 1kg materiálu

• ablační koeficient $\sigma = \frac{\Lambda}{2Q\Gamma}$, koeficient tvaru-hustoty $K = \Gamma S \delta$,

δ ... hustota meteoroidu

• geometrie dráhy $dh = -v \cos z dt,$

• zářivost meteoru $I = -\tau \frac{v^2}{2} \frac{dm}{dt}.$

4

Materiál meteoroidů

Meteory: podle počátečních výšek (začátek ablace): $K_B = \log \varrho_B + 2.5 \log v_\infty - 0.5 \log \cos z_R$

- **D** - např. drakonidy... nízká hustota, malá pevnost - „*křehký kometární materiál*“
- **C** - „*kometární materiál*“, většina rojových meteorů se známými mateřskými kometami
 - C1 - krátkoperiodické dráhy, nízké i
 - C2 - dlouhoperiodické dráhy, náhodné i
 - C3 - krátkoperiodické dráhy, náhodné i
- **B** - malé perihely, Q - blízko Jupitera, „*hustý kometární materiál*“
- **A** - *uhlíkaté chondrity* (asteroidy, komety)

Materiál meteoroidů

Bolidy:

$$P_E = \log q_E - 0.42 \log m_\infty + 1.49 \log v_\infty - 1.29 \log \cos z_R,$$

- **I** - nízký σ ($0.014 \text{ s}^2\text{km}^{-2}$), vysoká ρ , př. Příbram, Lost City, Innisfree... *obyčejné chondrity*
- **II** - σ ($0.042 \text{ s}^2\text{km}^{-2}$), většinou se rozadnou v atmosféře... *uhlíkaté chondrity (~A)*
- **IIIA** - vysoký σ , $\rho < 1000 \text{ kg m}^{-3}$, kometární roje, nízké i (~C1)
- **IIIAi** - dlouhoperiodické dráhy, náhodné i (~C2)
- **C3** - krátkoperiodické dráhy, náhodné i
- **IIIB** - velmi vysoký σ , velmi nízká ρ , převažuje mezi jasnými bolidy (~D)

Interval of \pm one standard deviation of average $q_M (\text{g cm}^{-3})$ and $\sigma (\text{s}^2 \text{ km}^{-2})$ of Tab. 1.

Group	q_M		σ	
	from	to	from	to
“ast” + I	2.7	5.9	0.007	0.028
A + II	1.4	2.7	0.028	0.056
B	0.65	1.7	0.05	0.11
C + IIIA	0.55	0.91	0.08	0.13
D + IIIB	0.18	0.38	0.17	0.26

Souvislost meteory - meteority

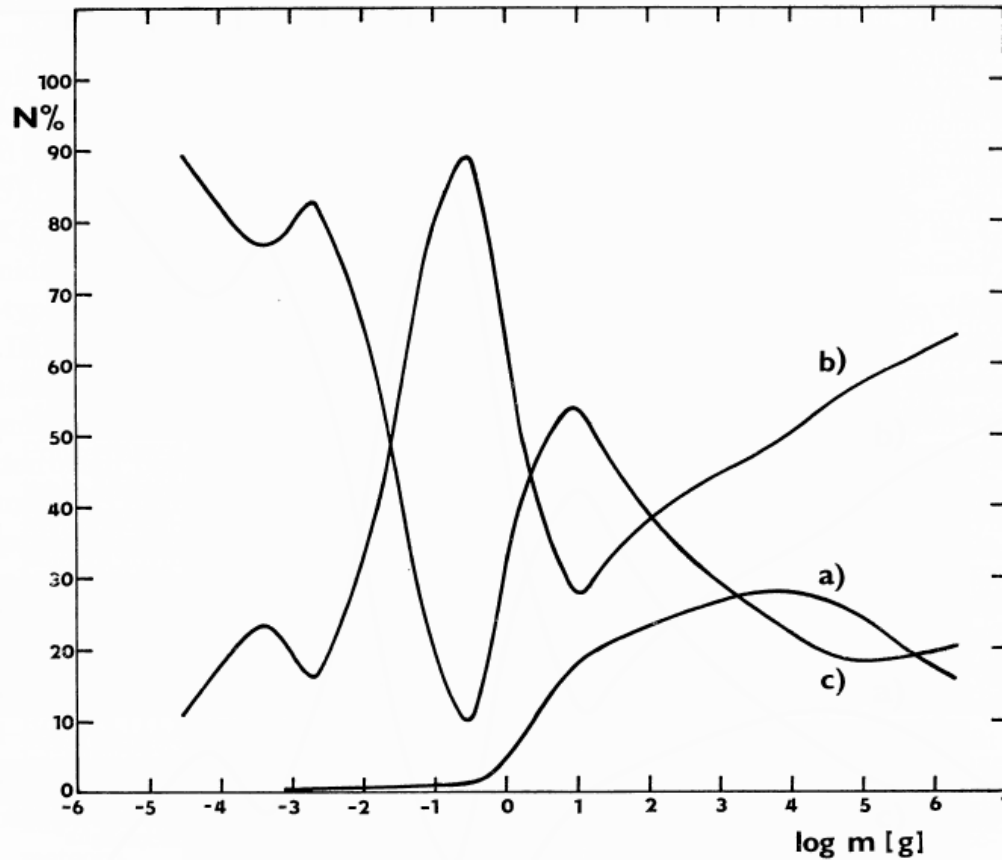


Fig. 3. Relative percentage of incremental numbers ($N\%$) of three types of meteor bodies as a function of the meteoroid mass:
a) stony material, b) A-group material (carbonaceous bodies), c) cometary material.