



Astronomický
ústav
AV ČR

Meteorická astronómia: skúmanie “padajúcich hviezd”

Adriana Pisarčíková

Credit: spaceplace.nasa.gov

Obsah



Úvod:

- meteoroid, meteor, meteorit
- pozorovania meteorov
- spektroskopia meteorov



Výskumné skupiny:

- Observatórium v Ondřejove AU AV ČR
- Univerzita Komenského v Bratislave

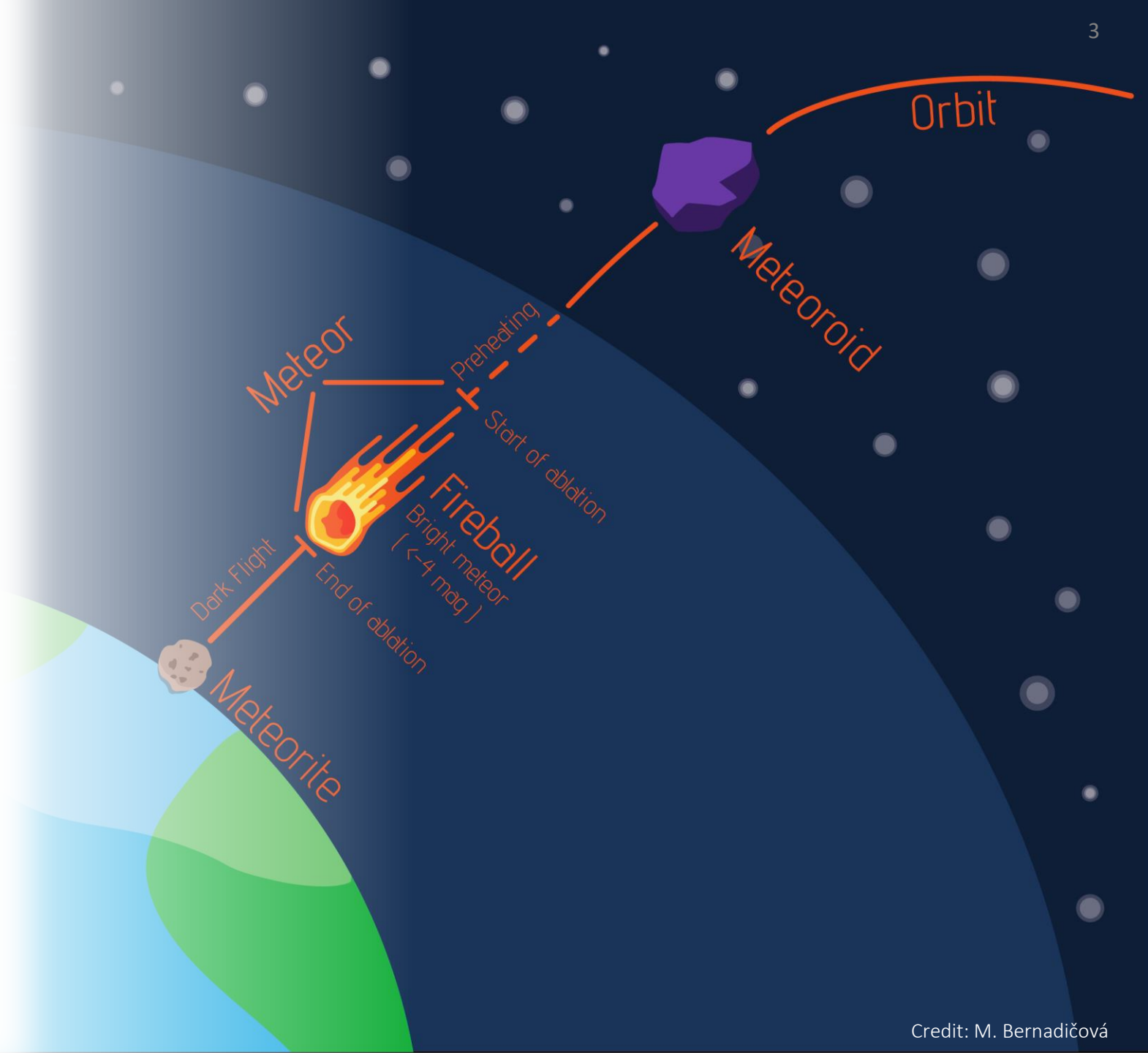


Výskum:

- reálne pozorovania meteorov
- laboratórne experimenty
- hľadanie znakov prítomnosti vody a organických zlúčenín

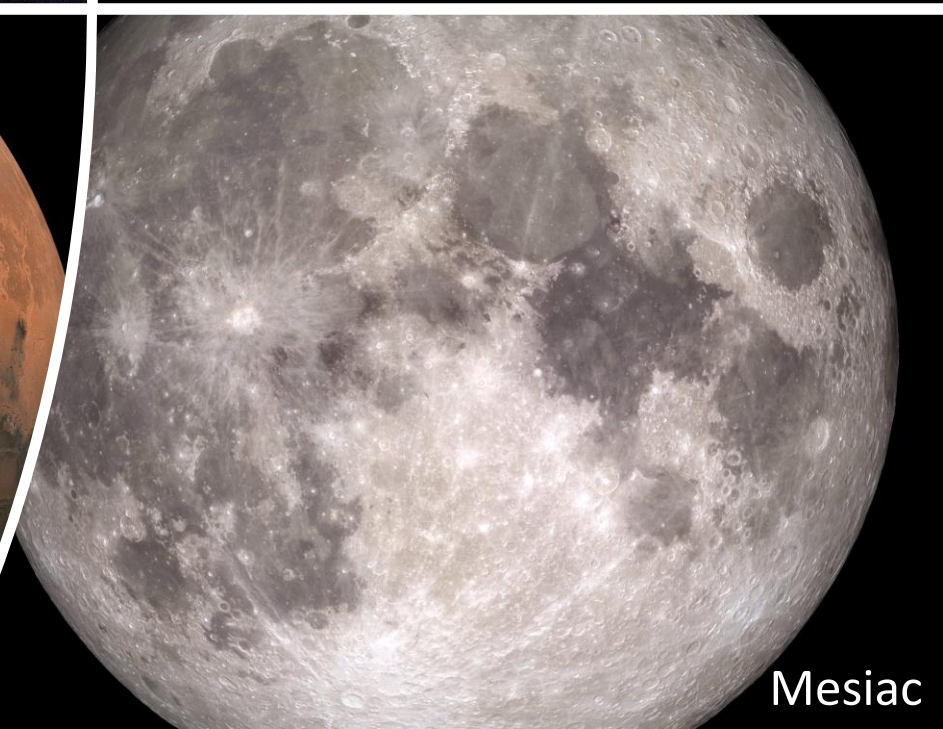
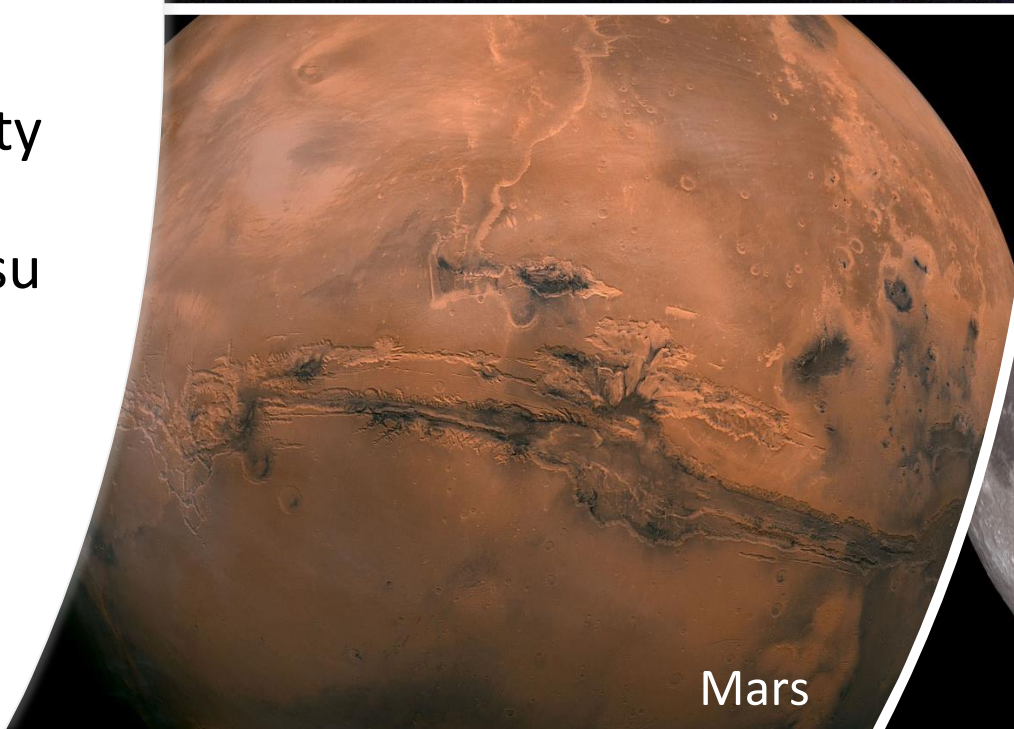
Základné pojmy

- **Meteoroid** - pevný prírodný objekt s veľkosťou približne $30\text{ }\mu\text{m}$ - 1 m , ktorý sa pohybuje v medziplanetárnom priestore alebo z neho prichádza
- **Meteor** - svetlo a s ním spojené fyzikálne javy, ktoré sú výsledkom vysokorýchlostného vstupu pevného objektu z vesmíru do plynnej atmosféry
- **Meteorit** - akýkoľvek prírodný pevný objekt, ktorý prežil fázu meteoru v plynnej atmosfére bez toho, aby sa úplne vyparil



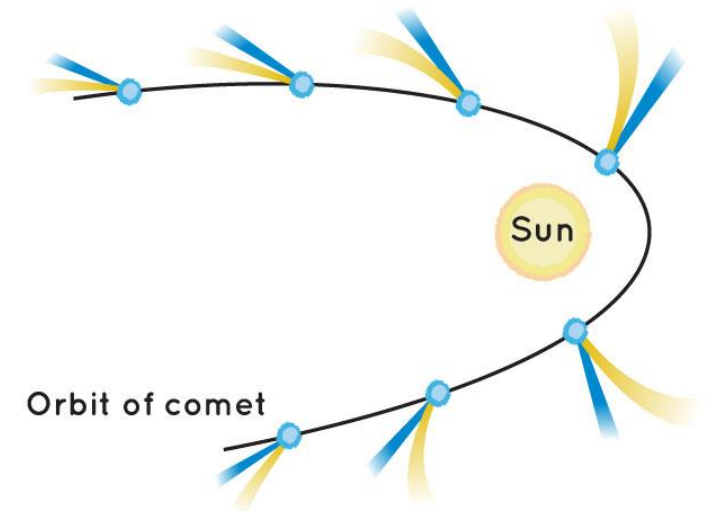
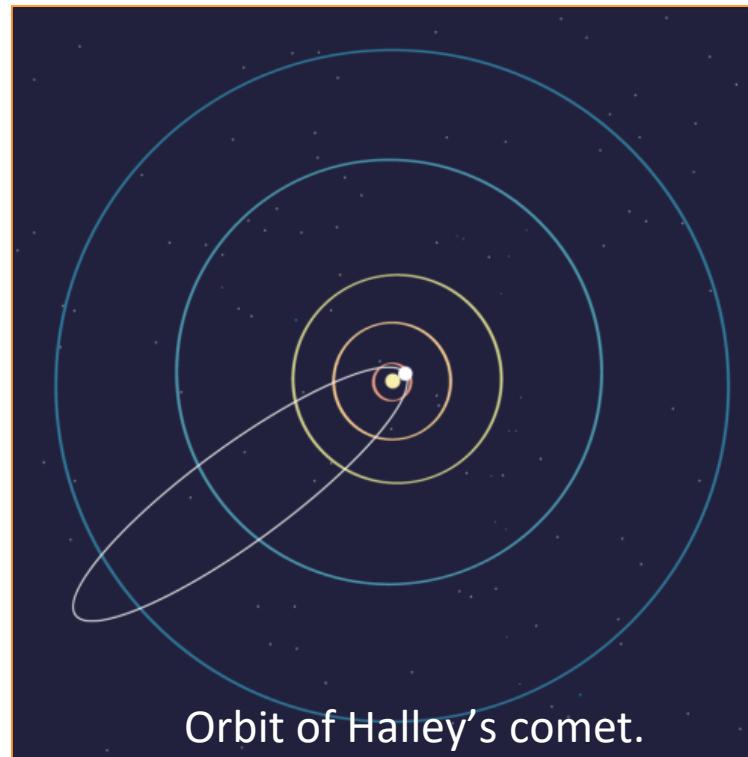
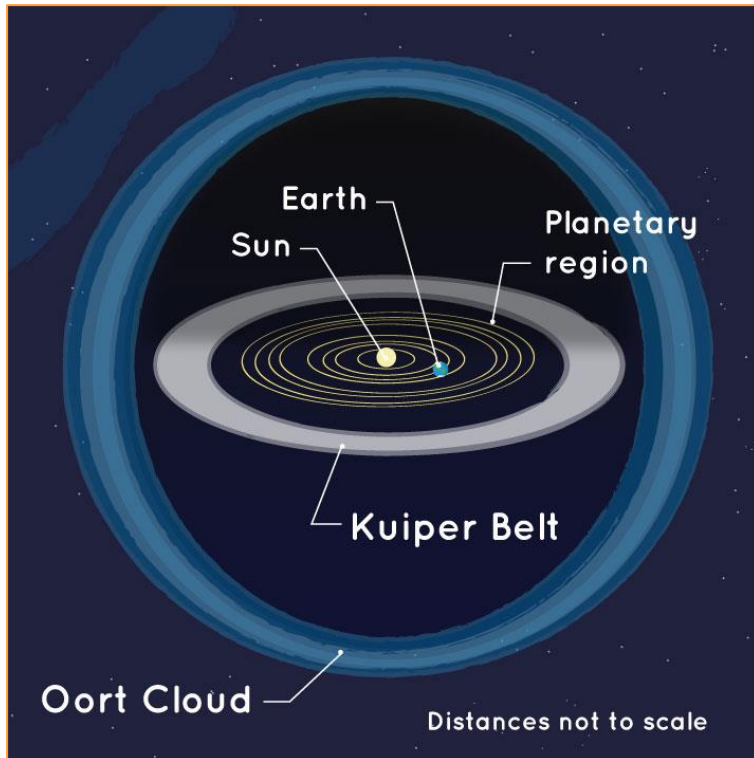
Pôvod meteoroidov

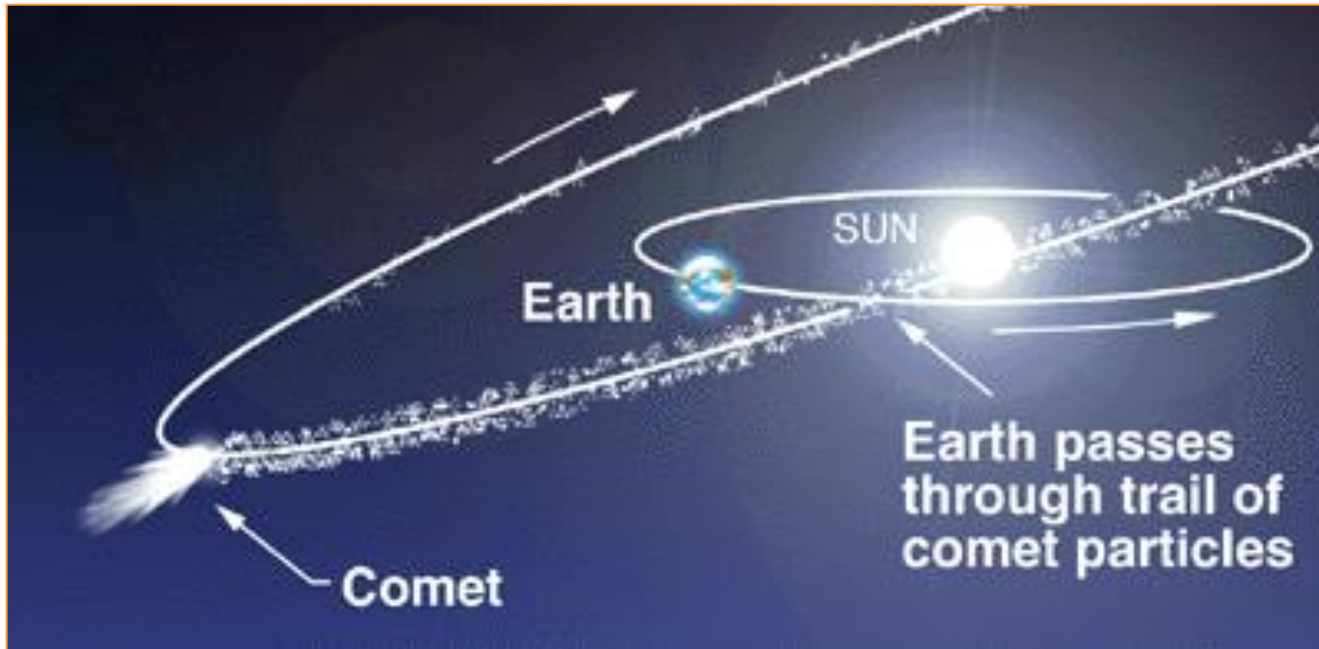
- Kométy
- Asteroidy
- meteority nájdené na Zemi – fragmenty aj z Mesiaca (649 meteoritov) a Marsu (368)



Kométy

- obsahujú ľahký materiál, prach a ľady zmrznutých plynov
- výskyt: Kuiperov pás (za dráhou Neptúna) a Oortov oblak
- 2 chvosty: plynný (modrastý) a prachový (žltkastý – odráža slnečné žiarenie)





Credit: astronomyisrael.com

Vznik meteorických rojov

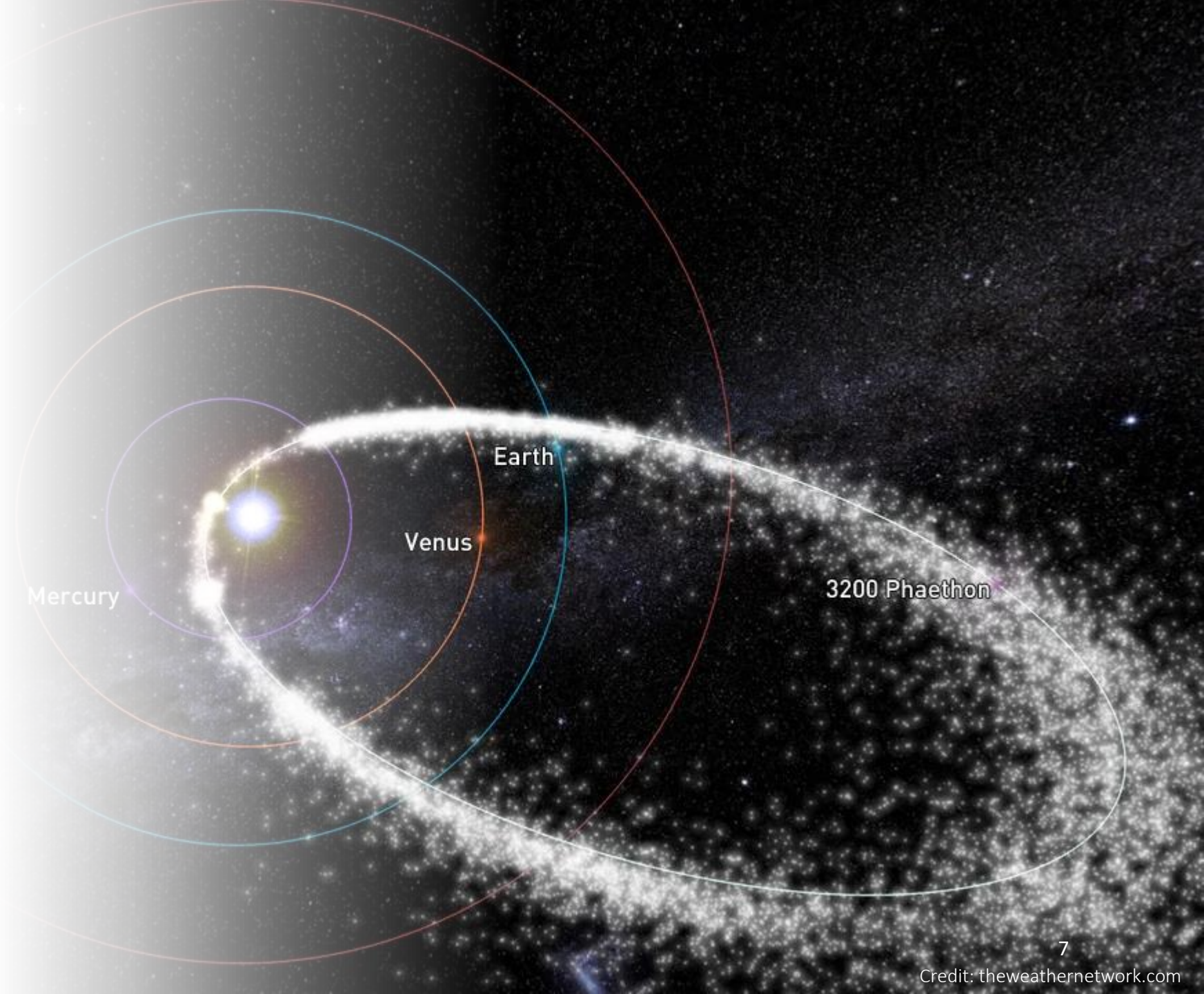
- objavujú sa iba v určitých ročných obdobiach
- vylietavajú z jedného smeru – radiant
- pomenovanie podľa súhvezdia, v ktorom leží jeho radiant

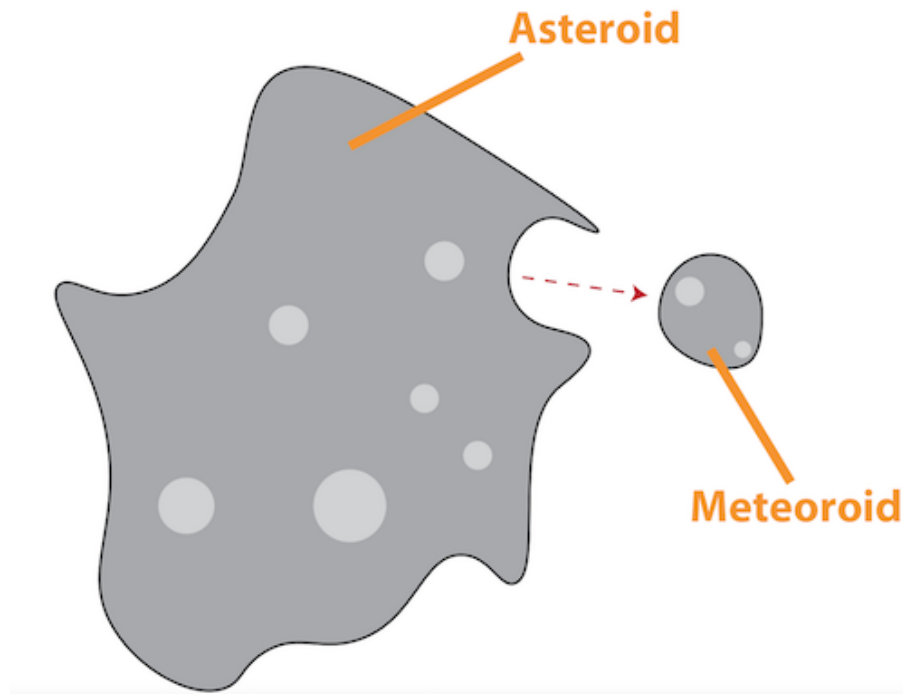


Credit: spaceplace.nasa.gov

Sporadické meteory

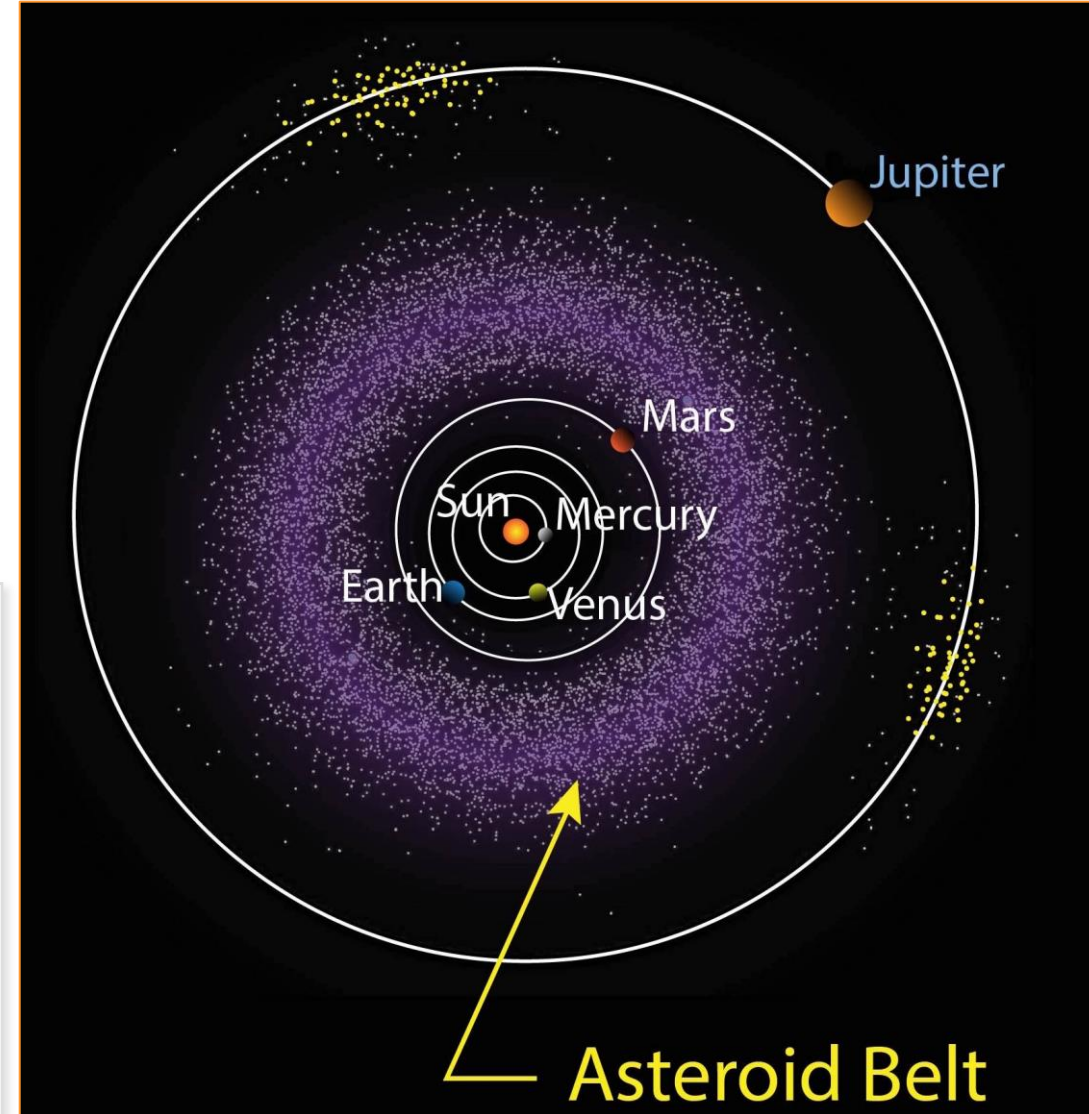
- nemožno priradiť k roju
- **pôvod:**
 - rozpadom asteroidov
 - rozpadom meteoroidných prúdov
 - okrajové časti prúdov/zriedené prúdy
 - prichádzajúce z vonkajších oblastí Slnčnej sústavy





Asteroidy

- kamenné telesá (> 1 m)
- najväčšia populácia (~ 97%) v hlavnom páske asteroidov, ďalšie blízkozemské, krížiče Marsu, Trójanania, Kentauri,...
- meteoroidy vznikajú predovšetkým pri vzájomných zrážkach asteroidov, tiež slapovými javmi

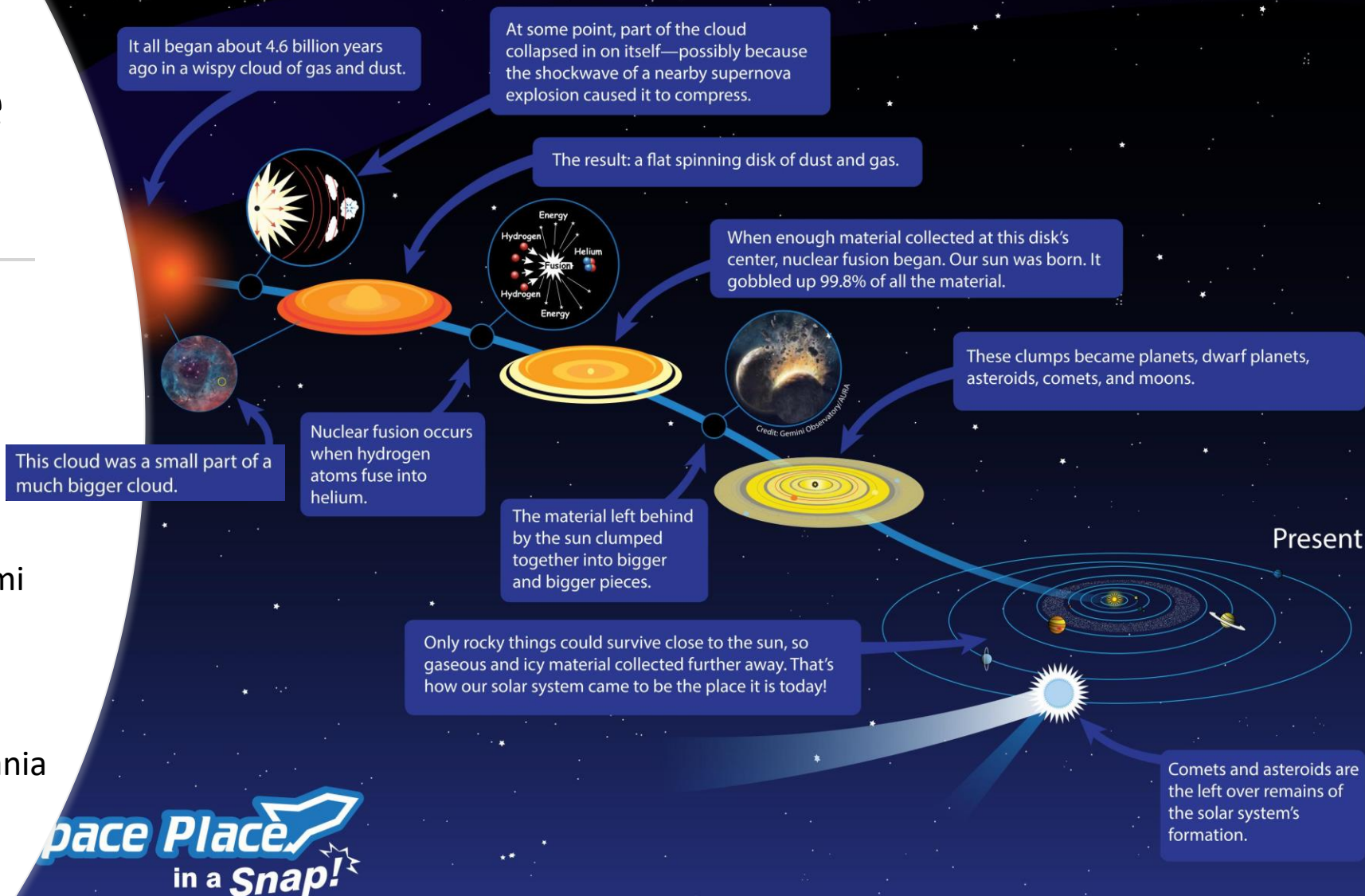


Prečo študujeme meteoroidy?

- pozostatky, ktoré sa zachovali z obdobia vzniku Slna a slnečnej sústavy
 - telesá s rôznymi rozmermi a hmotnosťami
 - informácie o fyzikálnych a chemických podmienkach pri vzniku S. s. pred 4,56 mld. r.
 - súvis so vznikom života na Zemi
- aplikácia do budúcnosti – zdroje surovín
- dostupnosť materiálu – meteority, vesmírne misie, pozemné pozorovania meteorov

How did our solar system come to be?

National Aeronautics and Space Administration



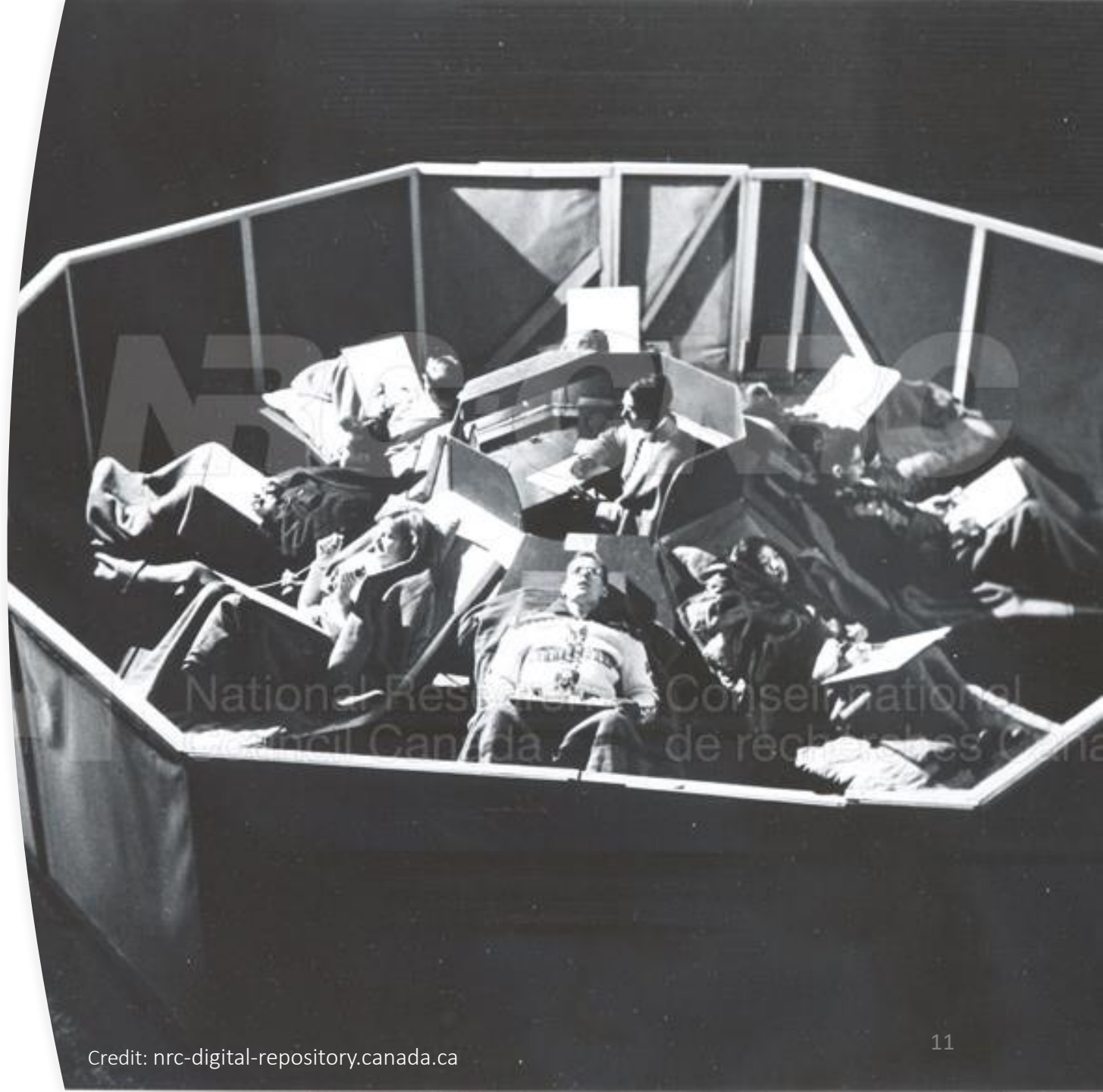
space Place
in a Snap!

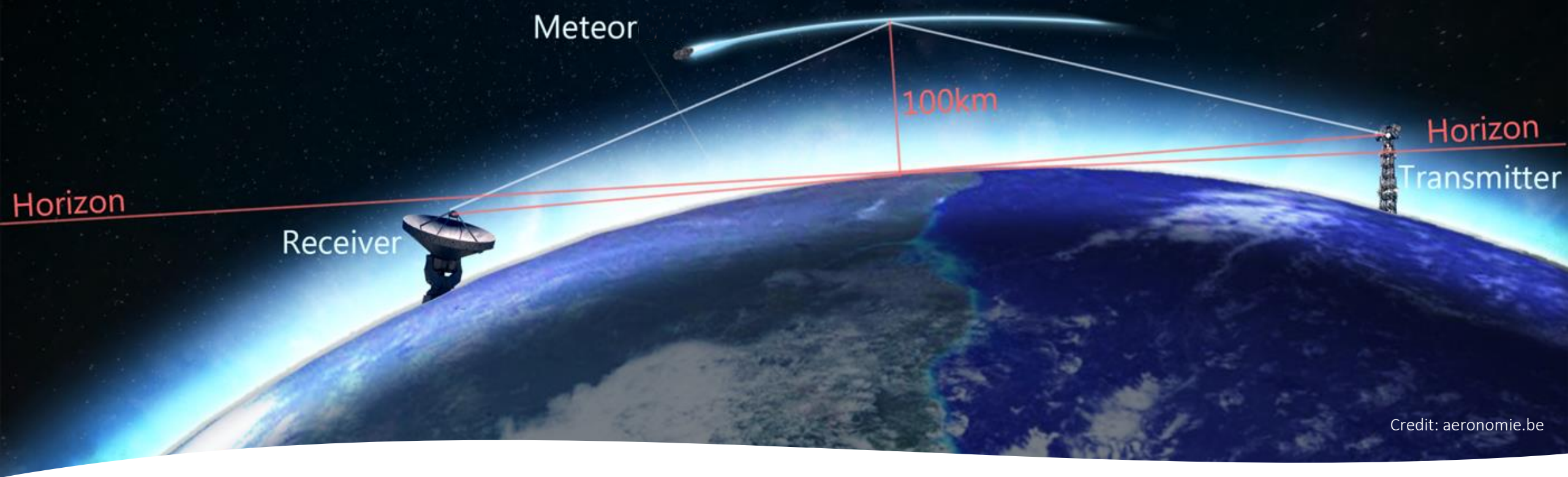
Metódy pozorovania meteorov

- Vizuálne pozorovania
- Radiové pozorovania
- Fotografické pozorovania
- Video pozorovania
- Spektroskopia ako súčasť fotografických a video pozorovaní

Vizuálne pozorovania

- počítanie meteorov v časovom intervale
- aktivita meteorických rojov a sporadických meteorov
- zaznamenáva sa čas, magnitúda (jasnosť meteor vzhľadom na hviezdy), príslušnosť k roju/sporadickému pozadiu, ...





Credit: aeronomie.be

Radiové pozorovania

- vysielanie rádiových vln pomocou radaru a následné prijímanie ich odrazov od ionizovanej stopy meteorov
- ionizovaná stopa ovplyvňuje elektromagnetické vlny (najmä v rozsahu 40 až 150 MHz)
- nezávislé od počasia a dennej aktivity meteorov
- najmä slabšie (menej jasné) meteory



Pôvodný fotografický systém na AGO Modra



Leonidy počas noci 16./17.11.1998 na AGO Modra

Fotografické pozorovania

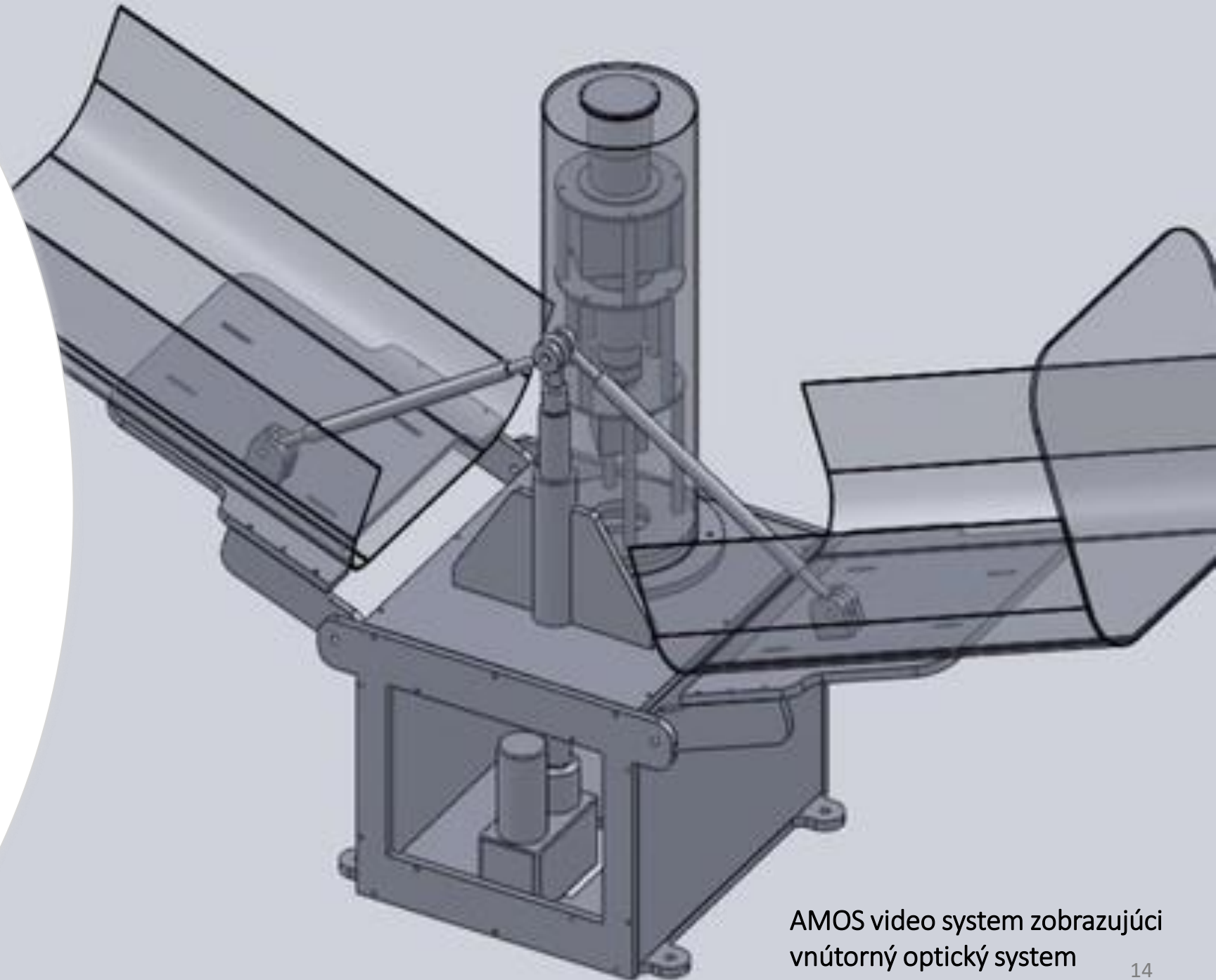
- v minulosti- all-sky objektívy, guľové zrkadlo odrážajúce oblohu
- neskôr - fish-eye objektívy, záznam na klasický fotomateriál
- v súčasnosti - digitálne fotoaparáty s fish-eye objektívmi
- nie je tak citlivá ako iné metódy, ale jej výhodou je vysoká presnosť určovania polohy meteorov
- pozorovania bolidov (veľmi jasných meteorov)

Video pozorovania

- v minulosti– analýza meteorov z videopásiek
- v súčasnosti – plne automatizované softvéry
- nižšia presnosť v určovaní polohy, avšak vyššia citlivosť ako pri fotografických systémoch
- pozorovania menej jasných meteorov

Viacstaničné video a fotografické pozorovania:

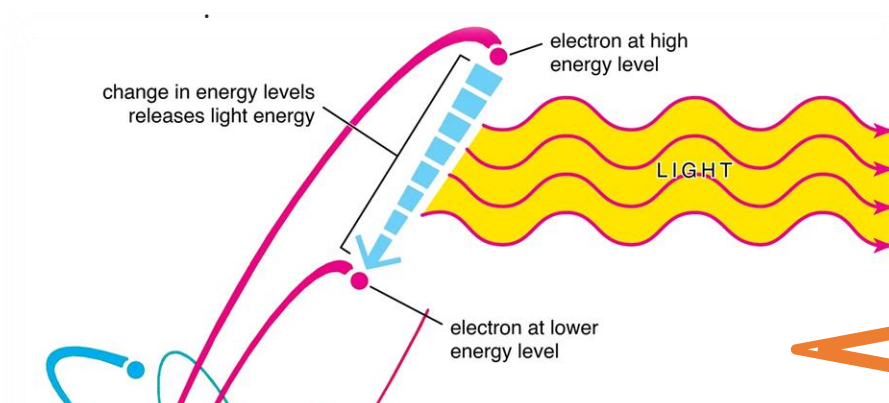
- atmosférická dráha
- pôvodná dráha v Slnnej sústave



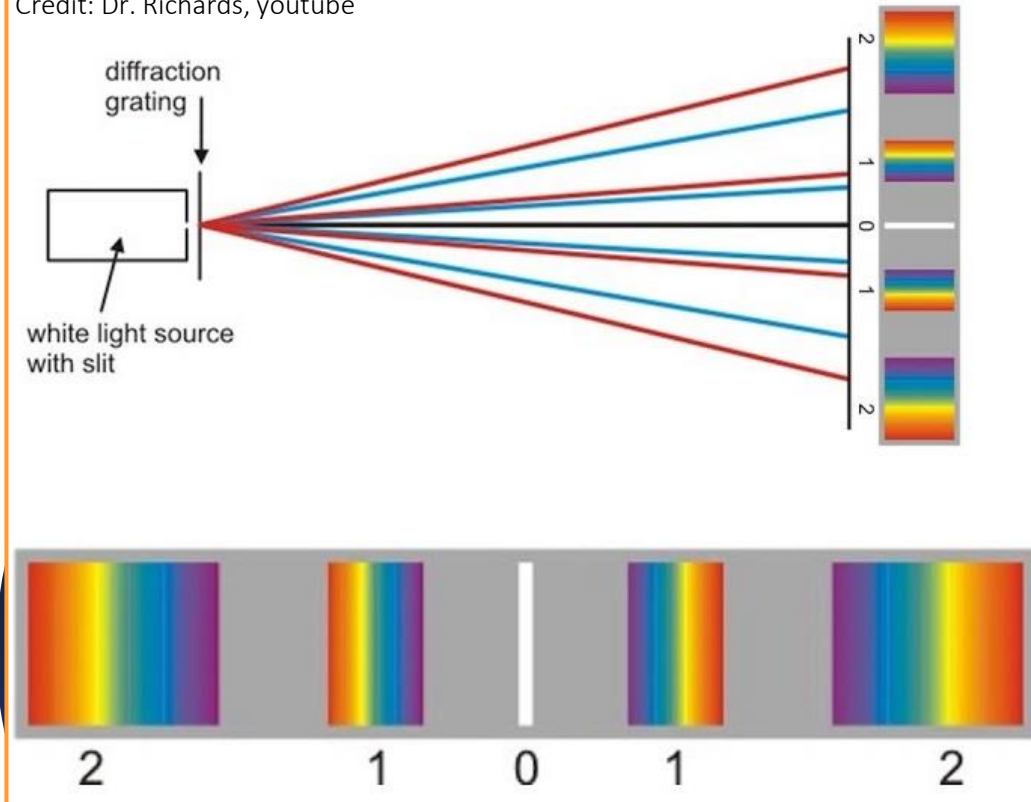
AMOS video system zobrazujúci
vnútorný optický systém

Spektroskopia meteorov

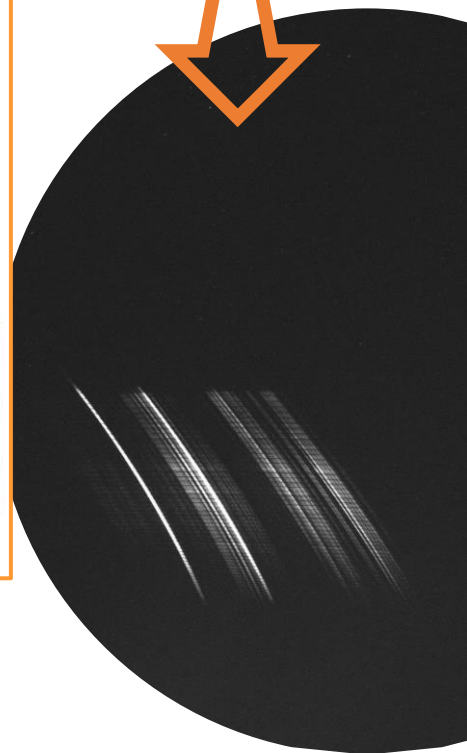
- použitie difrakčnej mriežky
- spektrum vo viditeľnej oblasti
- vznik emisného spektra:
 - vzájomné zrážky atómov meteoroidu s atmosférou (excitačné procesy) +
 - rekombinácia s voľným elektrónmi



Credit: Dr. Richards, youtube



Credit: V. Vojáček



Systematické pozorovací programy



Fotografické kamery v Ondřejově



Dr. Zdeněk Ceplecha

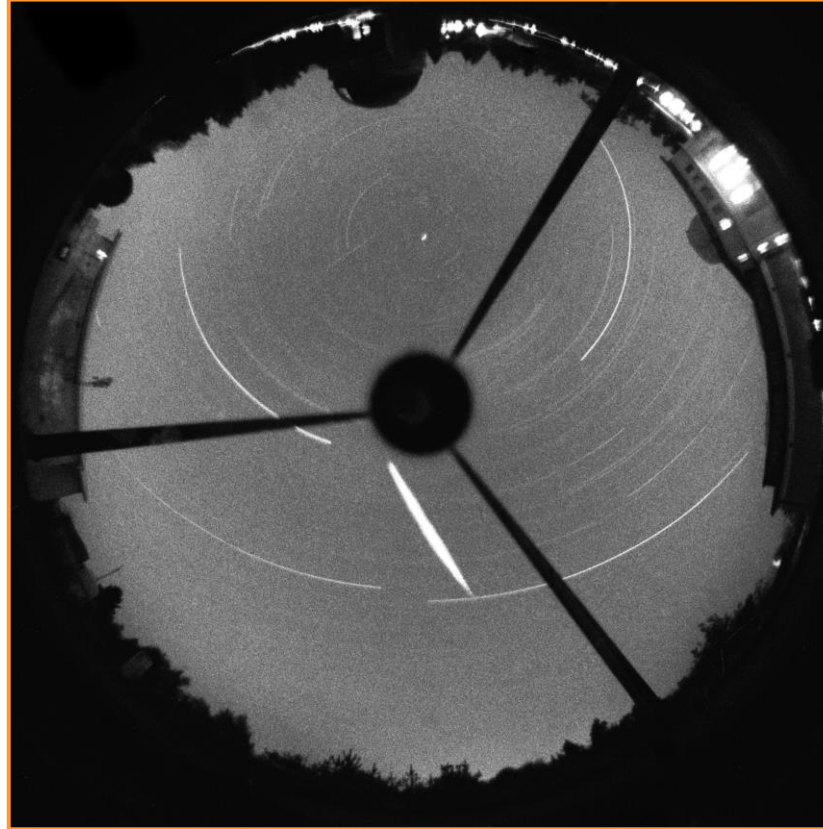


Příbramské meteority

1. Astronomický ústav AV ČR, Observatorium v Ondřejově

- dlhodobá tradícia založená Dr. Zdeňkem Ceplechom v roku 1951 – fotografické pozorovania
- 7.04.1959 – záznam 1. pádu meteoritu s rodokmeňom (známy pôvod) - Příbram

Vznik Európskej bolidovej siete



Zrkadlová celooblohová kamera v Ondřejove a snímok bolidu „Čechtice“

- 1963 – rozmiestnenie prvých celooblohových kamier na území Československa, ktoré fotografovali vypuklé zrkadlo (bolidy - väčšie meteoroidy)
- neskôr aj v Nemecku a Rakúsku

Súčasný stav (DAFO, SDAFO)

- plná automatizácia pozorovaní a digitalizácia
 - objektív typu rybie oko, detektor zrážok a oblačnosti, ...
 - fotografický a fotoelektrický (radiometer – svetelná krivka, presný čas) záznam bolidov + spektrálny záznam (od -7 mag)
- zvýšenie množstva záznamov a získanie kvalitnejších informácií

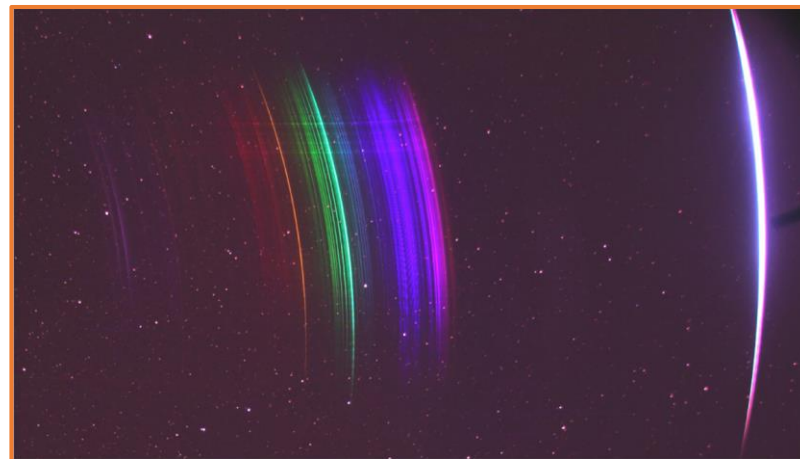


Credit: Borovička et al., A&A 2022

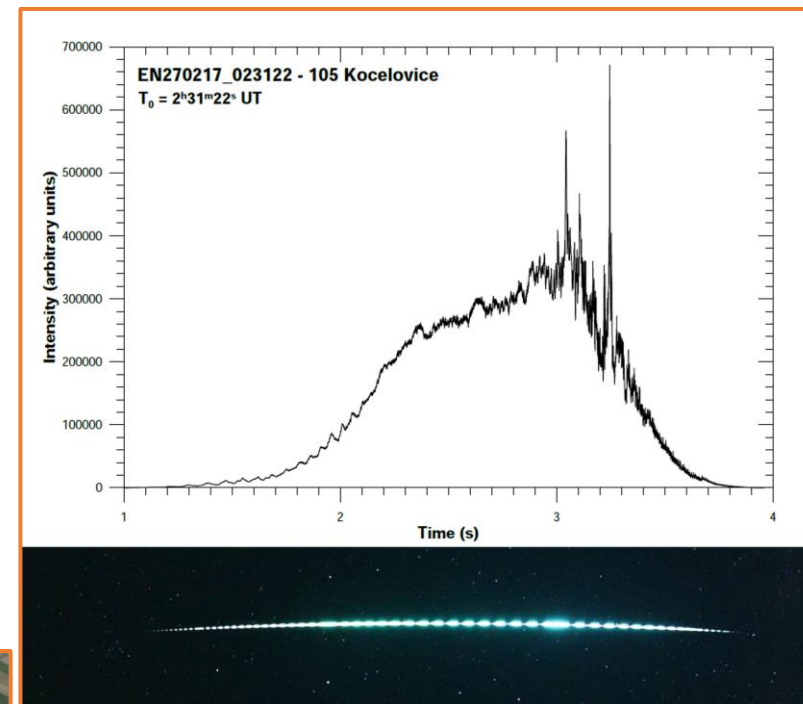
Ukážky snímok systémov DAFO a SDAFO



Celooblohový snímok bolidu – určenie rýchlosti a brzdenia telesa v atmosfére



Spektrum bolidu– určenie zloženia pôvodného meteoroidu (Credit: Borovička et al., A&A 2022)



Svetelná krivka bolidu– popis rozpadu telesa v atmosfére (fragmentácia)



Dopadová oblasť meteoritov, Zelená Hora, Poľsko

Ďalšie systémy na pozorovanie meteorov

- **IP video kamery** - doplnkové kamery na lepší popis dynamiky, fragmentácie a na niektorých staniciach aj spektier meteorov + záznam bolidov počas dňa
- **FIPS (Fireball Intelligent Positioning System)** – rýchlo navádzaná video kamera slúžiaca na podrobný popis javu (fragmentácia)
- **video kamery** na zaznamenávanie menej jasných meteorov (+7 mag) a ich spektier (od +2 mag, mm meteoroidy) – nižšie rozlíšenie





Umiestnenie staníc

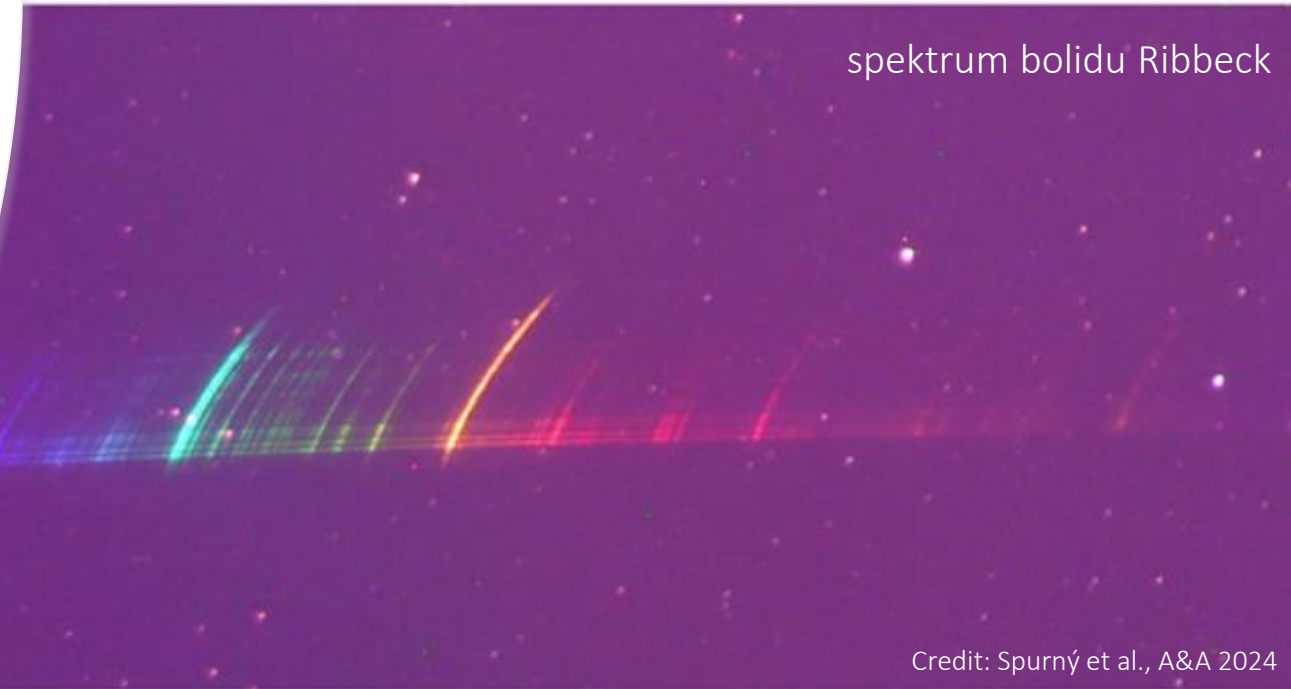
- 15 staníc v Česku, 4 na Slovensku, 1 v Rakúsku a Nemecku
- 21 celooblohových kamier, 12 spektrálnych kamier
- územie zaznamenaných bolidov pokrýva rozlohu cca 1 mil. km²

Najvýznamnejšie výsledky

- **popis žiarenia meteoru pomocou fyzikálneho modelu prenosu žiarenia** – určenie chemického zloženia priamo porovnateľného so zložením meteoritov nájdených na Zemi
- **nálezy meteoritov** – určenie dopadovej oblasti, zloženia zo spektra + neskôršie potvrdenie na základe nájdených úlomkov
 - pre niekoľko obyčajných chondritov a aubrit Ribbeck

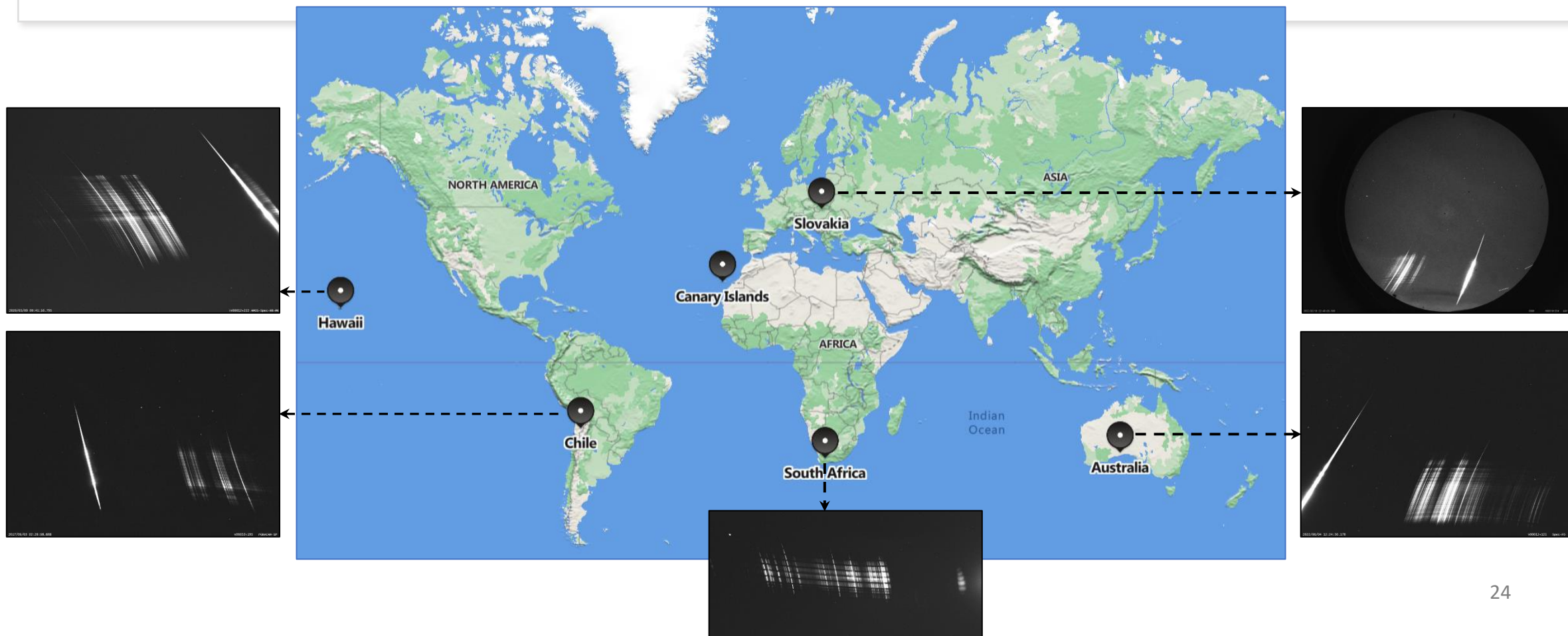


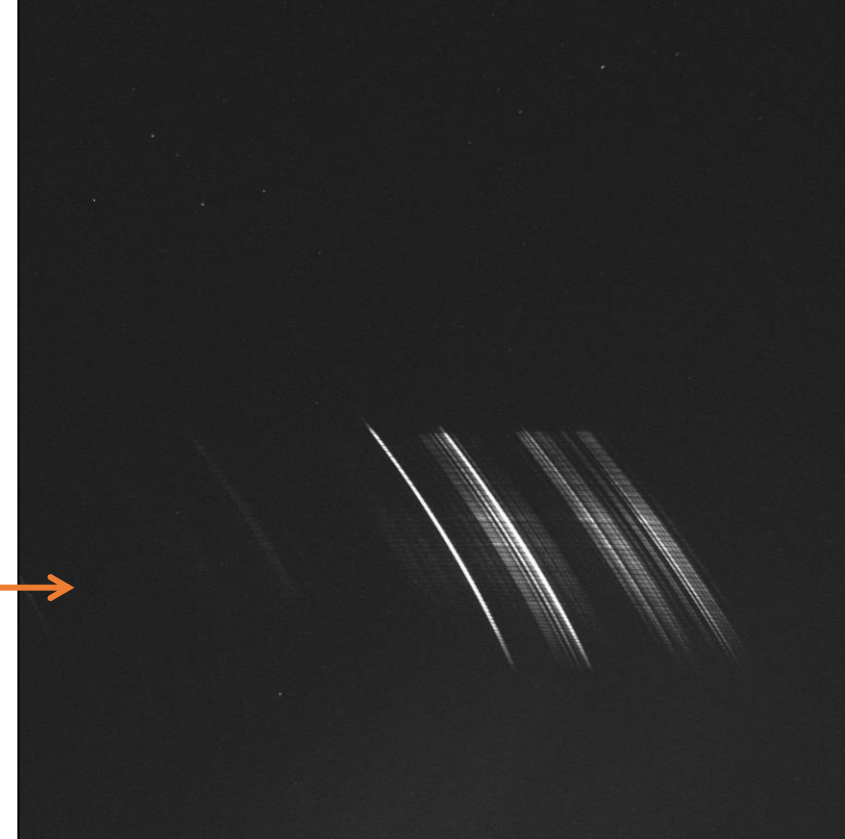
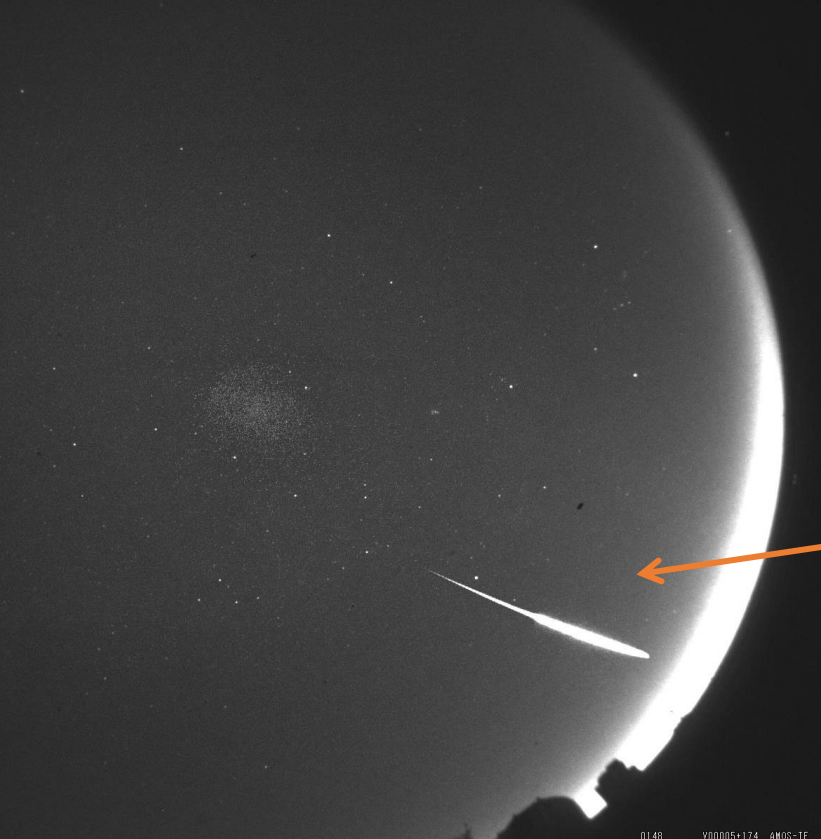
spektrum bolidu Ribbeck



2. Univerzita Komenského v Bratislave (AMOS sieť)

- **stanice:** Slovensko, Kanárske a Havajské ostrovy, Čile, Austrália, Južná Afrika, Arizona
- 17 štandardných celoblokových systémov – atmosférická trajektória + dráha v Slnčnej sústave
- 19 spektrálnych systémov – chemické zloženie + fyzikálne vlastnosti





AMOS systém

- video system
- plne automatizovaný, ovládaný na diaľku
- každý celoblohový systém zaznamenáva ~ 20 000 meteorov za rok
- spektier je oveľa menej (menšie zorné pole, len pre jasnejšie meteory od -1 mag, reprezentujúce mm-dm častice, geometria preletu)

Ukážka celooblohového záznamu meteoru

- meteor zaznamenaný
systémom AMOS
9.01.2024 na AGO Modra



2024/01/08 01:18:26.556

0016 00001 00000+206 AGO-ALLSKY



Ukážka spektrálneho záznamu meteoru

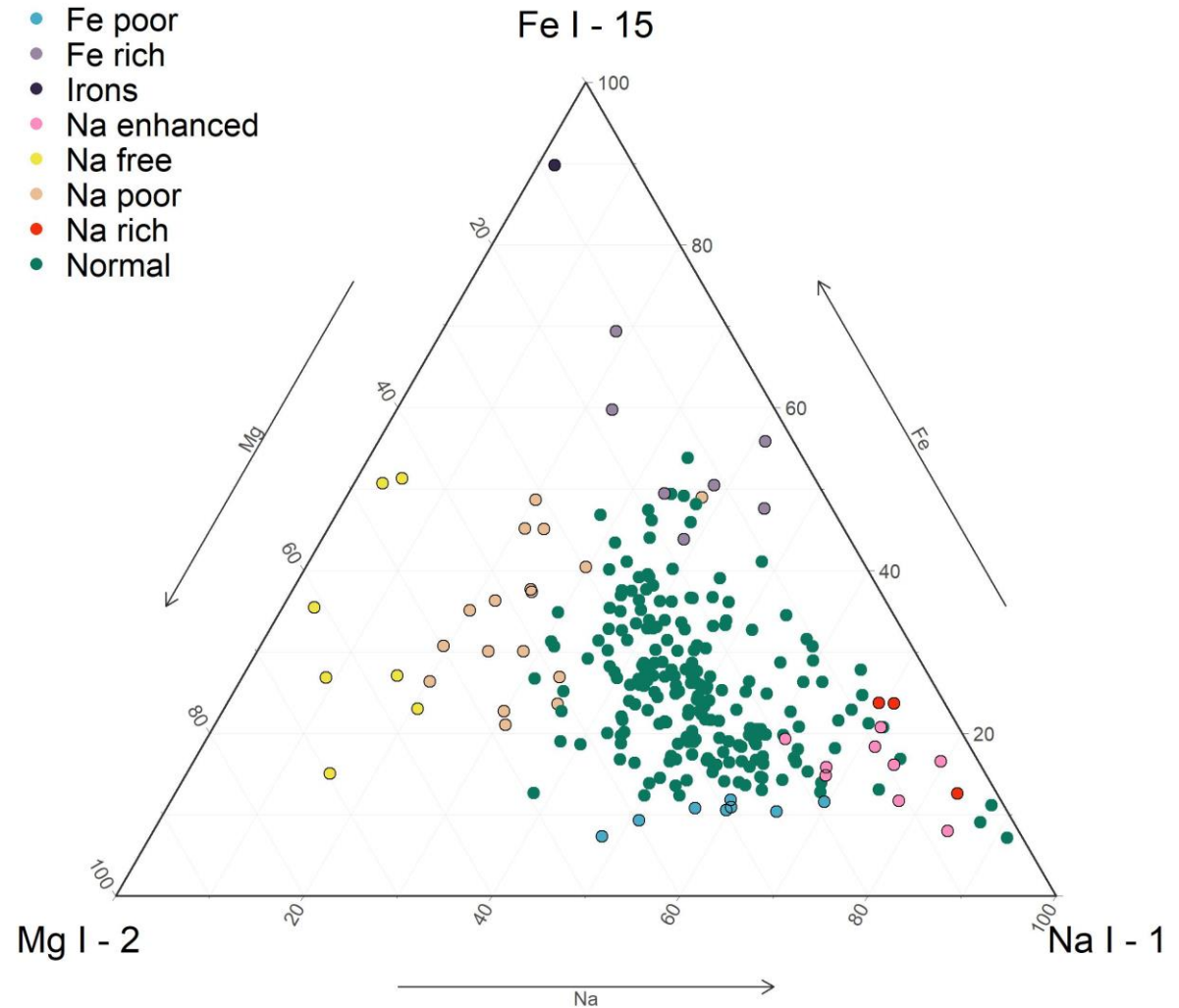
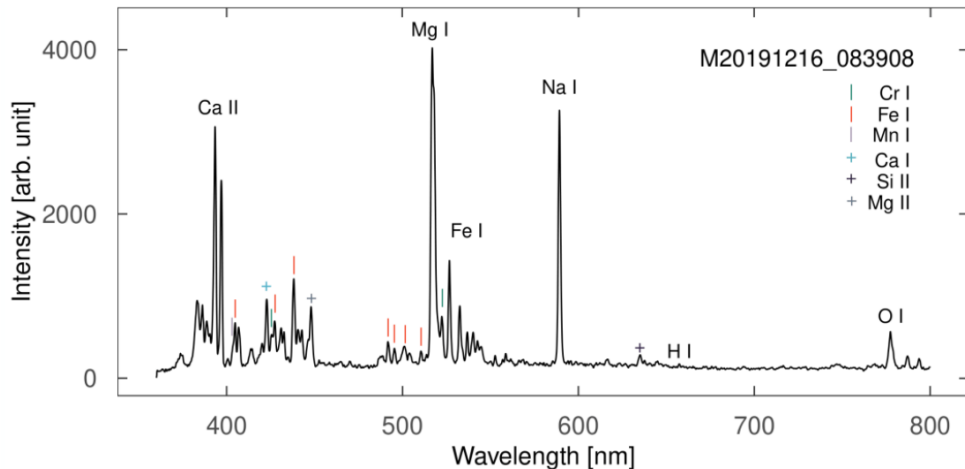
- spektrum meteora
zaznamenaného
systémom AMOS
9.01.2024 na AGO Modra

2024/01/09 01:18:26.546 00001

00000 069 AGO-SPEC-

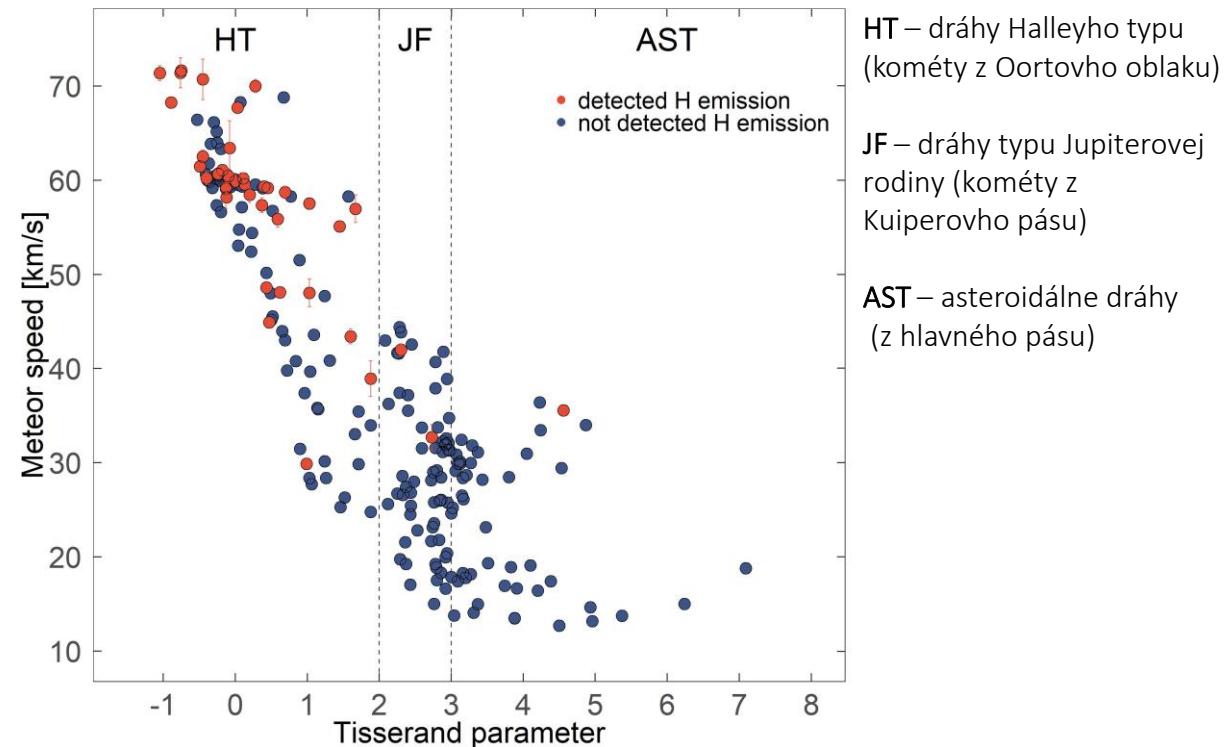
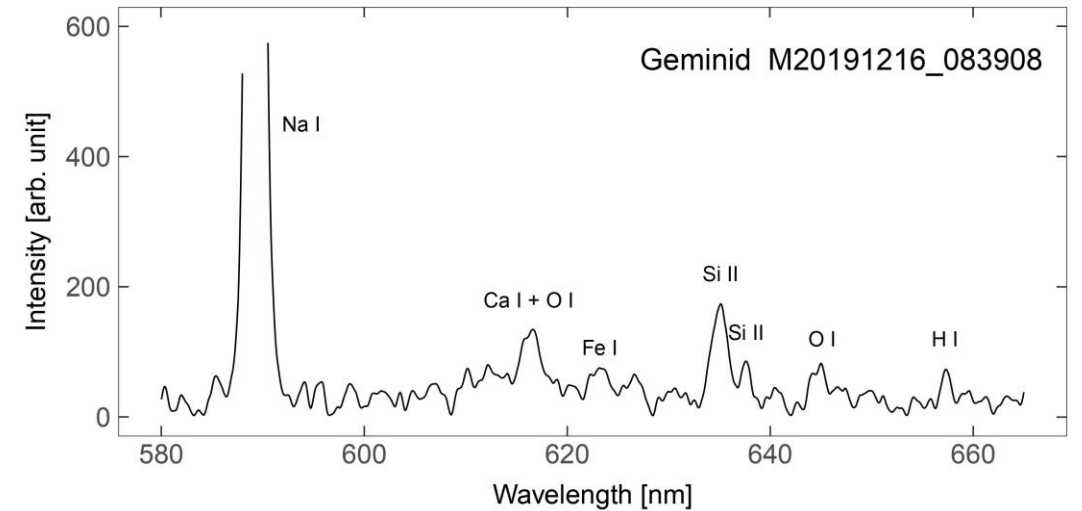
Najvýznamnejšie výsledky

- **spektrálne variácie meteorov z rôznych zdrojov** – rozšírenie spektrálnej klasifikácie na základe intenzít multipletov Na I, Mg I a Fe I
– problém je nájsť prepojenie medzi spektrálnou triedou a konkrétnym typom materiálu



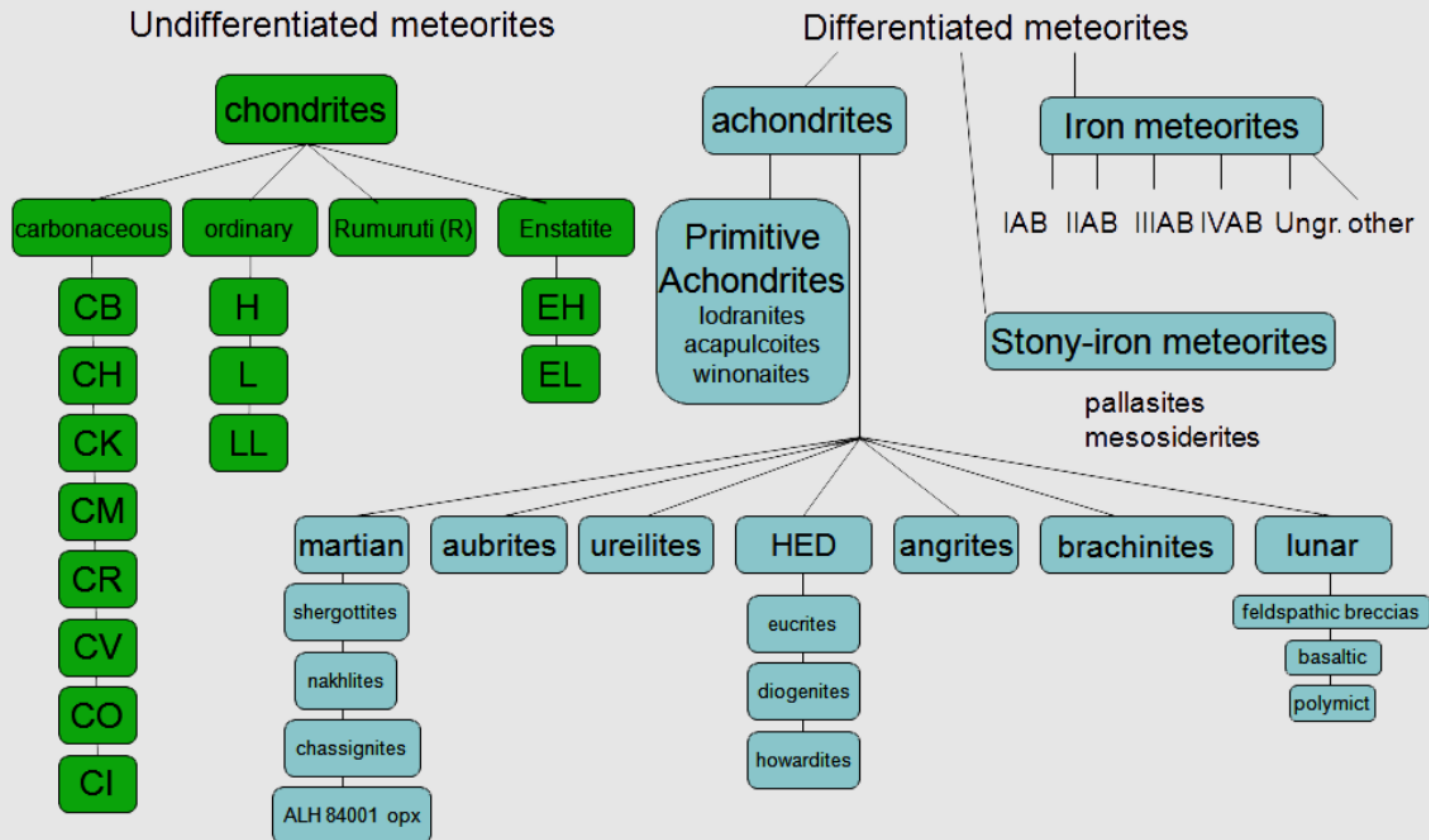
Ternárny diagram 253 meteorov pozorovaných AMOS spektrálnou kamerou v období 2013 – 2018.

- prítomnosť vody a organických zlúčenín:
 - nepriama metóda hľadania vody a organických zlúčenín v meteoroidoch
 - emisia vodíka **H α** na 656.3 nm - doteraz sa žiadne práce nevenovali jej systematickému hľadaniu
 - dataset: 304 spektier meteorov - H α nájdená v prevažne jasnejších a rýchlejších meteoroch na dlhoperiodických kometárnych dráhach Halleyho typu
- laboratórne experimenty ablujúcich meteoritov



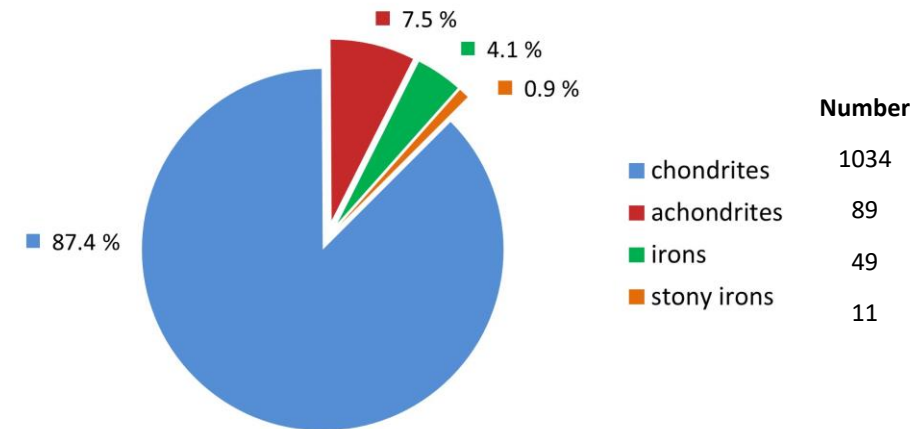
Klasifikácia meteoritov

METEORITE CLASSIFICATION CHART

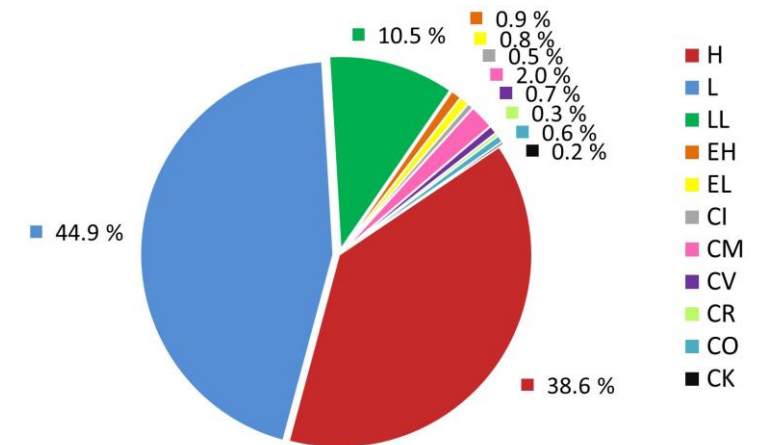


Credit: curator.jsc.nasa.gov

Statistics of major meteorite types



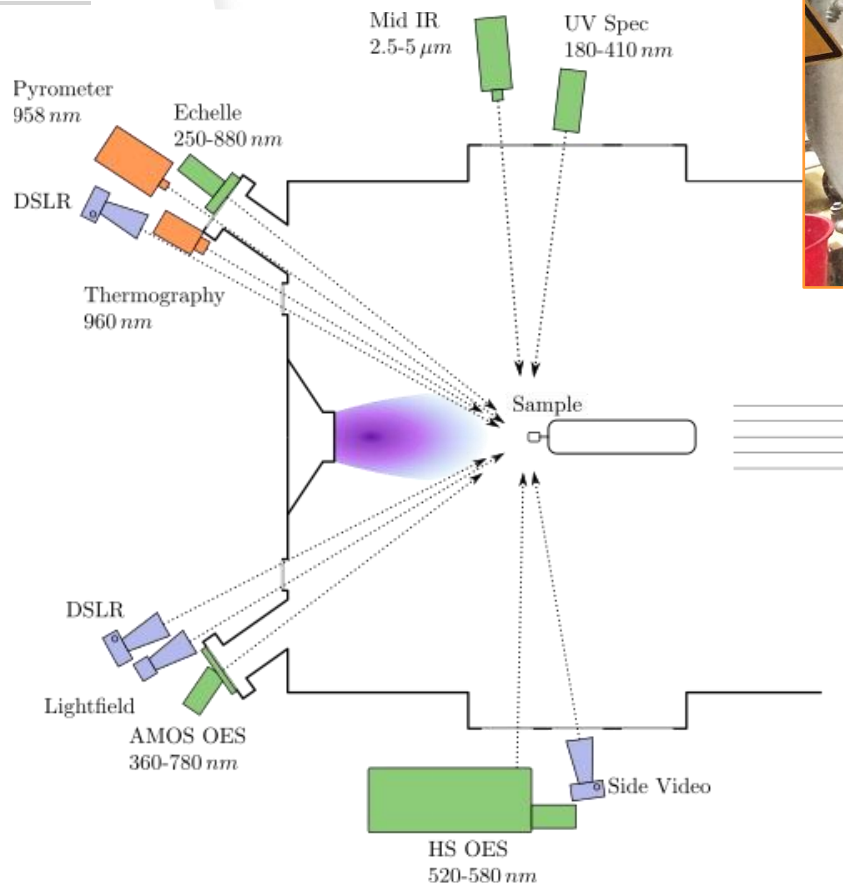
Statistics of chondrites



Meteoritical Bulletin Database (2023)

Laboratórne experimenty

- riešiteľ projektu: FMFI UK v Bratislave v spolupráci s IRS v Štutgarte a NHM vo Viedni
- simulácia meteorov v plazmovom veternom tuneli využitím vzoriek meteoritov – spektrá “umelých” meteorov
- Echelle spektrograf- 18-krát vyššie rozlíšenie ako AMOS spektrálna kamera



Plazmový veterný tunel v Štutgarte



AMOS Spec-HR kamera

Testované meteority

- celkovo 28 vzoriek meteoritov
- 17 odlišných typov meteoritov
- analógy asteroidálnych telies
- podmienky experimentu zodpovedali ~ 3.5 cm meteoroidu vo výške 80 km so vstupnou rýchlosťou ~ 12 km/s

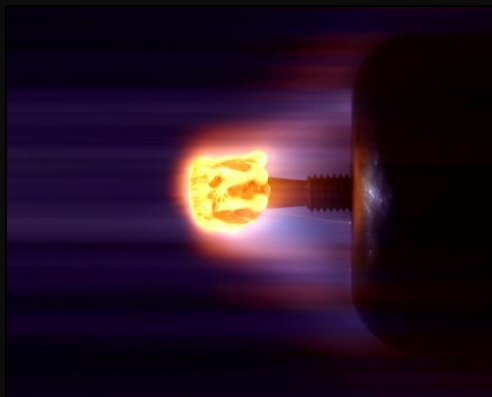
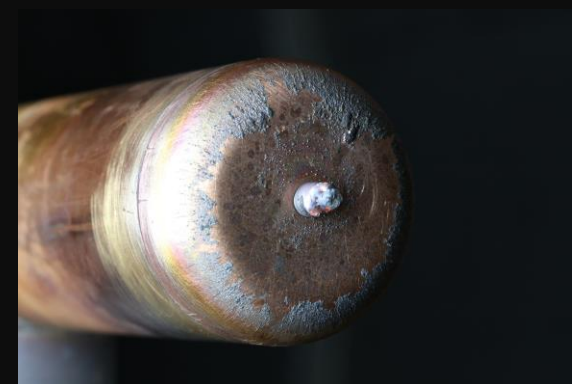
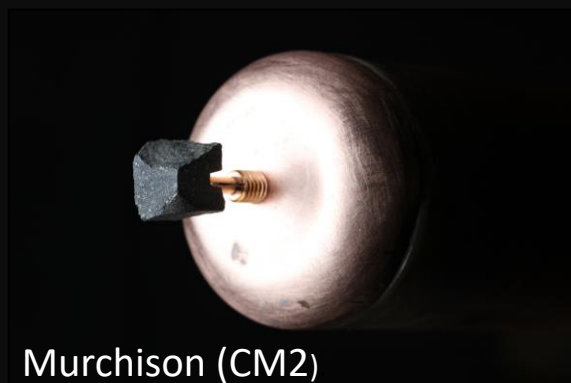


Meteorite	event	Meteorite	event
Mount Joy (Iron)	find	Eagle (EH5)	fall
Mincy (Mesosiderite)	find	Murchison (CM2)	fall
Košice (H5)	fall	Lancé (CO3.5)	fall
Pultusk (H5)	fall	Allende(CV3)	fall
Buzzard Coulee (H4)	fall	Sariççek (Howardite)	fall
Mocs (L5-6)	fall	Stannern (Eucrite)	fall
NWA 869 (L3-6)	find	Bilanga (Diogenite)	fall
Knyahinya (L/LL5)	fall	Tissint (Shergottite)	fall
Kheneg Ljouâd (LL5/6)	fall	NWA 11303 (Lunar)	find
Cheylabinsk (LL5)	fall	Norton County (Aubrite)	fall
Ragland (LL3.4)	find	Dhofar 1575 (Ureilite)	find

pred testovaním

počas testovania

po testovaní



Ablácia meteoritu Bilanga (Diogenite)

Frame number : 000000

Pts : 00:00:00,000

Ablácia meteoritu Kheneg Ljouâd (LL5/6)

Frame number : 000000

Pts : 00:00:00,000

 HEFDiG

Ablácia meteoritu Dhofar 1575 (Ureilite)

Frame number : 000000

Pts : 00:00:00,000

 HEFDiG

Ablácia meteoritu Murchison (CM2)

Frame number : 000000

Pts : 00:00:00,000

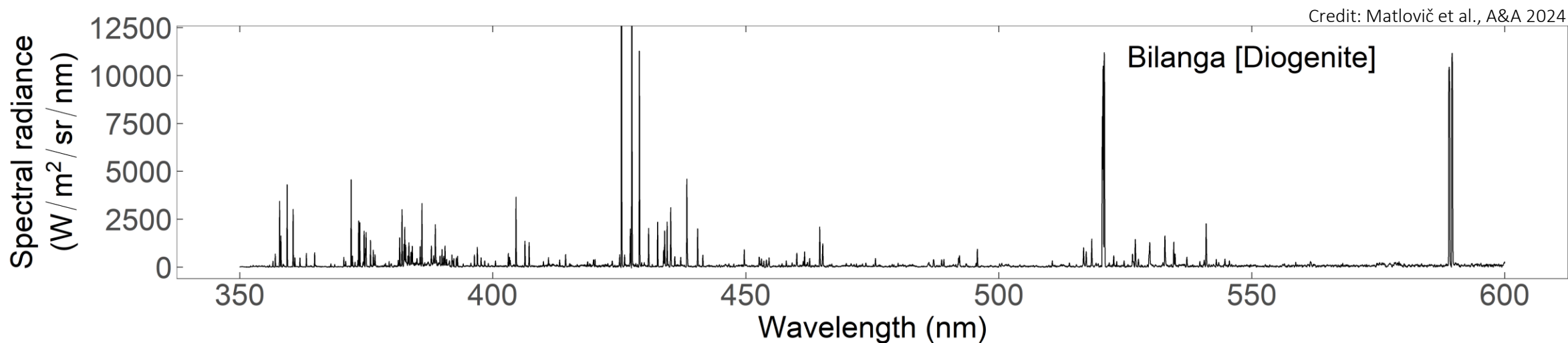
Ablácia meteoritu Mount Joy (Iron)

Frame number : 000000

Pts : 00:00:00,000

*HEFDiG

Čo sme získali z Echelle spektrografu?

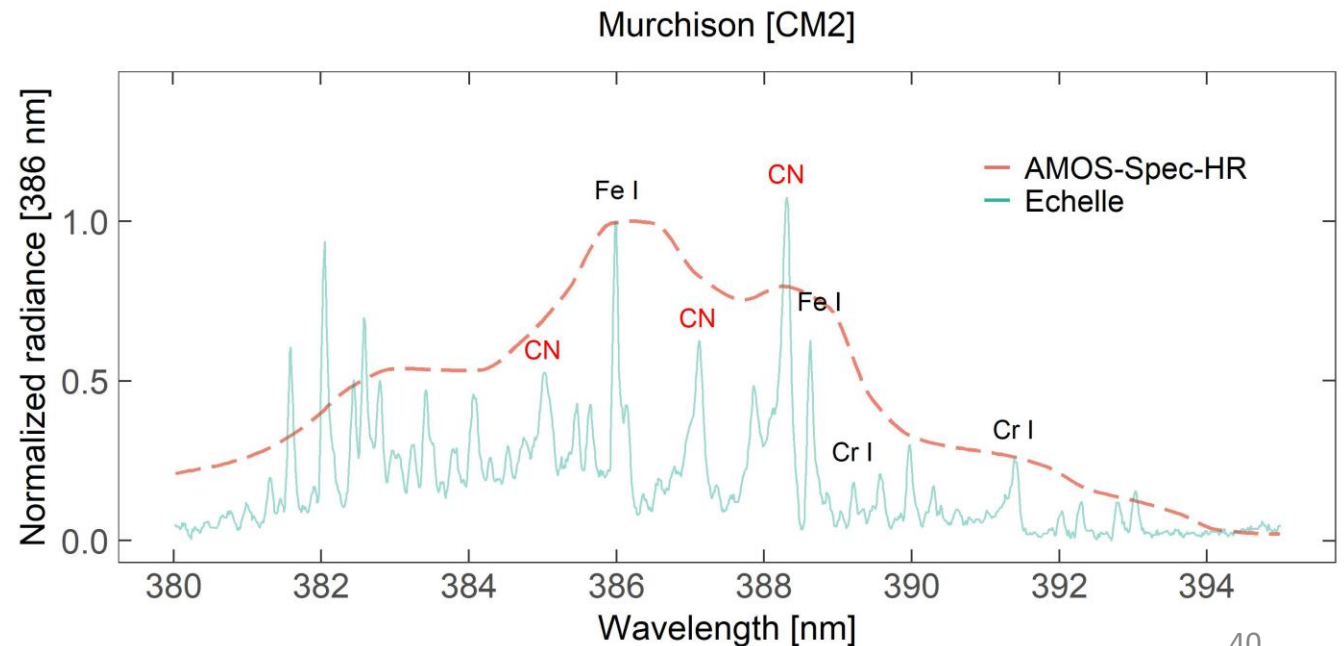
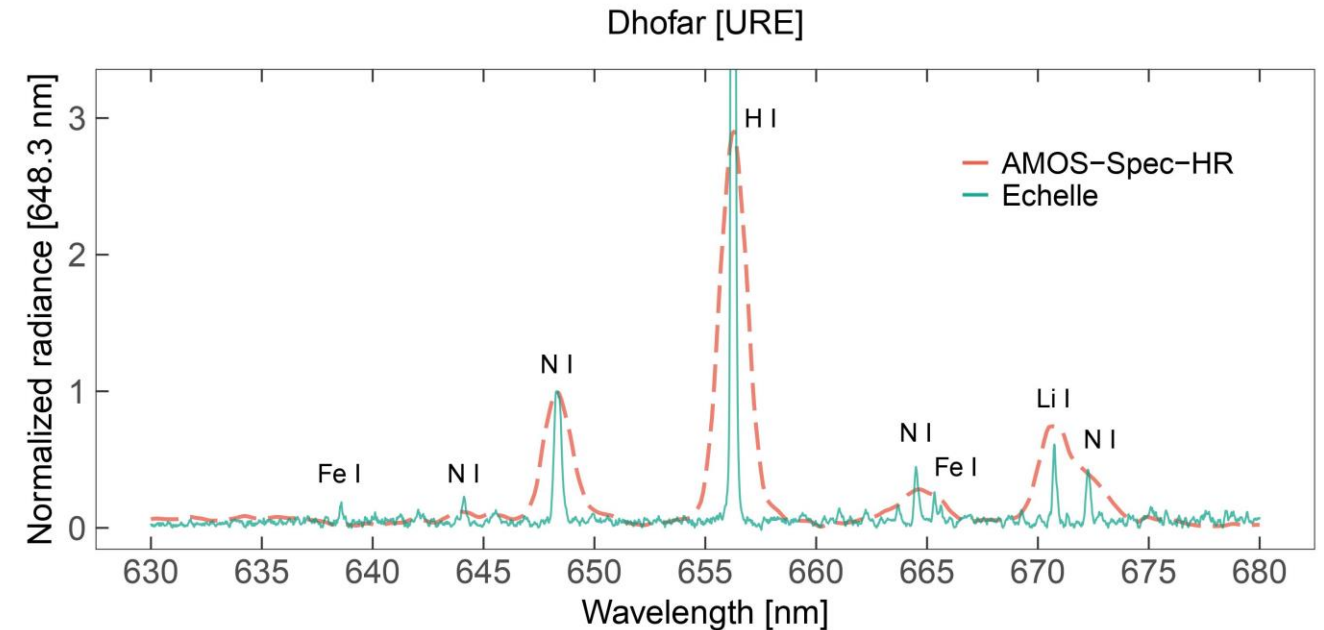


Hlavný cieľ:

- identifikovať spektrálne vlastnosti rôznych typov meteoritov – pomery intenzít čiar a diagnostické emisné čiary
- referenčné údaje pre interpretáciu spektier meteorov asteroidálneho pôvodu

Znaky prítomnosti vody a organických zlúčenín

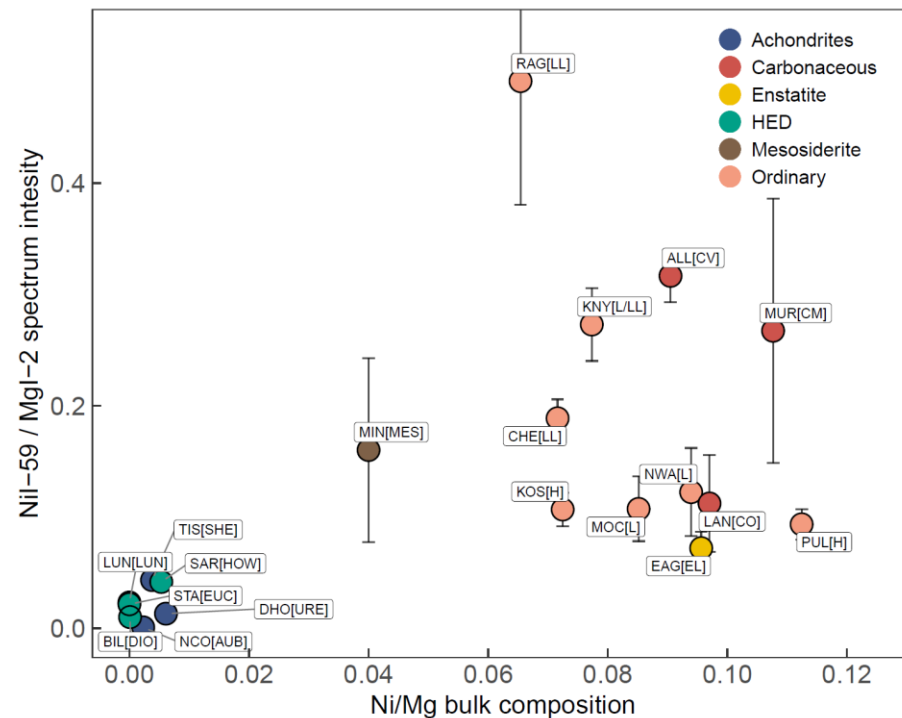
- emisia vodíka **H α** na 656.3 nm a kyanoradikálu **CN** s hlavným píkcom na 388.3 nm
- CN doposiaľ nebolo jednoznačne potvrdené v spektrách meteorov
- naša analýza potvrdila **prítomnosť obidvoch emisií v uhlíkatých meteoritoch a meteoritoch bohatých na C**



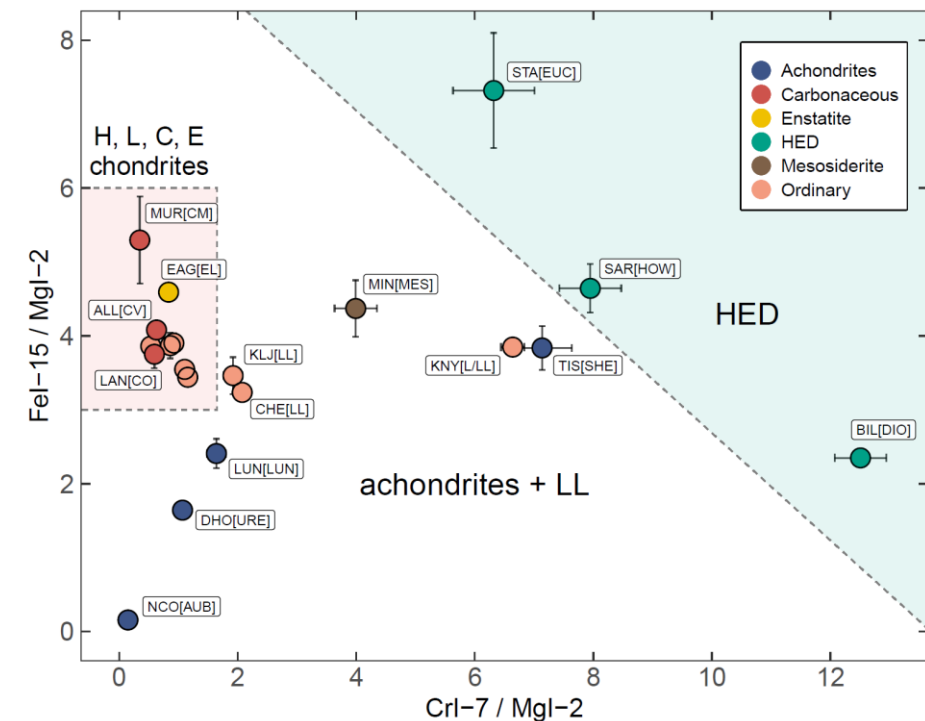
Diagnostické spektrálne znaky tried meteoritov

- identifikácia hlavných prvkov: Fe, Mg, Na, Cr, Mn, Li, Ni, K, Si + vedľajších: Co I, Cu I, V I
- neprítomnosť refraktorných prvkov: Ca, Ti, Al

Credit: Matlovič et al., A&A 2024



Ni I – rozlíšenie medzi chondritickými a achondritickými typmi meteoritov



Fe I, Cr I, Mg – rozlíšenie medzi HED achondritmi a ostatnými triedami achondritov a chondritov

Čo si odniesť...

meteory sú kľúčom k pochopeniu pôvodu a vývoju Slnačnej sústavy

rôzne typy pozorovaní prinášajú odlišné informácie – komplexný pohľad na meteory

moderné systémy umožňujú určovať dráhy meteorov a ich pôvod v Slnačnej sústave

spektrá meteorov odhaľujú ich chemické zloženie (indikácia vody a organických zlúčenín)

laboratórne experimenty pomáhajú lepšie interpretovať reálne pozorovania meteorov

Referencie

- Borovička, J.: “A fireball spectrum analysis”. *Astronomy & Astrophysics*, vol. 279, 2 (1993), 627-645.
- Borovička, J. and Berezhnoy, A. A.: “Radiation of molecules in Benešov bolide spectra”. *Icarus*, 278:248–265 (2016), doi: 10.1016/j.icarus.2016.06.022.
- Borovička, J. et al.: Data on 824 fireballs observed by the digital cameras of the European Fireball Network in 2017–2018. I. Description of the network, data reduction procedures, and the catalog. *Astronomy & Astrophysics*, 667:A157 (2022).
- Jenniskens, P. and Mandell, A. M.: “Hydrogen emission in meteors as a potential marker for the exogenous delivery of organics and water”. *Astrobiology*, 4(1):123–134 (2004), doi: 10.1089/153110704773600285.
- Loehle, S. et al.: “Experimental simulation of meteorite ablation during Earth entry using a plasma wind tunnel”. *The Astrophysical Journal*, vol. 837, 2 (2017): 112, doi: 10.3847/1538-4357/aa5cb5.
- Matlovič, P. et al.: “Hydrogen emission from meteors and meteorites: mapping traces of H₂O molecules and organic compounds in small Solar system bodies”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 513, 3 (2022): 3982-3992, doi: 10.1093/mnras/stac927.
- Matlovič, P., Pisarčíková A. et al.: “Spectral properties of ablating meteorite samples for improved meteoroid composition diagnostics”. *Astronomy & Astrophysics*, 689, id.A323 (2024). doi:10.1051/0004-6361/202450913
- Pisarčíková, A. et al.: “Analysis of CN emission as a marker of organic compounds in meteoroids using laboratory simulated meteors”. *Icarus*, vol. 404 (2023), 115682, doi: 10.1016/j.icarus.2023.115682.
- Spurný, P. et al.: “Atmospheric entry and fragmentation of the small asteroid 2024 BX1: Bolide trajectory, orbit, dynamics, light curve, and spectrum”. *Astronomy & Astrophysics*, Volume 686, id.A67 (2024), doi: 10.1051/0004-6361/202449735.
- Tóth, J. et al.: “All-sky Meteor Orbit System AMOS and preliminary analysis of three unusual meteor showers”. *Planetary and Space Science*, vol. 118 (2015): 102-106, doi: 10.1016/j.pss.2015.07.007.
- Tóth, J. et al.: “Overview of the MetSpec project - Artificial meteors in ground testing”. *Icarus*, page 115791 (2023), doi: 10.1016/j.icarus.2023.115791.