

Meteorit ásványok infravörös elemzése a Hera űrszonda támogatásához

Skultéti Ágnes

MTA CSFK Földrajztudományi Intézet

Bevezetés

A földközeli kisbolygók veszélyes becsapódásaik lehetősége miatt érdekesek [1], emellett közeli és űreszközzel könnyen elérhető kutatási célpontok is [2]. Az ESA Hera űrszondája [3] a Didymos kettős kisbolygót tervezi meglátogatni, amelyet előtte a NASA DART küldetése „meglő”, tesztelvén a becsapódás következményeit egy esetleges jövőbeli kisbolygó-eltérítés céljából. A becsapódás után érkezik a Hera és elemzi a következményeket (1b. ábra).

A Hera küldetés esetében tervezett infravörös detektor a kisbolygó felszíni törmelékanyagáról szóródó infravörös sugárzást elemzi. A detektor pontos megtervezéséhez azonban tudni kell, hogyan néznek ki a különféle meteoritok infravörös színeképei [4]. Sok kisbolygó mintája itt a Földön is elérhető meteoritok formájában – noha nem tudjuk pontosan, melyik kódarab melyik kisbolygóról származik, elemzésük mégis fontos támpontot adhat ahhoz, hogy miként tervezzük egy űrszonda műszerét. A meteoritok anyaga változatos, részben típusaik szerint [5, 6], emellett a becsapódásoktól ásványaik sokkolt állapotban lehetnek [7, 8], egyedi színképi jellemzőket mutatva. Különféle egyéb átalakulási nyomokat is megfigyelhetünk rajtuk [9] – mindezek a kisbolygók színeképet is befolyásolhatják.

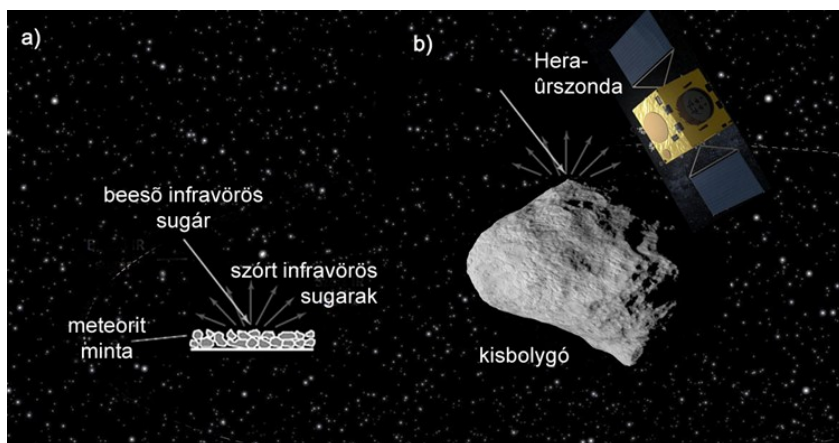
DRIFTs módszertan

Az infravörös (IR) tartomány a látható spektrumtartomány végétől a mikrohullámú tartományig terjed ($14000\text{--}20\text{ cm}^{-1}$), mely $14000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ között a közeli infravörös (NIR), $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ között a közép infravörös (MIR), míg $400\text{--}20\text{ cm}^{-1}$ között a távoli infravörös tartományra osztható. Az analitikai kémia és ásványhatározás számára ebből a $200\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ ($650\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$) közötti „ujjlenyomat” tartomány a legfontosabb, itt mutatkoznak a meteoritok ásványainak fontos vonalai.

A diffúz reflexiós infravörös Fourier-transzformációs spektroszkópia (DRIFTs) bonyolult folyamat, amelynek háttérében részt vesz abszorpció, transzmisszió, reflexió és szórás. A DRIFTs infravörös színekép (spektrum) elsősorban kvalitatív

analitikai célokat szolgál, azonban kvantitatív analitikai információt is hordoz. Az infravörös színekép a vizsgált anyagok különböző kötéseire, atomcsoportjaira jellemző abszorpciós sávokat tartalmaz, de a sugárzást szóró részecskék alakja, keménysége, kompaktáltsága, refraktív indexe, reflektivitása és elnyelése is befolyásolja a mérést.

A DRIFTs egység az IR fényt a mintatartóra fókuszálja. A fény kapcsolatba lép a minta részecskéivel és visszaverődik azok felületéről, diffúz szóródással, ami a minta fölött félkörben oszlik el (1a. ábra). A külső tükör a szórt sugárzást a spektrométer detektorába irányítja, és a detektor rögzíti az IR nyaláb változását, mint interferogram jelet, ami ezután használható a spektrum létrehozására. A háttér begyűjtése az IR mátrixból történik. A minta durva felszínén a sugárzás minden irányban reflektálódik. Ahhoz, hogy kellő mennyiségű diffúz sugárzás jusson a detektorhoz, egy optikai tükörrendszer szükséges [10–14]. Ez lehetővé teszi az IR sugárzás mintára való fókuszálását és a diffúz reflexiók (DR) sugárzás egy részének begyűjtését [15].



1. ábra: Az infravörös sugárzás és a minta kölcsönhatása (a), és fantáziarajz ennek megfigyeléséről (b). (Forrás: ESA, ScienceOffice.org)

A DRIFTs analízist számos tényező befolyásolja, többek között a minta szemcsemérete, hőmérséklete, kémiai összetétele, fizikai állapota és a beeső IR hullámhossz.

- Ideális esetben a szemcseméretnek kisebbnek kell lennie, mint a beeső IR fény hullámhossza (közepes IR tartományban $<5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$). A reflexió a szemcseméret növekedésével csökken, a kisebb átlagos szemcseméret ($<10\text{ }\mu\text{m}$) szebb spektrumot ad, kisebb csúcsszélességgel a nagyobb átlagméretű szemcsékhez ($>90\text{ }\mu\text{m}$) képest [13].

- A hőmérséklet szintén befolyásolja a reflektancia spektrumában a csúcsok pozícióját, szélességét és intenzitását. A hőmérséklet növekedésével a csúcsok kiszélesednek, intenzitásuk csökken, néhányan magasabb hullámhossz felé mozdulnak el, míg más csúcsok eltűnnek [16].
- A kémiai összetétel változásával a minta spektrumában egyes csúcsok eltűnnek, mások megjelennek. A meteoritokban gyakori olivin és piroxén ásványok esetén a vas (Fe^{2+}) tartalom növekedésével bizonyos csúcsok gyengébbé válnak, csökken a csúcsok reflektanciája és változás tapasztalható egyes csúcsok pozíciójában [17, 18].
- A becsapódásoktól sokkolt minták (magas nyomás/hőmérséklet hatására torzult kristályszerkezettel rendelkeznek) kevesebb spektrális változást mutatnak, habár a csúcsok intenzitása a sokkhatás mértékének növekedésével csökken [19]. A kristályos belső szerkezettel rendelkező minták spektruma jóval élesebb, mint az amorf szerkezetű minták esetén [20].

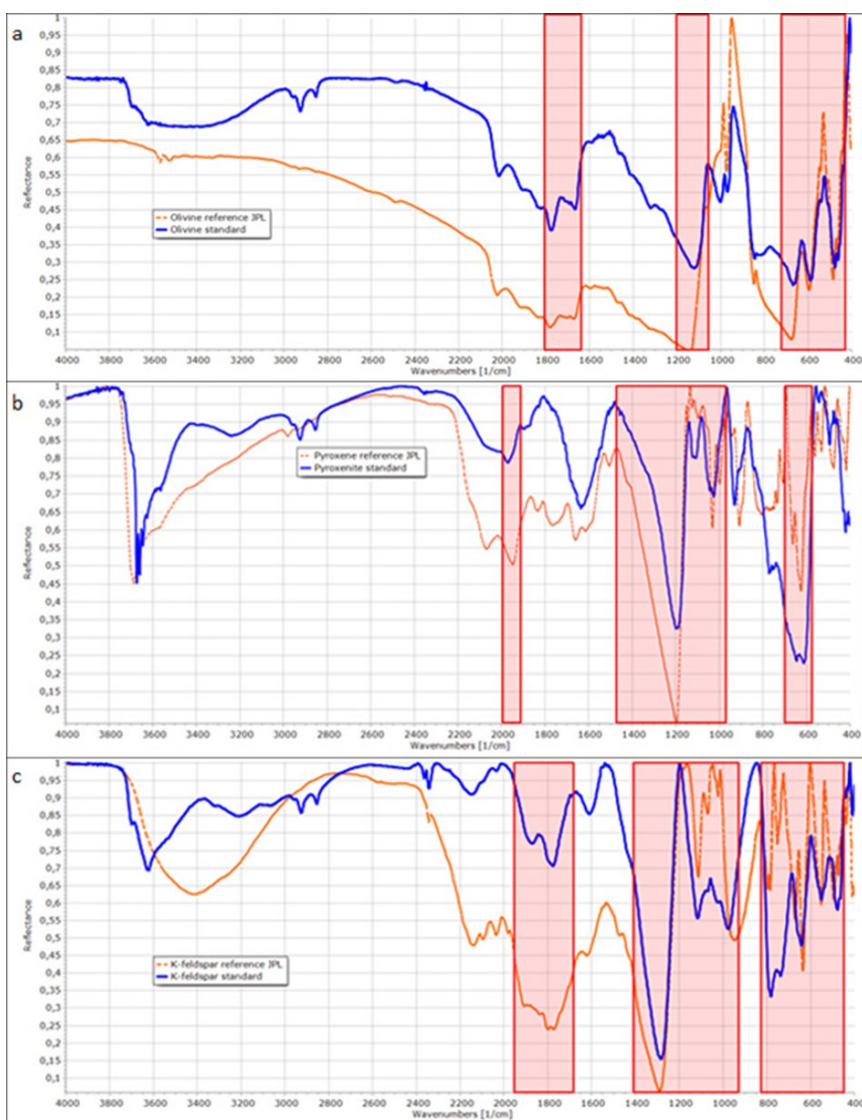
Vizsgált minták és műszerek

Az MTA CSFK Földrajztudományi Intézetében Kereszturi Ákos vezetésével végzett munkánk során eddig három, meteoritokban gyakori szilikát ásvány tiszta, referencia mintáit: olivin ($\text{Fe,Mg}_2\text{SiO}_4$), piroxén ($\text{Fe,Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$) és földpát (KAlSi_3O_8), illetve meteorit porok (NWA 869, Allende) reflektancia színeképét elemeztük. Az NWA 869 meteorit egy breccsás L3-6 típusú meteorit, mely a normál kondritok osztályába tartozik, míg az Allende egy CV3 szenes kondrit típusú meteorit.

Méréseinkhez a diffúz Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia módszerét alkalmaztuk. A műszer fizikailag három egységből épül fel, melyek a következők: egy Vertex 70 Fourier-transzformációs infravörös spektroszkóp, egy Praying Mantis diffúz reflektancia egység, és egy folyékony nitrogénnel hűtött, alacsony hőmérsékletű reakciókamra.

Eredmények

A vizsgált meteorit ásványok reflektancia színeképeiben az adott ásványra jellemző csúcsok mutatkoznak (2. ábra), melyek csúcspozíciója a vizsgált ásványok esetén az 1. táblázatban látható.



2. ábra: Vizsgált meteorit ásványok reflektancia spektruma sötétebb színnel (4000–400 cm^{-1}), referencia spektrumok világosabb színnel a NASA JPL spektrális adatbázisból. A téglalapok az egyes ásványok karakterisztikus csúcsait jelölik (a) olivin, (b) piroxén és (c) földpát ásvány esetében

Ásványok	Karakterisztikus csúcsok (cm⁻¹)
Olivin	1800–1600, 1100s, 700–400
Piroxén	2000, 1200s, 1100w, 1000, 600–700
Földpát	1800–1600, 1300s, 1100–900, 800–500

1. táblázat: A vizsgált meteorit ásványok (olivin, piroxén, földpát) karakterisztikus csúcsai

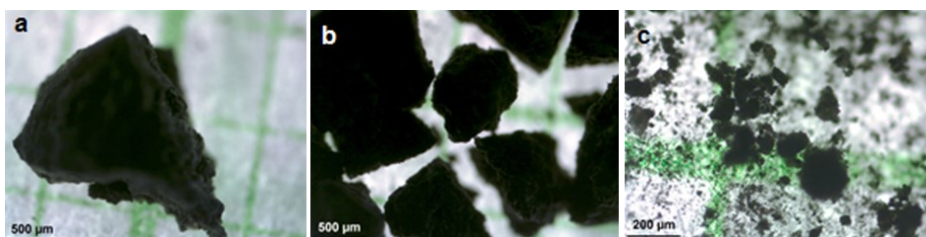
Az általunk vizsgált ásványok reflektancia színeképei jó egyezést mutatnak a NASA JPL adatbázisból származó olivin, piroxén és földpát színeképekkel (2. ábra). Ennek megfelelően tehát a Földtani és Geokémiai Intézet FTIR műszeréhez kapcsolt új DRIFT egység megfelelően üzemel, és megbízható spektrumokat tud rögzíteni.

Az NWA 869 meteorit reflektancia színeképének elemzésével a meteorit ásványos összetétele mellett kisbolygókra is releváns ásványi összetétel becsülhető. A vizsgált meteorit fő alkotói közé tartoznak a gyakori olivin, piroxén, földpát mellett az egykori vizes környezetre utaló agyagásványok, karbonát, vas-oxid és -hidroxid, illetve az ősi eredetű spinel, troilit és kromit.

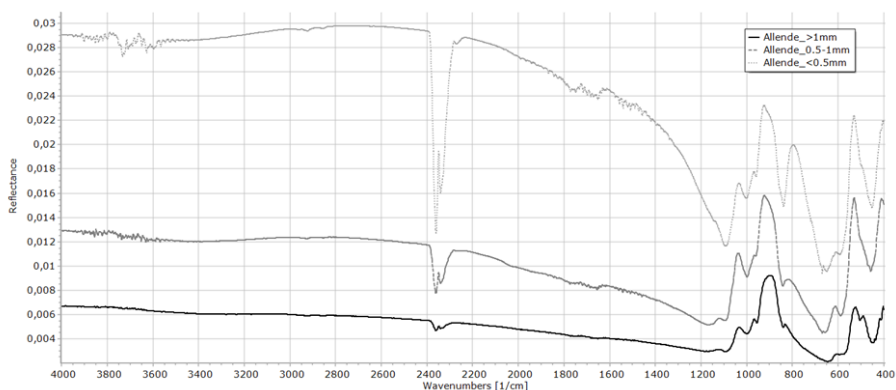
Minta	Ásvány	DRIFTs csúcsok (cm⁻¹)
NWA 869	Piroxén	1023, 970, 916, 864, 679, 667, 528, 488
	Olivin	840, 613, 602, 507
	Spinel	679, 507
	Földpát	1084, 952, 727, 645, 565, 538, 472, 434
	Agyagásvány	1139, 916, 538, 472
	Karbonát	1445
	Troilit	613, 538, 455
	Vas-oxid, -hidroxid	904, 538, 442, 409
	Kromit	667, 409

2. táblázat: Az NWA 869 meteorit ásványos összetétele, jellemző csúcsai

Elvégeztük a különböző szemcseméretű (>1 mm, 0,5–1 mm, <0,5 mm) Allende meteorit porminták (3. ábra) DRIFTs elemzését (4. ábra), hogy a minta szemcseméretének a színekpre való hatását vizsgáljuk. Az elemzett mérettartomány sok kisbolygó felszínén is jellemző lehet az ott előforduló porban, néhány megfigyelés alapján.



3. ábra: Eltérő szemcseméretű Allende meteorit porminták
a) >1 mm b) 0,5–1 mm c) <0,5 mm optikai képe



4. ábra: Különböző szemcseméretű (>1 mm, 0,5–1 mm, <0,5 mm)
Allende meteorit porminták reflektancia spektruma (4000–400 cm⁻¹)

Megfigyeléseink alapján a minta szemcseméretének csökkenésével a reflektancia nő, a színek minősége és felbontása javul (4. ábra). A szemcseméret változásával egyes csúcsok pozíciójában elmozdulás tapasztalható, míg bizonyos csúcsok eltűnnek, mások megjelennek a színekben.

Konklúzió

A meteorit ásványok földi infravörös spektroszkópos mérése lehetővé teszi az egyes ásványok megbízható azonosítását a rájuk jellemző reflektancia színek csúcsai alapján. A gyakori meteorit ásványok (olivin, piroxén, földpát) egyedi színekének ismerete megkönnyíti a többféle ásványt tartalmazó meteoritok színeinek értelmezését, összetételének meghatározását. A reflektancia színek több tényezővel szembeni érzékenysége (a minta szemcsemérete, hőmérséklete, fizikai állapota, kémiai összetétele) lehetővé teszi egy mért, ismeretlen minta néhány tulajdonságának becslését is – avagy egy adott tulajdonság ismeretében a pontosabb színkép értelmezést.

Természetesen egy kisbolygó felszínéről visszavert infravörös sugárzás értelmezése bonyolultabb, mint egy-egy meteorit színekének a megértése. A kisbolygókon ugyanis egyszerre többféle szemcseméret lehet jelen, és az ásványok a különféle sugárzások hatására részben át is alakultak, kristályszerkezetük torzult, hibák kerültek bele – a laboratóriumi színekhez képest sokkal nehezebb a megértésük. Ugyanakkor az így szerzett adatok, ismeretek és tapasztalatok felhasználhatók a tervezett detektorok sávjainak kijelölésében, és a kisbolygók felszíni regolitját vizsgáló űrszondák fejlesztéséhez. Mindez a munka pedig viszonylag szerény ráfordítással végezhető, ha megfelelő laboratóriumi műszerparkunk van, tehát fontos lehetőséget biztosít az űrtevékenységbe való bekapcsolódásra a szerényebb műszaki kapacitású országoknak is.

Ezt a kutatási projektet az ESA NEOMETLAB programja és a H2020 Excellence of Strategic R&D projekt keretében az NKFIH GINOP-2.3.2-15-2016-00003 pályázata támogatta.

Irodalomjegyzék

- [1] Kereszturi Á., Sárneczky K. (2003): Célpont a Föld? – Kisbolygók a láthatáron. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest
- [2] Bowles N.E. et al. (2018): CASTAway: An asteroid main belt tour and survey. *Advances in Space Research*, 62, 1998
- [3] Michel P. et al. (2016): MarcoPolo-R: Near-Earth Asteroid sample return mission selected for the assessment study phase of the ESA program cosmic vision. *Acta Astronautica*, 93, 530
- [4] Kereszturi Á. et al. (2017): Analyzing Raman–Infrared spectral correlation in the recently found meteorite Csátalja. *Spectrochimica Acta Part A*, 173, 637

- [5] Mészáros M. et al. (2014): A new classification of Nyirábrany, an ordinary chondrite from Hungary. *Meteorites*, 3, 17
- [6] Van Schmus W.R., Wood J. A. (1967): A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31, 747
- [7] Gyollai I. et al. (2017): Shock-induced alterations in the recently found H chondrite Csátalja meteorite and its implications. *Central European Geology*, 60, 173
- [8] Nagy Sz. et al. (2012): Shock and thermal annealing history of the ALH 77005 Martian meteorite: a micro-Raman spectroscopic investigation. *Central European Geology*, 55, 33
- [9] Gucsik A. et al. (2017): Luminescence Spectroscopical Properties of Plagioclase Particles from the Hayabusa Sample Return Mission: An Implication for Study of Space Weathering Processes in the Asteroid Itokawa. *Microscopy and Microanalysis*, 23, 179
- [10] Mitchell M.B. (1993): Fundamentals and Applications of Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) Spectroscopy. In: Urban M.W., Craver C.D. (eds.), *Structure-Property Relations in Polymers*, Advances in Chemistry Series, 236 (13), American Chemical Society, p. 351
- [11] Korte E.H. (1990): Infrarot-Spektroskopie diffus reflektierender Proben. In: Günzler H. et al. (eds.), *Analytiker Taschenbuch*, Vol. 9., Springer, p. 91
- [12] Fraser D.J.J., Griffith P.R. (1990): Effect of Scattering Coefficient on Diffuse Reflectance Infrared Spectra. *Applied Spectroscopy*, 44, 193
- [13] Fuller M.P., Griffith P.R. (1978): Diffuse Reflectance Measurements by Infrared Fourier Transform Spectrometry. *Analytical Chemistry*, 50, 1906
- [14] Kortüm G., Delfs H. (1964): Reflexionsspektrometrische messungen im infraroten spektralgebiet. *Spectrochimica Acta*, 20, 405
- [15] Drochner A., Vogel G.H. (2012): Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy: an In situ Method for the Study of the Nature and Dynamics of Surface Intermediates. In: Schäfer R., Schmidt P.C. (eds.), *Methods in Physical Chemistry*, 1st Edition, Wiley, p. 445
- [16] Armaroli T. et al. (2004): Diffuse Reflection Infrared Spectroscopy (Drifts): Application to the in Situ Analysis of Catalysts. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 59, 215

- [17] Chihara H. et al. (2002): Compositional dependence of infrared absorption spectra of crystalline silicates. I. Mg-Fe pyroxenes. *Astronomy and Astrophysics*, 391, 267
- [18] Koike C. et al. (2003): Compositional dependence of infrared absorption spectra of crystalline silicate. II. Natural and synthetic olivines. *Astronomy and Astrophysics*, 399, 1101
- [19] Johnson J.R. et al. (2001): Thermal Infrared Spectroscopy of Experimentally Shocked Anorthosite and Pyroxenite. 32nd LPSC, abstract 1195
- [20] Koike C. et al. (2000): Absorption spectra of Mg-rich Mg-Fe and Ca pyroxenes in the mid- and far-infrared regions. *Astronomy and Astrophysics*, 363, 1115