



Bérczi Szaniszló, Gucsik Arnold, Hargitai Henrik,
Józsa Sándor, Kereszturi Ákos, Nagy Szabolcs, Szakmány György:

KIS ATLASZ A NAPRENDSZERRŐL (11)

KŐZETSZÖVETEK A NAPRENDSZERBEN

Szerkesztette Bérczi Szaniszló



ELTE TTK/MTA Geonómia Bizottság
Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport
Budapest • 2008

Bérczi Szaniszló, Gucsik Arnold, Hargitai Henrik, Józsa Sándor, Kereszturi Ákos, Nagy Szabolcs, Szakmány György

KIS ATLASZ A NAPRENDSZERRŐL (11): KÖZETSZÖVETEK A NAPRENDSZERBEN

Szerkesztette: Bérczi Szaniszló

ELTE TTK/MTA Geonómia Bizottság, Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport, Budapest, 2008

A földtudományoknak van egy sajátos vizsgálati módszere. Egyszerre vizsgálja a nagyobb kiterjedésű kőzettesteket, amelyek többnyire egymásra rétegződnek az égitestek felszínén és a kőzetmintákat, melyeket ezekből a kőzettestekből vesz ki.

Ez a stratégia nem folytatható akkor, amikor vagy a kőzettest ismeretlen, vagy a kőzetminták. Ilyen helyzet áll fenn akkor, amikor kozmikus környezetünk égitestjeit vizsgáljuk. A Holdon előbb alkották meg a sztratigráfiát, majd később jutottunk néhány pont-ról holdi kőzetmintákhoz. Mintegy kétszáz éve pedig, Ernst Chladni könyvének (1794) megjelenésével kezdetét vette az a nyomozás, melynek során a meteoriteket vizsgálták. A belőlük kiolvasott fejlődéstörténet alapján egy legtöbb esetben mindmáig azonosítatlan forráségitest kőzettestjeinek fejlődéstörténetét sikerült rekonstruálni.

Földünk fejlődéstörténetét már évszázadok óta vizsgálja számos tudományág. A földtan (geológia) az a nagy szintézist fölépítő tudományág, melynek keretei között a Földtestnek a fejlődéstörténetét megfogalmazták és leírták. A földtan a Föld felszínén és a felszín közelében található kőzettestek vizsgálata útján jutott el következtetéseihez. Adatait a kőzettestek nagyléptékű földtani térképezésével, valamint a kőzettestekből vett kőzetminták mikroszkópi, majd egyre mélyebb anyagszerkezeti rétegekbe hatoló vizsgálataival gyűjtötte össze.

Új kis atlaszunkban a Földnél kisebb égitestek anyagainak vizsgálatával, a kőzetek szövetének tanulmányozásával foglalkozunk. Az első kicsi égitest egy kondritos összetételű kisbolygó, 100–300 kilométeres átmérőjű és fejlődéstörténetében olyan eseményeket hordoz, amelyeket nem ismerhetünk a Föld történetéből. A kondritos kisbolygó a Naprendszer ősi anyagából jött létre. Azért tudta megőrizni az ősi anyagokat, mert kis mérete folytán rövid ideig tartott benne az a fölmelegedés, amit a rövid felezési idejű radioaktív elemek hoztak létre benne. De ez alatt a rövid fölmelegedés alatt égitestünk végigment olyan fejlődési állomásokon, amelyek előbb fokozatosan átalakították majd kismértékben szét is változtatták az ősi szilárd anyag-együttest és sűrűségük szerint övekre

tagolták. A kisebb kondritos égitestek nem jutottak el eddig az állapotig, ők viszont megőrizték az ősi anyagösszetételt.

A Holdról származik a másodikként külső égitestről érkezett anyaggyűjtemény. A NASA Apollo-expedíciókon gyűjtött mintáiból az egyetemi oktatás számára készült vékonycsiszolati gyűjteményét elemezzük. A holdkőzetekből sok fontos ismeretet gyűjtöttünk a Hold felszíni folyamatairól. Ezek közül kiemelkedő jelentőségű a holdi anortozitok kéregalkotó szerepe, a nagy mélységből származó lávaszökőkúti szferulák holdi köpeny eredete, a mare bazaltok sokfélesége, néhány mare bazalt nagy titántartalma és a kormegállapítások arról, hogy nagyon idős holdi kőzetvilág.

Ma a holdi kőzeteket összetételük szerint a bázisos-ultrabázisos földi kőzetek közé interpolálhatjuk. Nagyobb magnéziumtartalma alapján több holdi kőzet már a pikrites ultrabázisos tartományba esik (12002, 70017). Azonban a becsapódások által elvégzett anyagkeveredéseknél három fontos csoportot különítenek el a holdi talajok forrásvidékeire. Az egyik a felföldek *anortozitja*, a másik a viszonylag nagy vastartalmú *mare bazaltok* csoportja s a harmadik a káliumban (K), ritkaföldfémekben (RFF, angolul REE) és foszforban (P) való gazdagsága miatt *KREEP*-nek nevezett komponens. Ez utóbbi komponens a *Mare Imbrium*tól való távolodással csökken a talajösszetevők között. A három fő forrástípus a későbbi *Clementine* és *Lunar Prospector* űrszondák sugárzásos összetétel analízatorai is jól el tudták különíteni. Így ma, a hat leszállás kicsiny felszíni mintavételezése ellenére a Hold egészére kiterjedő összetételi térképek állnak már rendelkezésünkre a holdfelszín anyagairól.

Munkánkban két fontos anyagminta gyűjteményre hivatkozunk. Ezeket dolgozik űrkutató csoportunk, a Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport az Eötvös Loránd Tudományegyetemen. Ezek használata tette lehetővé a fejlődéstörténeti kép kutatását és rekonstruálását. Az egyik a *NIPR* (Japán Nemzeti Sarkkutató Intézet) Antarktisi Meteorit Vékonycsiszolat Gyűjteménye.

A meteoritek között az 1960-as évekig fölismertek egy olyan csoportot, amely a magmás szövetű akondritok közül közös kémiai vonásokkal válik ki. Oxidáltabbak a többi akondritnál, nagy az illóelem tartalmuk, jelentős az alkália tartalom a földpátokban, sok a Ca a piroxénekben. Ezt a csoportot három fontos tagjáról, a *Shergotty*, a *Nakhla* és a *Chassigni* meteoritekről SNC* csoportnak nevezték el.

Az SNC-meteoritek magmás kőzetek. A magmás kőzetek a három vizsgált nagyobb égitest (Hold, Mars, Föld) belső folyamatai során jönnek létre. A shergottitok is és a nakhlitok is nagyobb magmatestek különböző mélységű rétegeiből származnak.

Szövetük vizsgálata értékes összehasonlításokat tesz lehetővé az égitestek magmás folyamatiról, a hasonlóságokról és a különbözőségekről.

Új kis atlaszunk ezt az összehasonlító planetológiai és kozmopetrográfiai programot folytatja a Naprendszer kőzetszövetek és a tanulmányozásával.

TARTALOM

- 4 / Meteoritek a kis égitestekről: a kisbolygók fejlődéstörténete
- 12 / A meteoritek osztályozása
- 14 / VÉKONYCSISZOLATOK ATLASZA
- 24 / Holdi fejlődéstörténet a Holdról gyűjtött kőzetminták alapján
- 30 / A Mars kőzetei a marsi meteoritek alapján
- 34 / Szilárd felszínű égitestek hőtörténete a Naprendszerben: megolvadások két korszakban

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a NASA Johnson Space Center, Houston, Planetary Materials Laboratory és a Japán National Institute of Polar Research, Tókió, Antarctic Meteorite Research Center kutatóinak a Holdkőzetek és az Antarktison gyűjtött meteoritek mintakészletének kölcsönzéséért. A füzet elkészülését és kinyomtatását az alábbi pályázatok segítették: MTA-JSPS 104/2007, és MŰI-TP-290/2008, melyekért köszönetet mondtunk.

A képek és ábrák forrásai

Az ábrákat Bérczi Szaniszló rajzolta, a 37. és 45.-et Hargitai Henrik. A mikroszkópos képeket, ahol máshogy nem jeleztük, Hargitai Henrik és Nagy Szabolcs fotózta az ELTE TTK-n. A mikroszkópi fotók magyarázatait Nagy Szabolcs írta, kivéve a 35–48. fotót, melyet Bérczi Szaniszló. A 21. ábra Kovács Zsolt Imre munkája.

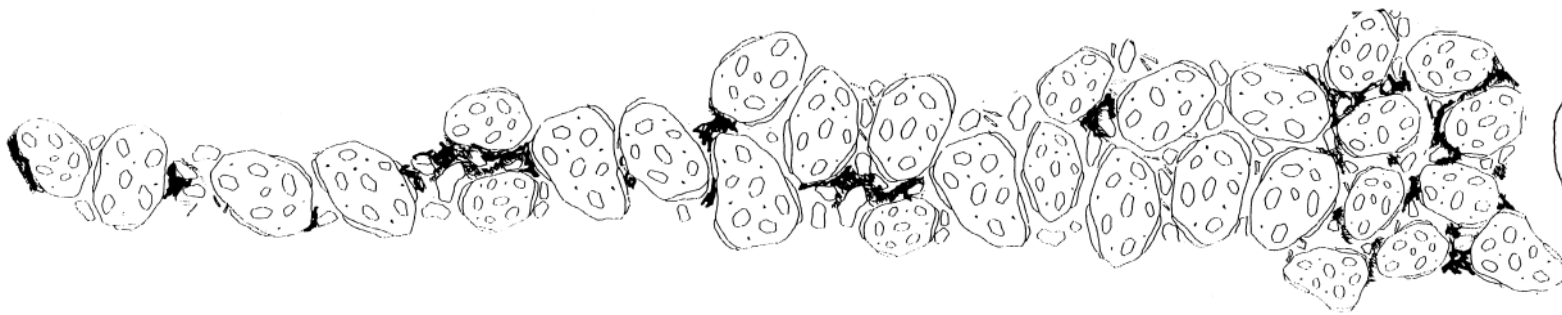
KIS ATLASZ A NAPRENDSZERRŐL (11): KÖZETSZÖVETEK A NAPRENDSZERBEN

Szerkesztette: Bérczi Szaniszló, 2008

Tipográfia: Hargitai Henrik, Cambria, Candara és Dupuy betűkből
ISBN 978 963 284 034 5

Kiadja az ELTE TTK/MTA Geonómia Bizottság, Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport, Budapest

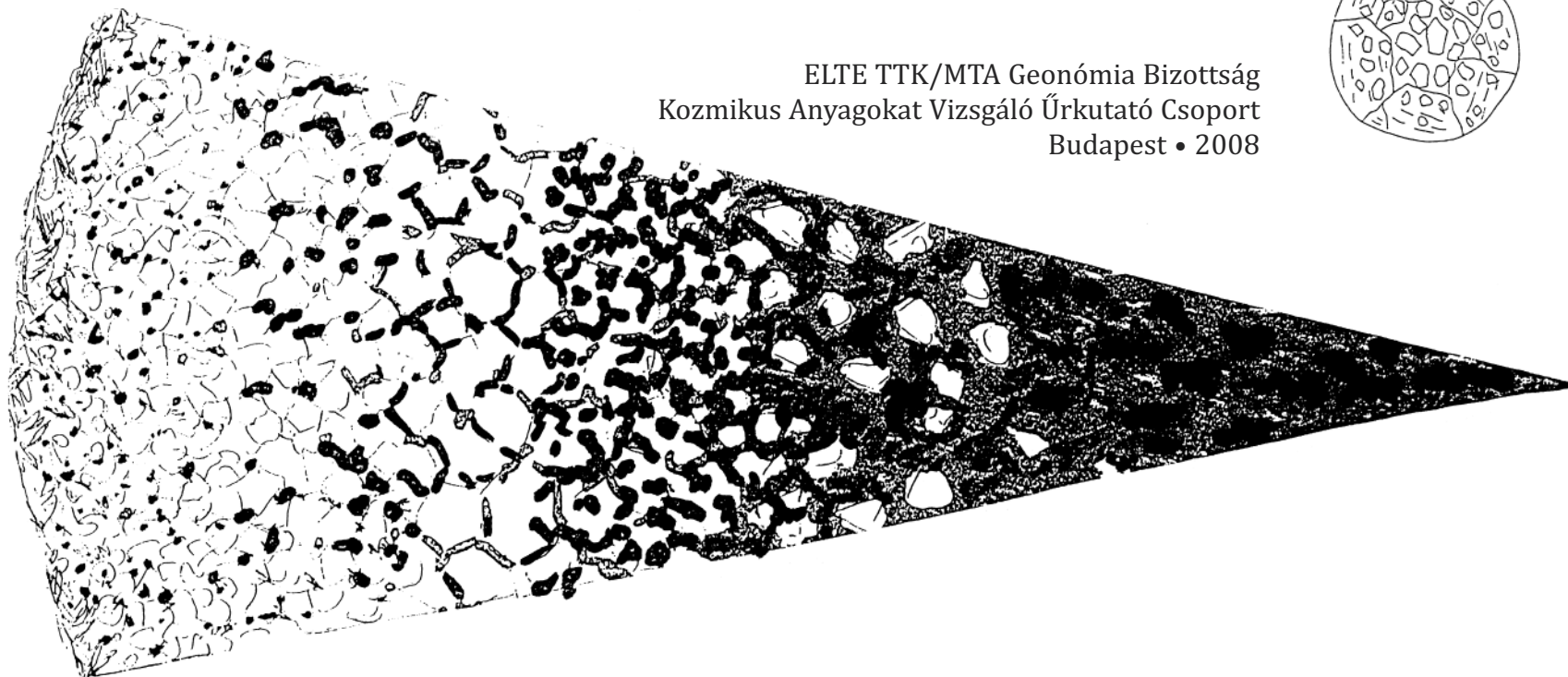
Kis atlasz a Naprendszerrel sorozatunk megjelentetését a Magyar Űrkutatói Irodánál elnyert 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 és 2008 évi pályázataink tették eddig lehetővé. Érdeklődni lehet a berczisani@ludens.elte.hu e-mail címen, vagy az 1-372-2986 telefonszámon. (Bérczi Szaniszló, ELTE TTK Fizikai Intézet, Anyagfizika Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/a.)



Bérczi Szaniszló, Gucsik Arnold, Hargitai Henrik,
Józsa Sándor, Kereszturi Ákos, Nagy Szabolcs, Szakmány György

KIS ATLASZ A NAPRENDSZERRŐL (11)

KŐZETSZÖVETEK A NAPRENDSZERBEN



ELTE TTK/MTA Geonómia Bizottság
Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport
Budapest • 2008

METEORITEK A KIS ÉGITESTEKRŐL: A KISBOLYGÓK FEJLŐDÉSTÖRTÉNETE

A meteoritek többsége kicsiny égitestek letörött darabja. Kozmikus események, becsapódások szakították ki őket az anyaégitestből és a Naprendszerben pályáikon mozogva hosszabb idő után csapódtak a Földre. A szülő égitest néhány száz 10 km-től néhány 100 km-ig terjedő átmérőjű kisbolygó lehetett. A meteoritek töredékként is magukban hordozzák a szülő égitest fejlődéstörténetét. Amikor tehát a meteoriteket tanulmányozzuk, kicsiny égitestek anyagátalakulásait követjük nyomon.

A meteoriteket ma három nagy anyag típusba sorolva csoportosítják: kő-, kő-vas- és vasmeteoritekként. Ezek közül a kőmeteoritek két részre bonthatók, kondritokra és akondritokra. Az akondritokban már nincsenek kondrumok. Hogy hogyan lesznek kondritokból akondritok, izgalmas anyagfejlődés-történeti kérdés és a meteoritika tudományának egyik fő területe ez. Mi is most e kondritos meteoritek átalakulásait tanulmányozzuk, dióhéjban.

A kondritok tizedmilliméterestől a centiméteres méretig terjedő nagyságú kicsiny gömböket, gőrgöül kondrumokat (magokat) tartalmazó meteoritek, s ezekről kapták nevüket. A kondritok a hullott meteoritek körében 85 százalékot tesznek ki. Közöttük az igen ősinek tartott szenes kondritok csak néhány százaléknyi csoportot alkotnak, mert könnyen málló, elmorzsolódó anyagúak, s hulláskor többségük széttöredezik apró darabokra. Ilyen a Magyarországon hullott híres kabai meteorit is, amely azonban szép alakú, a légkörön való áthaladás nyomait olvadácsugarakkal lesimított, sugarasan-kúposan mintáztott – ablatált – felületén is magán viselő darab.

A meteoritek több hő-történeti szakasz átalakulásait hordozzák anyagukban, szövetükben. Mostani vizsgálatainkban kétféle szakaszt fogunk megkülönböztetni. Egy első fölmelegedési (és lehülési) szakaszt, amely a Naprendszer kialakulásakor zajlott le (43. ábra). Ekkor fejlődtek ki a Nap körüli ásványi anyagok s alkottak öveket csökkenő hőmérsékletük szerinti elrendeződésben. Megkülönböztetjük ettől azt a második fölmelegedési szakaszt, amely már a kis égitest belsejében zajlott le. Ez a szakasz két részre osztható. A korábbi a kis égitest fölmelegedésének az a szakasza, amikor az emelkedő hőmérséklet hatására az égitest ásványi anyagai átkristályosodnak. (Ennek egyik speciális esete, amikor az átkristályosodás víz hatására történik.) Későbbi a kis égitest további fölmelegedésének az a szakasza, amikor az emelkedő hőmérséklet hatására megolvadások történnek és a kis égitest öves szerkezetűvé differenciálódik. Mindegyik szakasz vizsgálatához először a kondritok szövetével kell megismerkednünk.

A kondritok szövete

A kondritok szövete, első közelítésben, két fő összetevőből áll: kondrumokból és mátrixból. Majd tárgyalunk kisebb mennyiségben jelen lévő összetevőket is, mint például a „fehér zárványokat” (CAI), melyek a spinellhez hasonlóan nagy olvadáspontú ásványokból állnak, vagy a kondrumokat körülvevő peremeteket.

A kondritos szövet sok esetben ellentmondásos szerkezetű. Míg a mátrix finom szemcsés, alacsony hőmérsékleten keletkezett ásványokból áll, addig a kondrumok is, és a CAI-k is magas olvadáspontú anyagok. Az a tény, hogy a kétféle keletkezési hőmérsékletű ásványi összetevők együtt vannak, nem „egyenlítődték ki” kémiai szempontból, azt jelzi, hogy az az égitest, vagy égitest-zóna, amelyből a szenes kondrit meteorit anyaga leszakadt, sohasem melegedett fel eléggé (szenes kondritok, 3-as szövettípusúnak osztályozott kondritok). Ha fölmelegedett volna, a kondritos anyag „átsült” volna, s kémiailag harmonizálódott volna a kondrumoknak és a mátrix szövetének az ásványos anyaga. Ez nem történt meg, meteoritünk tehát ősi, különféle eredetű anyagokból összetapadt kőzet. Ez az ősi anyag a Naprendszer születése körüli idők anyagait hordozza.

Gyakoriságuk és ősiségük (4,5 milliárd évesek) alapján a kondritos meteoriteket tekintik a Naprendszer ősi kőzetanyagának.

A kondritok ásványtani osztályozása: a kondrit típusok

A **kőmeteoritek ásványai** leginkább a magmás kőzetek ásványaival rokoníthatók, s a kondritokéi pedig a földi köpenyt alkotó ásványokkal: olivinnel $[(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4]$ és alacsony Ca tartalmú piroxénnel. E két fő ásványi összetevő alapján készült a századelőn a Rose-Prior-, majd a kémiai összetételi mérésekkel kiegészített Urey–Craig és a Wiik–Mason osztályozás. Ezek alapján a 60-as években már öt nagy kondrit csoportot különítettek el: az ensztatit kondritokat (E), az olivin-bronzit (H), az olivin-hipersztén (L), az amfoterit (LL) és az olivin-pigeonit (C-III. ilyen a híres kabai meteorit is, 36. *fotó*) kondritokat valamint a szenes kondritokat (C), melyek később a zárójelben álló betű jeles rövidítést kapták. (Az ensztatit, a bronzit, a hipersztén és a pigeonit piroxénváltozatok, melyek különböző arányban tartalmaznak Mg és Fe komponenst, a pigeonit pedig az előbbieknél több Ca-ot is tartalmaz.) A szenes kondritokat Wiik a C-I., C-II. és a C-III. szenes kondrit csoportokba sorolta, csökkenő illóelem tartalmuk alapján. A kondritok (egyes szenes kondritok kivételével) mindig tartalmaznak fémes összetevőt, Fe-Ni ötvözetet és FeS szulfidot is. A kondritos me-

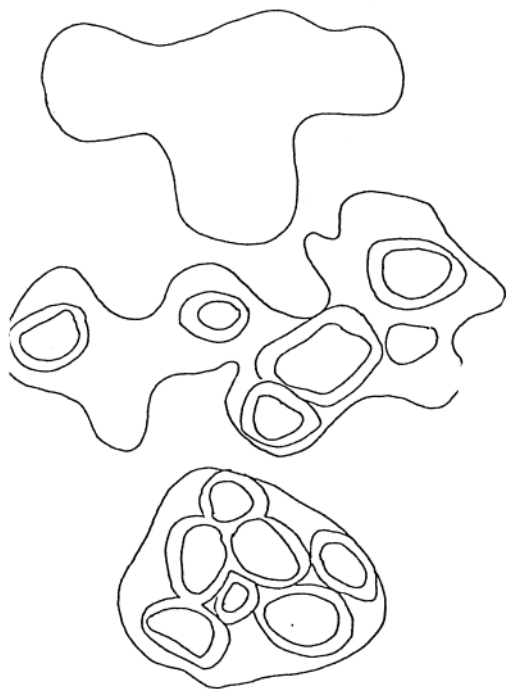
teoritek ásványai azok, amelyeket kémiai modellekkel le tudtak vezetni a 70-es években a Nap körül kialakult, majd lehült szoláris ködből.

A kondritos ásványi anyagok keletkezése az öves Naprendszer kialakulása során

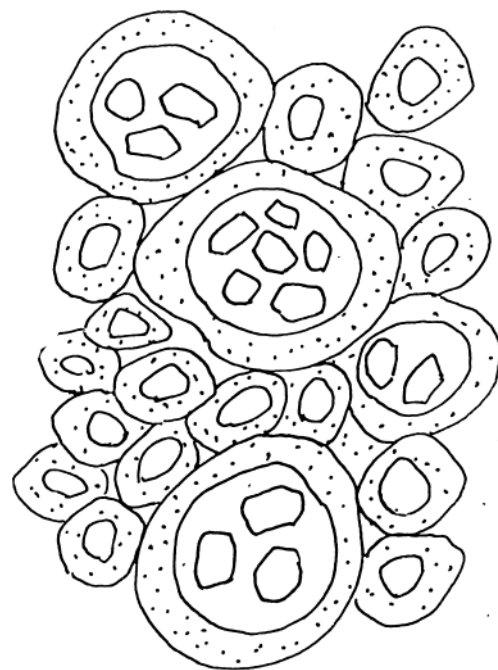
Az anyag fejlődéstörténetéről formálódó összképben döntő jelentőségű a meteoritek vizsgálata. A szilárd felszínű égitestekre simán leszállt űrszondák mérései előtt kizárólag a meteoritek tanulmányozásával gyűjtött kőzettani ismereteink voltak más égitestek anyagáról. A meteoritek anyagvizsgálata tárta föl, hogy a meteoritek ásványai, szöveti alkotóelemei, ezek ásványai a Naprendszer születésének idejéből származnak. A csillagászati modellekkel összhangban ma elfogadott az a nézet, hogy a csillaggá összehúzó kozmikus por- és gázköd fölmelegedett, központi forró tartományai létrehozták a Napot, a körülötte keringő ködből pedig anyagcsomók váltak ki, azok megformálták a Naprendszer ásványait, melyek ütközésekkel nagyobb égitestekké halmozódtak. Ezek alapján a meteoritek anyagvizsgálata során kérdezhetjük meg, hogy e folyamatnak milyen megfogható lépései maradtak fenn? A meteoritek tehát fontos láncszemek akkor amikor az anyag fejlődéstörténeti képet egyre részletesebben meg akarjuk ismerni.

A Nap körüli por- és gázköd anyagát kétféle erő csomósította, halmozta nagyobb testekké. Az egyik erő, mely elektromágneses és kvantumos hatások együttese, ásványszemcséket hozott létre. Apró szemcsékben kristályok váltak ki, melyek az ütközések során összetapadtak, s egyre nagyobb anyaghalmozokká álltak össze. A másik erő, a gravitáció, fokozatosan jutott szervező szerephez a bolygók főlhalmozódása és megformálása során. A kilométeres nagyságú égitestek, a planetézimálok, ütközéseikkel egyre nagyobb méretű égitestekké tömörültek, melyek egymás pályáit már egyre nagyobb mértékben befolyásolták.

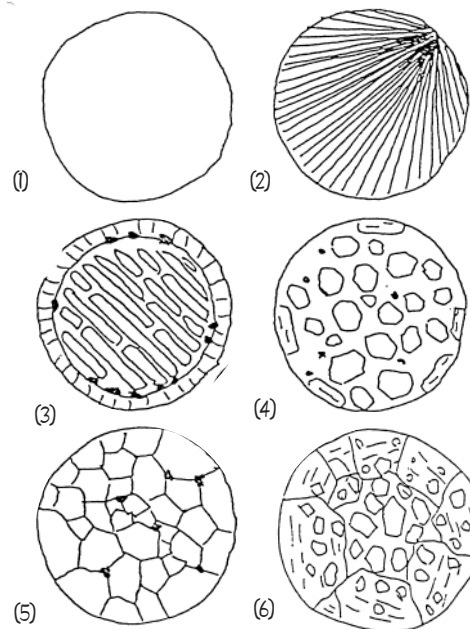
A Naprendszer a Napot körülvevő anyagokból és égitestekből áll. Mindegyik égitest és anyaga is a korai Napot körülvevő por- és gázködből alakult ki. E por és gázköd tömege mintegy századrésze a Nap tömegének, de a Naprendszer forgó mozgását ezek a Napon kívüli anyagok hordozzák keringő mozgásukban. A Nap körüli köd a Nap fölmelegedésével együtt fölforrósodott, s később lehült. A Naptól való távolsággal együtt változott a köd hőmérséklete, s ezzel a kristályos anyagok összetétele. A legfontosabb ásványok sorozatát táblázatunk mutatja be a *Lewis és Barshay*-féle modell szerint. A kondritos meteoritek főleg ebből az ásványsorból épülnek föl.



1. ábra. CAI-k CV szenes kondritban



2. ábra. Porperem kondrumok körül



3. ábra. Kondrumtípusok: (1) üveges/kriptonkristályos, (2) sugarasan szétágazó/radiális/excentro-radiális, (3) lemezes-pálcás-rudas, (4) profiros, (5) granuláris/szemcsés, (6) poikilites piroxén kondrum



4. ábra. Egy kondritos szövet. 3-as petrológiai osztály (a további átalakulásokat lásd a következő oldalon!)

Hőm. K	Kémiai elemek, reakciók	Ásványok
1600	CaO, Al ₂ O ₃ , ritkaföldfém-oxidok	Oxidok
1300	Fe, Ni fémötvözet	Fe-Ni fém
1200	MgO + SiO ₂ → MgSiO ₃	Ensztatit
1000	Alkáli oxidok+Al ₂ O ₃ +SiO ₂	Földpát
1200-490	Fe+O → FeO, FeO+MgSiO ₃ =	Olivin
680	H ₂ S+Fe → FeS	Troilit
550	Ca-ásványok+H ₂ O	Tremolit
425	Olivin+H ₂ O	Szerpentin
175	H ₂ O jég kristályosodik	Vízjég
150	gáz NH ₃ +jég H ₂ O=NH ₃ ·H ₂ O	Ammónia-hidrát
120	gáz CH ₄ +jég H ₂ O=CH ₄ ·7 H ₂ O	Metán-hidrát
65	metán, argon kristályosodik	Metánjég, argonjég

A Naphoz közeli forró tartományokban kiváló ásványok sorozatát Grossman és Larimer határozta meg. Ezek jelentőségét az adja, hogy a kondritos meteoritek kis mennyiségben ennéka forró övnek az ásványait is tartalmazzák.

1785 K	Al ₂ O ₃	Korund
1647 K	CaO.TiO ₂	Perovszkit
1625 K	2MgO.Al ₂ O ₃ .SiO ₂	Melilit (Gehlenit)
1513 K	MgO.Al ₂ O ₃	Spinell
1471 K	Fe.Ni	Vasnikkel
1450 K	CaO.MgO.2SiO ₂	Diopszid
1444 K	2MgO.SiO ₂	Forszterit
1362 K	CaO.Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	Anortit
1349 K	MgO.SiO ₂	Ensztatit

Mindkét ásványsorozat tagjai közvetlenül meg is figyelhetők a meteoritekben. A Lewis-Barshay-modell – ahogy említettük már –, a kondritokban, a Grossman-Larimer sorozat pedig a kalcium-alumínium oxid zárványokban (CAI). Ezekről szólunk most részletesebben.

A kalcium-alumínium oxid zárványok (CAI)

A belső Naprendszer ásványait a tűzálló kerámiák anyagaként ismerjük (pl. a korund). A tűzálló ásványok kicsiny hal-

mazokba gyűltek össze és rétegesen kristályosodtak egymás után.

A kondritos meteoritekbe beépülten találjuk őket, s ezeket a főleg kalciumból (Ca) és alumíniumból (Al) fölépülő világos színű ásványgyűtéseket CAI-knak nevezték el a meteoritkutatásban (CAI = Ca-Al-Inclusions = Ca-Al-zárványok) (1. ábra, 36. fotó).

Egy CAI réteges fölépülését folyamatosan növekedő kristályos anyagcsíráként képzelhetjük el.

Először korund (Al₂O₃), és perovszkit (CaTiO₃), válik ki, majd sorra melilit (Mg₂Al₂SiO₇), spinell (MgAl₂O₄), majd diopszid (CaMgSi₂O₆), végül anortit (CaAl₂Si₂O₈) rétegek következnek.

CAI ásványok (fehér zárványok) összetételét először Sztrókey Kálmán magyar kutató mérte meg a kabai meteoritban (36. fotó).

Röntgendiffrakciós méréseiben Sztrókey a fehér zárványokat spinell összetételűnek találta.

A 7. rajz jól mutatja, hogy szinte már teljesen átkristályosodott a kondritos anyag. A korábbi állapotot jelző 4. rajzon még éles peremmel különültek el a gömböcskék (kondrumok). A 7. rajzon már csaknem egyenletesen átkristályosodott szemcsés szövetet látunk, de egyes helyeken azért még fölismerhetők azok a tömbök, amelyek egykor kondrumot alkottak. Ezt a mostani fokozatot nevezte a termikus metamorf fokozatokat bevezető van Schmus-Wood tanulmány (1967) 6-os fokozatnak. Az egyes fokozatokhoz idővel hőmérsékleti intervallumokat is hozzárendeltek a kutatók. Míg a 3-as fokozathoz a 0 C-tól a 200 C-ig, a 4-es fokozathoz a 200 C-tól a 400 C-ig, az 5-ös fokozathoz a 400 C-tól a 600 C-ig, addig a 6-os fokozathoz már a 600 C-tól a 800 C-ig terjedő hőmérsékleti intervallumot kapcsolták.



5. ábra. Egy kondritos szövet. 4-es petrológiai osztály



6. ábra. Egy kondritos szövet. 5-ös petrológiai osztály



7. ábra. Kondritos szövet. 6-os petrológiai osztály

A kondrumok kialakulása

A fő kőzetalkotó szilikátok alkották a belső bolygók övében kiváló ásványok nagy részét. Ezek olvadékcseppeket alkottak egykor, mert a korai Nap kitérési egyes tartományokban úgy fölforrósították a por- és gázködöt, hogy az addig már kialakult és összetapadt kristályok megolvadtak, majd lehültek. A tizedmilliméteres-milliméteres nagyságú gömböcskékre (a kondrumokra) fokozatosan tapadt rá a körülöttük található por is. A kondrumok és a maradék poranyag összetapadással és ütközésekkel egyre nagyobb égitestekbe halmozódott. A mai kondritos meteoritek azokból a kisebb méretű kondritos égitestekből származnak, amelyek nem melegedtek föl a Naprendszer elmúlt 4 és fél milliárd éve alatt.

A megolvadt cseppek kihültek, kikristályosodtak. E kondrumok, mint a Nap körüli porfelhő szemcséi, beépültek az apró szemcsés alapanyagú kondritos meteoritekbe. A kondrumok többféle szövetűek lehetnek, ahogyan ezt a mikroszkópban a vékonycsiszolatokon megfigyelhetjük. A kőzetanban használt nevükön adjuk meg a hat fő típust. Lehetnek belső szöveti mintázatot nem, vagy alig mutató üveges vagy kriptokristályosak (1), sugarasak (angolul *excentro-radiálisak*) (2), leme-

zesek (angolul *barred*) (3), porfírosak (4), granulárisak vagy szemcsés (5) és poikilites piroxén kondrumok (6) (3. ábra). E kondrumok gyorsabban-lassabban lehült szilikátolvadék cseppekből keletkeztek. Az olvadékok összetétele is fokozatosan változott helyről helyre a Naprendszerben. Mind a hatféle kondrum előfordul a különféle kondrit típusokban, de különböző arányban vannak bennük. A kondrit típusokat ásványtani és kémiai tulajdonságaik alapján osztályozták.

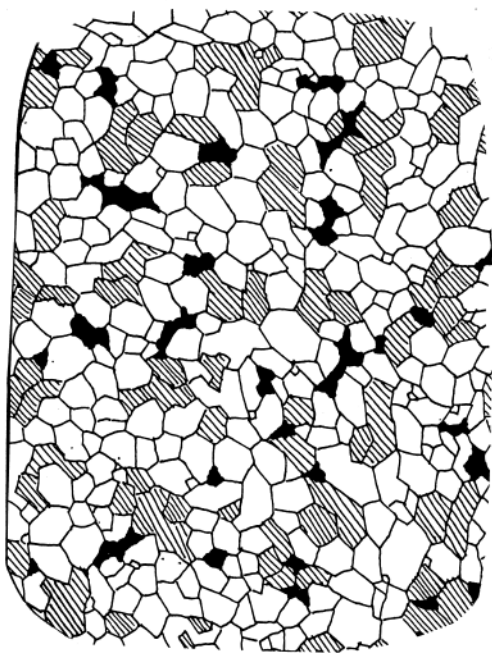
De a kondrumok megőrizték a Nap körüli gázködben lezajlott eseményeket a környezetükben található anyagok ásványos és kémiai összetételében is. A kondrumok egy része, miután megszilárdult, még különféle változásokon esett át addig, amíg a kondritos kisbolygók anyagává vált.

A kondrumok körül különféle peremeket találunk. Ezek részben még a Nap körüli por- és gázködben lezajlott események tanúi, más peremek viszont már a kis égitesten lezajlott (pl. vizes) átalakulás termékei. Egyes kondrumoknak aprószemcsés kristályok alkotta porpereme van, ami arra utal, hogy a kondrum, megszilárdulása után még hosszú ideig sodródott a Nap körüli por- és gázködben, míg hozzá nem tapadt

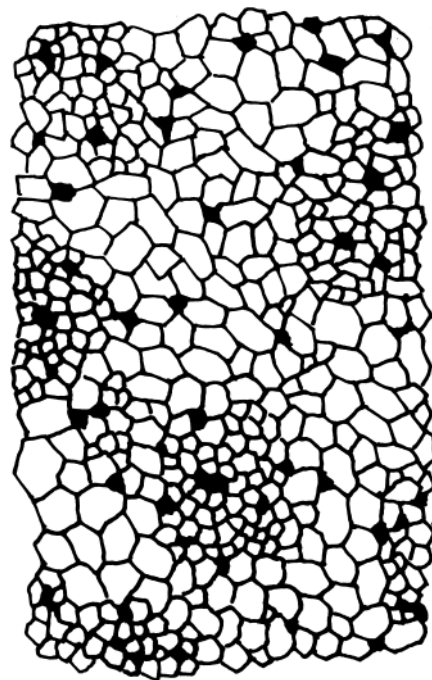
egy halmozódó anyagcsoporthoz. Egyes kondrumokat éppolyan magmás szövetű perem vesz körül, mint maga a szilikátcsepp anyaga. Ezek úgy jöhettek létre, hogy a már megszilárdult kondrum felületére gyűlt port újabb napkitérés megolvasztotta. Egyes kondrumok a külső részeiken, vagy a peremükön tartalmazzák a fém vasnikkel cseppeket. Ez arra utal, hogy a kondrumok forogtak, ezért a nagyobb sűrűségű összetevők fokozatosan a kondrum felületére sodródtak.

A meteoritek anyaga a kisbolygókból származik

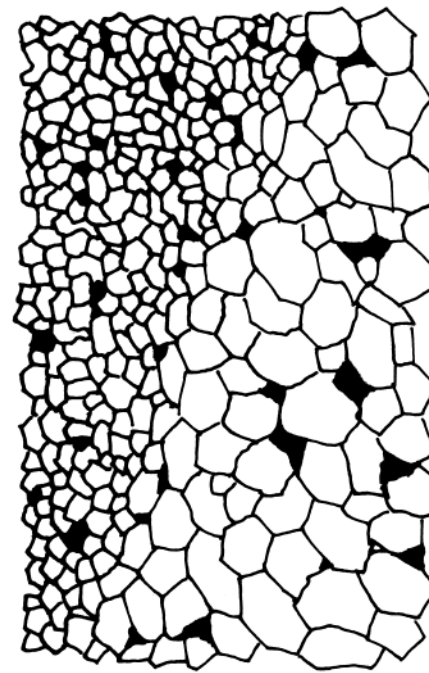
A kisbolygók reflexiós színképének a meteoritek színképével történt összehasonlításával már az 1970-es évekre átfogó kép alakult ki a csillagászatban arról, hogy a meteoritek forráshelye a kisbolygók öve. A 80-as évekre már a kisbolygó övön belül is zónákat tudtak elkülöníteni, amelyekre más és más uralkodó kisbolygó-színkép-típus volt jellemző (Gradie, Tedesco). A kisbolygó öv külső peremén a szenes kondritok a gyakoriak. S bár ma még nem rendelkezünk kőzetani módszerekkel elemezhető mérési anyaggal a külső Naprendszer jegeket is tartalmazó ősi anyagegyütteseiről, ezeknek a színképében már előfordulnak a vízjégre jellemző elnyelési vonalak.



8. ábra. Lodranit szövete



9. ábra. Yamato-74036



10. ábra. Yamato-75300

Ahogy melegszik föl a kis égitest, úgy változik a benne található kőzetek szöveti jellemvonásai. A 10. rajz utáni helyzet új szakasz megindulását jelzi a kis égitest fejlődéstörténetében. Megkezdődik a differenciálódás. Az egyenletesen átkristályosodott primitív akondritos szövet már a 9. és a 10. rajzon is bizonyos megindult differenciálódás jeleit mutatja. Más szövetekben megfigyelhető a vas és szulfid szemcsék perkolációja (összeolvadása). A kezdődő parciális olvadás nyomán vándorolni (migrálni) kezdenek a szemcsék között a szövet bizonyos összetevői: először a vas és vas-szulfid komponensek, 1100 C fölé emelkedett hőmérsékleten pedig már a bazaltos összetevők is. A következő oldalpár már a differenciálódott kisbolygóról származó szövet típusokat mutatja be.

Ugyancsak a reflexiós színeképek elemzésével mutatták ki azt is, hogy a külső Naprendszer fő ásványi anyaga a vízjég. Az óriásbolygók holdjai, a Szaturnusz gyűrűjének anyaga és az üstökösök anyaga a legismertebb vízjég azonosítások a külső Naprendszerben.

A kondritos összetételű kis égitest fejlődéstörténete

1. A kis égitest fölmelegedésének első szakasza: átkristályosodás (metamorfózis)

Amikor az anyag fejlődéstörténeti képben az égitestté összeállt anyaghalmozatok fejlődéstörténetét kutatjuk, akkor a meteoriteket egy másik szempontrendszer szerint kell megvizsgálunk. Az égitestben eltöltött idő nyomait keressük meg bennük. Fokozatosan bontakozott ki az az eseménytörténeti szakaszolás, melynek nyomán a Naprendszerben töltött időszakot és a kis égitestben eltöltött időszakot jól el lehetett határolni.

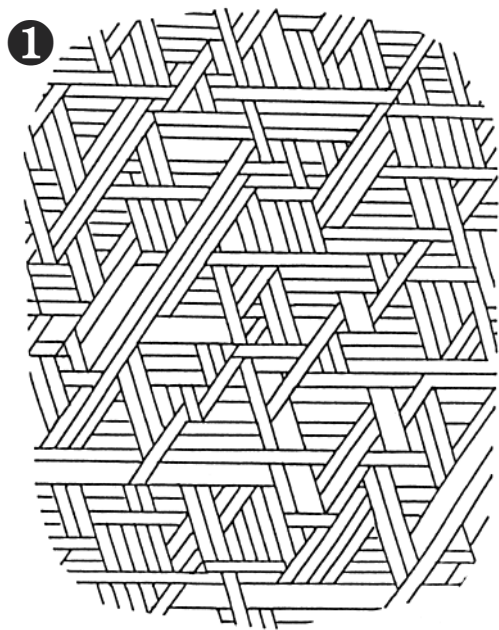
Az 1960-as években megindult holdkutató főlendítette a meteoritkát is. 1967-re összegződött a kondritos fejlődés vizsgálatának eredménye is. Van Schmus és Wood, cikkében a kondritokat, szövetük és kémiai változásaik alapján, átalakulási so-

rozatba rendezte el. A kondritos összetételű kicsi égitest lassú fölmelegedésének hatására az égitest anyaga fokozatosan átrendeződik és ez az átrendeződés figyelhető meg a kondritok szövetén. A lassú átmelegedés szilárd fázisú diffúziót eredményez, ennek számos hatása van a szövetre: fokozatosan elhalványodnak az éles peremű kondrumok, kémiai kiegyenlítődések történnek az ásványok összetételében, redox folyamatok változtatják a fémvas/oxidált vas arányt, a szövet fokozatosan átkristályosodik. (Mindezek a lépések jól tanulmányozhatók a NIPR antarktisi meteoritgyűjtemény vékonycsiszolat készletén).

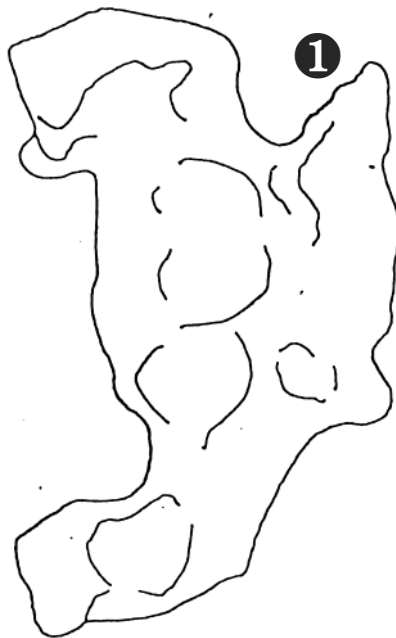
1953-ban tette közzé Urey és Craig az akkor ismert 90 kondrit kémiai összetételén végzett analízisét. Ebből az összefoglaló munkából az a diagram vált fontos anyagtérképpé, amely a vasvegyületek mennyiségét ábrázolja. A szerzőkről Urey-Craig-diagramnak (UCD) elnevezett koordináta-rendszerben a függőleges tengelyre a fémvas és szulfidvas mennyiségét, a vízszintes tengelyre pedig az oxidált vas mennyiségét mérték föl. A diagramra fölvitt pontok két tartományra különültek el. Ezeket a szerzők H (nagy) és L (kicsi) vastartalmú tartományoknak nevezték el. Három évvel később, 1956-ban, Wiik finn geokémikus tette közzé vizsgálatainak eredményét. Ő 30 nagyon

pontos kondritos meteorit összetétel meghatározás (több mérést maga végzett el) alapján azt találta, hogy a H-k és az L-ek két egyenesre esnek az UCD-n. A H-k 27 súlyszázalékos öszsvastartalmat, az L-ek 21 súlyszázalékos öszsvastartalmat képviseltek. E kondritos meteoritek egy jelentős része azonban nagy széntartalmú, ún. szenes kondrit volt. Wiik nem sorolta be őket a H csoportba, hanem leválasztotta őket és a C jelű szenes kondritokat 3 rész csoportba különített el, az illóelem tartalom szerint. Később Friderickson és Keil az L csoporttól elkülönítette a kissé alacsonyabb öszsvastartalmú LL csoportot és külön definiálták az E (ensztatitos piroxénű) csoportot is. Így alakult ki a kondritok ötös csoportbeosztása.

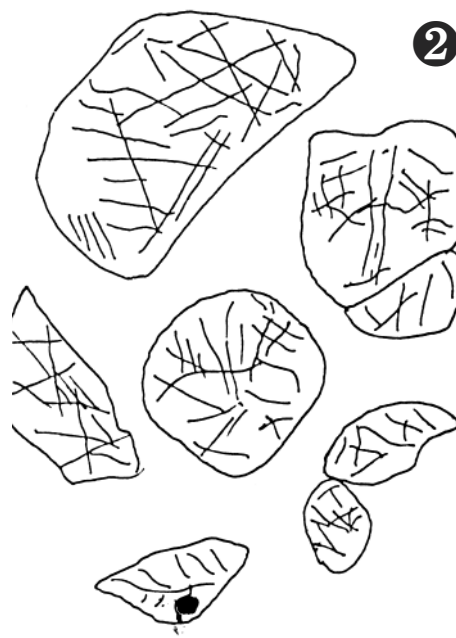
A fölmelegedés hatására lezajlott szöveti átalakulások mind-egyik kondrit csoportban megfigyelhetők. Ezért az összetétel (kezdeti feltétel) szerinti ensztatit (E), bronzit (H), hipersztén (L), amfoterit (LL) és szenes (C) kondrit csoportok osztályára „merőlegesen” egy másik rendező elv is kialakult a kondritos meteoritek áttekintésére, fejlődésük történetének kiolvasására. A kondritok osztályozásának ez a kétparaméteres rendszere a van Schmus-Wood táblázat, melynek petrológiai osztályai (ma petrológiai típusai) hő-történeti fejlődési fokozatokat jelentenek.



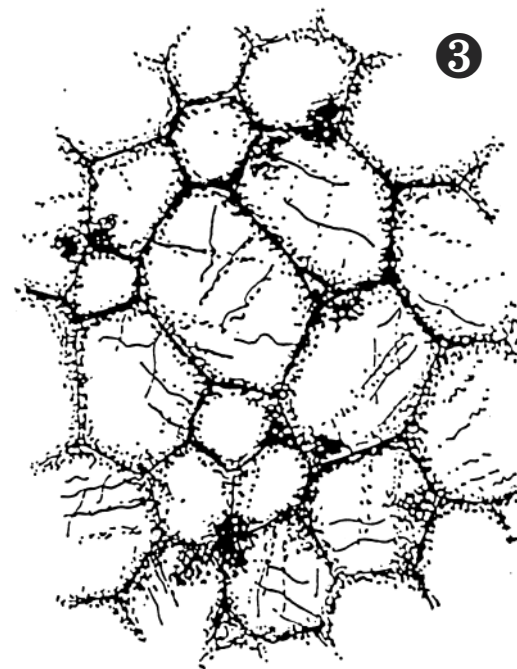
11. ábra. Vasmeteorit Widmanstätten-ábrával



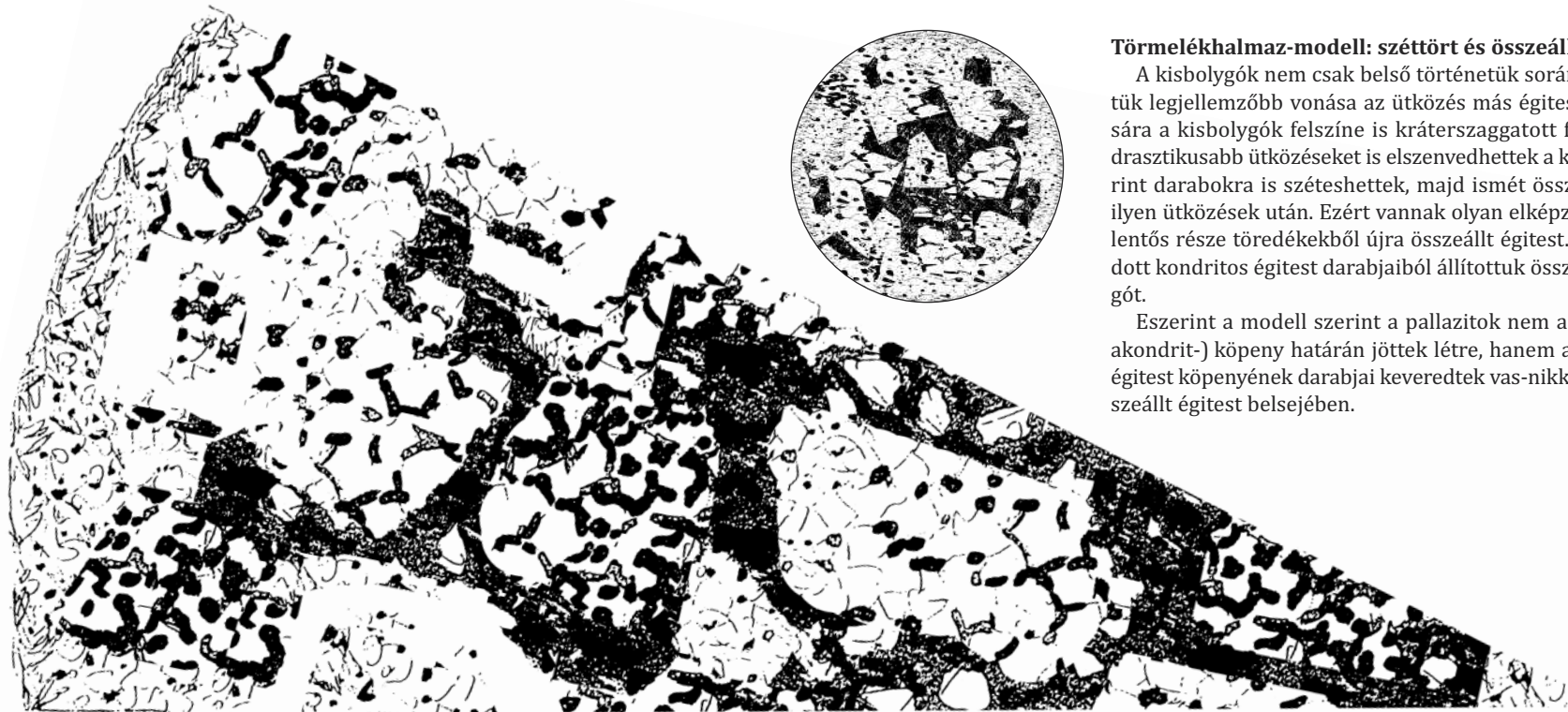
12. ábra. Yamato-791076 vasmeteorit



13. ábra. Yamato-8451 pallazit (lásd 1. fotó)



14. ábra. ALHA-77257 ureilit (lásd 4. fotó)

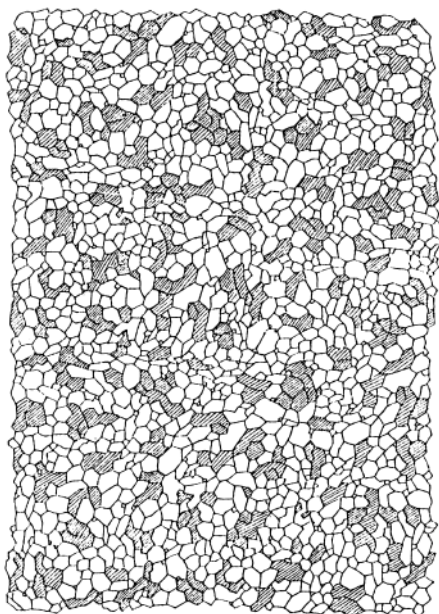


Törmelékhalmoz-modell: széttört és összeállt kis égitestek

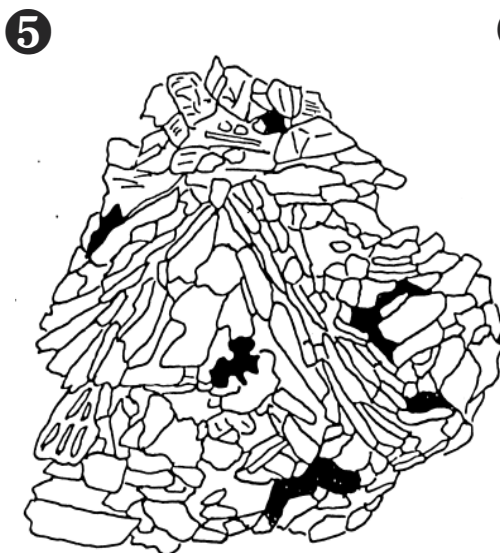
A kisbolygók nem csak belső történetük során alakultak át. Külső történetük legjellemzőbb vonása az ütközés más égitest-töredékekkel. Ennek hatására a kisbolygók felszíne is kráterszagattott felszín. Azonban még sokkal drasztikusabb ütközéseket is elszenvedhettek a kisbolygók. Feltételezések szerint darabokra is széteshettek, majd ismét összeállhattak a nagyobb testek ilyen ütközések után. Ezért vannak olyan elképzelések, hogy a kisbolygók jelentős része töredékekből újra összeállt égitest. Ábránkon egy differenciálódott kondritos égitest darabjaiból állítottuk össze a törmelékhalmoz-kisbolygót.

Eszerint a modell szerint a pallazitok nem a vasmag és szilikát (primitív akondrit-) köpeny határán jöttek létre, hanem az összeállás során a korábbi égitest köpenyének darabjai keveredtek vas-nikkel olvadékkal az újonnan összeállt égitest belsejében.

15. ábra. Törmelékhalmozként létrejött kis égitest metszete



16. ábra. Primitív akondrit (lásd 13. fotó) **4**



17. ábra. Yamato-793169 eukrit (lásd 8-9. fotó)



18. ábra. Yamato-75011 eukrit (lásd 8-9. fotó)

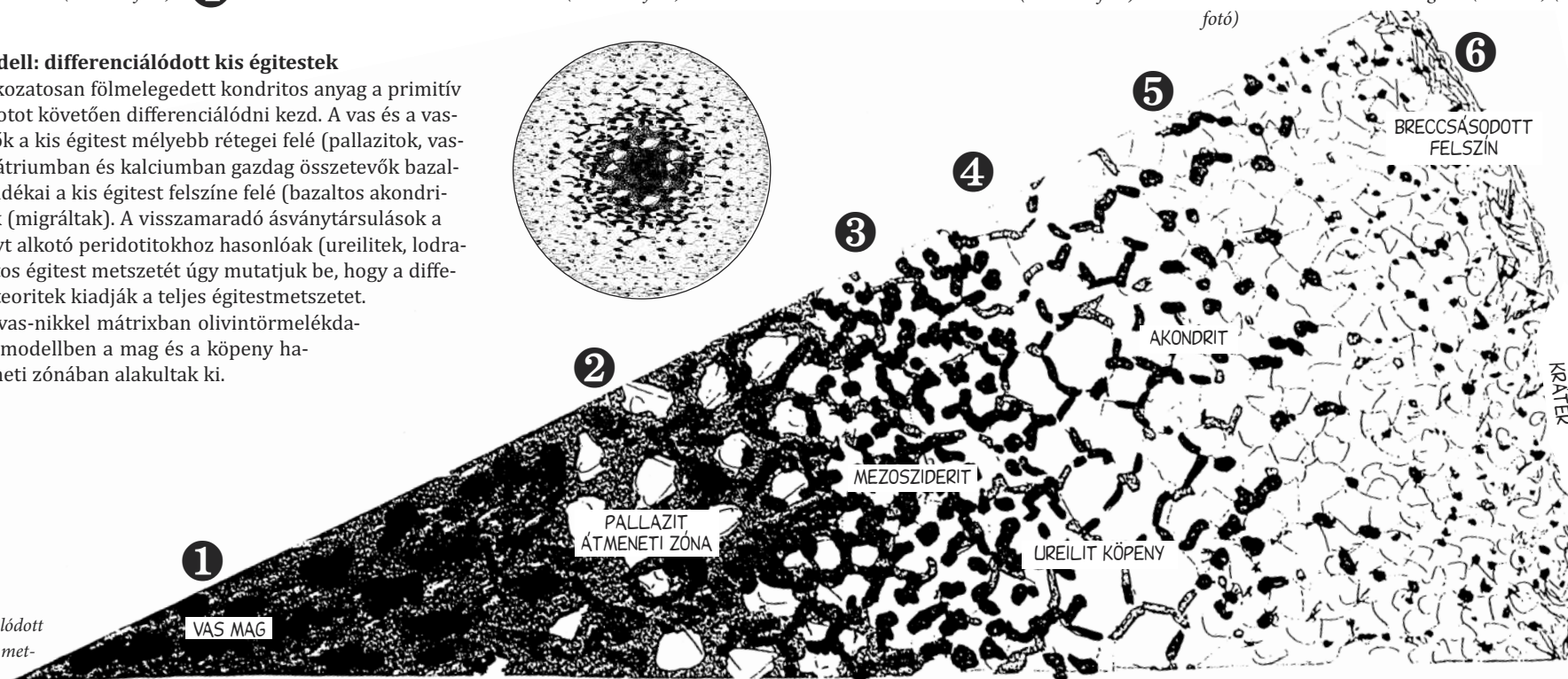


19. ábra. Yamato-791072 diogenit (breccsás) (lásd 5-6. fotó)

Hagymahéj-modell: differenciálódott kis égitestek

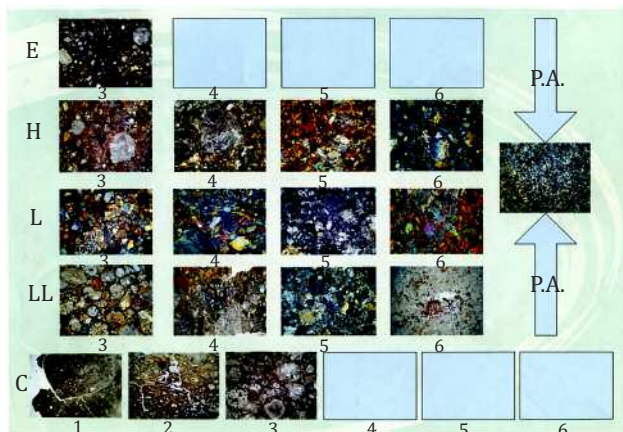
Az égitestben fokozatosan fölmelegedett kondritos anyag a primitív akondritos állapotot követően differenciálódni kezd. A vas és a vas-szulfid összetevők a kis égitest mélyebb rétegei felé (pallazitok, vas-meteoritok), a nátriumban és kalciumban gazdag összetevők bazaltos parciális olvadéka a kis égitest felszíne felé (bazaltos akondritok) vándoroltak (migráltak). A visszamaradó ásványtársulások a földi felsőköpenyt alkotó peridotitokhoz hasonlóak (ureilitok, lodranitok). A kondritos égitest metszetét úgy mutatjuk be, hogy a differenciálódott meteoritek kiadják a teljes égitestmetszetet.

A pallazitok (vas-nikkel mátrixban olivintörmelékdarabok) ebben a modellben a mag és a köpeny határán lévő átmeneti zónában alakultak ki.



20. ábra. Differenciálódott (átolvadt) kis égitest metszete

A melegedés hatására történő lassú átkristályosodás (metamorfózis) során a kondritos szövet fokozatos átalakulása figyelhető meg. A kondriumok fokozatosan elmosódott körvonalúvá válnak, majd teljesen szétfoszlanak a diffúzió hatására. Ugyancsak a hőmérséklet emelkedésével fokozódó diffúzió hatására kémiai kiegyenlítés történik az egyes ásványok kémiai összetételében, elsősorban a mátrix és az ásványok között. A leginkább tanulmányozott folyamat az olivin és a piroxén Fe és Mg tartalmában történő kiegyenlítés. A Van Schmus–Wood által definiált szövettani típusok sorozatának végén a még kondritos kémiai összetételű, de a kondriumokat már nem mutató, szemcsés szövet áll.



21. ábra. A Van Schmus–Wood sorozatok táblázata. A minták a NIPR Antarktisi Meteoritek kőzetgyűjtemény vékonycsiszolatai alapján készült. Az E, H, L, LL, C csoportok valószínűleg különböző kezdeti feltételekkel indult égitesteket jelölnek, a számok a Van Schmus–Wood féle petrológiai osztályok, amelyek fölmelegedési fokozatokat jelölnek.

A további fölmelegedés már parciális olvadási folyamatokat indít el. Az idők során egyre több olyan - viszonylag ritka - meteoritot találtak és tanulmányoztak, amely ugyan még kondritos összetételű, de már teljesen elveszítette kondriumos szövetét. Ezeket primitív akondritoknak nevezték el. Ma ezeket tekinthetjük a kondriumos meteoritekkel indult hőtörténeti fejlődés második szakaszában a kiindulási állomásnak. (Ilyen meteoritek az acapulcoitok, lodranitok, melyekben, kis mértékben a vas megolvadását, és bazaltos komponens parciális megolvadását is megfigyelték.)

A kondritos égitest fölmelegedésének utolsó szakaszát képviselik a primitív akondritok. Egy differenciálódási előtti, még

kondritos összetételű állapotot rögzítenek. Ezekből olvadnak ki a legalacsonyabb olvadáspontú összetevők: a vas és a bazalt (21. ábra).

2. A kondritos összetételű kis égitest fölmelegedésének második szakasza: parciális megolvadások, anyagátrendeződések (differenciáció)

A kis égitest köpenye: ureilit és lodranit: Leegyszerűsítve a primitív akondritokban meginduló kiolvadási folyamatokat két fő anyag távozik el belőle: a vas és vasszulfid „lefelé”, a kis égitest belsőbb övei felé, és a bazaltos magma „fölfelé”, a kis égitest felszínére is kiömölve. Ennek eredményeként a primitív akondritos összetételű kőzetből egy kiürült, de még mindig sok kondritos vonást őrző akondrit típus marad meg maradványként, amely a kis égitest köpenyét alkothatja. Két fontos akondrit (kondritos szövet nélküli) meteorit csoportot találtak eddig: ezek az ureilitok és a lodranitok.

Az **ureilitok** különleges akondritok. Ősi bélyegeket és átalakulási meg átkristályosodási jegyeket is hordoznak szövetükben. Ősi bélyeg a nagy széntartalom (4 súlyszázaléknyi is lehet, s ez annyi, mint a C-I. szenes kondritoké) és az olivin-pigeonit fő ásványi összetétel. A kondritokra jellemző vastartalom lecsökkent már bennük, tehát a vas és a szulfid összetevő többsége kifolyt már ebből a meteorit típusból. Eltávolozott azonban egy alacsonyabb olvadáspontú és a bazaltokra jellemző összetételű komponens is belőlük. Ezért az ureilitok egy differenciálódott, eredetileg kondritos összetételű kis égitest köpeny-anyagának tekinthetők.

Jellegzetes az ureilitok szövetében az, hogy a nagy méretű olivin és piroxén ásványokat fekete perem határolja. Az ásványok közötti hézagokat szén, fémes vasnikkel és vasszulfid tölti ki. Olyan egy ureilitos szövet, mintha ólomkeretes üveglakot látnánk szabálytalan poligonokkal kitöltve. A szén főleg grafit, amely kissé redukálta is az ásványok peremvidékét, s ennek hatására parányi vasszemcsék váltak ki az olivin és piroxén ásványok peremén. Ez a fémkiválási zóna szintén hozzájárul az ásványokat övező „ólomkeretes” peremekhez a szöveti képen.

A kis égitest magja: vasmeteoritek és pallazitok: A viszonylag gyakori vasmeteoritek utaltak már arra korábban is, hogy a **vas megolvadt** és kifolyt az eredetileg kondritos kőzetből jó néhány kis égitesten. Ugyancsak külön meteorit típusként számon tartottak bazaltos akondritokat is, melyek a bazaltot alkotó ásványokból (piroxén és földpát) állnak, s e két típus szépen beleillik abba a folyamatsorba, amit a kondritos égitest fej-

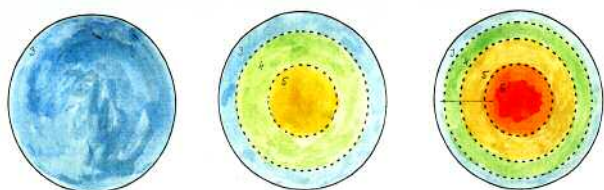
lődéstörténetének középső szakaszából le is lehet vezetni. A **primitív akondritos** összetételű égitestben a vas lefelé folyik ki és létrehozza a kis égitest magját, a kisebb sűrűségű bazaltos parciális olvadék pedig az égitest felszíne felé távozik, létrehozva annak a kérgét. Jelenleg egy nagyobb kisbolygót ismerünk bazaltos színképű felszínnel és ez a Vesta kisbolygó. Van azonban számos kicsiny, kilométeres – 10 kilométeres méretű töredék égitest ilyen a kisbolygóövben. Ezek az átalakulási termékek is tanulmányozhatók a NIPR antarktisi meteoritgyűjteményének vékonycsiszolatain.

A **pallazitok** olyan kő-vas meteoritok, melyekben több a fémes összetevő, mint a szilikátos. A vasnikkel fázis folytonos mátrixot alkot, melyben olivin (s néha piroxén) kristályok helyezkednek el. Vékonycsiszolatban a fémes fázis átlátszatlan (opak), s ezért a beágyazott, (fémmele körbevett) szilikátok jól megfigyelhetők. A szilikát ásványok lehetnek lekerekítettek, máskor pedig kristálylapokkal határoltak, vagy éles töréses pereműek. Metszetben az is megfigyelhető a fémes fázison, hogy kisebb nagyobb vasszulfid tartományok szintén be vannak ágyazva a fémes vasnikkel fázisba. Még olvadt állapotában ez a két fázis, a vasnikkel és a vasszulfid, egymással nem elegyedő (nem keveredő) olvadékot képez. A vasszulfid színe sárgásabb, a vasnikkel fázis ezüstszerű. A fémes fázisok színkülönbségét még inkább előhozza az etetésnek nevezett eljárás. Ennek során savval maratják meg a lecsiszolt fémes felületet.

A láthatóvá vált fémes szövetszerkezetnek a vasnikkel fázis esetén külön nevet is adtak. **Widmannstätten mintázatnak** nevezik első leírójának nevére. A nikkeldús fázis a gamma vas, taenit (kohászati nevén austenit), melynek kristályrácsát lapcentrált köbös elemi cellák alkotják. A nikkelszegény fázis az alfa vas, kamacit, melynek kristályrácsát tércentrált köbös elemi cellák alkotják. Lehűlés és lassú kristályosodás során oktaéder lapok szerint elrendeződő lemezek alakjában válik ki az alfa vas, peremén pedig a gamma vas, s ez a mintázat jelenik meg különböző irányú termetszetekben a levágott és lecsiszolt vasmeteorit felületeken. Minél nagyobb a nikkeltartalom, annál vékonyabbak az alfa vas rétegek.

A kis égitest kérgé: bazaltos akondritok: A **bazaltos akondrit** elnevezéssel a kőmeteoritek köréből származó néhány magmás szövetű kőzettípust jelölnek. Egy fejlett és differenciálódott kis égitest kérgének a kőzetszilánkjai ezek. De tisztán magmás szövete csak az eukrit–howardit–diogenit sorozat szélső tagjainak van, s persze ugyanezek előfordulnak breccsás szövettel is. (A howardit, eukrit, diogenit név betűszóvá olvasásával HED meteoritoknak is nevezik őket.) Ásványtani szem-

pontból ezek a kőzetek piroxénből és földpátból állnak. A diogenitek esetében a piroxén Mg-gazdag rombospiroxén, (szövegete újrakristályosodott szemcsés szövet). A másik szélső tag, az eukrit esetében ezek az ásványok pigeonit+plagioklász. A howarditok átmeneti breccsás kőzettípust képeznek az eukritek és a diogenitek között. A diogenit-howardit-eukrit sorozat kémiai összetétel szempontjából sokmindenben hasonlít a földi komatiit-pikrit-modern kori tholeiites bazalt sorozatra (például a sorozat kőzeteiben fokozatosan csökken a magnézium mennyisége, s ezzel párhuzamosan a szilícium-dioxid tartalom fokozatosan növekszik). Ez arra is utalhat, hogy a kis égitesten fölgyorsítva játszódott le egy olyan folyamat, amit a Földön is megfigyelhetünk. Kezdetben, a vékony kéreg esetén, nagy Mg-tartalmú lávák (komatiitok, vagy hozzá hasonló nagy Mg- tartalmú lávák) ömlenek a felszínre, majd a kéreg fokozatos vastagodása miatt az egyre kisebb Mg-tartalmúak érik már csak el a felszínt (Bérczi, Holba, Lukács, 2000).



ÉGY KONDRITOS SZÜLŐÉGITEST RÉTEGZŐDÉSE, METAMORFÓZISA ÉS DIFFERENCIÁCIÓJA JELLEGZETES HAGYMAHÉJ-SZERKEZETTEL



VASMAG ÉS BAZALTOS AKONDRITOS RÉTEGEK DIFFERENCIÁCIÓJA

22. ábra. Összefoglaló áttekintés a kondritos kis égitest fejlődéstörténetéről. A kondritok és a különféle, kondritos eredetű differenciálódott meteoritek egy kis égitest fejlődéstörténetének egymás után következő időszakaiban alakultak ki. A kis égitestről időrendben megrajzolt metszeteken egy hosszú anyagátalakulási eseménysor lánczemeit alkotják e kőzetek, melyekből fölvezölhatjuk a kis égitest fokozatosan kialakuló réteges szerkezetét is.

A meteoritek szövetében megfigyelhető jelenségek: A kondritok forráshelyeül szolgáló égitesteken a termikus fejlődéstörténet következő szakaszaira következtethetünk a NIPR 30 vékonycsiszolatból álló mintagyűjteményében is megfigyelhető kondritos szöveti jegyek alapján.

1. Kezdeti kondritos állapotok, ősi szövet, fölmelegedésre utaló nyomok nélkül,
2. ... a fölmelegedés megkezdődik és ennek hatására a kondrumok körvonalai elhalványodnak, a szövetszerkezet átalakul,
3. ... a fölmelegedés hatására széndiffúzió (ureilitben) és vasredukció (szemcseeloszlás változásban),
4. ... további fölmelegedés hatására a szilikátok szövetének átalakulása diffúzióval,
5. ... még további fölmelegedés hatására primitív akondritos szövet fejlődik ki,
6. ... még további fölmelegedés hatására vasmegolvadási termékek jelennek meg (pallazit),
7. ... parciális olvadás nyomán bazaltos akondritok (diogenit, howardit, eukrit) keletkeznek.

Összefoglalás

A kozmikus anyagok vizsgálata jelentősen kiterjedt az elmúlt fél évszázadban. Az űrkutatás arra törekszik, hogy anyagokat gyűjtsön más égitestekről és a kozmikus anyagok vizsgálatához, mert az égitestekre és a kozmikus környezetet anyagaira vonatkozó kutatások a leggyorsabban fejlődő vizsgálati területek közé tartoznak. Most a kisbolygókról származó meteoriteket vizsgáltuk.

A meteoriteket egy elképzelt Földnél kisebb kicsi égitest töredékeinek értelmezhetjük. A kondritos kisbolygó a Naprendszer ősi anyagából jött létre. Kicsi méreténél fogva csak néhány kis méretű kondritos égitest tudta megőrizni az ősi anyagokat, mert kis mérete folytán rövid ideig tartott benne az a fölmelegedés, amit a rövid felezési idejű radioaktív elemek hoztak létre benne.

A kissé nagyobb kisbolygónak is csak néhány millió éves fölmelegedési idő állt rendelkezésére. De ezalatt égitestünk olyan fejlődési állomásokon ment végig, amelyek előbb fokozatosan átalakították majd kismértékben szét is válogatták az ősi kondritos anyaggyűjttest és sűrűségük szerint övekre is tagolta (22. ábra).

A sorozat folytatásában több más fontos epizódot mutatunk majd be. Először a holdi eseményeket, amelyekről az

Apollo-expedíciókon begyűjtött kőzetminták és meteoritek is rendelkezésünkre állnak. A meteoritek egy különleges csoportját alkotják a marsi meteoritek. Ezekről szintén egy későbbi cikkben szólnunk, és a nagyobb méretű égitesthez tartozó még differenciáltabb kőzettani fejlődéstörténet újabb bolygótörténeti szakaszokkal fog megismertetni bennünket a Mars kutatása során. A bolygóttestek anyagából kiolvasható fejlődéstörténeti epizódokat a legnagyobb kőbolygónak, a Földnek a komplex története koronázza meg, ahol a leghosszabb ideig tartó és legváltozatosabb bolygófejlődési történeti szakaszt láthatjuk működni a lemeztektonika formájában.



23. ábra. Az Antarktisi Meteoritek kőzetgyűjtemény vékonycsiszolatai A National Institute of Polar Research (NIPR, Japán Nemzeti Sarkkutató Intézet) készlete alapján sok érdekes összehasonlító szöveti vizsgálatot végezhetünk el.

Százarcú meteoritos kőzetvilág mozgalmas eseménysorát láthattuk a forráshelynek tekintett néhány száz kilométer átmérőjű kisbolygókra vetítve. De ez az eseménysor még csak a kőzetbolygók (a Föld típusú bolygók) világában lezajlott égitestfejlődés egyes jellemző szakaszaira utalt. Kikutatásra vár a külső Naprendszer jeges világának, a Neptunuson túli kis égitesteknek a fejlődéstörténete is. Itt is ismerünk már, 1000 kilométeres égitesteket, melyeknek kőzetanyagában az egyik fő összetevő a vízjég. A külső naprendszeri fejlődéstörténet kutatásának egyik lépése lehetne a jégmeteoritek megtalálása az Antarktison. Maradt tehát kutatni való bőven a kisbolygók, a Neptunuson túli kis égitestek és a meteoritek világában a jövő nemzedékek számára is.

Besorolás	Osztály	Jel	Ásványai	Egyéb megjegyzés																																																				
KONDRITOK A kőmeteoritok alapjellemzői a korábban megolvadt ásványból álló kondrumok kb. 1 mm átmérőjű gömbök. Az égitest nem olvadt át, így a kondrumok megmaradtak. <i>A számmal jelzett petrológiai osztályok magyarázata</i> A jelnél a szám a kondrumok átalakulását (metamorfizációját) jelzi: a 3 a nem átalakultat jelzi. Ahogy nő a számérték, úgy nő az olvadás hatása. A 7-es számúaknál a kondrumok teljesen eltűntek átalakulással. A 7-es jelzésűeket akondritként vagy impakt olvadákként is definiálhatjuk. Az 1-es típusba a CI, a 2-esbe a CM és CR csoportok tartoznak. <i>Alosztályok</i> Mivel a termikus metamorfózis eseményeinek jelentős része zajlik le a 3-as és a 4-es petrológiai osztály között, ezért a 3-as és a 4-es szám közötti tartományt 10 részre fölosztották. 3.0: a szülő égitestbe épüléskori állapothoz képest átalakulás nem érte 3.9: szerkezete változatlanul tűnik, de ásványtani összetétele a szemcsék közötti diffúzióval megváltozott	ENSZTATIT KONDRITOK E=ensztatit. Mindegyik variációnak van EH (magas) és EL (alacsony) vastartalmú változata (E7=megolvadt). Ensztatit: Mg ₂ Si ₂ O ₆ , a magnéziumgazdag változat.	EL3/EH3 EL4/EH4 EL5/EH5 EL6/EH6 EL7/EH7	Ensztatit, fémek, szulfidok, plagioklász, olivin (EH)																																																					
	KÖZÖNSÉGES KONDRITOK A hullások leggyakoribb meteorittípusa (73%). Ha egy breccsásodott meteoritban többféle átalakulási fázisú rész található, kötőjellel kapcsolódnak, pl. H3-6.	H kondritok 12-21% (magas) vastartalmú (régiben bronzit) kondritok. A hullások 31%-a.	H3.0-H3.9 H4 H5 H6 H7	Olivin, piroxén, fém, plagioklász, szulfid																																																				
	L kondritok 5-10% (alacsony) vastartalmú (régiben hipersztén kondritok). A hullások 35%-a.	L3.0-L3.9 L4 L5 L6 L7	Olivin, piroxén, plagioklász, fém, szulfid	Pl. Mezőmadaras Pl. Mócs																																																				
	LL kondritok 2% (alacsony) vastartalmú (régiben amfoteritek). A hullások 7%-a.	LL3.0-LL3.9 LL4 LL5 LL6 LL7	Bronzit, olivin, oligoklász																																																					
	Osztály SZENES KONDRITOK Elemi szenet tartalmaznak. A hullások 3,6%-a. C=szenes (=carbon) A jel második betűje a típushelyre utal. A szám az átalakulás mértékét mutatja.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Klán</th> <th>Csoport</th> <th>Alcsoport</th> <th>Jel</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><i>Mini-kondrum</i></td> <td>Ivuna</td> <td></td> <td>CI</td> </tr> <tr> <td><i>CV-CK</i></td> <td>Mighei</td> <td></td> <td>CM1-CM2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Ornans</td> <td></td> <td>CO3-CO3.7</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Vigarano</td> <td>Allende</td> <td>CV-oxA</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Bali</td> <td>CV-oxB</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>redukált</td> <td>CV-red</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Karoonda</td> <td></td> <td>CK</td> </tr> <tr> <td><i>CR</i></td> <td>Renazzo</td> <td></td> <td>CR</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Bencubbin</td> <td></td> <td>CB</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Allan Hills 85085</td> <td></td> <td>CH</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Kakangari</td> <td></td> <td>K</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Rumuruti</td> <td></td> <td>R</td> </tr> </tbody> </table>	Klán	Csoport	Alcsoport	Jel	<i>Mini-kondrum</i>	Ivuna		CI	<i>CV-CK</i>	Mighei		CM1-CM2		Ornans		CO3-CO3.7		Vigarano	Allende	CV-oxA			Bali	CV-oxB			redukált	CV-red		Karoonda		CK	<i>CR</i>	Renazzo		CR		Bencubbin		CB		Allan Hills 85085		CH		Kakangari		K		Rumuruti		R	Filloszilikátok, magnetit Filloszilikátok, olivin, tochilinit Olivin, piroxén, CAI, fém Vasgazdag olivin, CAI-k (CV2-CV3.3) Olivin, CAI-k Filloszilikátok, piroxén, ol., fém Fém, piroxén Fém, olivin, magas vastartalom	pl. Kaba: CV3 pl. Kaba: CV3 Kisbolygó-ütkezés CB-vel kapcs.?
Klán	Csoport	Alcsoport	Jel																																																					
<i>Mini-kondrum</i>	Ivuna		CI																																																					
<i>CV-CK</i>	Mighei		CM1-CM2																																																					
	Ornans		CO3-CO3.7																																																					
	Vigarano	Allende	CV-oxA																																																					
		Bali	CV-oxB																																																					
		redukált	CV-red																																																					
	Karoonda		CK																																																					
<i>CR</i>	Renazzo		CR																																																					
	Bencubbin		CB																																																					
	Allan Hills 85085		CH																																																					
	Kakangari		K																																																					
	Rumuruti		R																																																					

A METEORITEK AZONOSÍTÁSA

Az alábbi állítások általában igazak minden meteoritra, de nem kizárt, hogy kivételek mégis akadnak alóluk.

- ▶ A legtöbb meteorit vonzza a mágneset, de maga nem mágneses
- ▶ Sűrűségük nagy, azaz méretükhöz képest nehezek
- ▶ Olvadási kéreg (*Fusion crust*): vékony, fekete (matt vagy fényes) kéreg. A holdi meteoritek olvadási

kérge üreges. Az olvadási kérget a forró sivatagokban talált példányoknál a szél leeroszhatta. A kisebb meteoritok nagy része leolvad a légkörön áthaladás alatt, ezért éles sarkok, törések (eredetileg) nem lesznek rajta.

- ▶ Kénes szag (friss meteoriteknél)
- ▶ Regmaglypt (ujjnyom) mintázat: mintha az ember a hüvelykujját belenyomkodta volna a meteoritba (főleg nagyobb meteoritoknál vagy

vastemeteoritokban) (a légkörön áthaladáskori forró gázörvények általi olvadás nyoma)

- ▶ Folyási mintázat (mint az eső a mozgó autó szélvédőjén) (a légkörön áthaladáskori olvadástól)
- ▶ Rozsdásodás (vasmeteoriteknél)
- ▶ Világos fémek „pelyhek”, foltok (Ni/Fe)
- ▶ Kondrumok (mm méretű golyócskák) (kondritokban)
- ▶ Nincs bennük kvarc (kivéve:

ensztatit kondrit, eukrit, shergottit)

- ▶ Eredetileg nincs bennük hematit, de a vasmeteoritek hullás után rozsdásodni kezdenek.
- ▶ Nincs rajtuk égésnyom, csak olvadási nyom
- ▶ Nem rétegzett
- ▶ Nem hólyagüreges (mert képződésükkor kevés gáz volt), kivéve egyes holdi vagy lehetséges, hogy egyes marsi vulkáni eredetű meteorit ill. eukrit.

FORRÁSOK:

<http://www.meteorite.fr/en/classification/>,
http://hu.wikipedia.org/wiki/Meteoritok_osztályozása,
<http://www.meteoritemarket.com/type.ht>, <http://aerolite.org/>;
http://www.daviddarling.info/encyclopedia/M/meteors_and_meteorites.html
 J. R. De Laeter: *The history of meteorite age determinations*. Geological Society, London, Special Publications; 2006; v. 256; p. 363-378;
 Bérczi, Lukács: Existence, survival, and recognition of icy meteorites on Antarctica with respect to paleotemperatures. *Acta Climatologica and Chorologica* v. 34-35, pp51-68, 2001.
<http://www.sci.u-szeged.hu/eghajlattan/akta01/051-068.pdf>.
 Sengupta D. et al: Terrestrial Ages of Antarctic Meteorites Based on the Thermoluminescence Levels Induced in the Fusion Crust. *Braz. J. Phys.* vol. 27 no. 3 São Paulo Sept. 1997.

Besorolás	Név	Meteoritnév	Ásványai	Jel	Eredet (szülő égitest)	Megjegyzés	
KŐMETEORITOK (NEMKONDRITOK)	AKONDRITOK	HED METEORITEK (Eredet: Vesta déli medence?) („Bazaltos akondritok”)	Howardit Eukrit Diogenit	Eukrit-diogenit Anortit-pigeonit Hipersztén (rombos pir.)	HOW EUC DIO	Vesta regolit Vesta bazaltos kéreg Vesta mélységi magmás	Breccsás szövetűek Magmás vagy breccsás (<10% diogenit) Hosszú idő alatt kristályosodott
	Kőmeteoritok kondrum nélkül. Egyes példányai holdi vagy marsi eredetűek. A hullások 8%-a.	MARSI VAGY SNC-METEORITEK (eredet: Mars)	Shergottit Nakhlit Chassignit egyéb	Bazaltos Diopszid, olivin Olivin	SHE NAK CHA	Marsi bazalt, sokkolt (köpeny?) Marsi mélységi / vulkáni Marsi mélységi pl. ALH84001 (4,5 Ga)	Shergotty kora: 165 Ma NAK: Kristályosodás: 1,3Ga; Kicsapódás (Marsról távozás kora): 10,7Ma Kaidun: phobosi meteorit?
		HOLDI METEORITEK	Holdi (Lunait)		LUN	LUN A: anortozitos felföldi; LUN B: mare bazaltok LUN G: gabbró, LUN N: norit	
		PRIMITÍV METEORITEK	Acapulcoit Lodranit Ureilit Brachinit Winonaite Angrit	Bazalt és regolit Olivin, piroxén Olivin, piroxén Olivin, pigeonit Olivin	ACAP LOD URE BRACH WIN ANGR	Újraolvadt kondrit (átmenet a kondrit és az differenciálódott akondritok között) Mint ACAP, de jobban olvadt (Ni-Fe tartalommal). Eredet: S típus. kisbolygó. Olvadt szenes kondrit; egy 10 Ma-korban elpusztult C kisbolygó belsejéből A / S típus. kisbolygó IAB & IIICD	
		ENSZTATIT AKONDRIT	Aubrit	Olivin, piroxén, plagi. Ensztatit	AUB	Olvadt E kondrit	

KŐ-VASMETEORITEK	Típus	Altípus	Ásványai	Jel
Fe-Ni ötvözet és szilikátos anyag keveréke A hullások 1,2%-a	PALLAZITOK (vasmag és akondritos köpenyanyag keveréke)	Főcsoport Eagle Station csoport Piroxénpallazit csoport	Vas, olivin Vas, olivin, piroxén Vas, piroxén	PAL
	MEZOSZIDERITEK (MES) A számjelzés az átalakulás mértékét jelzi. 1: finomszemcsés, 4: olvadék	Bazaltos (A csoport) Ultramafikus (B csop.) Ortopiroxén (C csop.)	Vas, Ca-pir., plagiokl. Vas, Ca-p., pla., ortopir. Ortopiroxén	1A, 2A, 3A, 4A 1B, 2B, 3B 2C

VASMETEORITEK	Típus	Widmanstätten sáv szélesség	Ásványai	Jel
(szerkezeti osztályozás) Fe-Ni ötvözet. A hullások 4,8%-a.	HEXAHEDRITEK <6% Ni	>50 mm	Kamacit	H (jell.: Neumann-vonalak)
Fe-Ni ötvözetek: Taenit: 20-65% Ni Kamacit: 5-15% Ni	OKTAHEDRITEK 6-17% Ni	3.3-50mm 1.3-3.3mm .5-1.3mm 0.2-0.5mm 0.2mm 0.2mm	Kamacit és taenit <i>Widmanstätten sávok: 60°-ban egymást metsző kamacit és taenit sávok</i>	Ogg Og Om Of Off Opl
	Ataxitok (>18% Ni)	nincs szerkezete; főleg taenitből áll (Fe-Ni)		D (pl. Hoba)

VASMETEORITEK	Magmás vasmeteoritok	Primitív (nemmagmás)	IAB főcsoport	Jel
(vegyi osztályozás)			Udei Station csoport Piits csoport Au és Ni tartalom alapján (az első betű az Au, a második a Ni-tartalomra utal, L: low, M: medium, H: high) IIE vasmeteoritok (szilikátzárványokkal)	IC; IIAB, IIC, IID, IIF, IIG; IIIAB, IIIE, IIIF; IVA, IVB; egyéb IAB (pl. Canyon Diablo=Meteor kráter) sLL, sLM, sLH, sHL, sHH IIE (becsapódásban létrejött?)

JÉGMETEORITEK	A világűrben vagy a felszínen gyors szublimációja/olvadása miatt még nem figyeltek meg példányt, ezért – példány híján – nem részei a meteoritek osztályozási rendszerének. Forrásuk: jeges égitestek, jeges törmelékek, óceáni becsapódás? Nem azonos a légköri eredetű kriometeorokkal.
---------------	---

EGY METEORIT ÉLETÚTJA

Apró szemcsék (CAI, kondrum) kicsapódása/megszilárdulása (4,567 milliárd éve) Ezekből: égitest (bolygócsíra) összeállás (tapadás/robbanás)

↓

Nem melegszik át (kicsi égitest)
VAGY differenciálódik (nagy) (első 10-20 millió éve)
ÉS megszilárdul: magma kikristályosodik (magmastest a mélyben vagy láva felszínen) (hűlési idő = felszín alatti mélység a kristálméretből megállapítható)
Kristályosodás kora: 4,4-1,6 Ga (nakhlit:1,3 Ga)

↓

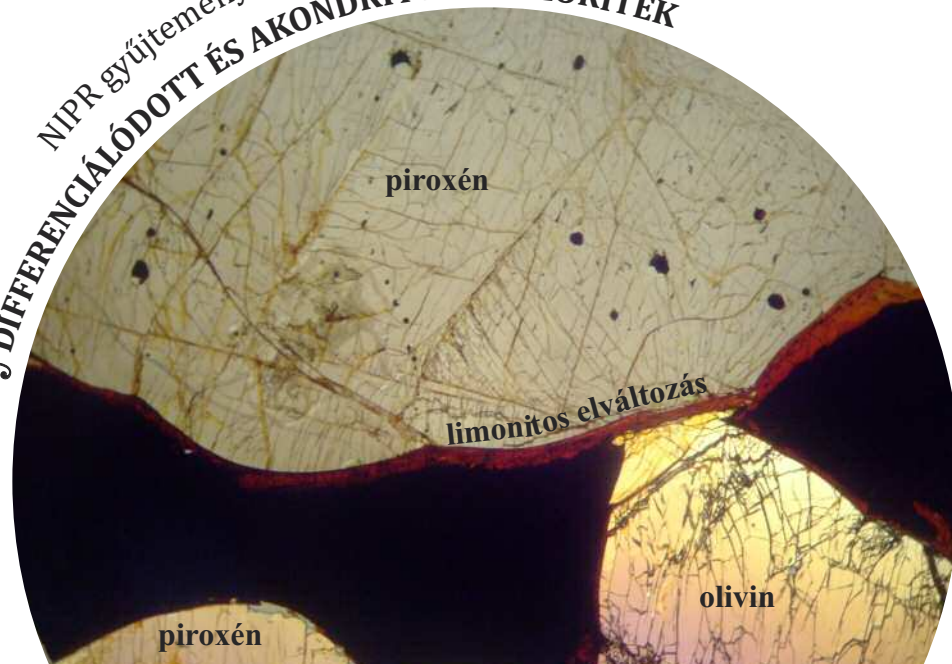
Kis égitest ütközés miatt darabokra törik (pl. kialakulása utáni első évtízmilliókban)
VAGY becsapódás: a törmelék az égitest belsejéből és/vagy felszínéről az űrbe távozik (=utolsó vizsgálás [becsapódáskori felforrósodás] kora – 4,0–4,5 Ga. Ha nem érte nagy becsapódás, megegyezik az égitest összeállás korával)

↓

Törmelék a világűrben
(Föld körüli vagy Nap körüli, földszűrő pályán)
(cosmic ray exposure age – 100 mGy/a @ 1 AU – kozmikussugárzás-kitétségi kor (az ezalatt képződött radioaktív izotópok alapján): kő: <80 Ma, kő-vas: 10-180 Ma, vas: 2,3Ga (De Laeter 2006) (vagy kozmikussugár-sávok alapján) Fiatal kor oka: kozmikus erózió?)

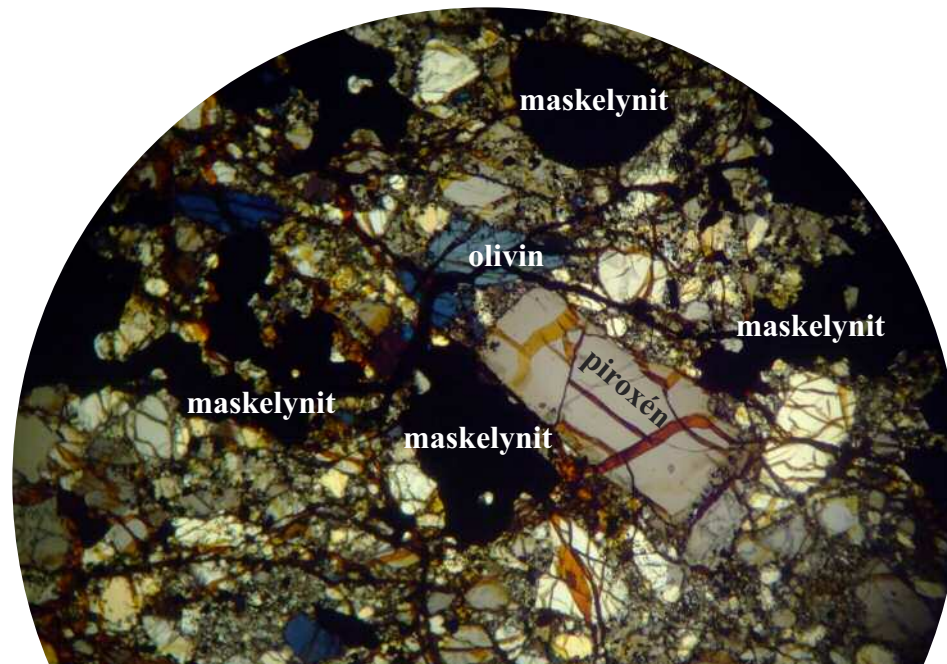
↓

Földre hullás (hullt vagy talált meteoritok)
(terrestrial age – hullás kora: az olvadási kéreg termolumineszcenciás szintje alapján; C14-kor alapján; általában kónél max. pár 10 ezer év; kivéve a fosszilis meteoritokat)



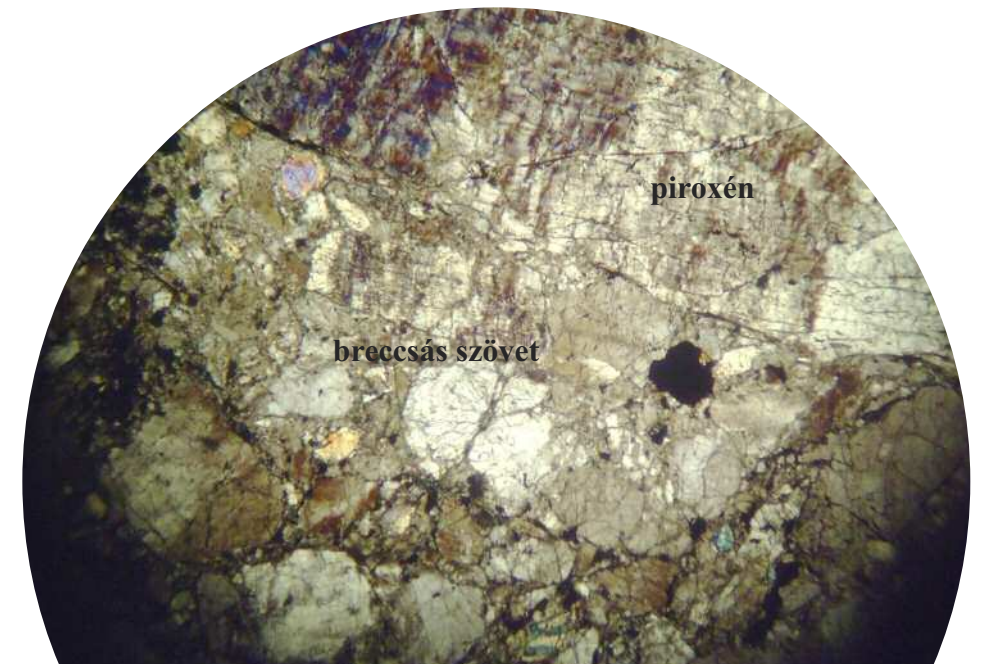
1. FOTÓ **PALLAZIT** [YAMATO 8451]

Olivint és piroxént tartalmazó pallazit. A piroxének alakja szubhedrális, területükön jól láthatók a hasadási síkok. A vékonycsiszolatot hipidiomorf szemcsés szövet jellemzi. Az olivinszemcsék mennyisége alárendelt a piroxénekéhez képest. Az olivin-szemcséken szabálytalan lefutású repedésrendszer látható. A piroxéneket átmetsző széles repedéseket vasdús elváltozott mállási termék tölti ki.



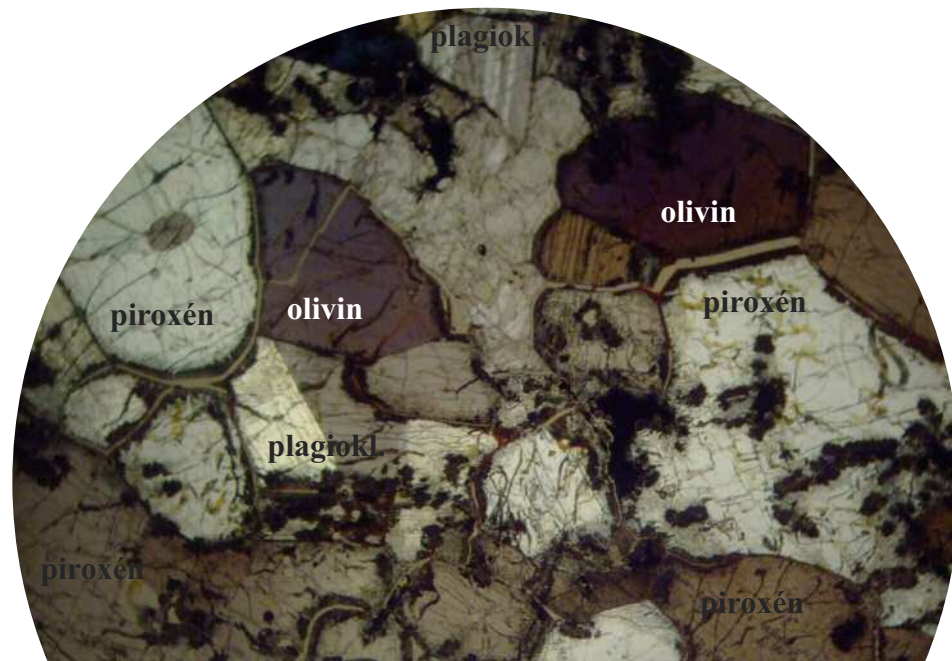
2. FOTÓ **MEZOSZIDERIT** [ALLAN HILLS 77219]

Főleg piroxént, olivint és földpátot tartalmaz a vékonycsiszolat, limonitosodással. A piroxének, az olivinek és a földpátok sajátalakúak. A földpátok részben maskelynitesedtek, részben meg is olvadtak („izzadságcseppek”). A kőzet szövete porfirós pánidiomorf szemcsés. A környezetükben lévő szemcsékhez képest hatalmas méretű porfirós piroxén szemcsék találhatóak. A limonitosodás a repedésekre korlátozódik.



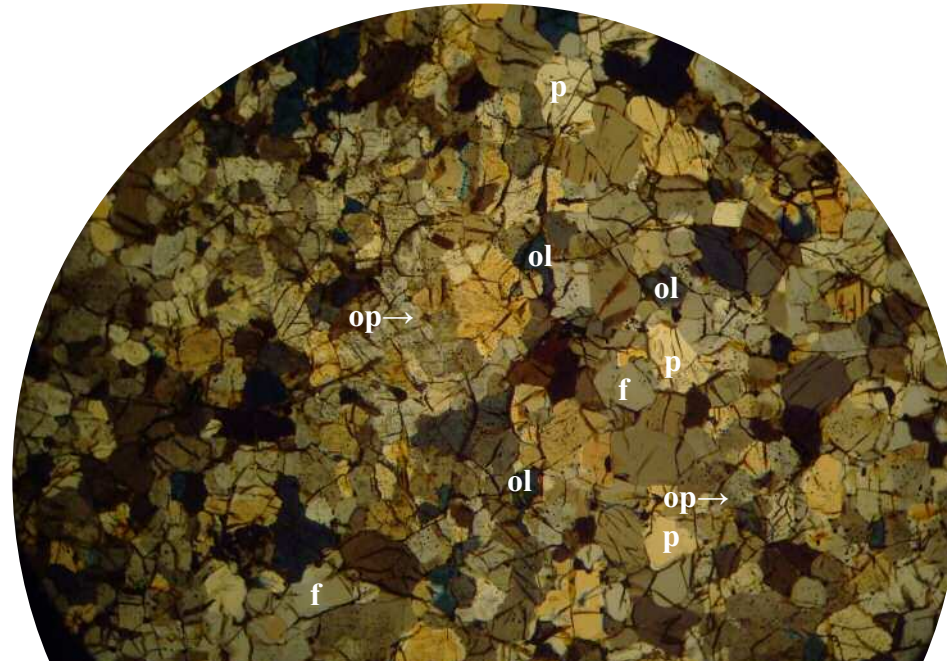
3. FOTÓ **AUBRIT** [ALLAN HILLS 78113]

Olivinben és földpátban szegény piroxén monomikt breccsa. A földpátok maskelynitesedtek, az olivin szemcsék pedig inkább xenomorf megjelenésűek. A piroxén szemcsék mozaikosak és szabályos lefutású repedésrendszer jellemzi őket, amely nem azonos a hasadási síkokkal. A kőzetet nagy ütődéses nyomás érte.



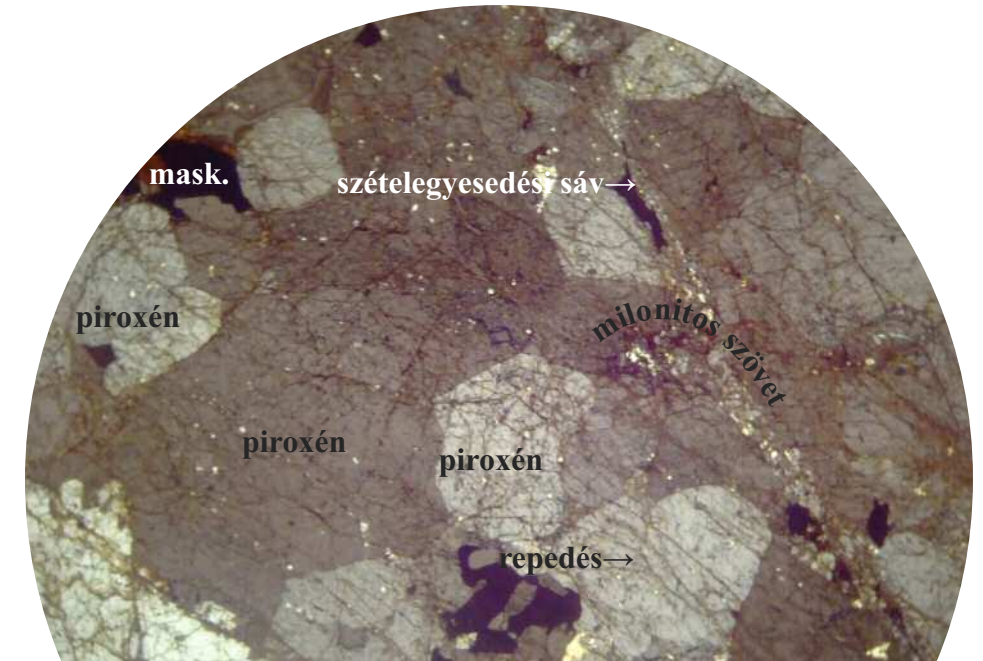
4. FOTÓ **UREILIT** [ALLAN HILLS 77257]

Mélyégi magmás szövetű kőzet vékonycsiszolata, melyet ekvigranuláris szövet jellemez. Főleg piroxén és plagioklász földpát tartalmú kőzet. A csiszolatban az egyensúlyi kristályosodáshoz tartozó szemcseélek lefutásai jól láthatók az érintkezési zónában. Opak ásványokkal „szennyezett” minta, melyben az opak ásványok bolyhos megjelenésűek.



5. FOTÓ **DIOGENIT A** [YAMATO 74097]

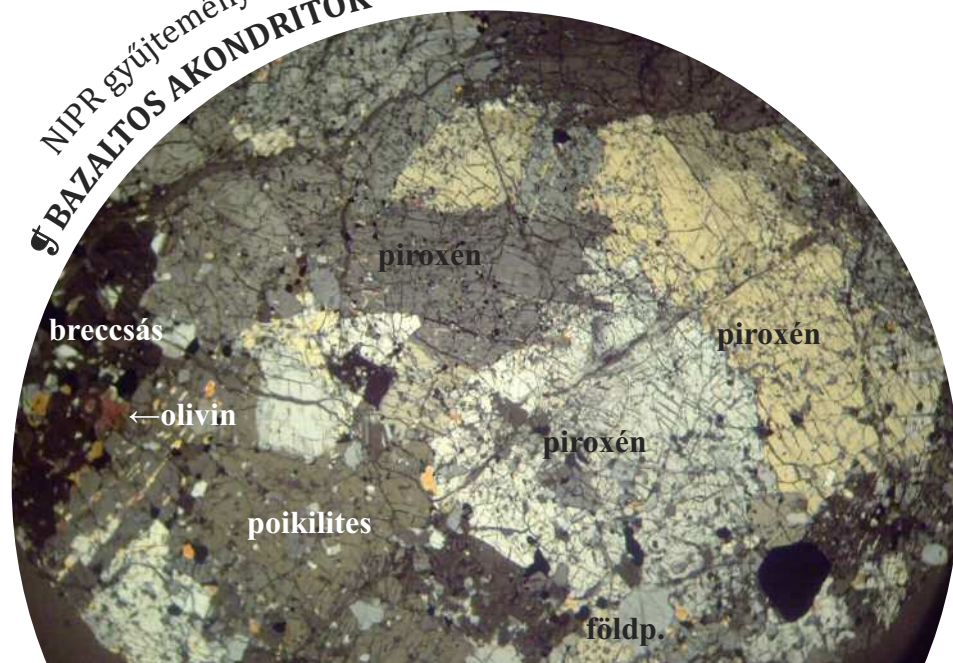
Ekvigranuláris-mozaikos szövetű a kőzetminta. Piroxénből, földpátból, olivinből és opak ásványokból áll. Az opak ásványok behintik a fő kőzetalkotó ásványok felületét. A hasadási felületek jól láthatók.



6. FOTÓ **DIOGENIT B** [ALLAN HILLS 77256]

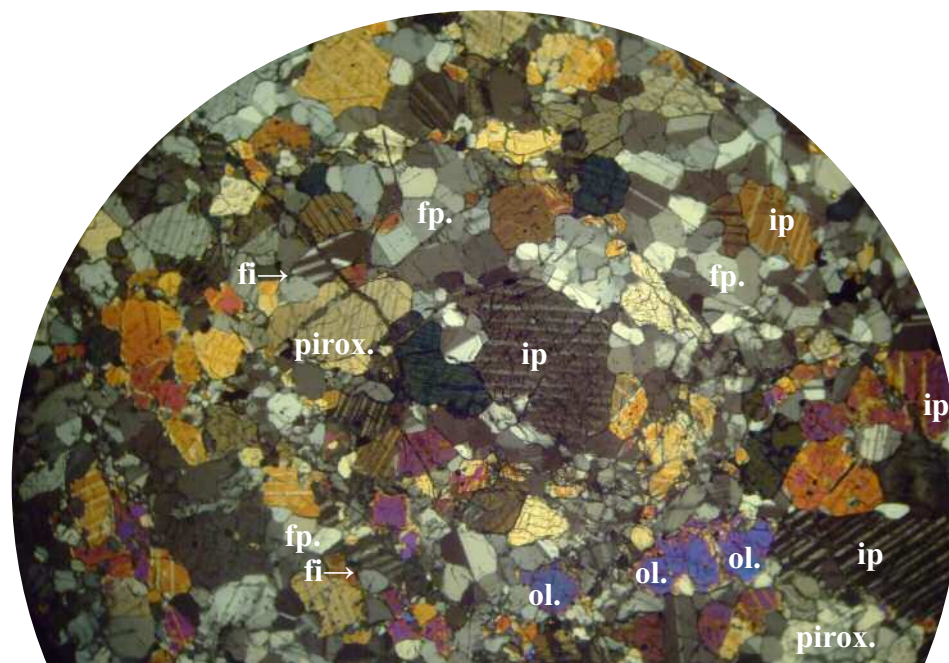
Piroxéndús monomikt breccsás szövetű kőzetminta. A piroxéneken szabályos lefutású szételegyedési sávok figyelhetők meg. A hasadási nyomvonalak nagyobb nagyításon jól láthatók, a sűrű, szabálytalan repedésrendszer pedig nagy ütőről tanúskodik. Kevés maskelynitesedett földpát és kevés opak ásvány is jellemzi a szövetet. Néhány helyen milonitos szövet is látható.

NIPR gyűjtemény
BAZALTOS AKONDRITOK



7. FOTÓ **HOWARDIT** [YAMATO 7308]

A csiszolat egyik felére a breccsás szövet durva szemcsékkel, a másik felére pedig a poikilites szövet a jellemző. Főleg piroxént, olivint és földpátot tartalmaz a csiszolat. Az oikokristályok sajátalakúak, míg a kisebb chadakristályok idiomorfak, vagy xenomorfak.



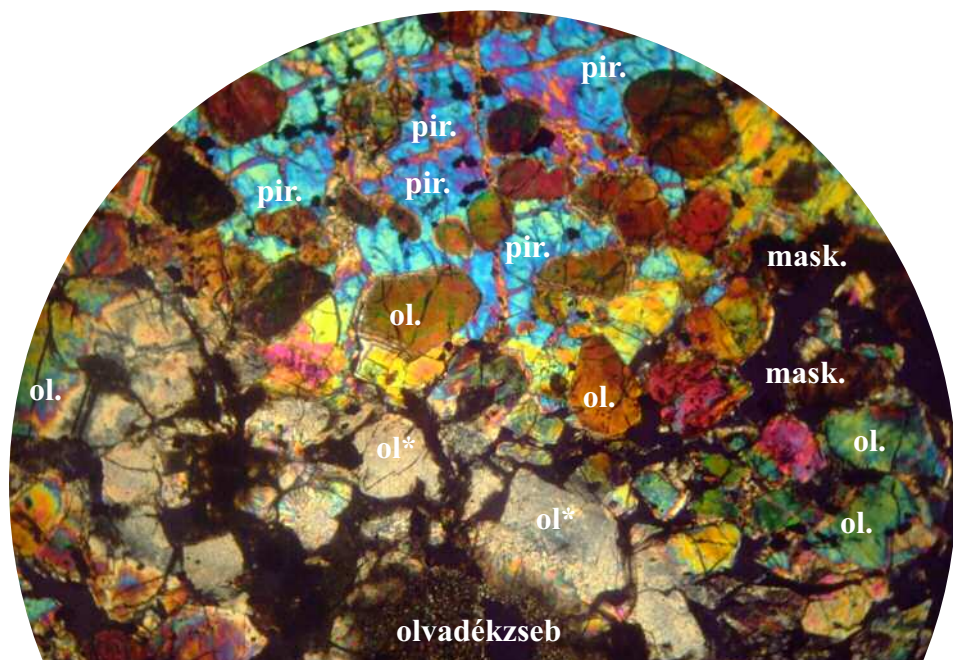
8. FOTÓ **EUKRIT A** [YAMATO 791195]

Piroxén, olivin és plagioklász földpát tartalmú a csiszolat. Az egyes ásványfajtákon jól látszanak a hasadási nyomvonalak, valamint az ikresedések (**ip**=ikresedő piroxén; **fi**=földpát ikrek). Egyes helyeken egyensúlyi kristályosodás ment végbe. Hipidiomorf és ekvigranuláris szövettípus jellemző a csiszolatra opak ásvány hintésekkel.



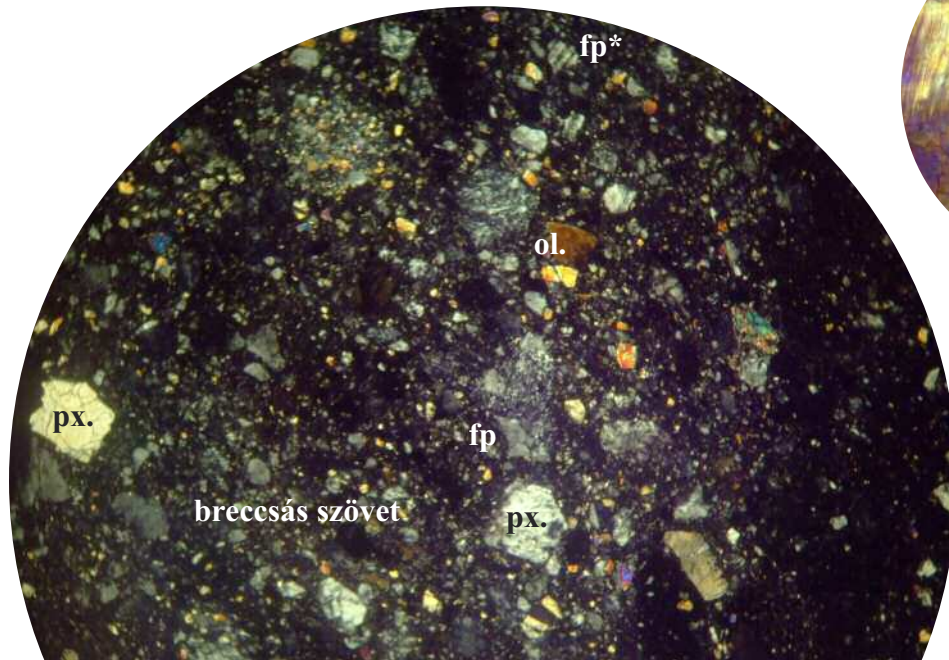
9. FOTÓ **EUKRIT B** [YAMATO 74450]

Főleg breccsás szöveti megjelenés jellemzi a csiszolatot, azonban néhol intergranuláris-interszertális és szubofitos szövet is megtalálható benne. Ugyancsak jellemző a hosszabb-rövidebb megjelenésű földpátok jelenléte. Fenokristályokat elsősorban piroxének alkotnak (ezek interferenciaszínei a csiszolat vékonysága miatt nem a megszokottak).



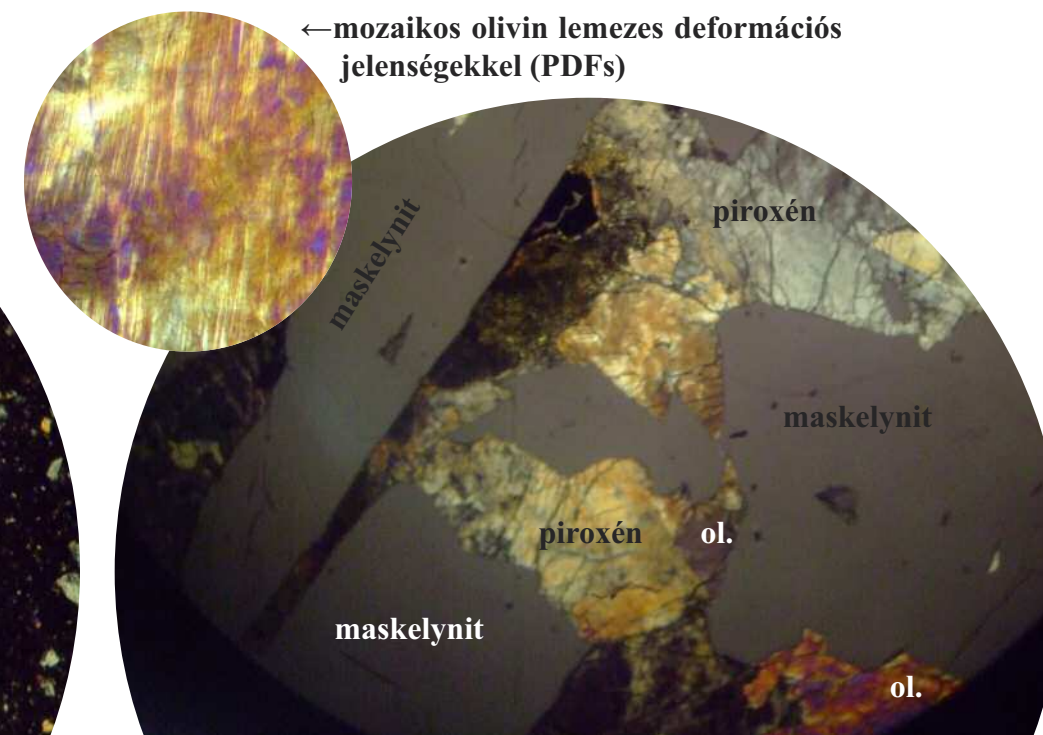
10. FOTÓ **SHERGOTTIT** [ALLAN HILLS 77005]

Ultrabázisos szövettípus. Főleg olivint és földpátot, illetve piroxént és opak ásványt tartalmaz a vékonycsiszolat. Részlegesen vagy teljesen olvadék is képződött benne egyes helyeken. Az olivinek hipidiomorf alakúak. A csiszolat bizonyos részeire jellemző a granuláris szövet, míg más részeire a poikilites szövet, megint más részeire pedig, az olvadékzseb területére az interszertális szövet a jellemző. A földpátok maskelynitesedtek. (a csiszolat vastagsága miatt az interferenciaszínek a megszokottnál magasabb rendűek, az olivin pl. kék helyett zöld, a piroxén narancssárgás helyett kék.) Az olvadékzsebhez közel eső olivineket az olvadékképződés során keletkezett nagy hőhatás érte (**ol***). A sokkhatásra létrejött olvadékzseb piroxént, olivint és földpátot együttesen tartalmaznak, azaz a sokk hullám hatására létrejött súrlódási hő minden ásványt megolvasztott..



11. FOTÓ **HOLDI BRECCSA** [YAMATO 86032]

Holdi regolit breccsa olivin, piroxén és plagioklász földpát (ikresedve: **fp***) tartalommal. A szemcsék részben idiomorfak (részben saját, részben nem saját alakúak), részben xenomorfak (nem sajátalakúak). A mintára a breccsás szövet a jellemző.

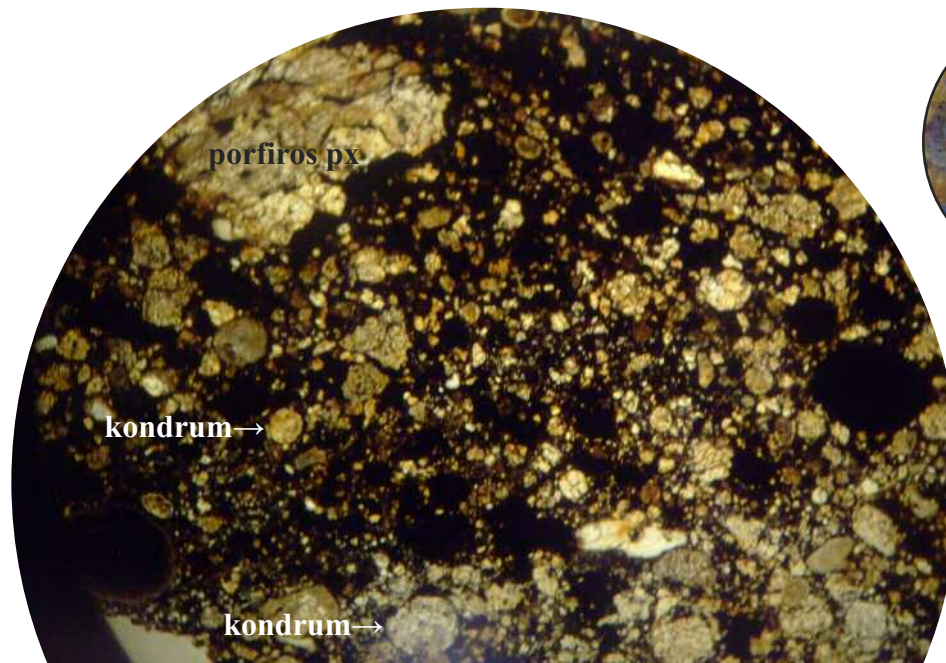


12. FOTÓ **HOLDI BAZALT** [ASUKA 881757]

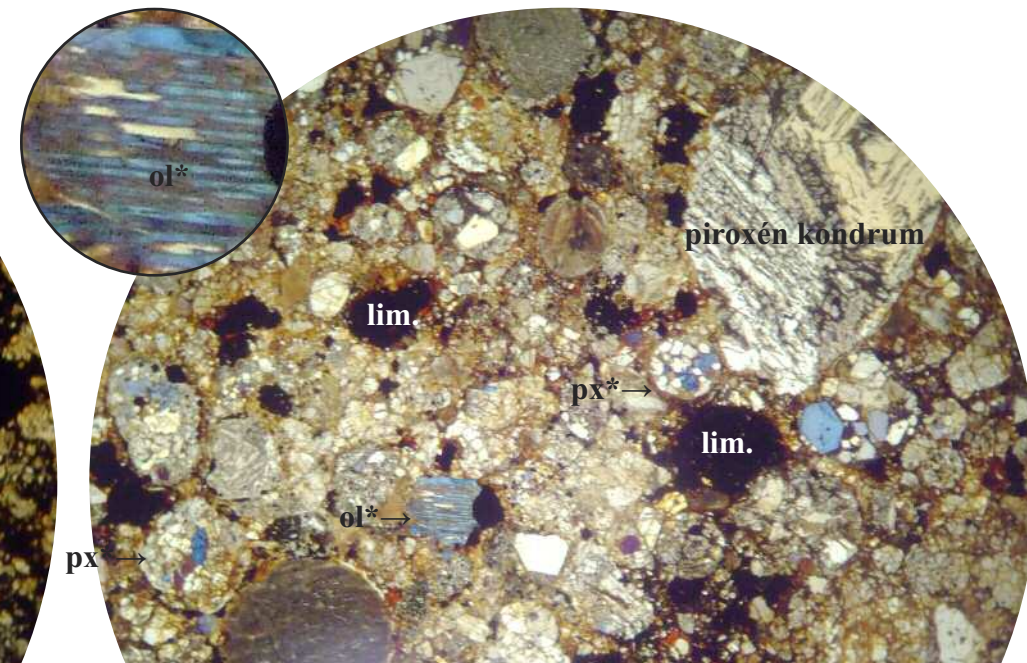
Hipidiomorf (sajátalakú) szemcsés szövetű kőzet, olivin, piroxén és maskelynitesedett plagioklász földpát tartalommal. Az ütődéses nyomás okozta maskelynitesedés nem mindig tökéletesen alakította át a földpátot, ezért a maskelynitesedés mozaikos megjelenésű. Az olivinekből bőségesen található a sokk-metamorfózis által létrehozott sík-deformációs lamellák (PDF-ek) (csak nagyobb nagyításon [$>200\times$] látható).



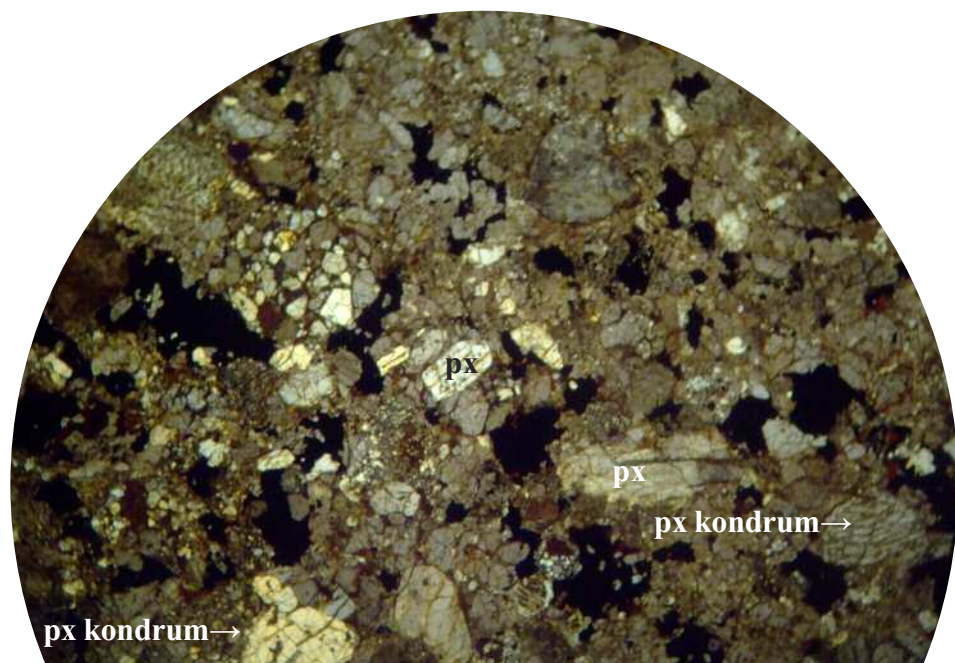
13. FOTÓ **PRIMITÍV AKONDRIT** [YAMATO 794046]
Porfíros szövetű minta. A plagioklász lécek alkotják a kőzet vázát (a bemutatott, kb. 100-szoros nagyításon nem látható) s kicsi, kerekded szemek veszik azokat körül, amelyek olvinek. Néhol a poikilites szövettípus a jellemző. Az olivin szemcsék hipidiomorfak.



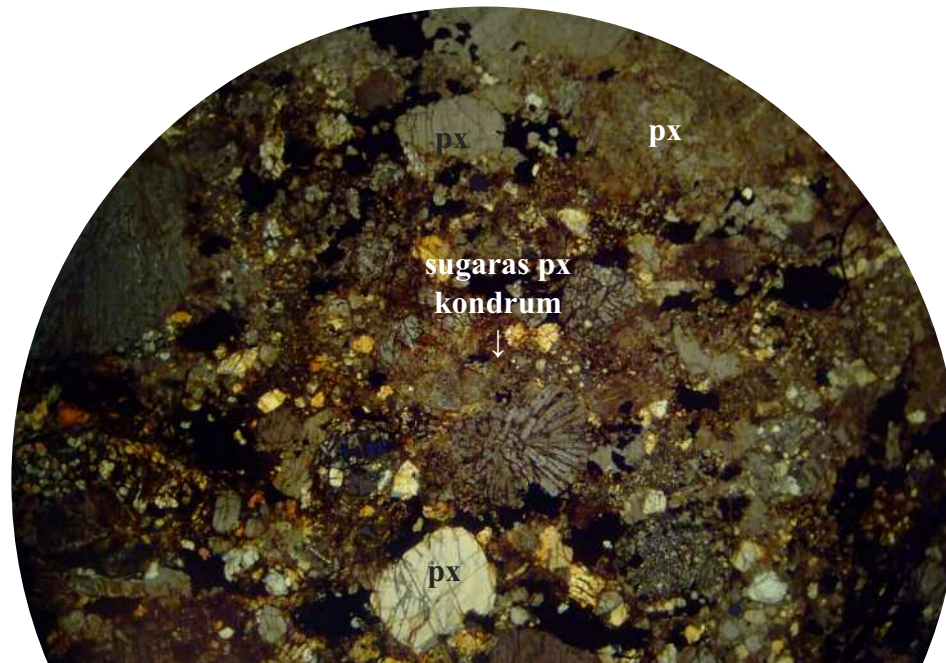
14. FOTÓ **EH3 KONDRIT** [YAMATO 691]
Breccsás szövetű minta, leginkább piroxénből álló kondrumokkal, melyek kerekdedek. A mátrixa részben opak megjelenésű. Jelentős mértékben mállott, azaz limonitosodott, a benne lévő nagy vastartalom miatt.



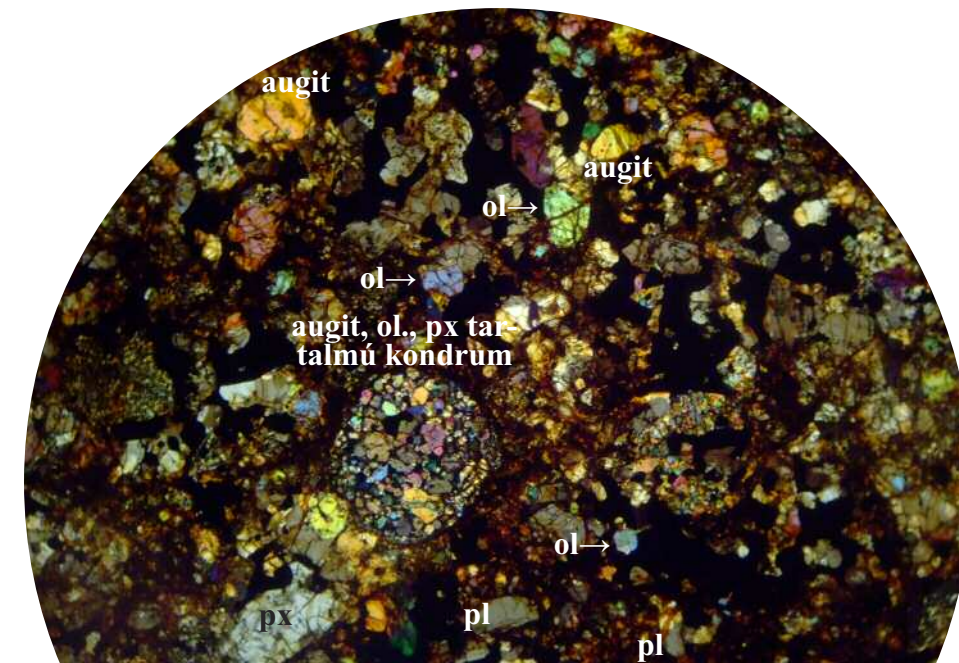
15. FOTÓ **H3 KONDRIT** [YAMATO 791428]
Breccsás szövetű minta, piroxénből és olivinból álló kondrumokkal. Az olivinból álló kondrumok vázszerkezetűek vagy léces szerkezetűek (**ol***, lásd a nagyításban!). Néhány piroxén kondrum szövete ekvigranuláris (szemcsés) (**px***). Némely piroxén kondrum szintén léces kifejlődésű ásványokat tartalmaz. Az aprószemcsés mátrix opak megjelenésű. Limonitos vaskiválás megfigyelhető a vékonycsiszolatban.



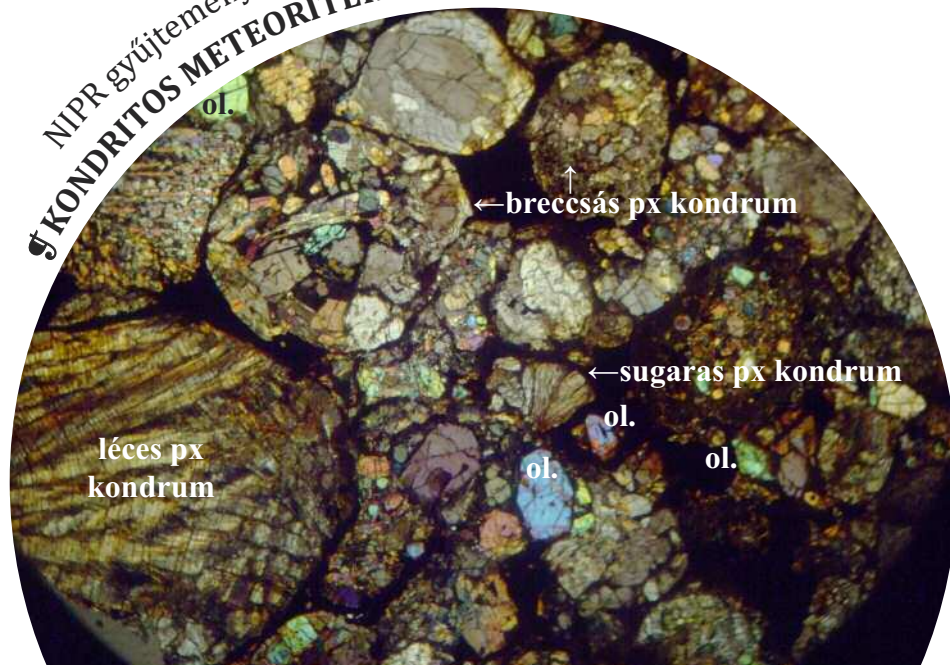
16. FOTÓ **H4 KONDRIT** [ALLAN HILLS 77233]
Breccsás szövet, főleg piroxén egykristályokat és piroxén kondrumokat tartalmaz, relatíve sok opak ásvánnyal.



17. FOTÓ **H5 KONDRIT** [YAMATO 74079]
Porfíros szövetű minta piroxén kondrumokkal. Opak tartalma jelentős. A porfíros szövet mellett az ekvigranuláris szövet is jellemző rá. A kondrumok léces és sugaras megjelenésűek.

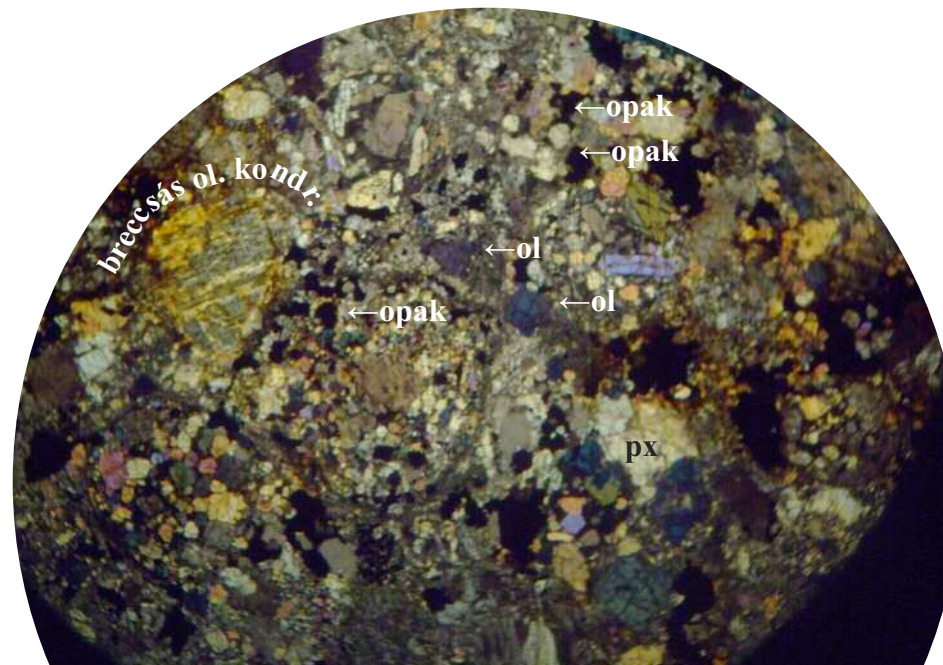


18. FOTÓ **H6 KONDRIT** [YAMATO 74014]
Augit, olivin, plagioklász földpát, általában piroxén és opak ásványok a fő komponensei a szövetnek. Néhány elfoszlott piroxén és olivin kondrumok még megfigyelhető a szövetben. A vékonycsiszolatban a szöveti jellemzők helyről helyre változnak. A protogranuláris, az ekvigranuláris és a poikilites szövettípusok a legjellemzőbbek. A kondrumok léces megjelenésűek, sugaras szimmetriájúak.



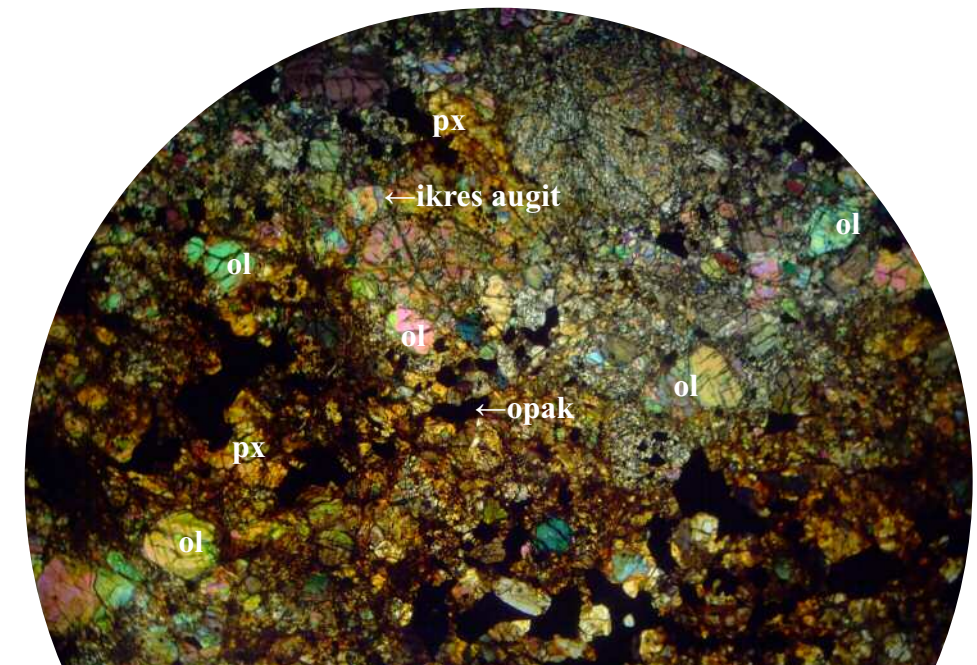
19. FOTÓ **L3 KONDRIT** [YAMATO 74191]

Porfiros megjelenésű, piroxén és olivin kondrumokkal jellemezhető vékonycsiszolat. A piroxén kondrumok léces, sugaras megjelenésűek. Némely piroxén kondrum breccsás szövetű. Néhány nagyméretű, breccsás piroxén kondrumon belül megkülönböztethetők a léces-sugaras elrendeződésű kisebb kondrumok is. Azok az olivinek, amelyek nem alkotnak kondrumokat, hipidiomorf alakúak.



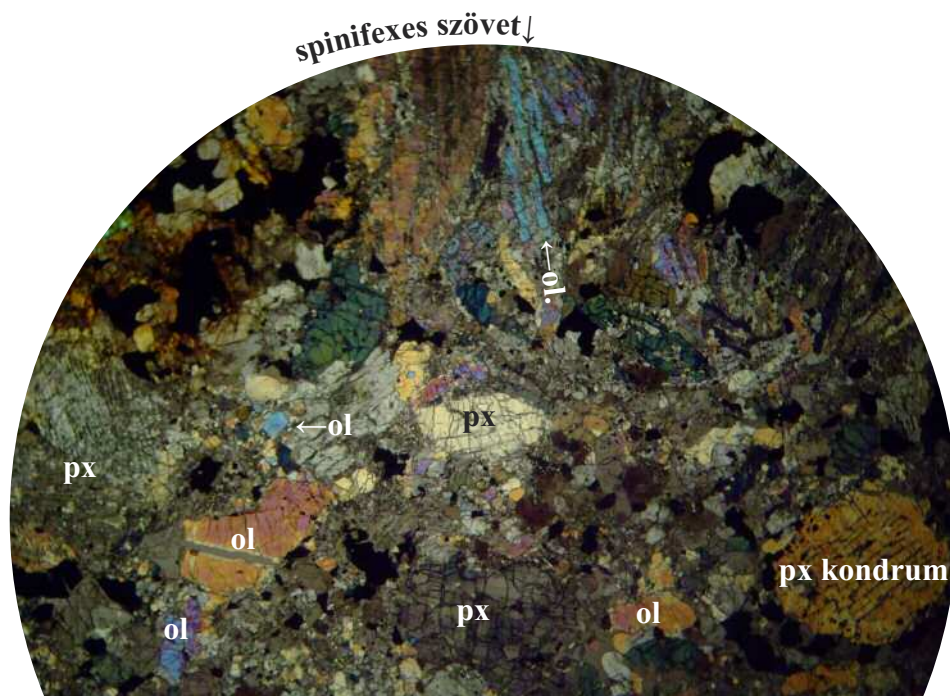
20. FOTÓ **L4 KONDRIT** [YAMATO 74355]

Breccsás szövetű minta, olivinból és piroxénből álló kondrumokkal, jelentős opak ásvány tartalommal.



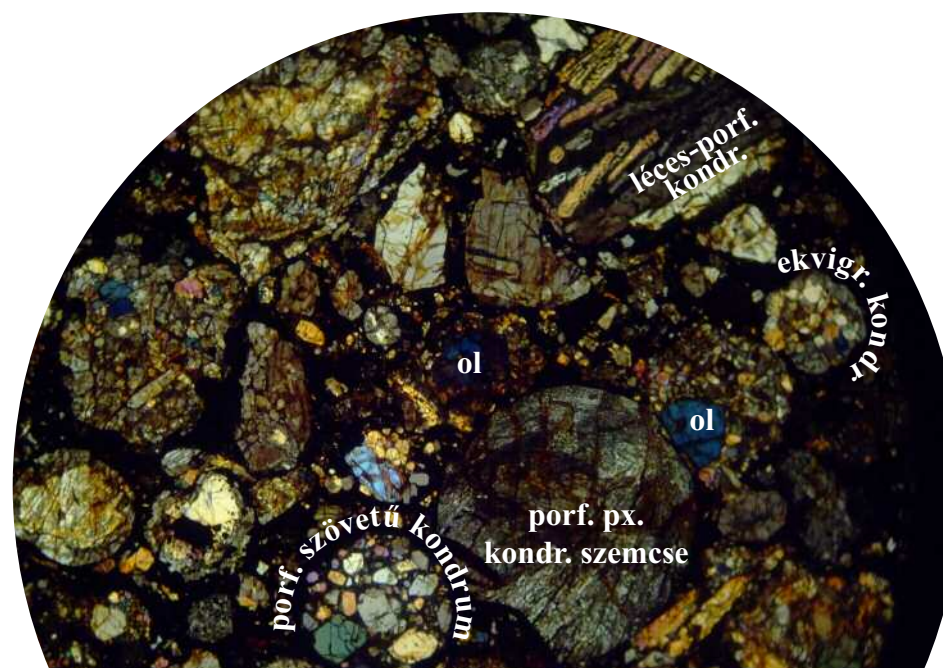
21. FOTÓ **L5 KONDRIT** [YAMATO 790957]

Porfiros, ektogranuláris és porfiroklasztos szövettípusú minta. Fő ásványai az olivin, a piroxén, az augit. Néhol a poikilitos szövettípus is fölfedezhető a mintában. Az opak ásvány tartalom igen jelentős.



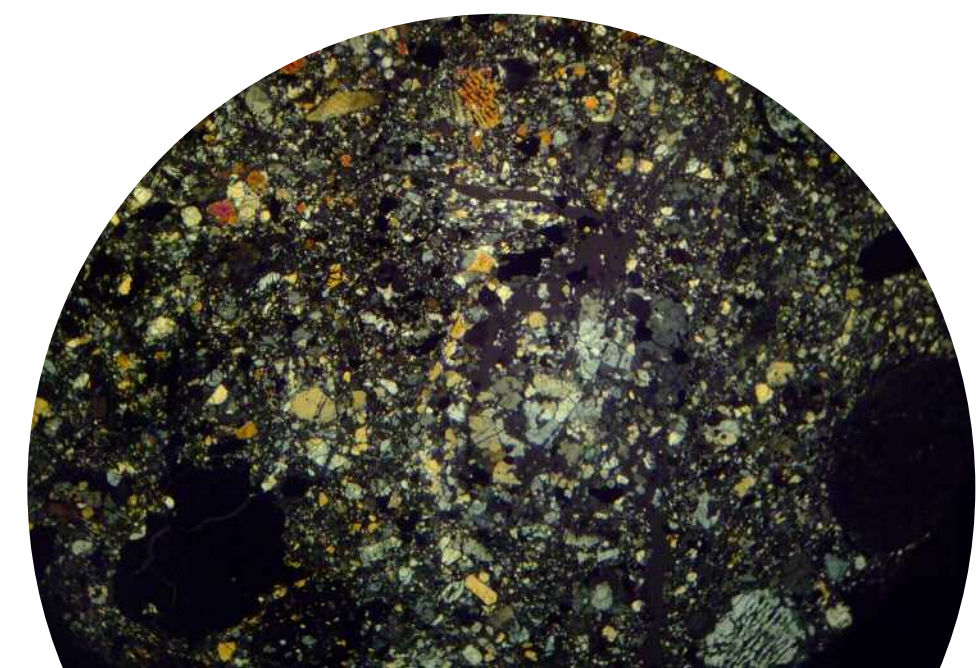
22. FOTÓ **L6 KONDRIT** [ALLAN HILLS 769]

A minta váltakozva tartalmaz porfiros, breccsás, ekvigranuláris, spinifexes szövetű tartományokat. A fő ásványai az olivin, a piroxén és az opak ásványok. Néhol az olivinre és plagioklász földpátra a léces megjelenés a koomatitokra jellemző spinifexes szöveti jelleggel (az olivin és a piroxének szabályosan felváltva jelennek meg).



23. FOTÓ **LL3 KONDRIT** [YAMATO 740448]

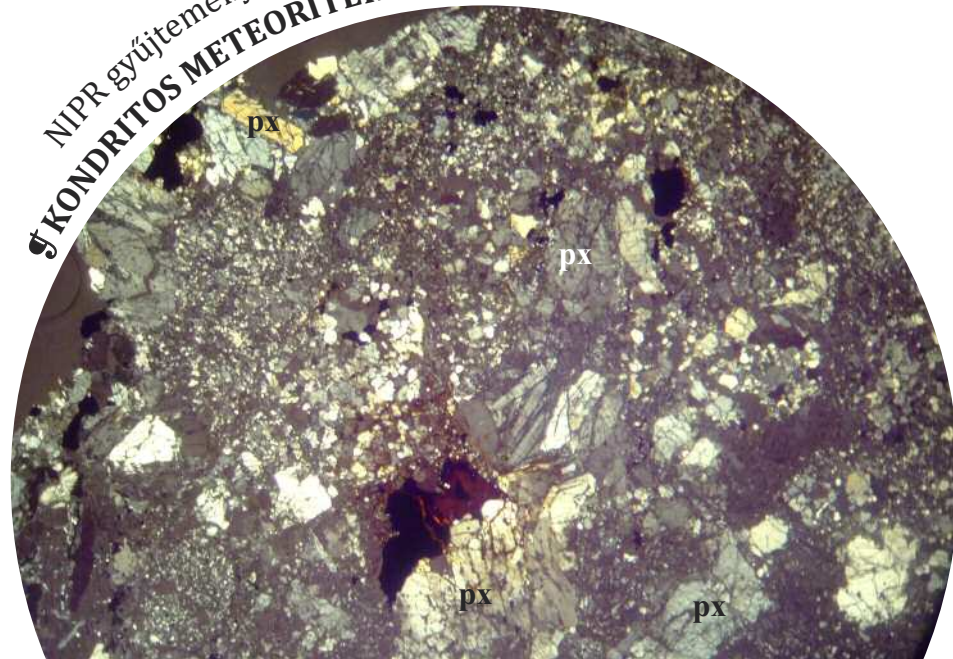
Kerekded és hosszúkás kondrumokat tartalmazó minta. A kondrumok anyaga főleg piroxén és olivin némi üveg tartalommal. A kondrumok porfiros, sugaras vagy léces megjelenésűek.



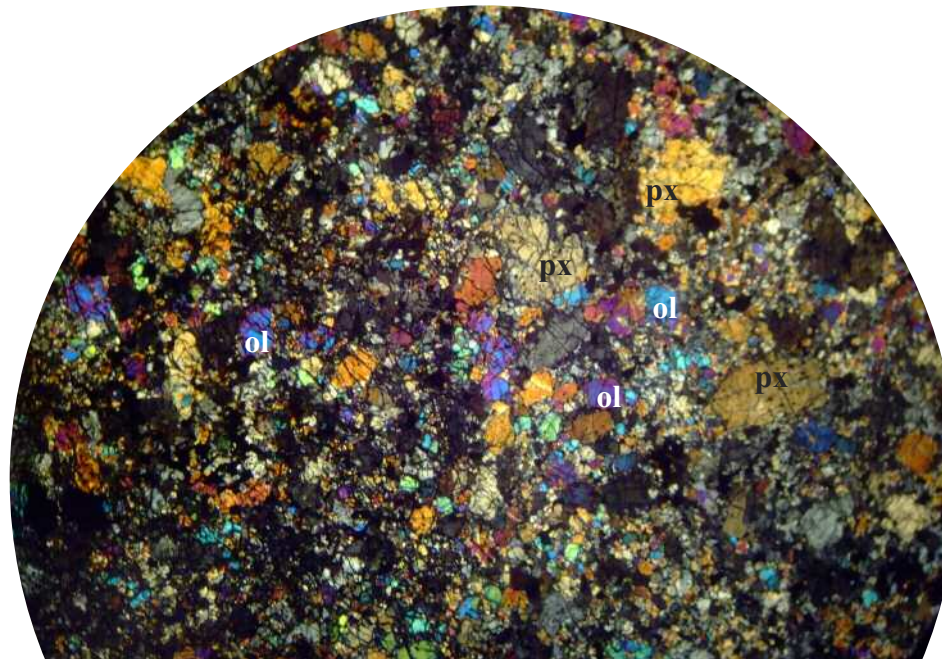
24. FOTÓ **LL4 KONDRIT** [YAMATO 74442]

Breccsás szövet porfiroklasztos piroxén kondrumokkal.

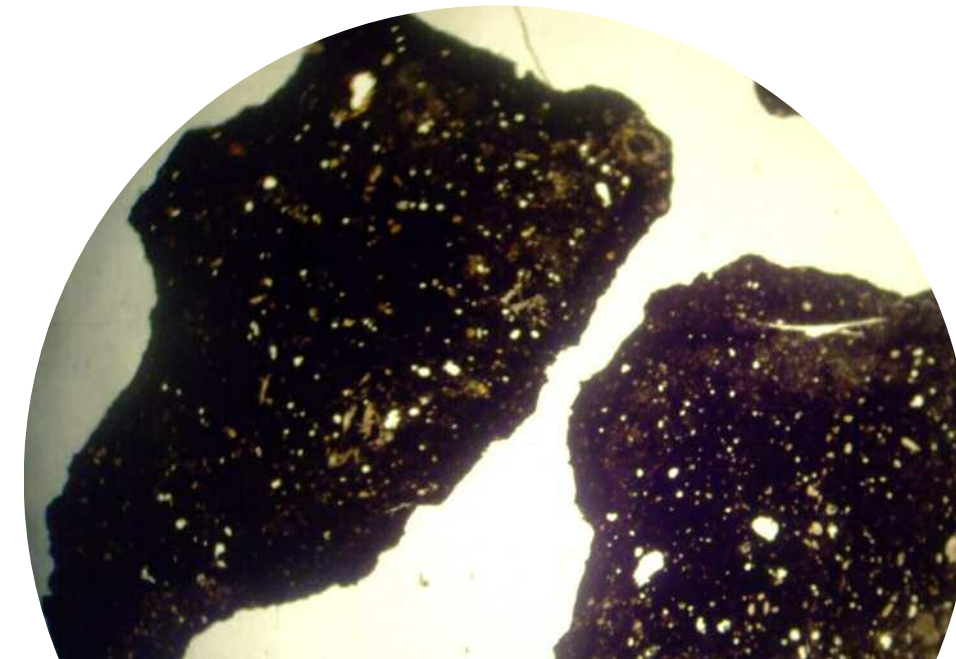
NIPR gyűjtemény
KONDRITOS METEORITEK



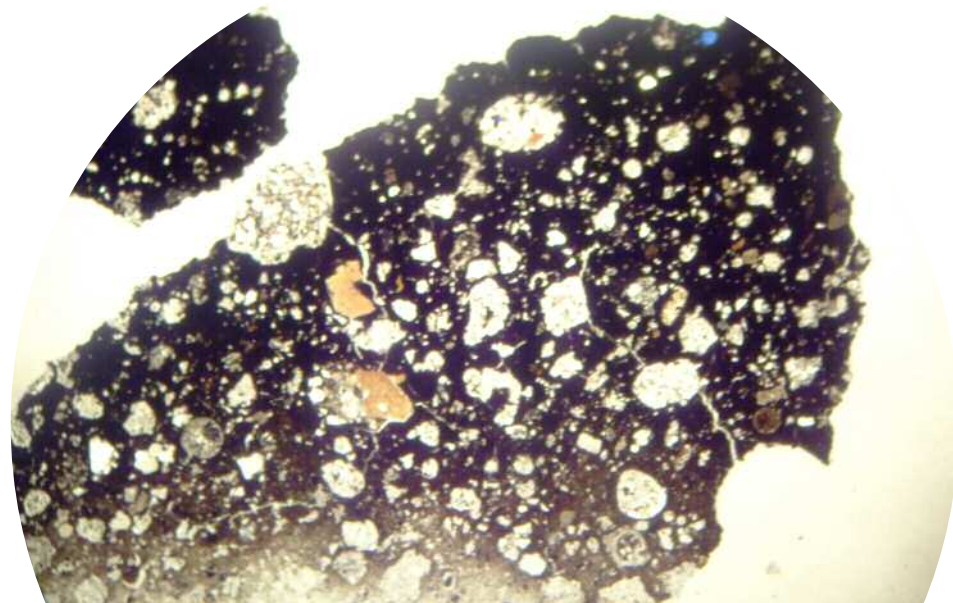
25. FOTÓ **LL5 KONDRIT** [ALLAN HILLS 78109]
Porfíros-porfiroklasztos szövetű minta. A mátrix megegyezik a porfíros elegyrészek anyagával, azaz a mátrixot is aprószemcsés piroxén alkotja (Px=piroxén klasztok).



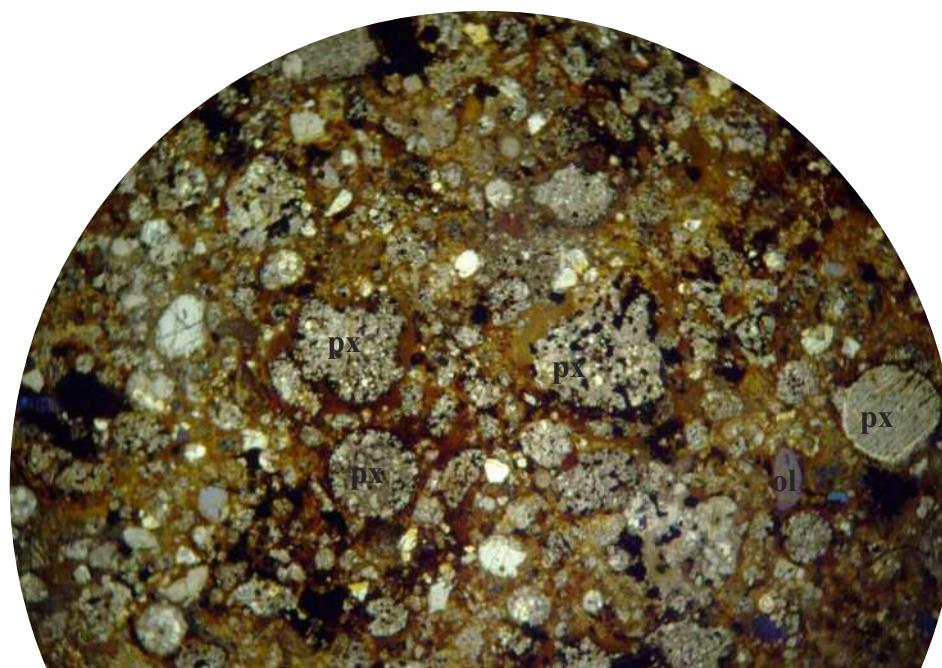
26. FOTÓ **LL6 KONDRIT** [YAMATO 75258]
Porfíros és ekvigranuláris szövettel jellemezhető minta, amely főleg olivin és piroxén tartalmú.



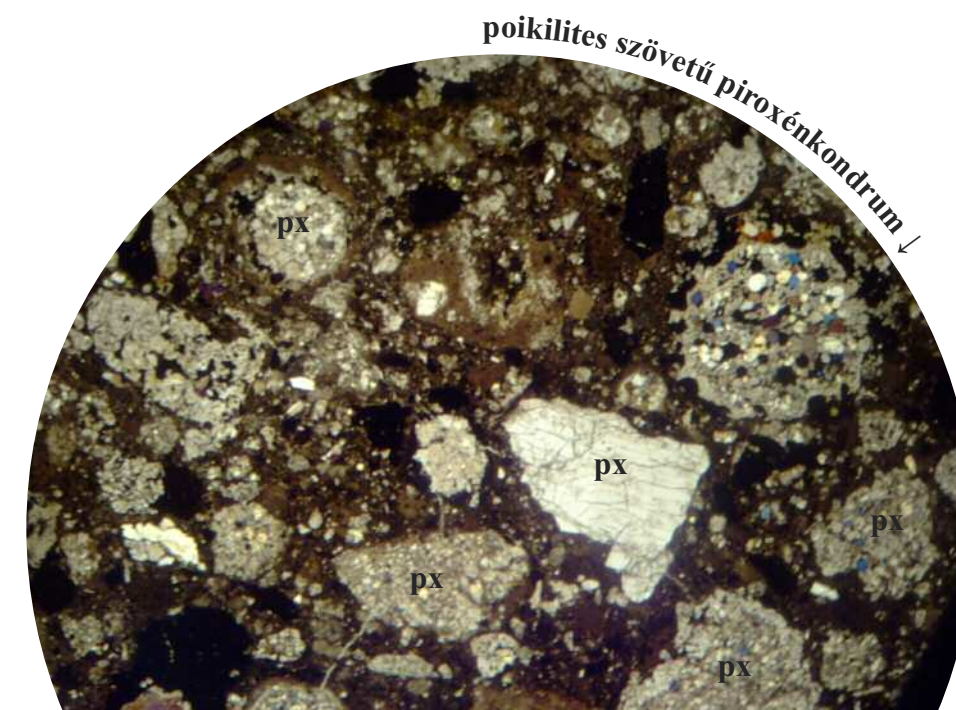
27. FOTÓ **CI SZENES KONDRIT** [YAMATO 82162]
Átlátszatlan anyagú minta, aprószemcsés, optikai mikroszkóppal csak kevéssé vizsgálható.



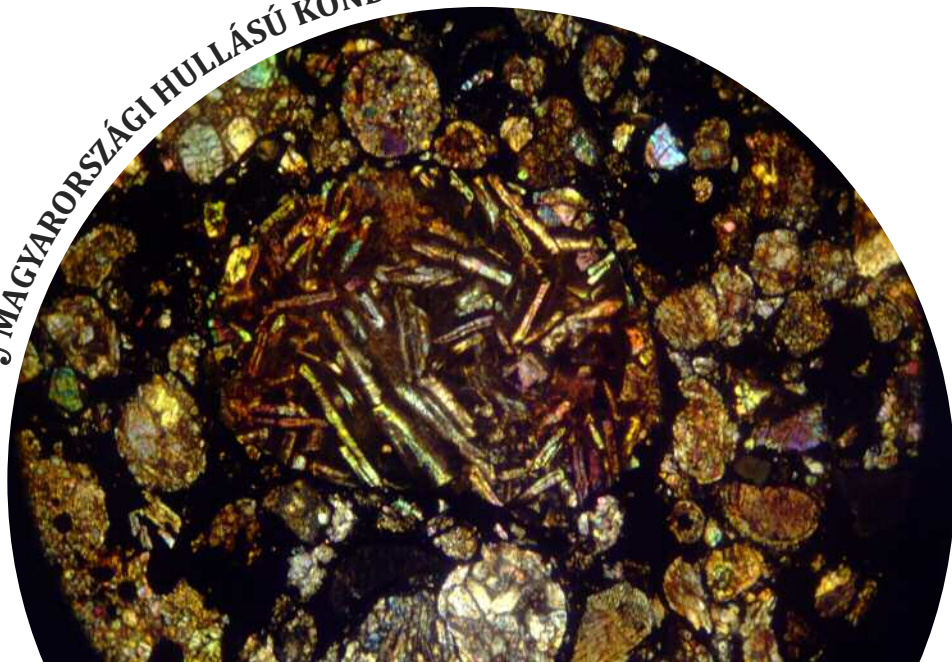
28. FOTÓ **CM2 SZENES KONDRIT** [YAMATO 74662]
Átlátszatlan alapanyagban kevert ásványos összetételű kondrumok figyelhetők meg. A kondrumok porfíros megjelenésűek, azonban a kondrumokon belül ekvigranuláris-granuláris szövet a jellemző. A kondrumok lehetnek plagioklász-olivin kevert ásványos összetételűek.



29. FOTÓ **CO3 SZENES KONDRIT** [YAMATO 791717]
Porfíros szövetű minta, jelentős piroxén és olivin tartalommal. Az apró szemcsés mátrixban megjelenő kondrumok éles pereműek. A barnás mátrix feltehetően a földi környezet hatására feloxidálódott Fe³⁺-ból áll, aminek a leggyakoribb ásványa a limonit.

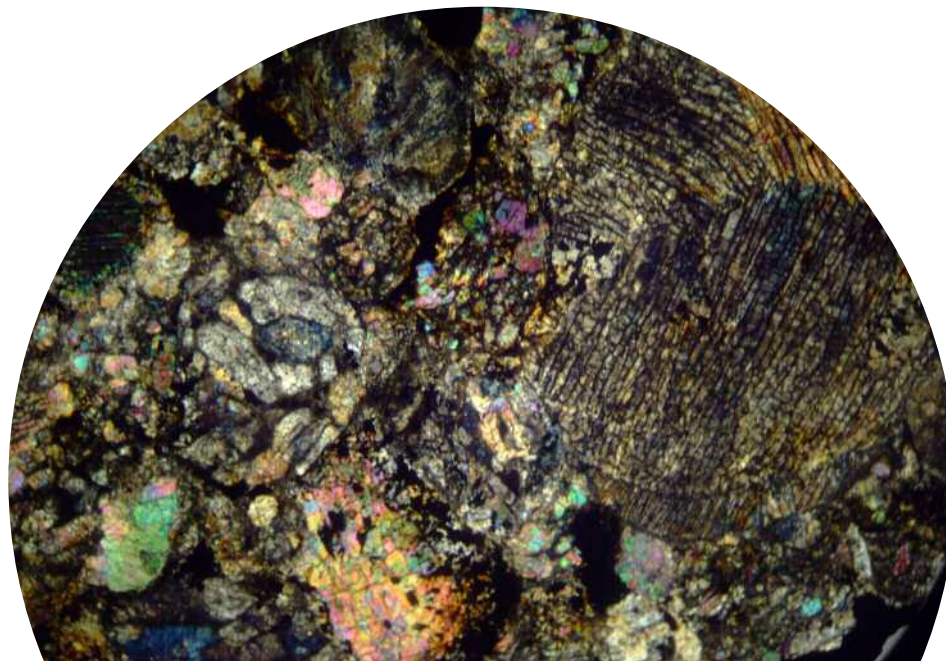


30. FOTÓ **CV3 SZENES KONDRIT** [YAMATO 86751]
Porfíros szövetű minta, melyben az apró szemcsés mátrixban megjelenő kondrumok éles pereműek, de nagyobbak a CO₃-belieknél és ezért kevesebb is van belőlük azonos területen. A sötétbarna mátrix feltehetően a földi környezet hatására feloxidálódott Fe³⁺-ból áll, aminek a leggyakoribb ásványa a limonit.



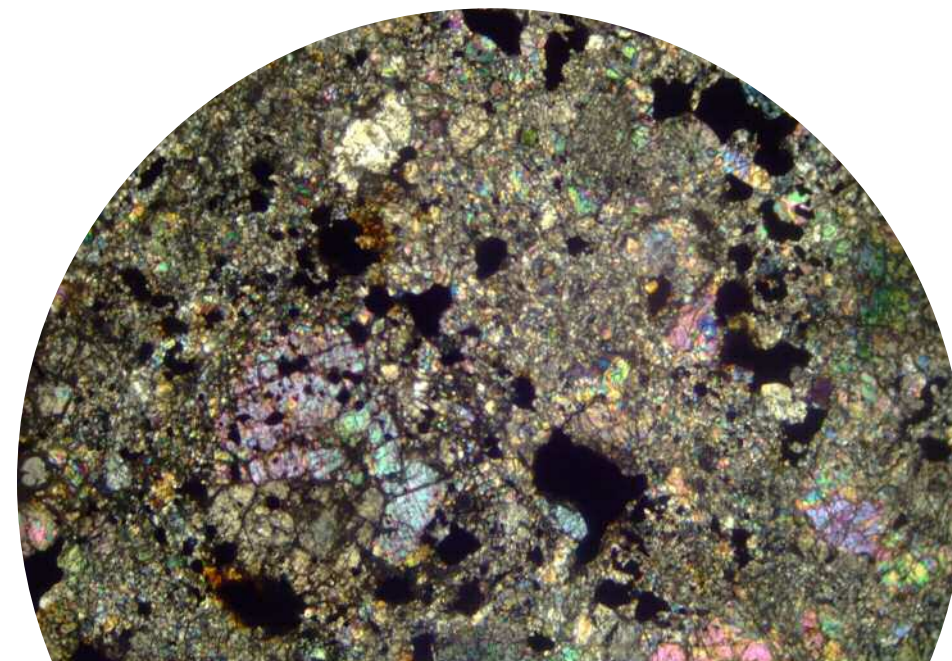
31. FOTÓ **MEZŐMADARAS**

L3 típusú kondritos szövet, melyet gazdagon építenek föl a kondrumos szemcsék. Nagyon gyenge metamorfózis érte a szülő égitesten, ezért szövetében a kondrumok éles pereműek.



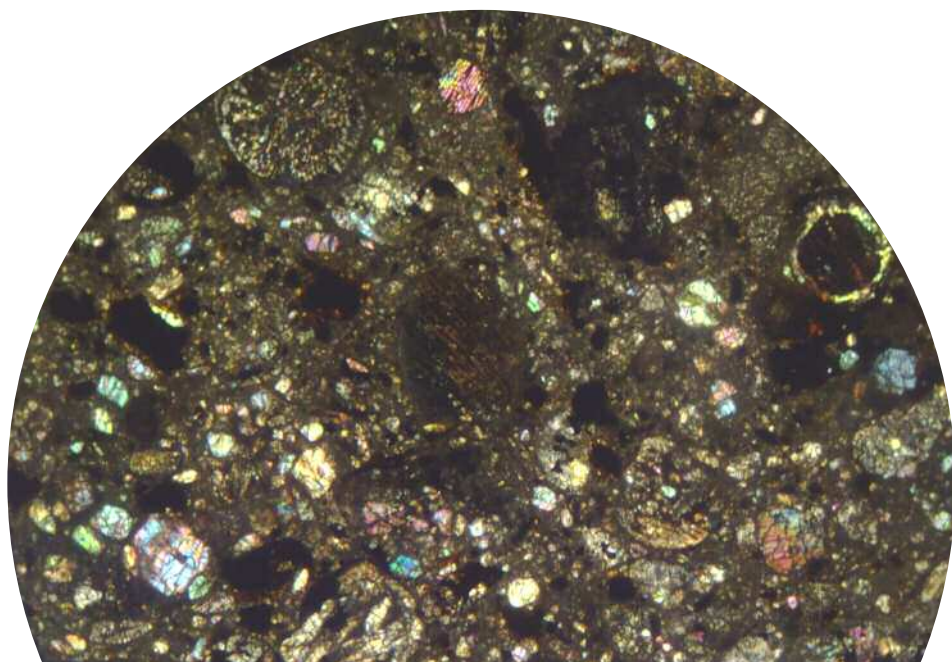
32. FOTÓ **KNYAHINYA**

L5 típusú kondritos meteorit, amely a kárpátaljai Knyahinya közelében hullott 1866-ban. Mivel a kőzettartomány erősen metamorf átalakulást szenvedett, a kondrumoszemcsék pereme már csak nagyon elmosódott. Mintegy 1000 darabra becsülik a hullás során földet ért törmelékek számát.



33. FOTÓ **MÓCS**

L6 típusú kondritos meteorit, amely az erdélyi Mezőségben hullott, 10 község határában. Mintegy 3000 darabra becsülik a hullás során földet ért törmelékek számát. A kőzettartományban már alighanem a kondrumok pereme, mert a metamorf átalakulás a kondrumokat fokozatosan átkristályosította. A kondritos meteoritok itt bemutatott sorozata érzékelteti a kis égitestnek azt a fejlődési szakaszát, amikor a radiatív fűtés miatti fölmelegedés során a diffúzió a kőzeteket átkristályosítja.



34. FOTÓ **NYÍRÁBRÁNY**

Szövege hasonló a Knyahinyáéhoz, mert a diffúzió már erősen elmosa a kondrumok peremét. LL5 típusú.



35. FOTÓ **KABA**

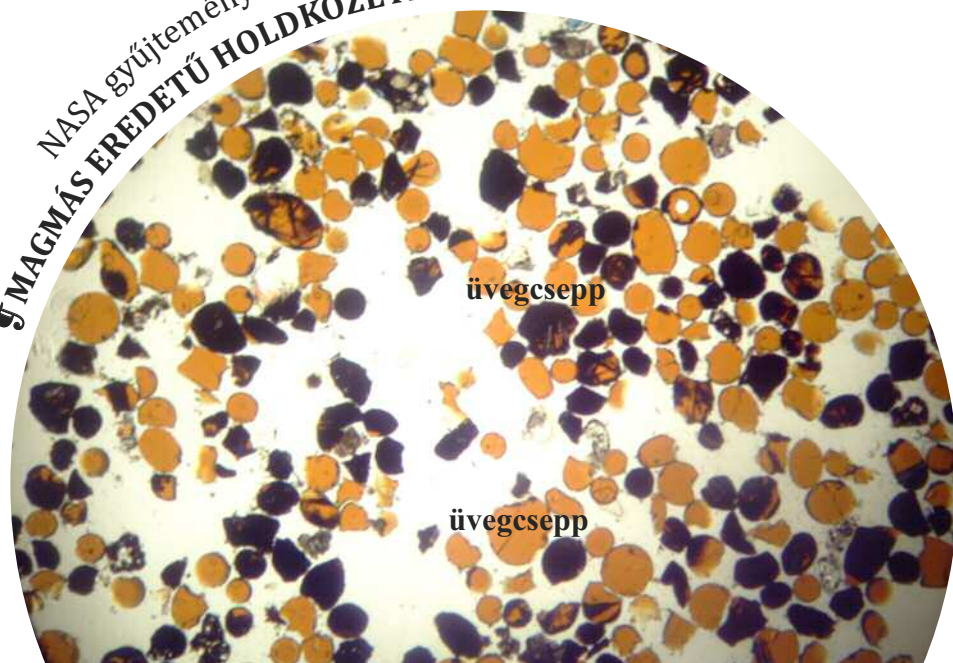
A kabai meteoritból készült vékonycsiszolat elektronmikroszkópos felvételén megfigyelhető, hogy a kondrumok kissé lapultak. Egy gyenge irányítottság is megfigyelhető a szöveten. Ezek arra utalnak, hogy a meteorit réteges szerkezetű, s talán egy gyenge ütés hatására kapott lamellás szerkezetet.. (B.SZ.) (Fotó: Gál-Sólymos Kamilla)



~ 1 cm

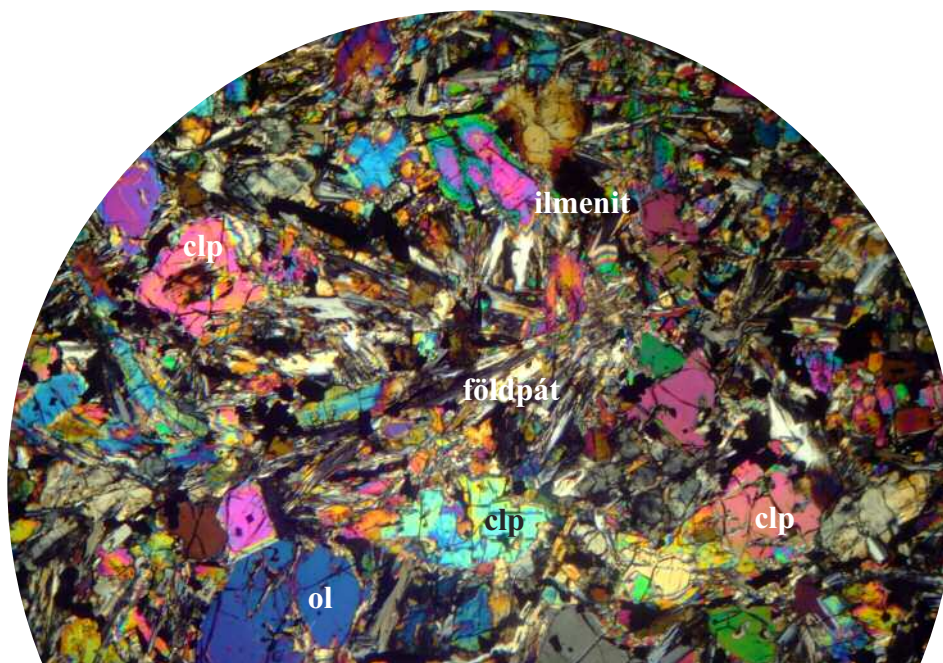
36. FOTÓ **KABA**

A kabai meteoritnak szép alakja van. Áramlási formákat őriz a felszínén. Hulláskor a meteorit külső része fölizzik, megolvad, és az olvadékréteg deformálódik. A test körül áramló levegő elmozdítja a felszíni rétegeket és egyes cseppeket le is sodor róla. A meteorit kúpos alakját is a légkörön való áthaladása során vette föl. A kabai meteoritnak egyik érdekessége az, hogy a felszínén is látható fehér ásványok (fehér zárványok, CAI-k) találhatóak benne. Ezek, Sztrókay Kálmán szerkezet-meghatározása alapján, főleg spinellből állnak. (B.SZ.) (Fotó: H.H. Debrecen)



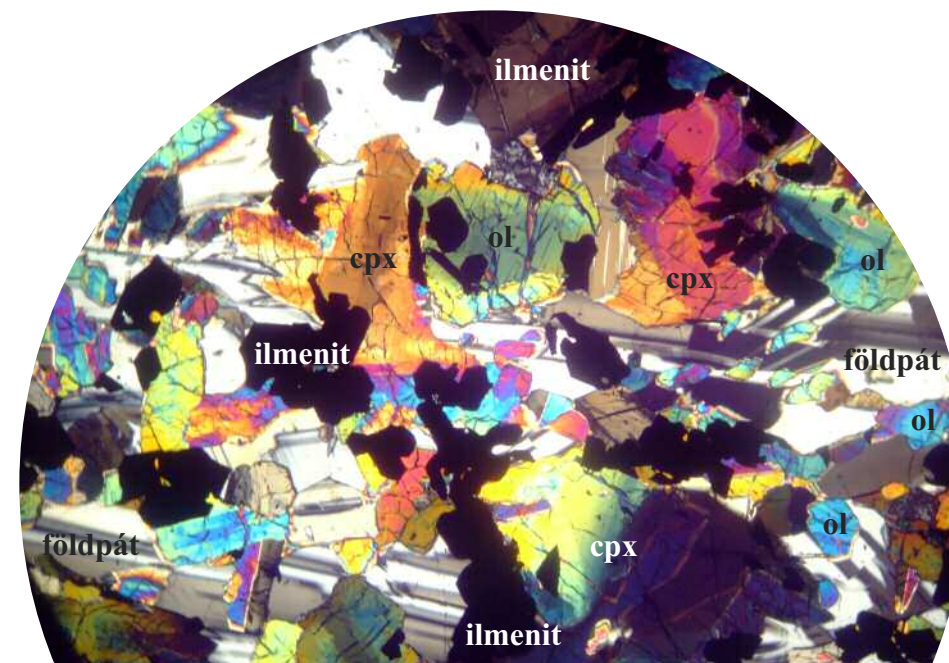
37. FOTÓ **74220 NARANCS TALAJ** [TAURUS-LITTROW]

Az Apollo-17 expedíció során gyűjtött talajminta. Ez az egyetlen olyan holdi minta, amelyet összegyűjtésekor színe alapján fedezett fel H. Schmitt. 50-100 µm nagyságú szemcsékből áll, melyek többsége narancssárga színű üvegcséppescke. A kutatók feltételezése szerint lávaszökőkút spriccelte a felszínre az olvadékot, amely a kitorési gázokban gyorsan gömböcskékévé dermedt. Összetétele pikrites (ultrabázisos bazalt).



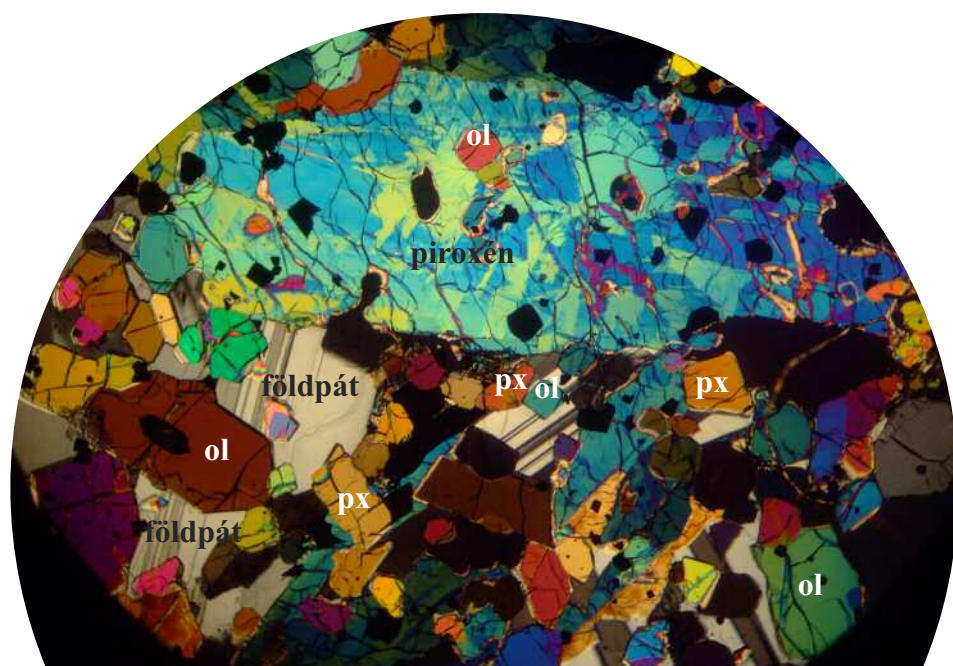
38. FOTÓ **12002 BAZALT** [VIHAROK ÓCEÁNJA]

Az Apollo-12 gyűjtötte ezt a viszonylag gyorsan lehűlt bazaltos kőzetet. A nagyméretű Mg ill Fe-dús klinopiroxén (clp) és olivin szemcséket tús kifejlődésű piroxén és földpátkristályok nyalábjai fogják közre. A minta egy 10 m-es holdi lávafolyás 2-3 m-es mélységéből származhat. A bemutatott bazaltmintákat mare területen gyűjtötték. Összetétele azonos a következő, 70017-es mintáéval.



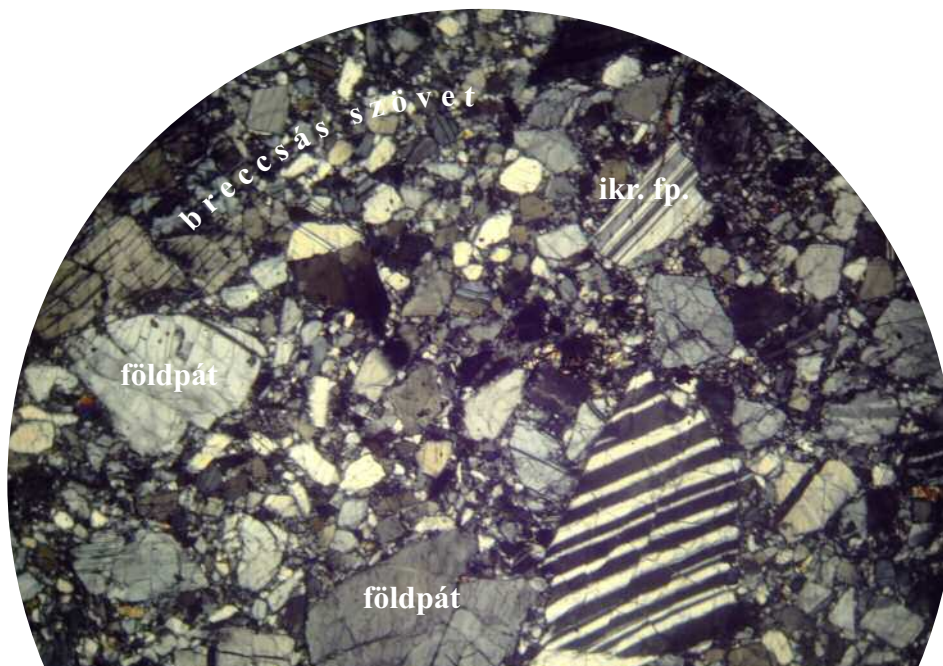
39. FOTÓ **70017 BAZALT** [TAURUS-LITTROW]

Az előző bazaltmintánál - a nagyobb szemcseméret alapján - kissé nagyobb mélységben kristályosodott bazalt, amelyben nagy mennyiségben találunk átlátszatlan (opak) ilmenitkristályszemcséket. Az élénk színű piroxének és az olivinek a hatalmas, ikresedett földpátkristályokba vannak beágyazva. A kristályosodás sorrendje: ilmenit, olivin, piroxén, földpát. A kép jobb alsó részén látható sárga és sötét klinopiroxén egy szemcse, melynek egyik része éppen kioltási helyzetben van, a másik pedig pedig interferencia színt mutat.



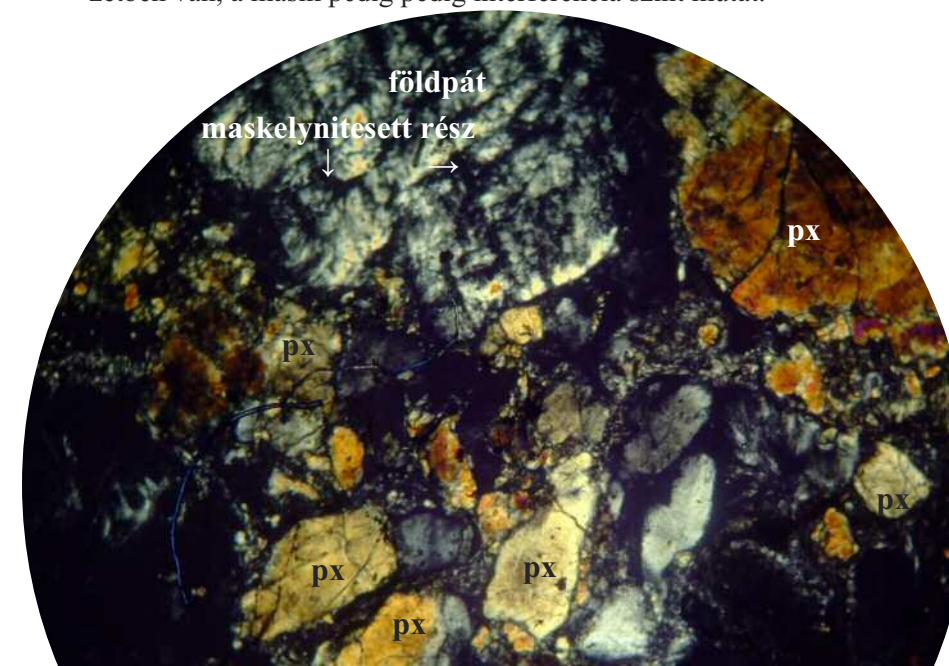
40. FOTÓ **12005 BAZALT** [VIHAROK ÓCEÁNJA]

Az előző bazaltoknál is nagyobb mélységből származó minta. A benne látható nagyobb szemcsék (kép: nagy, a változó színből láthatóan önmagában eltérő összetételű (Fe ill. Mg) piroxén fenokristály) körbezárják a korán kristályosodott kisebb szemcséket. Ezt a szövettípust nevezik poikilites szemcsének. A NASA-készlet négy bazaltmintáját a lehülési sebességük csökkenő sorrendjében elrendezve mutattuk be (74220: leggyorsabb; 12005: leglassabb). A földpátok a kiömlési kőzetekre jellemző Ca-dús albitok. A bal oldali, barnás olivin ellipszis alakú, jobb végében dipiramis forma látható. A jobb oldali zöld mintában látható a rájuk jellemző szabálytalan törérendszer (mivel nem tud hasadni, nincsenek benne kitüntetett irányok).



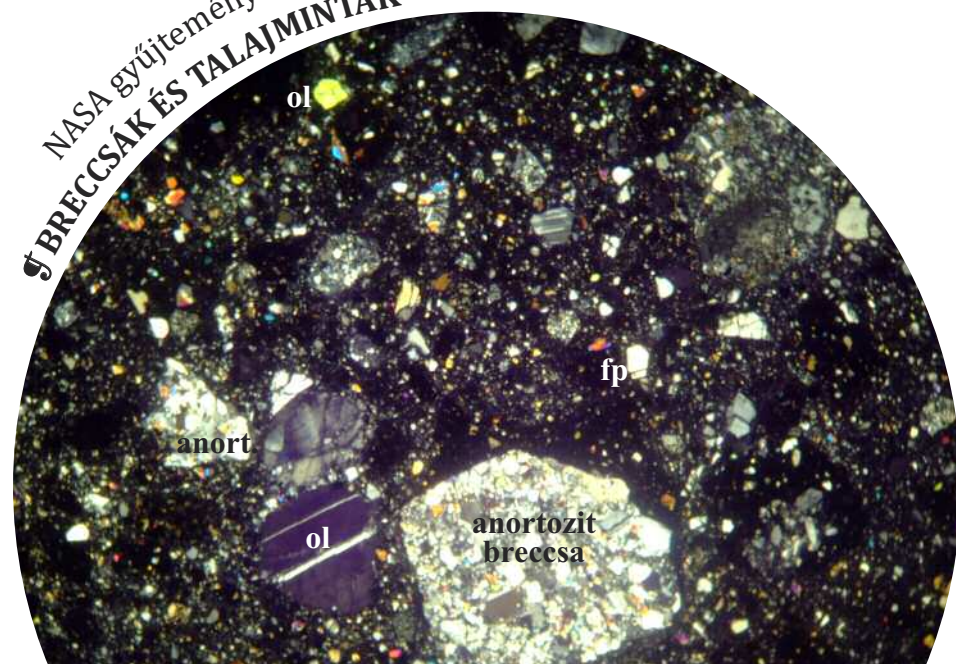
41. FOTÓ **60025 ANORTOZIT** [APOLLO-16]

A holdi felföldek anyaga az anortozit. Breccsás kőzetszövetet látunk, amelyet kicsi és nagy méretű törmelékcszemcsék alkotnak. Eredetileg ez a kőzet kumulátos (az olvadékból kiváló ásványszemcsékből felhalmozódott) szövetű anortozit lehetett, amelyet a becsapódások összetörtek. Jól megfigyelhetők a szemcséken az összetördelés okozta változások: ikresedés, hasadás, ásványtestek odébbcsúszása. Monomimerális kőzet, plagioklász földpátból (Na-dús anortit) áll.



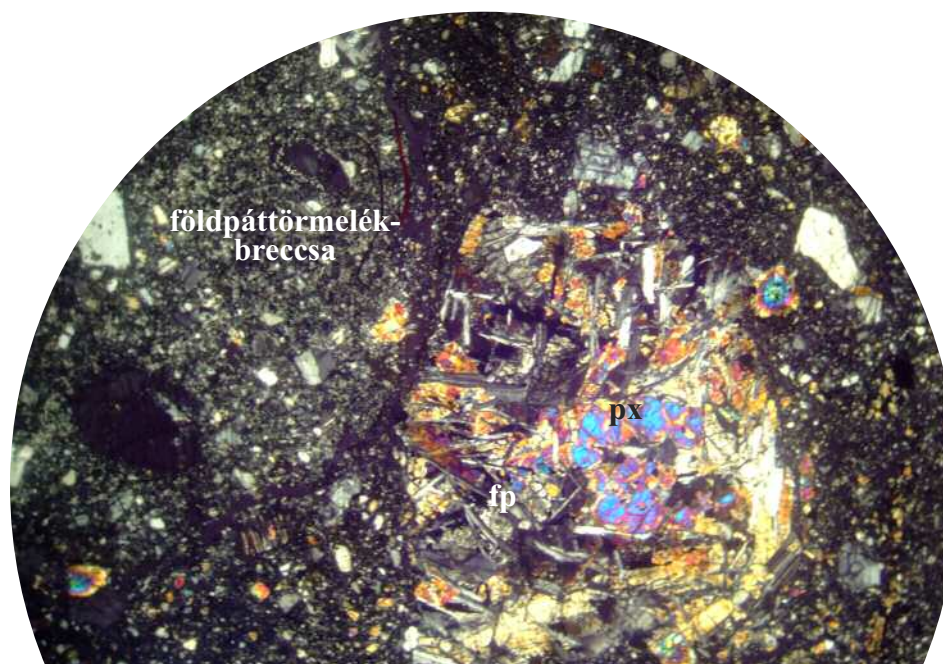
42. FOTÓ **78235 NORIT** [TAURUS-LITTROW]

Ultrabázisos kőzet a holdi felföldekről, melyet nagy méretű plagioklász földpát (anortit) és rombos piroxén szemcsék építenek föl. A plagioklász a becsapódás a lökéshullám feszültségét felfogó repedésekből kiindulva részben átalakította izotróp maskelynitte (az eredeti földpát szerkezet meg nem olvad, hanem amorfszerkezetet vesz fel). A piroxénben látható, sokkot jelző mozaikosodás (jobb oldali piroxén barnás és sárgás; a mikroszkópban a tárgylemez forgatásakor "csillogó" terület) területei. Itt a nagy ütés hatására kisebb domének (területek) más pozícióba fordultak el. Mind az anortozit, mind a norit a Földön nagy mélységben kristályosodik és ezért durvaszemcsés szövetű. A földi neveket összetételük és főbb szöveti jellemvonásaik alapján alkalmazzuk a holdkőzetekre.



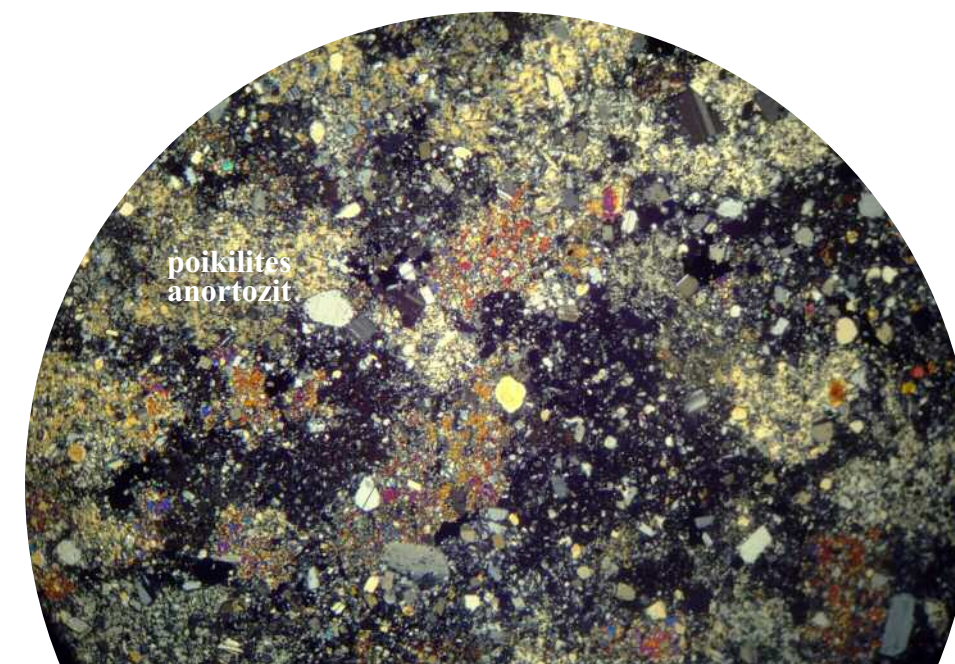
43. FOTÓ **72275 BRECCSA** [TAURUS-LITTROW]

A holdi breccsák különböző, a becsapódás során létrejött szögletes törmelékekből és holdtalajból összecementált közetek. Gyakran tartalmaznak nagy méretű kőzetszemcséket beágyazva. A képen látható egyik ilyen beágyazott szemcse anortozit: egy korábbi becsapódás breccsája. A becsapódások sokszor távoli vidékekről származó törmelégeket is összekevernek, ezért a breccsákból számos az Apolló-űrhajósok által meg nem látogatott helyről származó kőzetmintát is megismerhettünk.



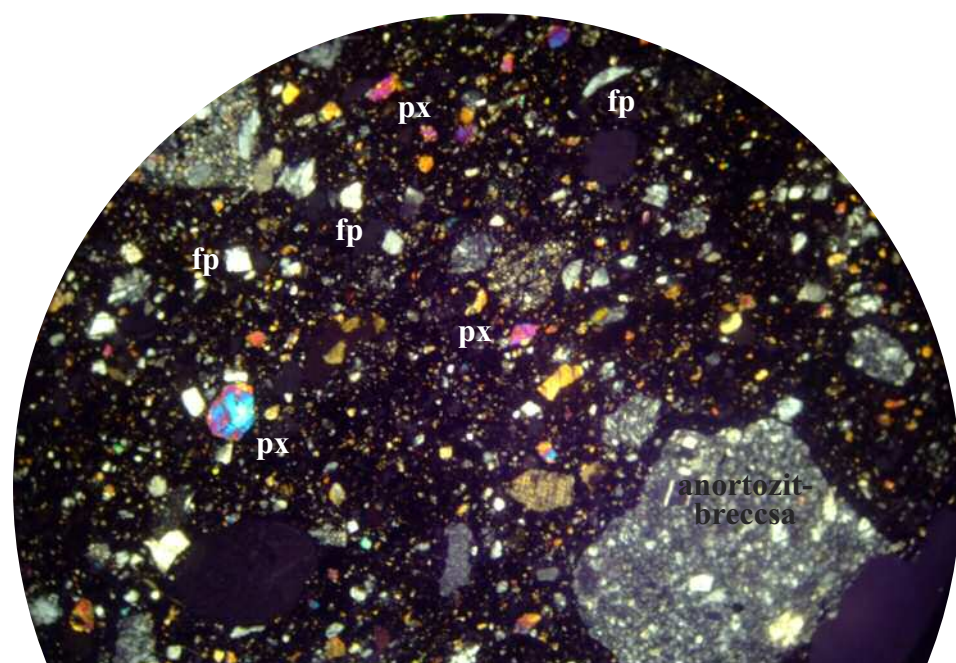
44. FOTÓ **14305 BRECCSA** [FRA MAURO KRÁTER]

Az Apollo-14 a holdi Imbrium-medence kidobott takaróján, a Fra Mauro Formáción szállt le. A felszínen található kőzettest az Imbrium-medence törmelékeit összekevert formában tartalmazza. Képünkön egy nagy méretű bazaltszilánkot figyelhetünk meg. Tük: földpát, kék: piroxén.



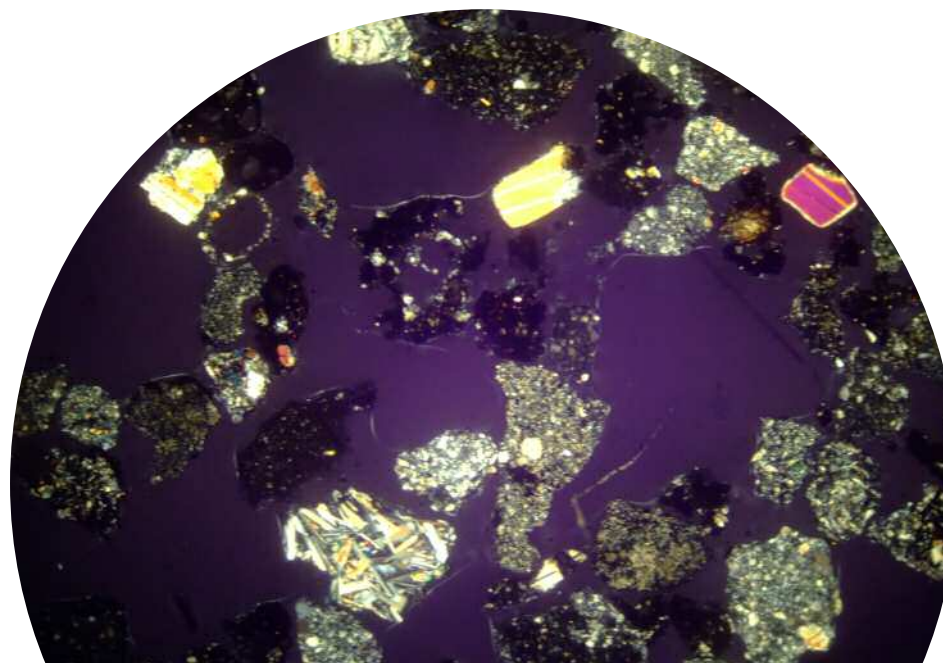
45. FOTÓ **65015 ANORTOZITBRECCSA**
[APOLLO-16]

Poikilites anortozitbreccsa, melyben a megömlött ásványszemcsékbe nagy számú kis méretű ásványszemcse van beágyazva ("felhős" szerkezet).



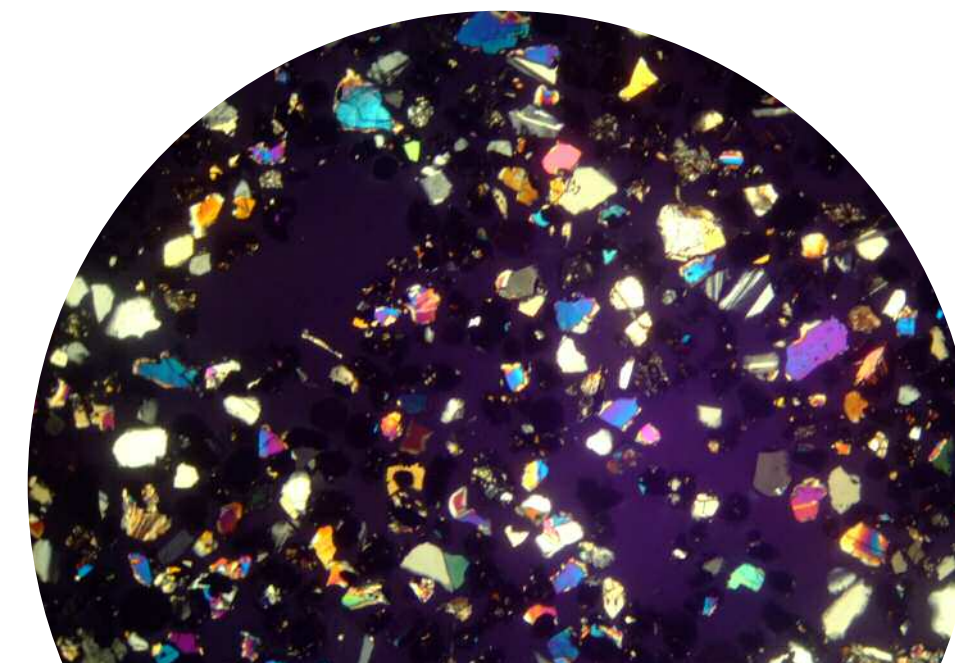
46. FOTÓ **15299 TALAJBRECCSA**
[HADLEY-VÖLGY]

Az Apollo-15 a holdi Appeninek előterében, a Mare Imbrium peremvidékén szállt le. A begyűjtött talajbreccsában ezért bazaltos törmelégeket (élénk interferenciaszínnel) és anortozitos (szürke) szilánkokat is találunk.



47. FOTÓ **68501 SZITÁLT TALAJMINTA**

(Apollo-16) A talajminta szitált frakciója itt is 100 mikronos kőzetszilánkokat tartalmaz. Ezek között nagy számban találunk anortozitosakat, mert a leszállási hely felföldi volt. Előfordulnak azonban bazaltos szilánkok is, mint ahogy a képen közepén lent látható tús földpátmintán láthatjuk.



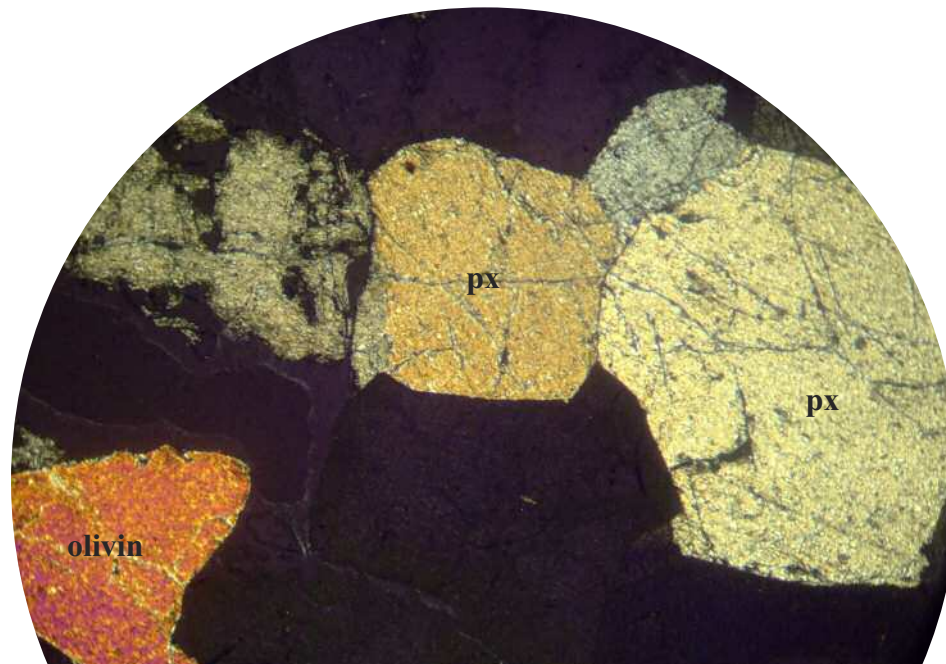
48. FOTÓ **70181 SZITÁLT TALAJMINTA**
[TAURUS-LITTROW]

Holdi összetördelt bazalt képezi ennek a talajmintának az anyagát. Élénk interferenciaszínű piroxének és olivinek ill. szürkés-fehéres földpátszemcsék alkotják. A képen nem látható, de előfordul e talajban néhány narancs szemcse is; ezt a talajt tehát kis távolságra találták a narancs talajtól.



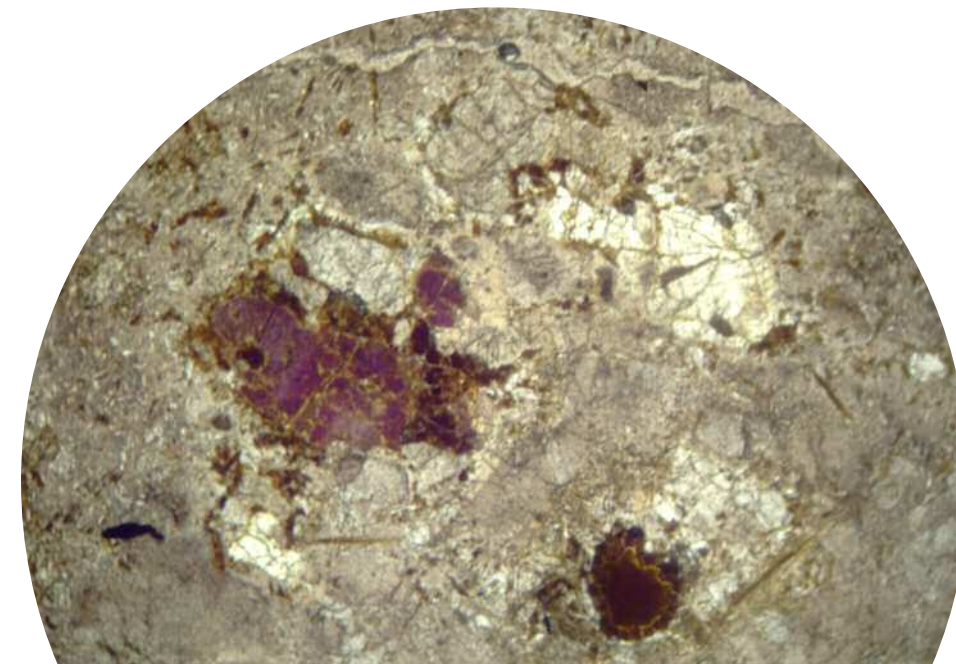
49. FOTÓ **KOMATIIT** [KANADA, ABITIBI BELT]

A komatiit a földtörténeti óidőben a felszínre ömlött higan folyós, ultrabázisos, igen forró magmából keletkezett. Nagy a Mg-tartalma, jellegzetessége a spinifexes szövet, amely nevet (*spinifex*) az ausztráliai hosszúszerű fűvekről kapta: a klasszikus komatiit-szövetet ilyen, hosszú olivinásvényszemcsék építik föl, egyenes síkban rendeződve, közöttük itt piroxének és más, opak ásványok foglalnak helyet. A fotón látható spinifexes szövet hűen reprezentálja a komatiitra jellemző megjelenést, azonban az eredeti ásványok már nem figyelhetők meg a mintában, mivel a kőzet másodlagos átalakulást szenvedett.



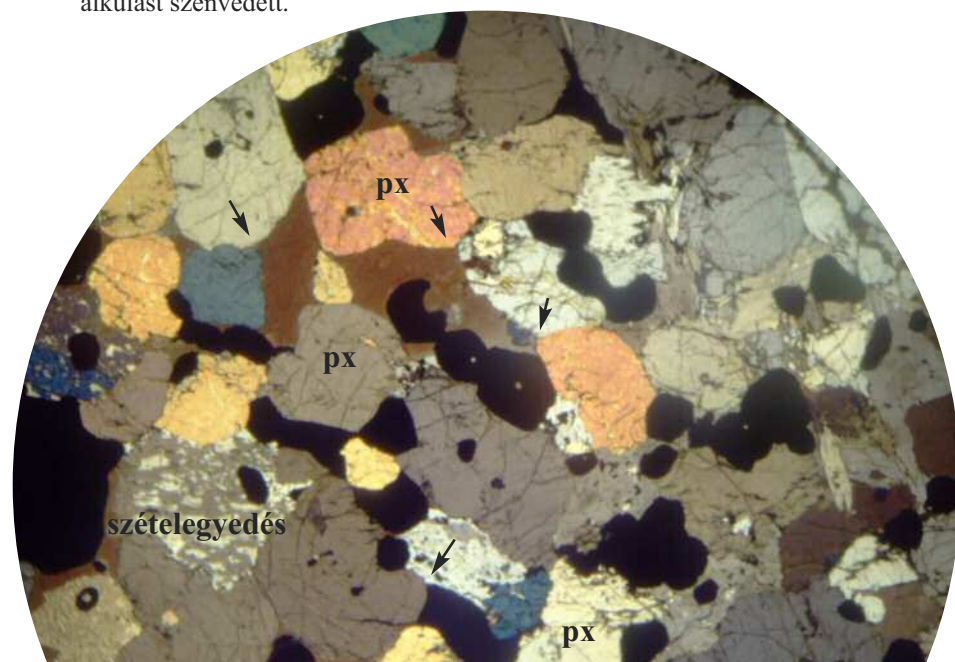
50. FOTÓ **LHERZOLIT** [SZENTBÉKKÁLLA]

A lherzolit a peridotit egyik változata; ultrabázisos kőzet. A Föld felső köpenyére jellemző. A szentbékállai lherzolitokat a bazaltmagma vagy a bazalttufa hozta föl nagy mélységből. Négyféle ásványból áll: olivin, rombos és monoklin piroxénből és spinellből. Nagy mélységben kristályosodott, durvaszemcsés kőzetszövetet alkotnak.



51. FOTÓ **KRÁTERBRECCSA** [MIEN RAMSÖ]

A dél-svédországi Mien meteoritkráter központi csúcsából származó minta, amely riolitos olvadékból és beágyazott kőzet-szemcsékből áll. A becsapódás gránitba történt, ezért a megolvadt kőzet riolitos. A központi csúcsban felszínre tört a megolvadt riolitos réteg.



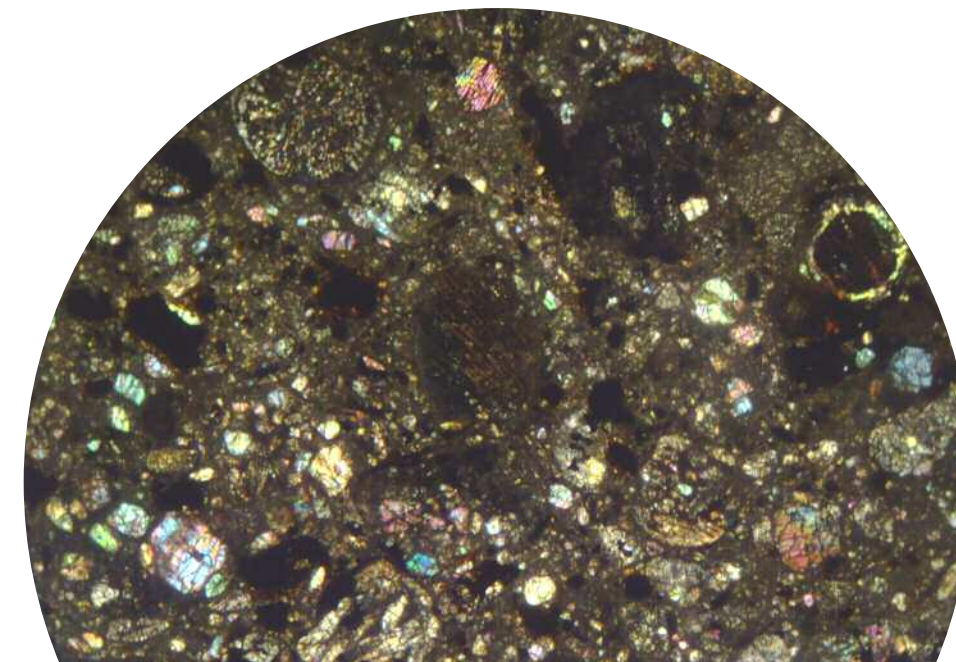
52. FOTÓ **ULTRABÁZIT (PIROXENIT)** [SZARVASKŐ]

Ekvigranuláris szövetű kőzettípus, hosszúkas piroxénszemcsék figyelhetők meg a csiszolat teljes felületén, némely esetben a Mg ill. Fe-dús komponensek szételegyedése jelensége is megfigyelhető. A csiszolat opakásvány-tartalma jelentős. A hatszögű opakásványok a magnetitek. A szemcsehatárok három éllel kapcsolódhatnak egymáshoz ("Mercedes-jel" alakban) (*nyilak*), ami arra utal, hogy a kristályosodás egyensúlyi állapotban történt.



53. FOTÓ **BAZALT** [SZILVÁSKŐ]

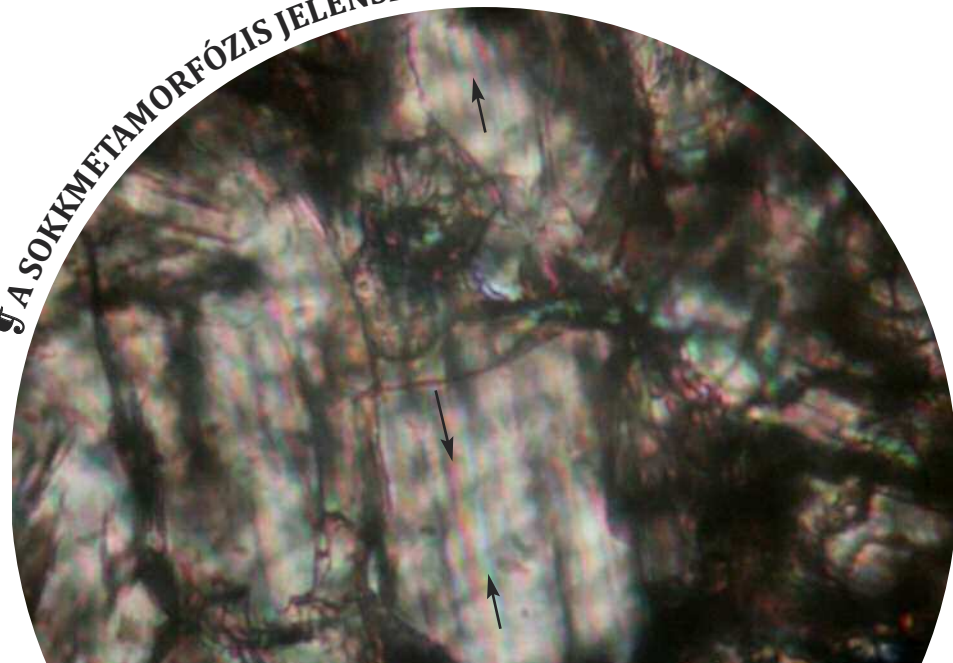
A kőzet porfiros szövetű, a nagy oikokristályok a csiszolat középpontjában plagioklászföldpátok. Ezeken kívül még rengeteg kis, hosszanti irányban megnyúlt plagioklászföldpát figyelhető meg a mátrix anyagban is. A fotó alján piroxénszemcse látható. A szövetben rendezettség figyelhető meg (*lásd nyilak!*), folyásirány jellegű lefutással a hosszanti plagioklászszenecskék elhelyezkedésében.



54. FOTÓ **PIKRIT** [HAWAII]

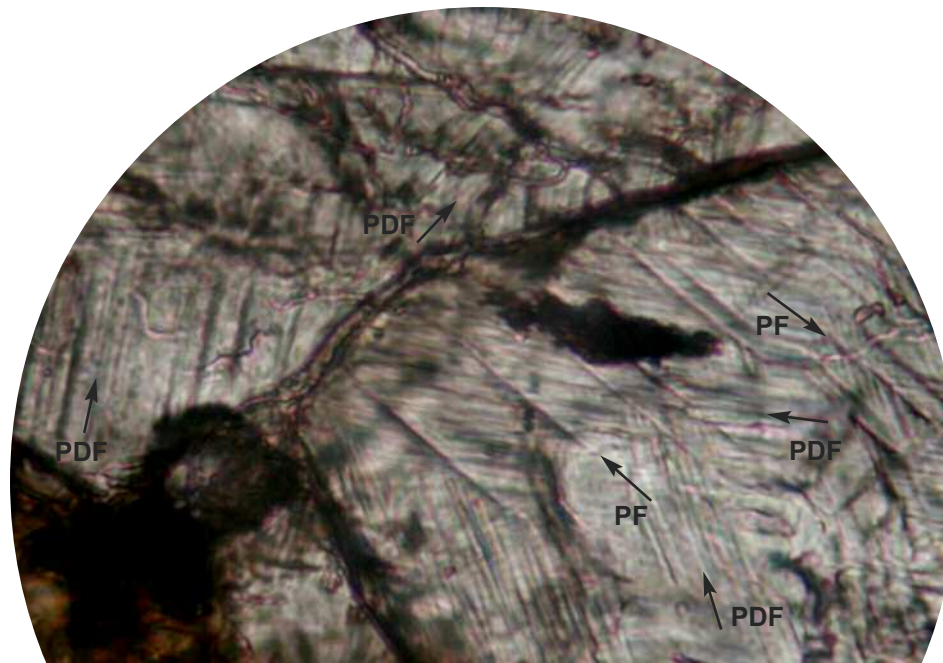
A szövet mikrogranuláris-porfiros. A bal alsó sarokban levő és a nagy rózsaszín szemcse olivin. A zöld ásvány talán zöld amfibol, a jobb felső sarokban pedig augit. Az alpanyagot ugyanezek az ásványok töltik ki. A nagy szemcséket fenokristályoknak nevezzük. A pikrit magas magnéziumtartalmú olivint tartalmazó bazalt. Másik neve oceanit. Tholeiites típusú bazaltokból származik, a pikrit és a komatiit hasonló kémiai kőzettípusok, de a komatiit nagyobb mennyiségű magnéziumdús olvadékot tartalmaz, mint a pikrit, ill. spinifex szövetű a komatiit. Az ásványok szélein reakciószegély látszódik, a vizes behatás következménye. A minta a Mauna Loa bazaltjából való (Hawaii). (NSz)

A SOKKMETAMORFÓZIS JELENSÉGEI



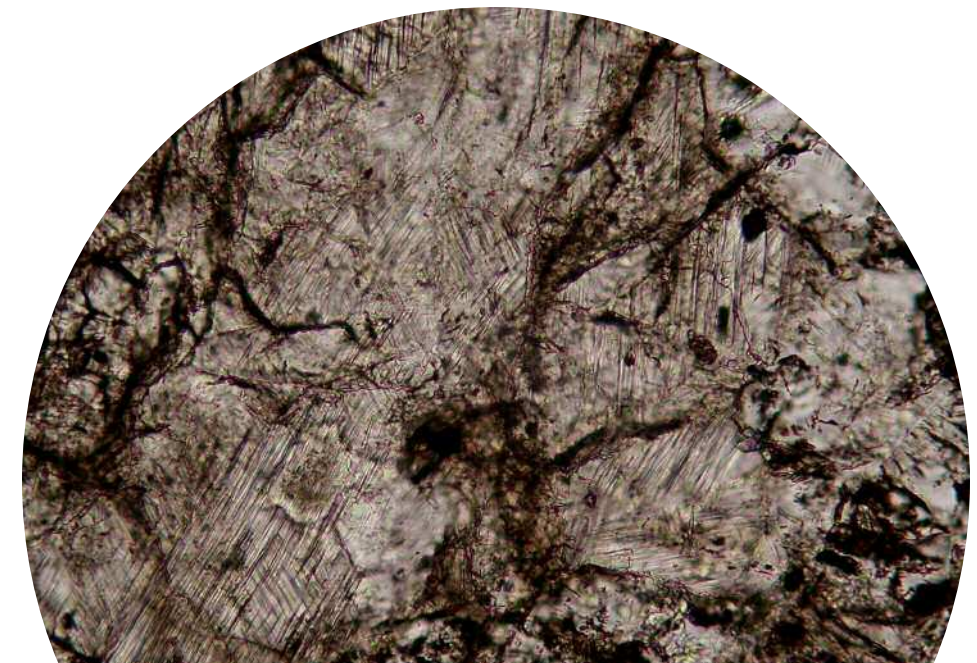
55. FOTÓ **TITANIT** [SUEVIT; RIES-KRÁTER, NÉMETORSZÁG] +N

Poliszintetikus ikresedés jelensége titanitban, mely nagyon ritka (a titanit a természetben nem képes ikresedésre). Ezek az ikrek tehát nem genetikailag jöttek létre, hanem a sokk nyomás mechanikai hatására. Az ikreket az optikailag kissé eltérő síkok adják ki optikai diszkontinuitásként. Az ikrek az egyenesként megjelenő pirosas, zöldes vagy sötét sávok, melyek két ikerlemez közös lapjai (az a sík, ahol az összenövés megtörtént). A jelenség titanitban 15-20 GPa fölött jelentkezik. A Sedan nukleáris kráterben (Nevada Test Site) írták le először.



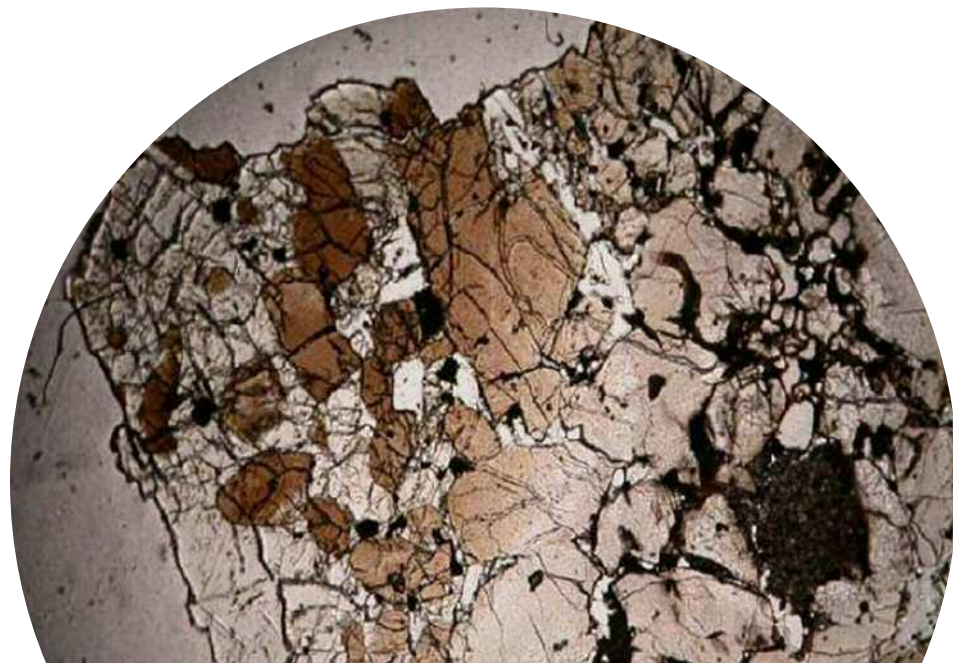
56. FOTÓ **KVARC** [SUEVIT; RIES-KRÁTER, NÉMETORSZÁG] N

A kvarcban megfigyelhető a lemezes deformációs jelenség (PDF, planar deformation features). Ehhez 10-20 GPa közötti sokknyomás szükséges. A bemutatott képen a PDF lemezek négyféle irányultságúak (4 köteg). A PDF-eken kívül lemezes törések (PF, planar fractures) is megfigyelhetők a képen. A PDF-ek és PF-ek repedéshatárokat vagy szemcsehatárokat nem keresztezhetnek. A PDF-ek PF-eket sem kereszteznek. Ez azt mutatja, hogy a jelenség szerkezetfüggő. Az ábrán megfigyelhető jelenségek közel hidrosztatikai nyomás szinten jönnek létre (az xyz tengely felől is közel egyenlő mértékű nyomáson); ellentétben a kvarc bázislapjával párhuzamosan kifejlődő PDF-ekkel, melyek nyírás (és nem nyomás) következtében jönnek létre.



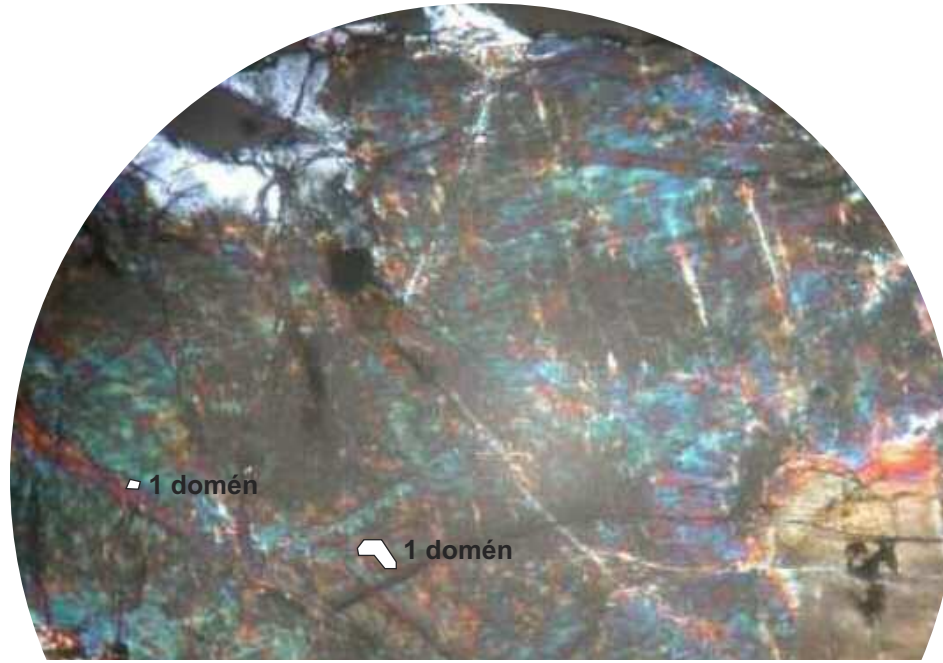
57. FOTÓ **KVARC** [SUEVIT; RIES-KRÁTER, NÉMETORSZÁG] N

Ötféle irányultságú PDF-rendszer. PF-ek alig találhatóak. Ha több PDF kifejlődési irány (több PDF-köteg) figyelhető meg, akkor előfordulhat, hogy két PDF-köteg hegyes szögben keresztezheti egymást, mely a kvarc kristályrendszeréből következik, azaz szerkezetfüggő tulajdonság (pl. a képen a bal alsó sarokban). A keletkezési mechanizmus alapján először a PF-ek alakulnak ki, majd a PDF-lemezek. A PF-ek jönnek létre előbb, mert kevesebb energia kell a törések létrehozásukhoz, utána a PDF-ek, melyek a sokk hullám közegbeni lecsengési (relaxációs) időtartama (0,2-1 sec) alatt alakulnak ki. A PDF-ek a kvarc szerkezetében levő gyöngeségi zónák stabilizálására is szolgáló képződmények. A rövid idő alatt nem alakulhat ki egyensúlyi állapot, ezért nem jön létre stishovit, hanem csak azon síkok mentén alakulnak ki ilyen amorf lamellák, melyek a szerkezet „túléléséhez” járulnak hozzá (50 GPa fölött már szétesik a szerkezet és amorfként megjelenő „diaplektikus üveg” alakul ki).



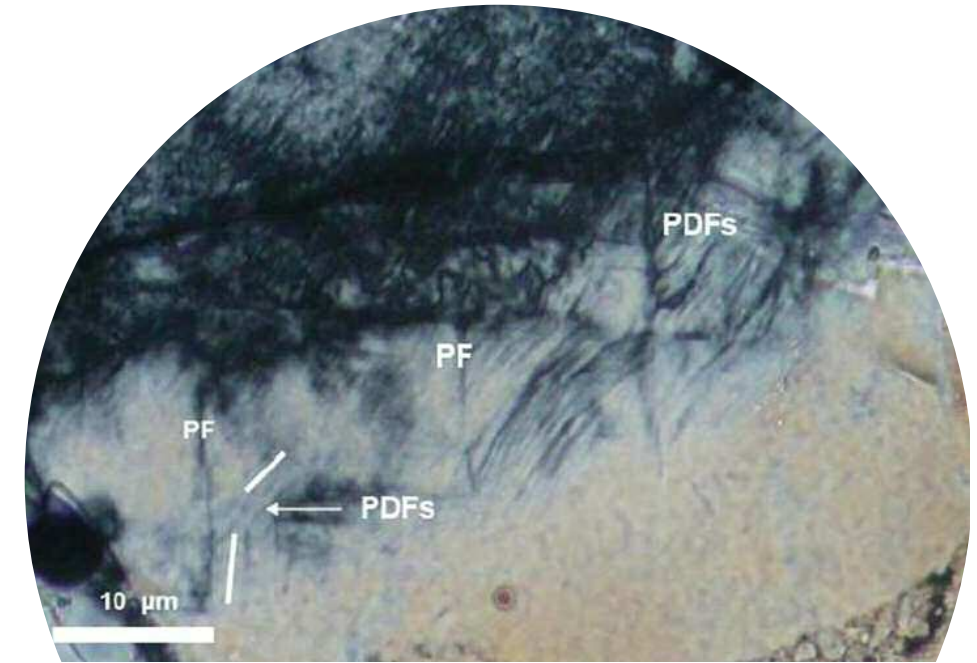
58. FOTÓ **SHERGOTTIT** [ALLAN HILLS 77005] N; 100x

(lásd még az 59. fotót) Az olivinnek olvadékszemek (*melt pockets*) közelében jelentkező kihéredése (*thermal annealing*) jól látható, amely vas veszteségre utal. Az itt látható, 4,5 tömegszázalék teljes vastartalmú (*total Fe*) olivinnek szokatlan módon barna alapszínűek, ami arra utal, hogy ez a vas nem a szerkezetben, kötött formában, hanem diffúziós formában jelentkezik. (De a nem barna olivinben is található vas.) A diffúziós forma bizonyíték a pleokroizmus hiánya (mely csak 1 nikolos képen jelenik meg: az ásvány különböző kristálytani irányokban jelentkező színváltozását jelenti: itt tehát a barna szín minden kristálytani irányban azonos (a szín intenzitása változik, de színe nem)). (Lásd még a hasonló tulajdonságú zöld- és barna amfibolokat).



59. FOTÓ **SHERGOTTIT** [ALLAN HILLS 77005] +N; 400x

A képen az olivinben előforduló mozaikosság látható, mely közepes szintű sokk esetén jelentkezik (20-40 GPa). A mozaikosság jelensége a sokkhatás következtében létrejött doménképződés jellegzetes példája. Ebben a jelenségben a sokkhatás következtében az eredeti olivinszemcse szétesésének következményeként eltérő kioltási irányú felületek alakulnak ki (a mikroszkópi metszet síkfelületén nézve), amelyek a mindenkori optikai főtengelyhez viszonyítva 0-5°-os rotációval oltanak ki. Az egyes domének véletlenszerűen eltérő rotációval oltanak ki, így a mikroszkópi tárgyasztal forgatásakor kalidoszkópszerű színjátékokat keltenek.



60. FOTÓ **SHERGOTTIT** [ALLAN HILLS 77005] +N; 400x

A fotón egy olivinszemcseben egy átmeneti zóna figyelhető meg a halvány narancsos színű terület és a sötét terület közötti PDF-ekkel és PF-ekkel tarkított zónában. A kép felső, sötét területe termikus felfűtődés eredménye, a kép alsó harmada a csökkent interferenciaszínű olivin képét mutatja. (Ez a csiszolat vastagsága miatt nem kék, hanem sárgás). Az átmeneti zónában a legalacsonyabb interferencia-szín figyelhető meg, ami a sokknyomás következtében az olivinszerkezet kezdődő átalakulásának a következménye. A fotón látható PDF-ek kissé görbült lefutásúak, ami az olivinre jellemző. A felfűtődött felső harmadban eredetileg szintén megtalálhatóak voltak a PDF-ek, azonban ezt az utólagos termikus felfűtődés eltörölte.

HOLDI FEJLŐDÉSTÖRTÉNÉT A HOLDRÓL GYÚJTOTT KÖZETMINTÁK ALAPJÁN

A földtudományok első lépései a Hold felszínének föltérképezésében

A Naprendszer anyagait bemutató első fejezetben a kis égitestek anyagát vizsgáltuk és a kondritos kisbolygó fejlődéstörténetét tekintettük át. A mostani fejezetben a holdi fejlődéstörténet nagyobb eseményeit mutatjuk be, amelyekről az Apollo-expedíciókon begyűjtött kőzetminták és a holdi meteoritek is tudósítanak.

A Naprendszer űrszondákkal végzett kutatása a Föld és a Hold vizsgálatával indult. A Hold anyagainak föltérképezése során a földtan által 300 éve kitaposott utat járták végig. Ennek lényege, hogy első lépésként az égitest felszínén lévő kőzettesteket azonosították. Ezeket nagy holdi események hozták létre. Egy évtized alatt az *U. S. Geological Survey* munkatársai megalkották a hold rétegtanát. Nem volt azonban segítségükre fosszília az egymást át nem fedő rétegek relatív sorrendjének meghatározására, vagyis a földtani korrelációra.

Ekkor ismerték föl, hogy a kőzettestekhez tartozó forma is lehet zárvány szerepű. Igaz, fokozatosan tartozik hozzá, az egyre több reá rakódó kráter, de a kőzettest felszínén megfigyelhető krátereket ugyanolyan „fosszília” szerepkörben kezdték alkalmazni, mint korábban a biológiai, majd azt követően a radioaktív elemekkel tették. Megszületett a kráterstatistika, melynek segítségével ma már a Naprendszer távoli égitestjeinek is meg tudjuk határozni a korát.

A földi sztratigráfia axiómái

A szilárd kérgű bolygótestekről készült geológiai térképeken a kőzettestek a „főszereplők”. Azokat a kőzettesteket ábrázolják, színes formában, amelyek a felszínre nyúlnak. A kőzettestekkel valójában gyakran a felszínén megfigyelhető formákat térképezik föl és arra törekszenek, hogy a kőzettesteket még a felszín alá nyúlásukban is nyomon kövessék. A kőzettest rétegekből rétegtani (sztratigráfiai) egységeket, sorozatokat állítanak össze.

A kőzettestek föltérképezése során axiómákat állítottak össze. Az axiómákat megelőzi egy alapföltevés, mely a következő: az égitest felszíné tömbökből áll, 3D kiterjedésű kőzettestekből, melyeknek a körvonalai, elhelyezkedése, egymáshoz való viszonya mérhető, föltérképezhető.

A legismertebb axióma a települési törvény (*Nicolaus Steno*, dán természettudós állította föl az 1600-as években). Az égitest felszínén található kőzetrétegek (kőzettestek) közül az a fiatal-

labb, amelyik fölötté van a másíknak. A rétegek sora így rendre fölfelé haladva egyre fiatalabb kőzettesteket jelez.

A következő két fontos és elismert axióma annak a tapasztalatnak a kiterjesztése, amit ma, itt a Földön megfigyelhetünk. Megfigyelhetjük, hogy

1. milyen folyamatok alakítanak ki kőzettesteket: pl. üledék-képződés a tengerben, vulkanizmus stb., és hogy
2. milyen folyamatok változtatják e kőzettestek egymáshoz való viszonyát: pl. tektonizmus, intrúzió stb.

A kiterjesztési kettős-axióma azt mondja ki, hogy amilyen folyamatok hatnak ma és itt a Földön, azok hatottak korábban is, és másutt is a Föld felszínén. Az időbeli aktualizmusnak, a térbeli uniformitarizmusnak is nevezik, de mindkettő a jelen folyamatok működésének térbeli és időbeli kiterjesztése.

A következő két fontos axióma a kőzettestek közötti viszonyokból von le időrendi következtetést. Az egyik megállapítja, hogy az a tektonikus folyamat, amely elmozdít egymáshoz képest két kőzettestet, fiatalabb, mint a két elmozdított kőzettest. A másik azt állítja, hogy az a kőzettest, amely más kőzettestbe való behatolással jött létre, fiatalabb, mint az őt bezáró kőzettest.

Az utolsó fontos axióma a korreláció lehetőségét fogalmazza meg zárványok segítségével. A zárványok bezárásának axiómája egyrészt ugyanolyan viszony-axióma, mint az előző kettő, másrészt azonban magában hordozza az Univerzumra is kiterjeszthető anyagszerkezeti rétegtan lehetőségét is. Ez az axióma kimondja, hogy a bezárt test (zárvány) mindig idősebb, mint a bezáró kőzet. A földtani korreláció alkalmazására azért van szükség, mert a kőzettestek nem folytonos réteget képviselnek ill. mert különböző helyeken az égitest felszínén más és más típusú kőzetek egyidejűségét is fontos megállapítani. Röviden: a rétegek oldalirányú folytonosságát tudjuk kimutatni a korreláció segítségével.

A zárványok önálló fejlődéstörténeti sorozatot képeznek akkor, ha az élővilág fossziliáit alkalmazzuk a korreláció megállapításánál. Vannak azonban időközben fölfedezett másféle zárványok is: ilyenek például a radioaktív elemek, melyek bomlásukkal szintén saját fejlődéstörténetet képeznek. A zárványok tehát rávilágítanak arra a tényre, hogy a rétegtan (sztratigráfia) lényegéhez tartozik az, hogy két független, saját fejlődéstörténetet őrző eseményszálat vet egybe, hasonlít össze.

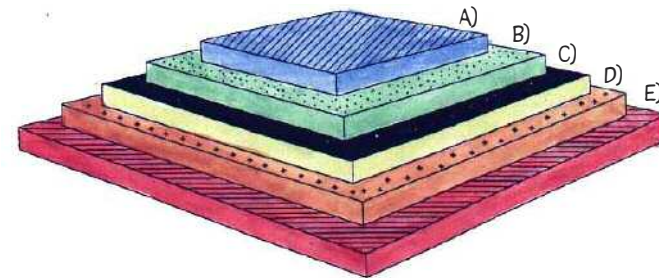
A Naprendszerbe kilépve új típusú zárványokra lesz szükségünk ahhoz, hogy a korrelációt égitestek közötti tartományokra is kiterjesszük. Olyan zárványokra lesz szükségünk, melyek több égitest felszínén is megtalálhatók, és valamilyen tulajdonságuk időben változik. Ilyen zárványok a kráterek, s korrelációra alkalmas kőzetprovinciák az égitestfelszíni krátermezők.

Holdi sztratigráfia

A Hold volt az első égitest, melyre a sztratigráfia Földön kifejlesztett, de más égitestre kiterjesztett axiómáit alkalmazták (*Shoemaker és mtsa, 1962, Wilhelms, 1970a, 1970b, Wilhelms és mtsa, 1971*). A kőzettestek tulajdonságait, az átfedési viszonyokat először fotometriai úton, távcsöves fényképfelvételekről, majd űrfelvételekről állapították meg.

A rétegtani térképező munka egyik összefoglalása a holdi rétegtani oszlop, amit mi most egy lépcsőszerű aszték piramis formájában mutatunk be. Ebben felsoroljuk a holdi rétegtan fő emeleit, melyek egyúttal a holdi kőzetképződés nagy korszakait is jelentik.

A holdon a sugársávok kráterek a legfiatalabbak (kopernikuszi rendszer), ezeket követik lejjebb a még mindig fiatalosan tagolt morfológiájú, de már sugársáv nélküli kráterek (eratosztheneszi rendszer). Mindkét fiatalabb emelet (rendszer) rétegei többnyire csak kráternyi foltokban vannak jelen a Hold felszínén, bár előfordulnak eratosztheneszi marék is (és a Tycho vagy a Copernicus kráter sávjai is messzire nyúlnak, különösen telihold idején láthatjuk ezt). A földi rétegtani egységek alatt nagy kiterjedésű kőzettesteket alkotó két emelet következik. Az egyik az imbriumi, mely az Imbrium-medencéhez kapcsolódott a definiáláskor kijelölt területen (imbriumi rendszer). A másik, a még idősebb egység a Nectaris-medencéhez kapcsolódik (nektári rendszer). Legalul fekszik a krátermezőkkel borított terravidékek (prenektári) rendszere (emelete) (24. ábra).



24. ábra. A holdi sztratigráfia idealizált rétegtani piramisa: felülről rendre a következő rétegtani egységek (rendszerek) sorakoznak: **A)** kopernikuszi (fiatal, sugársávokkal is rendelkező kráterek tartoznak ide), **B)** eratosztheneszi (fiatal, de sugársáv nélküli kráterek tartoznak ide), **C)** imbriumi (az Imbrium-medence kialakulásától, kidobott takarók, mare elöntések tartoznak ide), **D)** nektári (a Nectaris-medence kialakulásától kezdve képződött medencék, marék tartoznak ide), **E)** prenektári (minden Nectaris-medence előtti kőzettest ebbe a rétegtani emeletbe tartozik).

Azóta a rétegtan alapelveit több más naprendszerbeli égitestre is alkalmazták, így a Marsra, a Merkúrra, a Jupiter Galilei-féle holdjaira és jelenleg a Vénusz geológiai térképezése folyik. A XIX. század egyik nagy tevékenysége lesz a Naprendszer léptékű rétegtan (sztratigráfia) kidolgozása.

Hosszú ideig a Naprendszer bolygói és holdjai esetében csak ennek az égitestet borító rétegsornak a vizsgálata vált lehetővé: a felszíni rétegek azonosítására nyílt mód a fényképi felvételeken. Ma az űrkutatás egyik nagy kihívása az, hogy a bolygótestek geológiai föltérképezése után tegye lehetővé a klasszikus földtan másik fontos hierarchiaszintjének, a kőzetmintáknak a vizsgálatát is. A Hold esetében ez már részben megvalósult. Az Apollo-expedíciókból is és a földre hullott meteoritek anyagából is vizsgálhatjuk ma már a Hold anyagait.

NASA Holdkőzetek

Az 1969 és 1972 közötti öt év alatt hat sikeres leszállást hajtottak végre a NASA űrhajósai a Holdon. A begyűjtött kőzetminták össztelege 384 kilogramm. Ezek az első tudatosan gyűjtött naprendszerbeli anyagkészletek. Ugyanebben az időszakban három Luna űrszonda robot is hozott talajmintát a Holdról az orosz űrkutatás keretében.

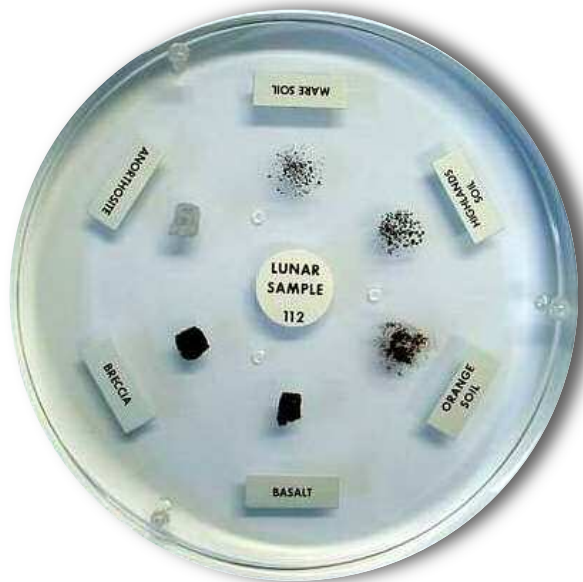
A NASA 20 példányban elkészített egy 12 vékonycsiszolatból álló készletet a felsőoktatás számára (25. ábra). Az oktatási holdkőzet mintasorozat jó áttekintést ad a Hold főbb kőzettípusairól. Vizsgálatuk képet ad a Holdon lejátszódott fontosabb kőzettani folyamatokról.

Ezek a következők:

1. a holdi kéreg kialakulása (az anortozitminta és a noritminta),
2. a bazaltos mare előntések kialakulása, s a bazaltok rétegződése (3 bazaltos minta és egy szitált frakció a narancs színű talajból, amit lávaszökőkút hozott létre),
3. breccsák keletkezése (3 breccsa minta, egy-egy a felföldi és mare területről és egy a Fra Mauro Formációról) s
4. a holdi regolit keletkezése (2 talajmintából szitált frakció és egy talajbreccsa).

Anortozit

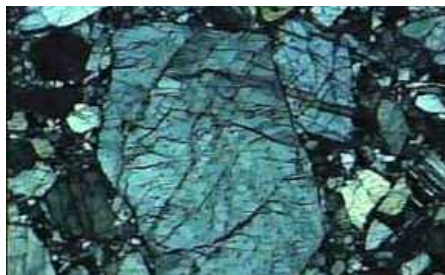
A Hold külső kérgé az égitest összeállása után megolvadt. A magma óceánból kristályosodott ki az az anortozitos kéreg, amelyet mi egységesen holdi felföldeknek (*terra*) nevezünk. Arra, hogy a holdi magmaóceán a teljes Holdra kiterjedt, az ásványok ritkaföldfém-gyakorisága alapján következtettek: az anortozitok nagy pozitív európium anomáliájából és a holdi bazaltok nagy negatív európium anomáliájából. Néhány anortozit mintában még megfigyelhető a kőzet kumulátos szövete is.



25. a-b. ábra. A NASA holdkőzet-készletének két része: balra a holdi mintákat tartalmazó korong látható 6 beöntött anyagmintával. Jobbra a 12 vékonycsiszolatot tartalmazó készlet látható felülnézetben.

A Hold anortozitos kérgét a keletkezése utáni félmilliárd évben több nagyméretű égitest becsapódása érte. Ezek a becsapódások feltördelték az anortozitos kérgét, körkörös medencéket hoztak létre, és hatalmas területekre terítették szét a kidobott törmelékanyagot. A hold kérgét alkotó anortozitos kőzetek ezért többségükben breccsás szöveteik. Az Apollo-űrhajósok által hozott anortozit minták többségében megfigyelhetjük az összetördelt ásványokat, a breccsás szövetszerkezetet.

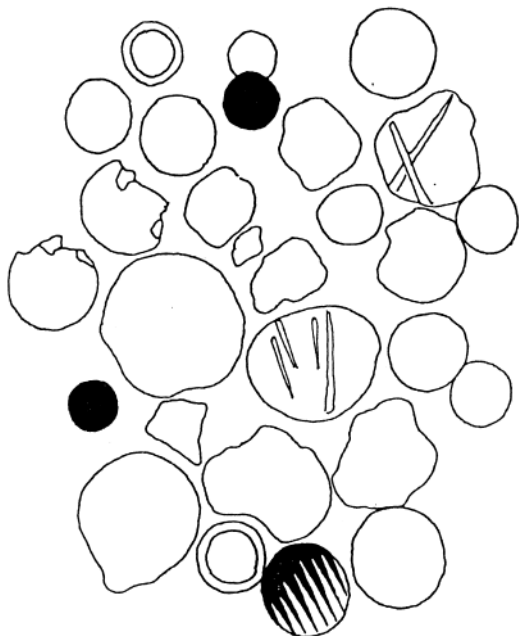
A **terra kőzeteket** egy anortozit- és egy noritminta képviseli. Az anortozit a holdi felföldek anyaga, szinte kizárólag csak földpát kristályokból áll. A valamikori nagyméretű (centiméteres) szemcsék a sok ütközéstől, becsapódástól, rengéstől mára összetöredeztek (60025, 27. ábra). A vékonycsiszolaton megfigyelhetjük a blokkok elmozdulását, a szemcseperemek összetöredezését, az optikai tulajdonságok (pl. a kioltás) mozaicitását. Az anortozitok kialakulásának kora 4,4–4,2 milliárd év (26. ábra).



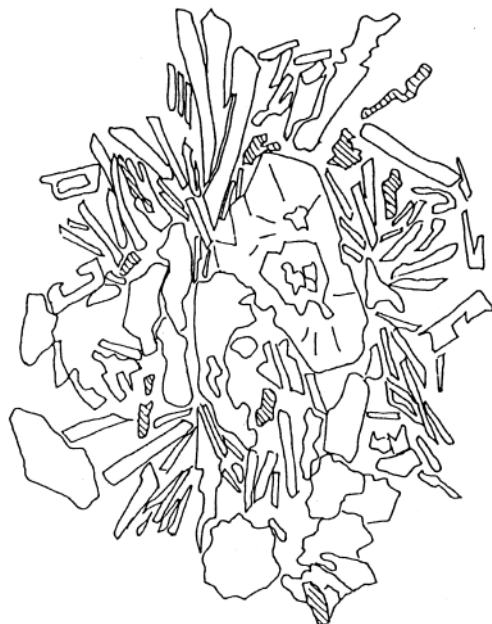
26. ábra. Anortozitminta a NASA készletből: a 60025 sz. kőzetminta részlete



27. Holdi anortozitminta 60025 (lásd 41. fotó; 26. ábra)



28. ábra. Narancs talaj (Hold, 74220) (lásd 37. fotó)



29. ábra. Holdi bazaltminta 12002 (lásd 38. fotó)



30. ábra. Holdi bazaltminta 70017 (lásd 39. fotó)



31. ábra. Holdi bazaltminta 12005 (lásd 40. fotó)

A norit minta felerésztt rombospiroxénből, felerésztt plagioklász földpátból áll (78235). Durvaszemcsés kőzet, az ásványok nagysága az 5 mm-t is elérheti. Üveges erek is előfordulnak benne. A becsapódások ütközései nagyon megviselték ezt a kőzetet. A földpát nagy része maszkelynit üvegeként található benne. Ma azt feltételezik, hogy a nóritok és más terra kőzetek is intrúzióként nyomultak be az anortozitos kéregbe.

Holdi bazaltok

A holdi kéregbe történt nagy becsapódások medencéket alakítottak ki a Holdon. A Hold látható oldalán ezeket a körkörös medencéket bazaltláva folyások töltötték föl. A holdi vulkanizmus hosszú ideig tartott, s a hígan folyó láva hatalmas távolságokon, vékony rétegekben terült szét. A holdi bazaltok keletkezésének kora csaknem egy milliárd évet fog át az Imbriumi korban, de krátorszámítások alapján tudjuk, hogy léteznek olyan lávafolyások is, melyek az eratosztheneszi időszakban keletkeztek. Ilyenek az Imbrium-medencében föltérképezett lávafolyások is. Az Apollo-expedíciókon földre hozott holdkőzetek kora 3, 7 és 3,2 milliárd év közé esik.

A holdi lávák vékony rétegekben terültek szét. A holdi bazalt mintákat ezért legcélszerűbb egy vékony lávafolyás felszínétől lefelé haladva sorba rendezni és így bemutatni őket. A felszíntől lefelé haladva más és más jellegű szöveteket találunk

egy lávafolyásban. A láva a mélység növekedésével egyre lassabban hűlt le, s ezért a kőzet szövetek a lehülési sebesség csökkenése szerinti sorba lesznek rendezve. A szövetek az üveges elegyrészeket is tartalmazó szferulitos szövetből elindulva rendre a következő típusokat tartalmazzák: *variolitos szövet, interszertális szövet, intergranuláris szövet, szubofitos szövet, ofitos szövet, poikilites szövet*. A holdi bazaltok között a legtöbb típusra van példa, néha azonban csak úgy, hogy töredékként jelennek meg a breccsákban. Ilyen szövetsort földi ofiolitokban, vagy párnalávákban is találtak kutatók (Józsa, 2000).

Három bazaltos vékonycsiszolat van a gyűjteményben, de összetételét tekintve ide tartozik a „narancs színű talaj” minta is, tehát a **bazaltokat** négy minta képviseli a NASA készletben. Rendezzük el a holdkőzet-készlet négy, bazaltos összetételű mintáját egy olyan tulajdonság alapján, ami jól megfigyelhető a szövetükön: az ásványszemcsék mérete alapján. Tudjuk, hogy a lehülés körülményei erősen hatnak a szemcseméretre. A gyorsan lehűlő szilikátolvadékból apró kristályok válnak ki, míg a hosszú ideig (pl. nagy mélységben) kristályosodó kőzetek durva szemcsés szövetűek lesznek. Ha tehát az átlagos szemcseméret, illetve a szemcsék egymáshoz való viszonya alapján készítünk el egy sorozatot a holdi bazaltokból, akkor voltaképpen a lehülési sebesség szerinti anyagterképét is föl-

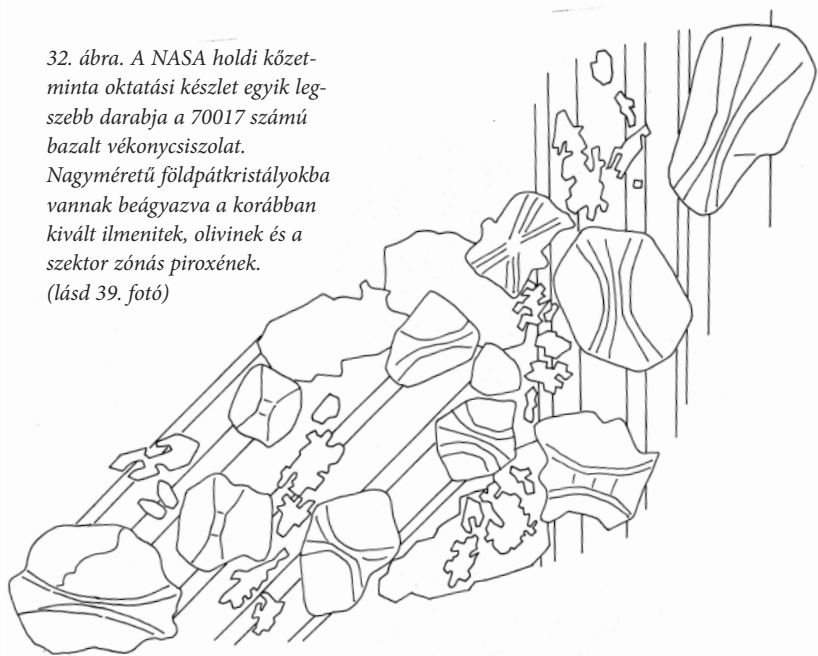
vázoltuk. A mi lehülési anyagterképünkön (35. ábra) a függőleges tengelyen szerepel a lehülési sebesség, a különféle szövetek pedig egymás alá kerülnek: az apró szemcsés felszínközeli, s rendre az egyre durvább szemcsés mélységi szövetekkel zárul a sor.

A leggyorsabban lehűlt anyagot a narancsszínű talajminta üvegcsappjei képviselik a sorozatban (74220, 28. ábra). Ezek a holdi ásványi anyagok egyúttal a legszínesebbek is. A narancsszínű talajminta, egy 40–100 mikrométeres szemcsékből, többnyire szferulákból (gömböcskékből) álló szitált frakció. Feltehetően egy lávaszökőkút széjjelfröccsent, parányi olvadékcseppjeiből keletkezett. Üveges alanyaguk mintegy szerkezeti ellentéte a kristályos szerkezetű kőzetmintáknak. A hirtelen megszilárdult cseppek átalakulás nélkül megőrizték a láva forrásvidékének, a holdi köpenynek az olvadékösszetételét.

A lehülési sebesség szerinti szövetsorban alájuk kerül az ugyancsak gyorsan lehűlt, de már a mélyből jövő lávában nagyobbra nőtt ásványszemcséket is tartalmazó szövet, melyben ásványnyalábok (plagioklász földpát és piroxén) figyelhetők meg (12002, 29. ábra). A piroxén-tűkristályok körbe veszik a korábban a mélyben már megnőtt, és a magma által fölhozott olivin-kristályokat, s így alakítják ki a porfirós szövetet. A minta porfirós szövege úgy alakult ki, hogy a kristályosodás már a

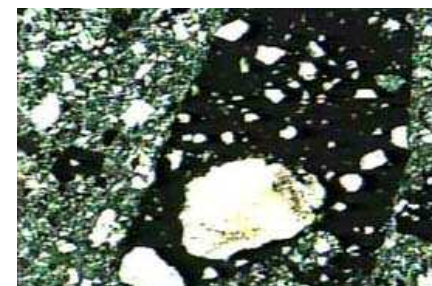
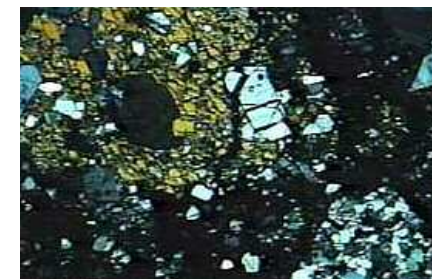
32. ábra. A NASA holdi kőzetminta oktatási készlet egyik leg-szebb darabja a 70017 számú bazalt vékonycsiszolat.

Nagyméretű földpátkristályokba vannak beágyazva a korábban kivált ilmenitek, olivinek és a szektor zónás piroxének. (lásd 39. fotó)



33. ábra. Holdi breccsa 72275 (lásd 43. fotó)

34. ábra. Holdi breccsák a NASA készletből „breccsa a breccsában” szövettel. → Alul: 14305 (Fra Mauro) (lásd 44. fotó)



mélyben megkezdődött, s a kiömlő láva már tartalmazta az olvadékból elsőként kikristályosodó ásványokat, az olivineket. Ezeket aztán körbevelték a szál-as-tűs piroxének és a földpátok.

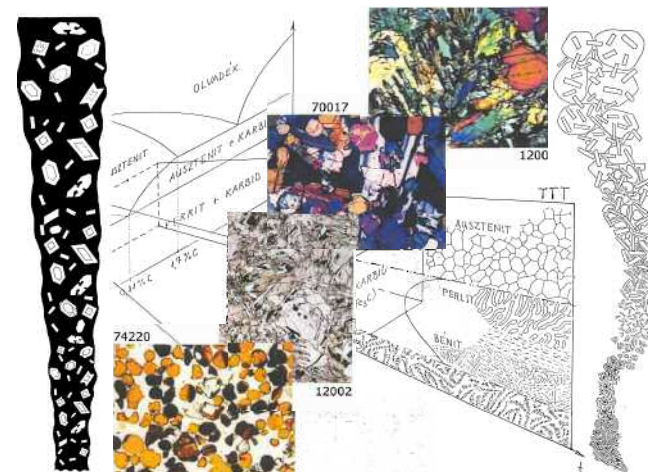
A szövetek sorában harmadik bazaltminta már nagyobb ásványokat is bőven tartalmaz (70017, 30. ábra). (Ez a minta a hazai szarvaskői, DNY-bükki gabbrónknak is rokona nagy titántartalma alapján.) A 70017 sz. bazaltban a piroxének saját színe a halvány rózsaszín barackvirághoz hasonló, de a fekete, átlátszatlan (opak) ilmenit kristályok, melyek fontos elegyrészei a 70017 számú bazaltnak, sötétre színezik a vékonycsiszolatot. A spinell szemcsék többnyire négyzetes vagy hatszögletes metszetű fekete (opak) ásványként figyelhetők meg, az ilmenitek gyakran vázkristályosak, beöblösödéseket mutatnak a vékonycsiszolatban. Igen ritkán megfigyelhetünk armalcolit ásványokat is, melyek hosszúkás hordó alakúak. Az *armalcolit*-ot a Holdon fedezték föl és az elsőként leszállt űrhajósokról (Armstrong, Aldrin, Collins) nevezték el.

A lehülési sorban negyedik egy poikilitos szövetű minta (12005, 31. ábra). Ebben – a lehülésnek immár egy késői szakaszában –, nagy szemcsékbe ágyazottan láthatók a korábban kivált kicsiny szemcsék. A korán kiváló kristályszerkezeteket megolvadék vette körül, ezért szép, saját alakkal kristályosodtak. A 12005 sz. bazalt minta szövetében a nagy méretű földpátok és piroxének kristályosodtak utójára, s ezért bezárják a szép, sajátalakú olivineket és néhány ilmenit és spinell szemcsét.

Breccsák

Még az anortozitoknál is tördeltebb ásványvilág szökik a szemünkbe a **breccsákat** megfigyelve a mikroszkópban (34. ábra). A becsapódások útjese összetett átalakító folyamatokat indít el a felszíni kőzeteken. Ipari folyamatok hasonlatával élve: mint a „malom” őrlő, mint a „vihar” forgózele teríti, s mint a „kemence” forrósága összesüti a törmelékeket. A breccsák némelyike sokszor átesett ezen a tortúrán, ezért alakulhatott ki soknak a „breccsa-a-breccsában” szövege (14305, 72275, 33. ábra).

Sok breccsában különböző eredetű kőzetszilánkok és töredékek keveredtek össze (polimikt breccsák), míg más breccsák egyetlen megelőző kőzet (protokőzet) összetördeléséből alakultak ki (monomikt breccsa). Sok breccsában a mátrix anyaga megolvadt és újrakristályosodott. A becsapódási kráter közepén találjuk azokat a kőzeteket, amelyek a megolvadt kőzetekből és a rájuk visszahullott törmelékekből alakultak ki. A 65015 számú felföldi breccsában a megolvadt mátrixból olyan nagyméretű piroxén ásványok kristályosodtak ki, amelyek az apró plagioklász földpát szemcséket poikilitesen magukba zárják. Más breccsákban nagyméretű kőzettöredékeket, kőzetszilánkokat találunk beágyazva. A breccsák jelentőségét az adja, hogy bennük több távoli területről származó idegen kőzetszilánk is megtalálható. Így a hat expedíciós gyűjtőhely a breccsák révén sokkal nagyobb kiterjedésű gyűjtési területet reprezentál összekeveredett kőzetszilánkjával.



35. ábra. A NASA holdkőzet készlet 4 bazaltmintájának szövege lehülési sebesség szerinti sorozatba rendezve és összevetve az acélok edzésére készített szövetdiagrammal, melyen a különböző szövetű acélok is lehülési sebességük szerint következnek. A szövet mintázata annál apróbb szemcsés, minél közelebb történt a lehülése a felszínhez, s ezért minél nagyobb volt a lehülés sebessége.

Porminták

A NASA-készletben a negyedik anyagminta típus a talajmintáké. A talajminták is a távoli vidékekről odaszállított változatos anyagvilágot, kőzet- és ásványtörödékek darabokat hordozzák és így a felszíni keveredési folyamatokra is utalnak. Szitált frakciók 60–100 mikrométeres szemcsékkel. A 68501 sz. minta (47. fotó) a felföldekről, a 70181 sz. minta (48. fotó) pedig a mare vidékekről tartalmaz töredékeket, kőzetszilánkokat, ásványszemcséket.

A 68501 sz. mintában főleg anortozitos szilánkok fordulnak elő néhány felföldi típusú bazalt szilánk is megtalálható közöttük. A 70181 sz. minta főleg a mare bazaltok ásványtörödékeit tartalmazza. Előfordul a szemcsék között néhány odakeveredett narancs talaj gömböcske is.

Ugyancsak a talajminták sorába illik a 15299-es számú regolit breccsa. Ebben üveges alapszövetbe beágyazva találhatjuk meg a kőzet- és ásványszilánkokat. Olyan kisméretű gömböcskék (szferulák) is megfigyelhetők bennük, amelyek becsapódások idején keletkeztek. Méretük 10–20 mikrométer, s így észrevehetően kisebbek, mint a lávaszökőkutak 60–100 mikrométeres szferulái.

Összegzés a Hold kőzeteiről

Az űrkutatói módszerekkel megszerzett első expedíciós kozmikus anyaggyűjtemény csoport a Holdról származik. Az

Apollo- expedíciók gyűjtötte 384 kilogrammos készletnek csak egy részét dolgozták föl eddig. A Hold felszíni folyamatairól sok fontos ismeretet gyűjtöttünk már az Apollo-11 anyagának megismerésével. Ezek közül kiemelkedő jelentőségű a holdi anortozitok kéregalkotó szerepe, a nagyon idős holdi kőzetvilág kormegállapításai, a nagy mélységből származó lávaszökőkúti szferulák holdi köpeny eredete, a mare bazaltok sokfélesége és néhány mare bazalt nagy titántartalma.

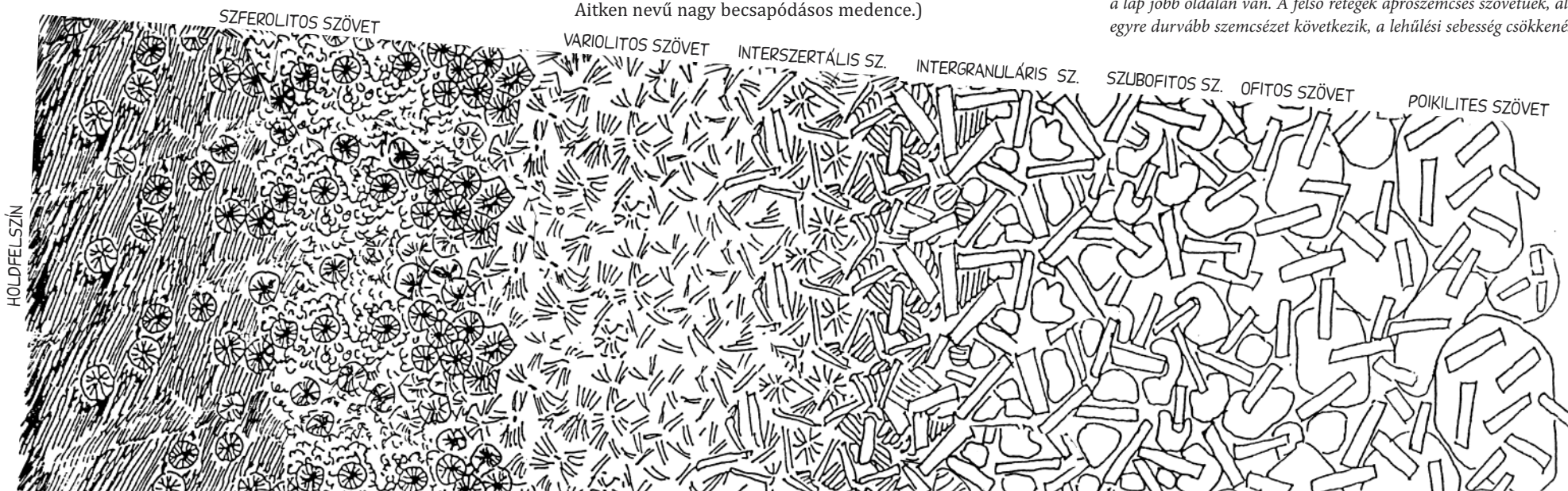
Ma a holdi kőzeteket összetételük szerint a bázisos-ultrabázisos földi kőzetek közé interpolálhatjuk be. Nagyobb magnézium tartalma alapján több holdi kőzet már a pikrites ultrabázisos tartományba esik (12002–29. ábra, 70017–32. ábra). Azonban a becsapódások által elvégzett anyagkeveredéseknél három fontos csoportot különítenek el a holdi talajok forrásvidékeire. Az egyik a felföldek anortozitja, a másik a viszonylag nagy vastartalmú mare bazaltok csoportja s a harmadik a káliumban (K), ritkaföldfémekben (REE) és foszforban (P) való gazdagsága miatt KREEP-nek nevezett komponens. Ez utóbbi komponens a Mare Imbriumtól való távolodással csökken a talajösszetevők között. A három fő forrástípust a későbbi űrszondák sugárzásos összetétel analízatorai is jól el tudták különíteni. Így ma, a hat leszállás kicsiny felszíni mintavételezése ellenére a Hold egészére kiterjedő összetételei térképek állnak már rendelkezésünkre a holdfelszín anyagairól. (A Hold túlsó oldalán szintén van egy fontos KREEP forrás, s ez a South Pole-Aitken nevű nagy becsapódásos medence.)

A Hold fejlődéstörténete

Azokkal a kőzetmintákkal, amelyeket a térképezésből már ismert geológiai környezetből gyűjtöttek, pontosítani lehetett a sztratigráfiában már megismert holdi fejlődéstörténetet is. A holdi terrák anortozitjai és a bennük mért ritkaföldfémek eloszlása különös és fontos eseménysort bizonyított. Egykor a Hold külső rétegei megolvadtak s 4,4 milliárd évvel ezelőtt az egész égitestre kiterjedő magmaóceán borította a Holdat. (A földi külső rétegek kezdeti megolvadására a holdi anortozitos kéreg keletkezésének fölismerése után gondoltak először.) A magmaóceán lehülése során a plagioklász földpát (CaAl₂Si₂O₈) az olvadéköna tetején gyűlt össze, s létrehozta a világos színű felföldek anortozitját. A nagyobb sűrűségű ásványok az olvadéköna aljára süllyedtek. Ez az első holdi differenciálódási korszak mintegy félmilliárd évig tartott (37. ábra).

A vastagodó holdi kéregre történtek a nagy körkörös medencéket létrehozó becsapódások, melyek feltöltették a holdi kérget. A töréseken át bazaltos láva szivárgott a felszínre és egy-másfél milliárd éven át működő vulkáni tevékenységgel feltöltötte a Hold látható oldali medencéit. A bazaltok a hold köpenyéből származnak. Némelyik közülük titánban igen gaz-

36. ábra. Holdi lávaömlés metszete a főbb bazaltos szövettípusokkal. Metszeteket bemutató ábráink egy holdi láva rétegének felső 10 méteres darabját érzékeltetik. A lávafolyás teteje a füzet bal szélére esik, alja pedig a lap jobb oldalán van. A felső rétegek aprószemcsés szöveteik, alattuk egyre durvább szemcsézet következnek, a lehülési sebesség csökkenésével.



dag, mint például az Apollo-11 és 17 leszállási helyéről gyűjtöttek (Meyer, 1987).

A bazaltos vulkanizmus csenedesedésével a nagy felszínformáló események elültek a Holdon. Az egyre vastagodó holdi kéregre egyre kevesebb becsapódás történt. A folyamatos kráterbombázás a talajt ma is állandóan őrli, keveri és süti össze breccsákká. A holdi breccsa a breccsában szövetű kőzetek, a talaj anyagából összesült breccsák, a becsapódáskor megolvadt anyagból keletkeztek talajbreccsák mind ezt igazolják (Wilhelms, 1970b).

Ugyancsak fontos új ismeretek, ritka kőzettípusok származnak a holdi meteoritek készletéből, melyek kiegészítik az Apollo leszállóhelyekről gyűjtött mintákat. Ilyenek pl. a legelsőbb YAMM holdi bazaltok.

A holdi meteoritek felsimerésének története

Robert Hooke 1665-ben megállapította a holdkráterek vulkáni eredetét, de a vulkáni aktivitás megfigyelése csak az 1780-as években kezdődött. Ekkoriban meteoritek holdi eredetét Laplace elméleteként tartották számon.

William Herschel az 1780-as években több kitérésről is beszámolt, melyet más hasonló megfigyelései követtek. Heinrich Wilhelm Olbers kapcsolta össze először a holdi vulkánokat a meteoritokkal. 1796-ban Lichtenberg már népszerűbben is megfogalmazta: „A barátságtalan hold-szomszédunk kövekkel dobálja meg a Földet”.

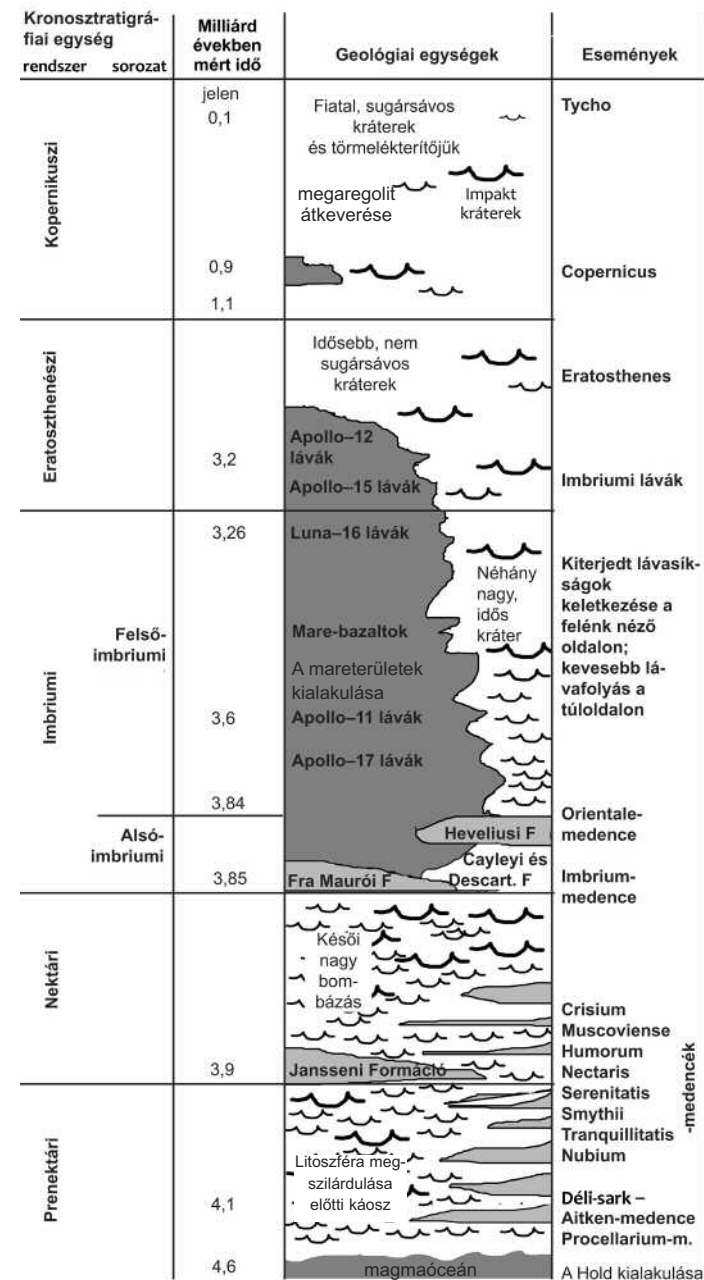
Amikor 1803-ban Ernst Chladni tudomására jutott, hogy Leonban (Spanyolország) 12 véka bab hullt az égből, melyet begyűjtöttek, elfogyaszottak és jó ízűnek találtak, megállapította, hogy egy holdkitérés feltehetően valamiféle élelmiszerként katapultálhatott az űrbe. Chladni 1794-ben először vetette fel a meteoritek kozmikus (Holdon túli) eredetét, ám elbizonytalanodott, mikor a holdi eredet mellett már túl sok érv kezdett szólni: több kőmeteorit hasonló összetételű volt – azaz egy helyről kellett származniuk. A vas és nikkelt nem volt oxidált – a Holdon valóban nincs légkör, sem víz. Chladni azonban többféle lehetséges forrást is felsorol: a meteoritek lehetnek egy soha össze nem állott égtest darabjai (mint eleve gondolta), holdi vulkánok kitérés-termékei, egy elpusztult bolygó törmeléke, vagy egy égtestről leszállított darabok.

J. Lawrence Smith szerint a holdi kráterek idős vulkánok, így a meteoriteknek is a régmúltban kellett ezekből kilövellniük; vagy a Hold felszínéről valamiféle ismeretlen erő szakította ki őket (ahogy valóban így is van, ám ezt az ismeretlen erőt ő még nem ismerhette fel).

A holdi eredet elmélete végül akkor lett az enyészete, amikor kiszámították annak valószínűségét, hogy a Holdról a Földre hogyan juthatna anyag. Olbers 1803-ban már felvetette, hogy ahhoz, hogy épp a Földet találja célba egy holdi vulkánkitérés kőzete, olyan sok anyagot kellene kidobniuk a holdi vulkánoknak, hogy a Hold tömege érezhető csökkenésen menne keresztül. Benzenberg később, 1834-ben megállapította, hogy a Hold mindkét oldalán 1200 vulkán található, és több, mint 4 millió holdkőzet hullt a Földre a 6 ezer évvel ezelőtti teremtés óta. Benzenber az elmélet hívévé az 1833-as meteorzáporokor vált, melyet egy holdi vulkánkitérés következményének tartott. Még később, 1859-ben Benjamin A. Gould kiszámította, hogy 5 millió kilóvellt törmelékkel összesen 3 db hullna csak a Földre. Ezek után már szinte senki sem hitt a meteoritek „romantikus” holdi eredetében, ahogy azt Brewster címkézte. Egészen addig, amikor az Antarktiszon először találtak a holdi becsapódásos kráterek keletkezéséről kilökött meteoriteket 1982-ben. A talált meteorit neve és sorszáma Allan Hills 81005. A minta a Smithsonian Institutba került, megállapították, hogy a minden eddigi meteorittól elütő kőzetminta holdi meteorit. Évekkel az amerikai azonosítás után a japán kozmopetrográfusok is találtak egy holdi meteoritot az 1979-ben begyűjtött antarktisi meteoritok között (Yamato 791197). 2008. februárjáig 112 holdi meteoritot azonosítottak, melyek a párosítások után 50 különböző holdi meteoritot adnak.

Amint azt a 19. században is gondolták, a földre hullt meteoritok egy része valóban holdi eredetű és valóban a kráterekből származnak. Ami változott: a kráterek nem vulkánok, így ezek a meteoritek sem vulkánkitérés termékei: a krátereket létrehozó becsapódási eseményben a kilökött törmelék egy része elérte a holdi szökési sebességet (2,38 km/s), ezek egy része Föld körüli, más része Nap körüli pályára állt. A kozmikus sugárzási kitétségi kor alapján a holdról származó meteoritek legidősebbike 13–20 millió évvel ezelőtt indult el a Holdról, azaz ekkori becsapódás terméke (Dhofar 025), a legfiatalabb pár száz éve indult a Holdról útjára (Kalahari 008/009), azaz kis, pár km átmérőjű méretű kráterekhez kötődnek. Head (2001) elméleti számításai szerint már egy 450 m átmérőjű kráter keletkezése is útnak indíthat holdi meteoriteket.

Különlegesek a YAMM holdi bazaltok: a rövidítés a Yamato 793169, Asuka 881757, MIL 05035, és MET 01210 meteoritokra utal, melyek egyazon becsapódásból erednek, de külön-külön, más-más helyre hullva érkeztek a Földre.



37. ábra. A Hold geokronológiai ill. kronosztratógráfiai tagolása (Wilhelms 1987 és Hargitai et al. 2008 alapján)

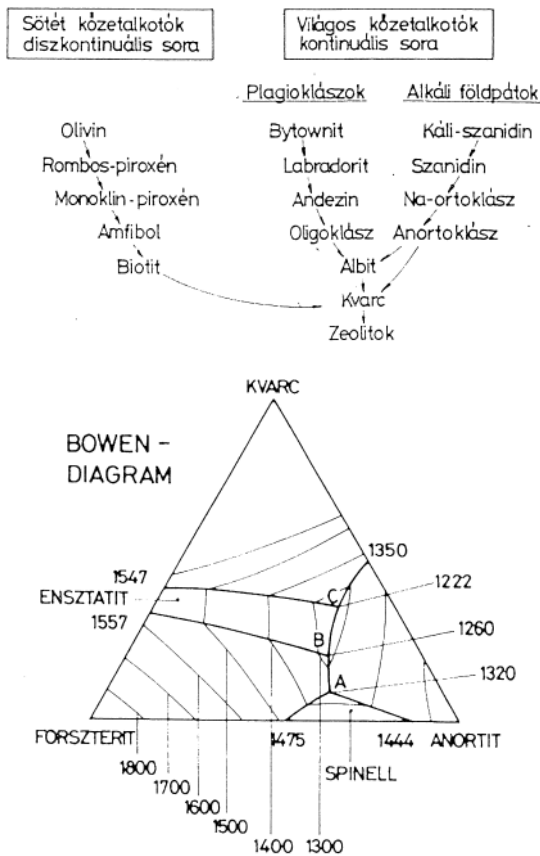
A MARS KÖZETEI A MARSÍ METEORITEK ALAPJÁN.

A magmás kőzetekről általában

Három fő kőzettípust különít el a kőzettan a Földön: a magmás, az üledékes és a metamorf kőzeteket. A magmás kőzetek szilikátolvadékokból keletkeznek lehűlési kristályosodással. Az üledékes kőzetek a felszíni mállás során keletkező üledékekből, a metamorf kőzetek, (átalakult kőzetek) nagy nyomás és/vagy hőmérséklet hatására történő átkristályosodással jönnek létre. Ezek közül a magmás kőzetek azok, amelyeknek előfordulására leginkább számítani lehet a Föld típusú, szilárd anyagú kőbolygók felszínén. A Merkúr, a Vénusz, a Föld, a Hold és a Mars szilárd anyagának jelentős részét, e bolygók köpenyét és kérgét főleg ilyen szilikátos anyagok alkotják. A megszilárdult láva főleg Fe, Mg, Ca, Al, Na, K, Ti, Cr, Mn szilikátokból, valamint számos oxid- és szulfidásványból épül föl. A magmás kőzetek rendszerét az elmúlt három évszázad során megalkották. Először e rendszernek a magját mutatjuk be, azzal a céllal, hogy benne elhelyezhessük a marsi magmás kőzeteket, melyek meteoritként érkeztek a Földre.

Az égitest felszínére ömlő láva jelentős része olvadt állapotban van, de benne már megkezdődött a kristályosodás. A magmás kristályosodás során létrejövő ásvány-együttes (ásványtársulás) a fő kőzetalkotó ásványokból a mellékelt ábra szerinti arányban tartalmaz színes és színtelen szilikátokat. A színes szilikátok az olivin, a piroxén, az amfiból és a csillámok, a színtelenek a plagioklász és a káliföldpátok, a földpátpótlók és a kvarc. Bowen egy évszázaddal ezelőtti fontos megfigyelése volt az, hogy a magmás kristályosodás során a színes és a színtelen szilikátok gyakran együtt kristályosodnak, egymással párhuzamosan haladó folyamatként, de az ásványsorokon belül meghatározott sorrendet követve (39. ábra).

38. ábra. A marsi meteoritek egyik fő típusát alkotják a shergottitok. Egyik típusuk a lherzolitis shergottit, melyekben az egyik fontos szövetelem a csaknem kumulátosan elhelyezkedő poikilitos piroxének olivin és krómit chadakristályokkal. Itt kőzetet oszlopba rendezve mutatjuk be ezt a szöveti típust. (lásd 10. és 58. fotó)



39. ábra. Bowen tapasztalati diagramja a magmás kristályosodásról (felül) és a kimért kvarc-forszterit-anortit diagram (alul).

Később, olvasztási kísérletei nyomán, Bowen a magmás kristályosodás során keletkező fázisok viszonyait anyagterképen foglalta össze: ez a híres Bowen-diagram. A Bowen-diagram három fő ásványkomponens segítségével (olivin, plagioklász földpát és kvarc) le tudta vezetni a magmás kristályosodás fizikai-kémiai menetét.

A 21. század elejére a magmás kőzettan az interplanetáris mérési eredmények alapján a planetológia részét is képező tudományággá vált. Egyrészt azért, mert a legtöbb Föld típusú bolygótest felszínén az űrszondák kimutatták a bazaltot és más magmás kőzetek jelenlétét. Másrészt azért, mert a geokémia kutatói fölismerték, hogy a bazaltok „háttérben” egy kondritos, tehát peridotitos összetételű köpeny áll, melynek parciális olvadékai a bazaltok. Ezért a magmás kőzetek olyan differenciálódási sorozatokba rendezhetők, melyek egyik pólusán a peridotitos köpeny anyagai, a másik oldalán pedig a belőle le-származtatható különféle magmás kőzetek állnak. E sokszínű folyamatcsoportra példaként mutatunk be olyan eseteket, amelyeket a marsi meteoritek szolgáltatnak.

Magmás kőzetek a Marson

Csaknem 30 esztendeje annak, hogy az első, kémiai kísérletekkel igazán gazdagon felszerelt űrszondák, a Viking leszálló egységek, simán leereszkedtek a Mars felszínére. E páros marsi expedíció vizsgálatai közül legismertebbek a 3 biológiai kísérlet eredményei. A Mars magmás kőzeteinek megismerésében azonban egy egészen különleges, közvetett szerepe volt a Viking-méréseknek. A leereszkedés során ugyanis megmérték a marsi légkör összetételét és ezt az adatsort néhány év múlva a Földre már eljutott marsi kőzetek azonosítására használták föl.

A meteoritek között az 1960-as évekig fölismertek egy olyan csoportot, amely a magmás szövetű akondritok közül közös ké-



miai vonásaival válik ki. Melyek ezek? Oxidáltabbak a többi akondritnál, nagy az illőelem tartalmuk, jelentős az alkália tartalom a földpátokban, sok a Ca a piroxéneknél.

Ezt a csoportot három fontos tagjáról, a Shergotty, a Nakhla és a Chassigny meteoritekről SNC-csoportnak nevezték el. A naxhláról 1974-ben két fizikus, Papanastassiou és Wasserburg Rb-Sr radioaktív kormeghatározási módszerrel kimutatta, hogy nagyon fiatal, 1,3 milliárd éves, szemben a meteoritek többségének 4,5 milliárd éves korával. Ilyen fiatal vulkanizmus csak nagyobb méretű bolygótesten játszódhatott le. Később a shergottitokat még fiatalabbnak, már csak 170 millió évesnek mérték (ez a földi rétegtanban a jura kora).

A Viking légkörmérések nyomán Bogard és Johnson (1974) a megtört SNC-mintákból fölszabaduló nemesgázok (Ar, Kr, Xe) izotóparányai alapján valószínűsítette az SNC-meteoritek marsi eredetét. Később a becsapódással való kiszakítás mechanizmusát is modellezték. A gyűjtemények hatféle SNC-meteoritje mellé még hatot találtak 1995-ig az Antarktison. Ma már csaknem 40 SNC-meteoritet ismerünk, mert időközben, az Antarktisz után a forró sivatagokban is fedeztek föl újabb marsi meteoriteket. A marsi meteoritek táblázatának csak az első harmadát mutatjuk be tájékoztatásul.

Az SNC-meteoritek közettípusai

Az SNC-meteoritek magmás kőzetek. A földi magmás kőzetek rendszerét először az ásványos összetétel, a kemizmus (pl. SiO_2 tartalom) és a szövet szerkezete és szemcsemérete alapján tagolták típusokba. A legismertebb egy olyan táblázatos elrendezés, ahol kétszer négy mezőben sorolják föl a magmás kőzeteket. A táblázat felső sorában a négy kiömlési (vulkáni) kőzet szerepel: komatiit/pikrit, bazalt, andezit és a riolit. Ez a növekvő

SiO_2 tartalom sorrendje 40%-tól 70%-ig. A táblázat alsó sorában a mélységi magmás (plutóni) kőzetek sorakoznak, szintén növekvő SiO_2 tartalom szerint: peridotit, gabbró, diorit, gránit. A felső sor apró szemcseméretű kőzeteket tartalmaz, ami kapcsolatban áll a lehűlési sebességgel. Az alsó sor a durvaszemcsés kőzeteket tartalmazza, mert a mélyben a lehűlés sebessége lassúbb volt. A táblázat oszlopait azonos kémiai összetételű kőzetek alkotják és csak a szemcseméretben különböznek.

A marsi meteoritek ebben a magmás kőzet-osztályozási rendszerben a komatiit/pikrit, bazalt, kiömlési kőzetekkel is jellemezhető bázisos-ultrabázisos tartományba esnek. A marsi meteoriteket 6 típusba sorolják. ortopiroxenit (*ALHA 84001*), klinopiroxenit (*a naxhlitok*), dunit (*chassignit*), bazaltos shergottit (pl. a *Shergotty* maga is), pikrites shergottit (pl. a Northwest Africa 1068 – *NWA 1068*) és a lherzolitos vagy peridotitos shergottit (pl. az *ALHA 77005*). A három leggyakoribb marsi meteorit típus a naxhlit, a bazaltos shergottit és a lherzolitos shergottit.

A shergottitok

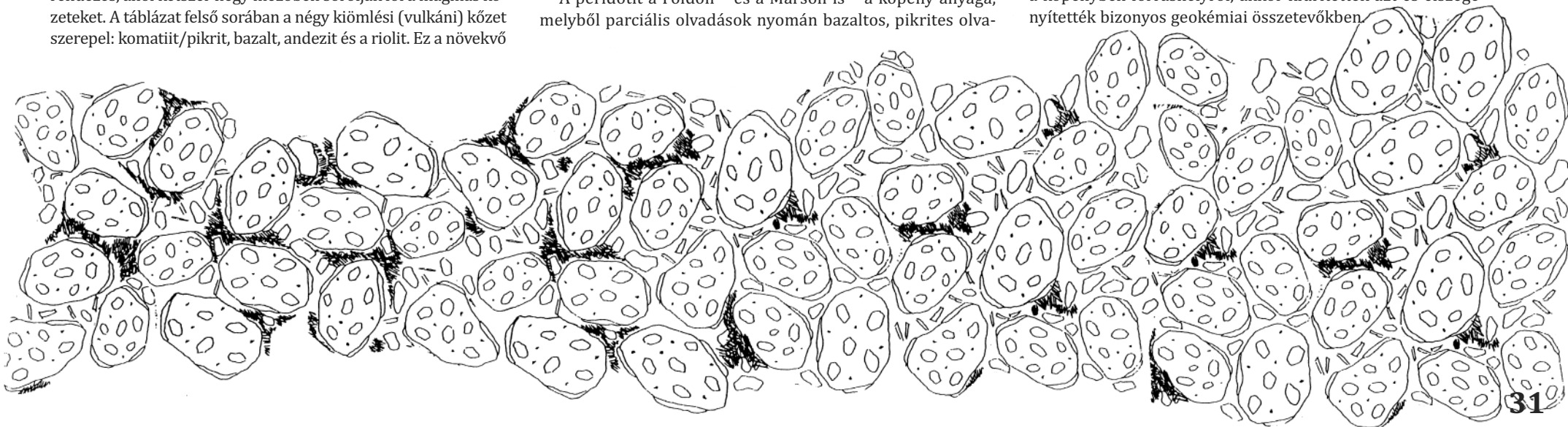
A bazaltos shergottitok szürke színű magmás kőzetek, melyek monoklin piroxénekből (pigeonit, augit) plagioklász földpátból (amely azonban a meteoritet kiszakító ütés hatására átalakult maskelynitte) és járulékos ásványokból áll. A peridotitos (lherzolitos) shergottit a földi lherzolitokra-harzburgitokra hasonlít. Szövetében nagy rombos piroxén szemcsékbe vannak beágyazva az olivin és krómít kristálykák. Csak kevés földpátüveg (maskelynit) található bennük.

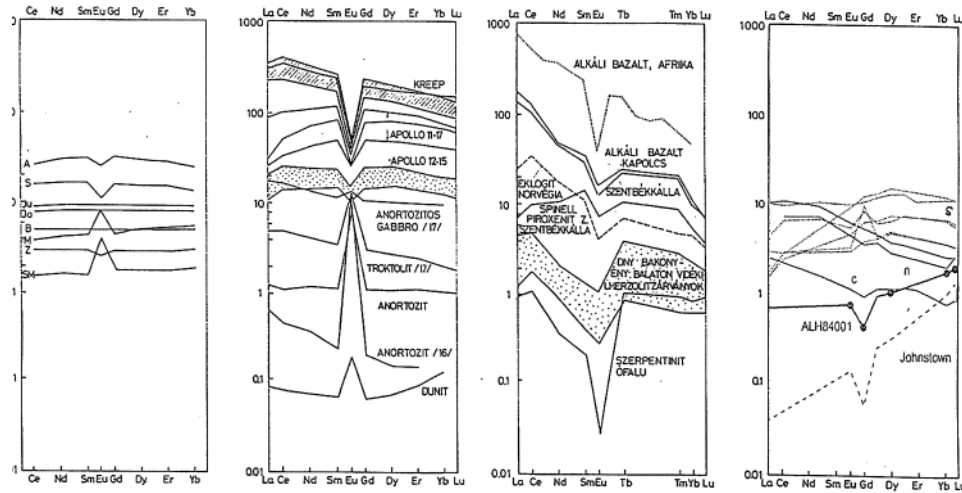
A peridotit a Földön – és a Marson is – a köpeny anyaga, melyből parciális olvadások nyomán bazaltos, pikrites olva-

dékok ömlenek a felszínre vagy jutnak felszín közelbe és ott kikkristályosodnak. A shergottitok egyes típusai ebbe a folyamatba illő közettípusok. Az olivin-porfíros shergottitok nagy méretű olivin kristályokból állnak, amelyek be vannak ágyazva a finomszemcsés bazaltos alapszövetbe.

Éppen a MER robotok fölismerése az, hogy egyes típusok a marsi felszínen közettömbökben is megtalálhatók. Például *McSween* a Spirit útja során megfigyelt és mért olivinben dús marsi bazaltokat az olivin-porfíros shergottitokkal rokon kőzetnek találta annak alapján, hogy a Pancam, a miniTES és a Mössbauer spektrométer adatok igazolták, hogy az olivin gyakori ásványa több marsfelszíni kőzetnek (*Humphrey, Adirondack, Mazatzal*). A Gusev kráterben mért bazaltokban az olivin összetételének Fe/Mg aránya is hasonló volt az olivin-porfíros shergottitokéval. Ezek a sötét, aprószemcsés Gusev-bazaltok mintegy 25 %-ban tartalmaznak olivin fenokristályokat és mivel a színképük hasonló a déli *terra* peremén található kőzetekéhez, ezért azt is föltételezik, hogy főként ez a bazalt – az olivin-porfíros shergottit – alkotja a noachi ősi terrákat. (noachi, heszperiai, amazoni a három marsi rétegtani emelet [rendszer].) (*Bérczi et al. 2001, Hargitai et al. 2008*) Más kutatók (pl. Irving) a Tharsis vulkánokat tartják az olivin-porfíros bazalt forráshelyének.

A shergottitok geokémiai osztályozására Warren és Bridges (2005) javasolt egy kéreg-asszimilációs modellt. Ez földi köpeny-zárványok mintájára a shergottitokat a marsi köpenyből származtatja. A marsi bazaltos parciális olvadákok – a földi párhuzamos eseményeknek megfelelően – amikor eltávolztak a köpenybéli forráshelyről, akkor kiürítették azt és elszegényítették bizonyos geokémiai összetevőkben.





40. ábra. Négy ritka-földfém (RFF) gyakorisági diagram a kondritos értékekre normalva. Balról jobbra a kondritos kisbolygó bazaltjai, a Hold kőzetei, a Föld néhány kőzete (Szentbékállai sorozat) és a Mars néhány meteoritja szerepel a négy oszlopban. A legdifferenciáltabb folyamatok a földi bazaltokat jellemzik, mert egy feltételezett kondritos kezdeti értékről (az 1-es vonal magasságában) parciális olvadással fölfelé is, és lefelé is igen változatos kőzettípusokat hoztak létre. Ezen a diagramon a Mars kőzetei ősi differenciálatlanságot mutatnak. Az s-sel jelölt shergottitok RFF gyakorisága a holdi Apolló-12 és 15 bazaltok magasságába esik. Az ALHA 84001 is ősi RFF gyakoriságot mutat.

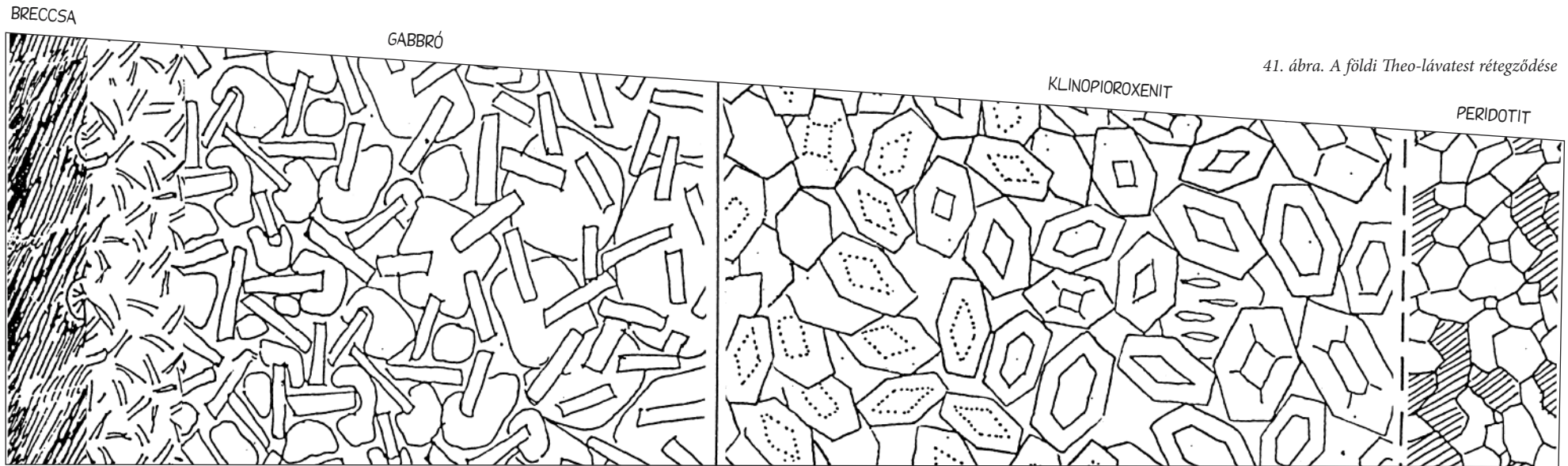
Ennek alapján Warren és Bridges bevezet háromféle shergottitot: erősen (E), közepesen (K) és gyengén (Gy) kiüresedett shergottitokat (az eredetiben: HDS, MDS, SDS: highly/moderately/ slightly depleted shergottites) Az E-shergottitok közé tartozik pl. a QUE94201, a K-shergottitok közé tartozik pl. ALHA77005, a Gy-shergottitok közé tartozik a Shergotti és a Zagami. (A Gy-shergottitok azonban leszámaztathatók az E-shergottitokból úgy is, hogy a fölfelé tartó láva a kéregben nagy ritkaföldfém tartalmú kéregösszetevő komponenszt asszimilált, olvasztott magába.

A magma parciális kiolvadása, majd az útja és lehűlése során bekövetkező differenciálódási folyamatot jól tükrözi a létrejött kőzetnek és a benne lévő ásványoknak a ritkaföldfém (RFF) tartalma (40. ábra). Ilyen módszerrel ismerték föl a földi kőzetekben is a peridotitos köpenyből a bazaltot leszámazató parciális olvadási folyamatokat. A parciális olvadás során ugyanis a RFF-tartalom a korai kiolvadó fázisban halmozódik föl. (Erről részletesebben Bérczi Sz. Kristályoktól bolygótestekig c. könyv 3.3 és 3.4-es fejezetében olvashatunk).

A nakhlitok

A nakhlitok főleg monoklin piroxénből álló kumulátos kőzetek. Kisebb részben olivin és más ásványok is előfordulnak benne. A nakhlitok nagyméretű magmatesten belüli kristályosodás során jöttek létre. A már létrejött piroxén ásványok, a magmatestnél nagyobb sűrűségük miatt, lassan ülepedtek és a magmatest aljára süllyedtek, ahol egymáson megtámaszkodtak.

Az így létrejött kőzetszövet a kumulátos szövet. Összetételében is és szövetét tekintve is nagyon hasonlít a nakhlitokra a földi Theoláva (Theo's Flow) Kanadában (Treiman és munkatársai, 1996). A magmás kristályosodási és szétválási folyamatok során a Theo-lávatest 120 méter vastag összletében három nagy kőzettípus réteg különült el. Ezek szöveve is különbözik. Felülről lefelé haladva, egy felső 20 méteres breccsás fedő alatt a következő rétegek helyezkednek el a Theo-lávatestben (41. ábra): gabbró, mintegy 35 méteres vastagságban, alatta mintegy 50 méteres vastagságban piroxenit és legalul peridotit mintegy 10-12 méteres vastagságú rétegben (Friedman Lentz és munkatársai, 1998).



41. ábra. A földi Theo-lávatest rétegződése

A Mikouchi-modell a nakhlitok kialakulásáról

A Theo-lávatest ismeretében, több nakhlitmintá összehasonlító vizsgálatával Mikouchi japán kutató modellt alkotott arról a geológiai környezetről, ahonnan a nakhlitok származhatnak (42. ábra). A nakhlitok szövetében a kumulátos szövetet alkotó, sajátalakú piroxének között olivin kristályok, valamint a kőzetolvadékból kristályosodott földpát található. Mikouchi annak alapján, hogy az olvadék alá süllyedő ásványok között kevesebb a maradék kőzetolvadék, míg az olvadákoszlop felsőbb részein lazábban helyezkednek el a támaszkodó piroxének, mélységi sorba tudta rendezni a nakhlitokat.

Egy nakhlitos lávaoszlop magassági „emeletei” szerinti sorozatban az oszlop tetején helyezhető el a 2005-ben legújabb nakhlit, a MIL03346. Lefelé haladva az NWA817 következik, még lejjebb a Yamato-000593, majd a Governador Valaderes és a Nakhla helyezkedik el. A hűlő lávaoszlop legmélyebb pontjáról származhat a Lafayette, mert ebben illeszkednek legtömöbben a kumulátos piroxének (Mikouchi és munkatársai, 2003). A felsorolt 6 nakhlitot úgy is szemléltethetjük tehát, mint amelyek egy 30 méteres vastagságú lávaoszlopba mélyített fúrásnak egyes szakaszait képviselik. E sorbarendezhető-

42. ábra. Egy nakhlitos lávatest rétegződése. A hűlő lávaoszlopban elhelyezkedő nakhlitok (kumulátos piroxének) Mikouchi és m. társai, (2003) modelljében. A felsorolt hat nakhlit lefelé haladva egyre tömöttebb kumulátos szövetet mutat: MIL03346, NWA817, Yamato-000593, Governador Valaderes, Nakhla, Lafayette. (Itt is fekvő helyzetben ábrázoltuk a magmatestet, felső része a lap bal szélére esik. Jobb oldalon van a magmatest alja.) A marsi magmatest rétegződését ezen az oldalon láthatjuk a minták mélységi sorrendjét is követhetjük.

ség megerősíti azt a feltételezést, hogy egyetlen becsapódási esemény szakíthatta ki marsi forráshelyükről a nakhlitokat. Harvey és m. társai ezt a forráshelyet a Syrtis Majorban feltételezik a TES és THEMIS szinképvizsgálatok alapján.

Chassignitok

A harmadik betűt az SNC-ben a chassignitek adják. Eddig két ilyen meteoritot sikerült begyűjteni. Olivinből állnak, nevük tehát dunit a földi nómenklatúrában. Valószínű, hogy a nagy vastagságú magmatestekbe idővel beilleszthetők lesznek. Dunit – olivinben földúsult réteg a Theo-folyásban is található.

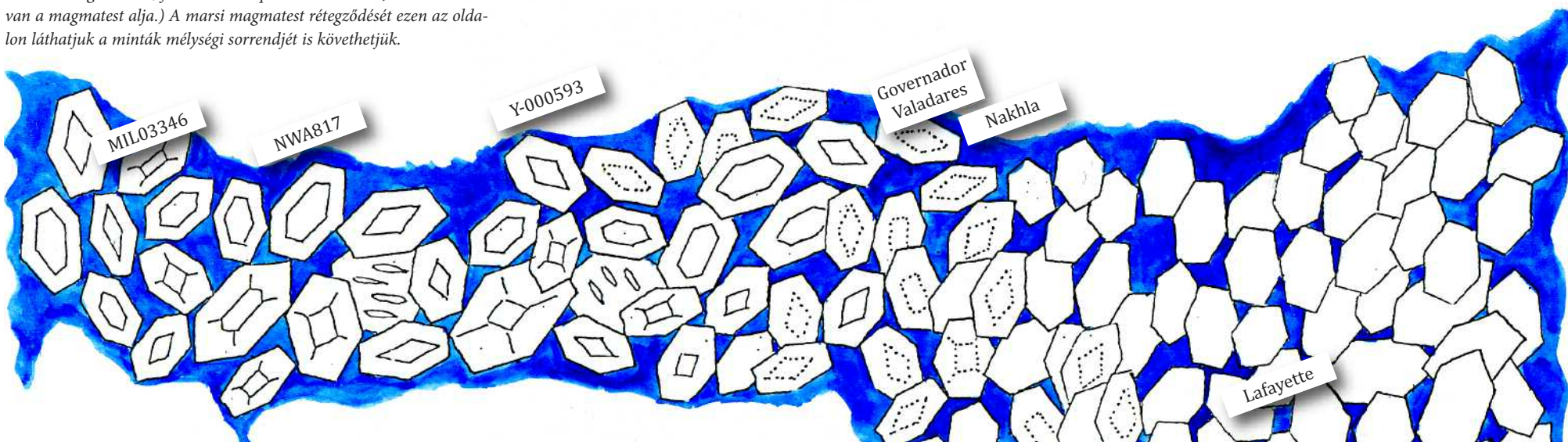
Összegzés a marsi meteoritekről

A Marsról érkezett meteoritek azt tanúsítják, hogy érdekes és sok szempontból a földihez hasonló magmás folyamatok hoztak létre kőzeteket a Marson. De nagyon kevés helyszínről vannak még kőzetmintáink és a főbb marsi meteoritek nem fedik le a spektroszkópiái és a felszíni rover mérésekkel megismert kőzetípusokat sem. Ezért a marsi meteoritek csak bevezető jellegű kőzettani ismeretekhez juttattak bennünket a mars felszíni kőzetéről. A mállási történetet már a Mars felszínén végzett anyagvizsgálatok.

A legújabb eredmények a marsfelszín kutatásában

A marsi meteoritek mellett ma már űrszondák raja gyűjti az adatokat a Mars kőzeteiről. Amíg a földre hullott marsi meteoritek csak kevés nyomait mutatták a mállásnak, a felszínen dolgozó űrszondák (Spirit és Opportunity, majd a Phoenix)

éppen a ma is jelenlévő mállási hatásokra mutattak egyre több mérési eredményt. Hasonló nyomokat a keringő űrszondák spektrométerei is jeleztek (legutóbb az MRO az opált, ami vizes átalakulás terméke). A legfrissebb eredmények (karbonát, agyagásvány, felszín alatti jég, a Phoenix leszállási helyén; jarozit és más szulfátok, hematit, az Opportunity leszállási helyén) arra utalnak, hogy a Mars múltjában a magmás szakaszt mállási jelenségek követték a felszínen. Ezek egyrészt a korai Mars idején (a rétegtanban a noachi ill. a geokémiai tagolásban a philloci időszak) vizes mállási formájuk lehettek, később az enyhén savas kémhatású és már hideg felszíni és felszínközeli vizekben keletkezett szulfátok képződése vette át a vezető szerepet a mállásban (hesperiai ill. theiiki). Az opál fölfedezése és nagy kiterjedése arra utal, hogy ez a mállási forma átnyúlt a harmadik nagy marsi időszakba, az amazonia (ill. sideriki), amikor már főleg oxidációs és redukációs változások történtek a felszíni kőzetekkel. A kémiai vizsgálatok azt jelentik, hogy a mállás okát már nem csak a morfológia szintjén figyelhetjük meg, (folyó)medrek (völgyek) formájában, a feltételezett kiszáradt északi óceán partvonalaiban, hanem nagy korszakok kémiai változásairól is fokozatosan képet alkothatunk. Mindkét mérési adatgyűjtés a víz jelentőségét hangsúlyozza, amely kezdetben még magasabb hőmérsékleten, később már, az egyre hidegebbé váló marsi viszonyok között, fogyó mennyisége folytán besűrűsödő sókiválásokkal is, folyamatosan okozott mállást a felszíni kőzeteken.



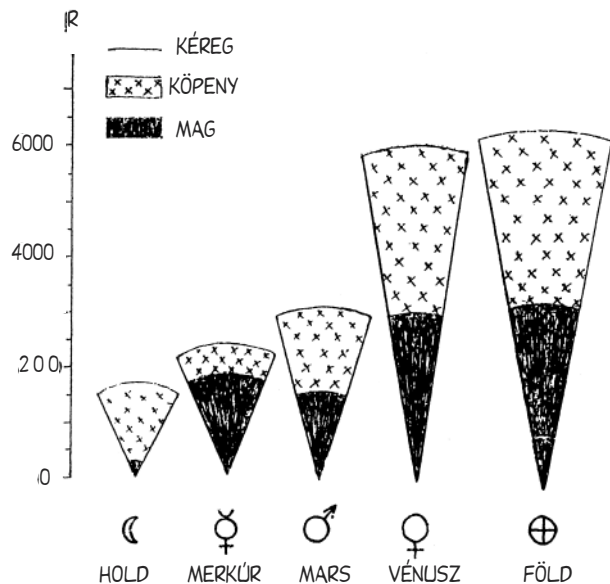
SZILÁRD FELSZÍNŰ ÉGITESTEK HŐTÖRTÉNETE A NAPRENDSZERBEN: MEGOLVADÁSOK KÉT KORSZAKBAN

A Naprendszer szilárd anyagai legalább két nagy fázisban jöttek létre anyagukat tekintve:

1. kristályos anyagok formájában túlélték a Nappá összehúzódó köd fölmelegedését, vagy kicsapódtak a szoláris ködből. Mindkét forma tartósan egyensúlyban volt a szoláris köddel.

2. égitestekké halmozódtak ütközések során: előbb planetézimálokká, majd bolygótestekké.

A Nap körüli szoláris ködből a Larimer-Grossmann és a Lewis-Barshay sorozatok szerinti ásványövek képződtek. A kristályos anyagok létrejöttére és eseményeire vonatkoznak az ismert CAI és a kondrum adatok (a CAI-k és a kondrumok folyamatos sort képeznek ásványtani szempontból). A kristályos anyagokból azok a porcsomók, amelyek a Nap T-Tauri típusú kitéréseinél kitérés irányba estek, megolvadtak. A napkitörések, és más mechanizmusok hozták létre a kondrumokat, cseppnyi méretű olvadások formájában. A kondrumok gömb alakja a korai fölhevítések eredménye: ettől lettek gömbölyűek. Aztán lehültek.



44. ábra. A Föld-típusú bolygók és a Hold metszete, vas-maggal és köpennyel

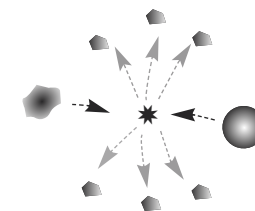
Később a kivált anyagcsomók égitestekbe halmozódtak. Ekkor kezdődik a második korszak. A második fölmelegedés égitestméretű esemény. A kisbolygón belüli radioaktív fűtés hatására a kis égitestek fölmelegedtek,

különböző öveik eltérő hőmérsékletig jutottak el. Ezt legjobban az öves kisbolygó modell mutatja. Legfelül találjuk a legerősebben fölhevült állapotot és ennek nyomait a kondritos közetcsövet metamorfózisában. A legnagyobb méretű kisbolygók differenciálódtak is: vas magra és olivin-piroxénes köpenyre. Felszínükre ömlött a bazalt, amikből leszakadt darabok a bazaltos akondritok.

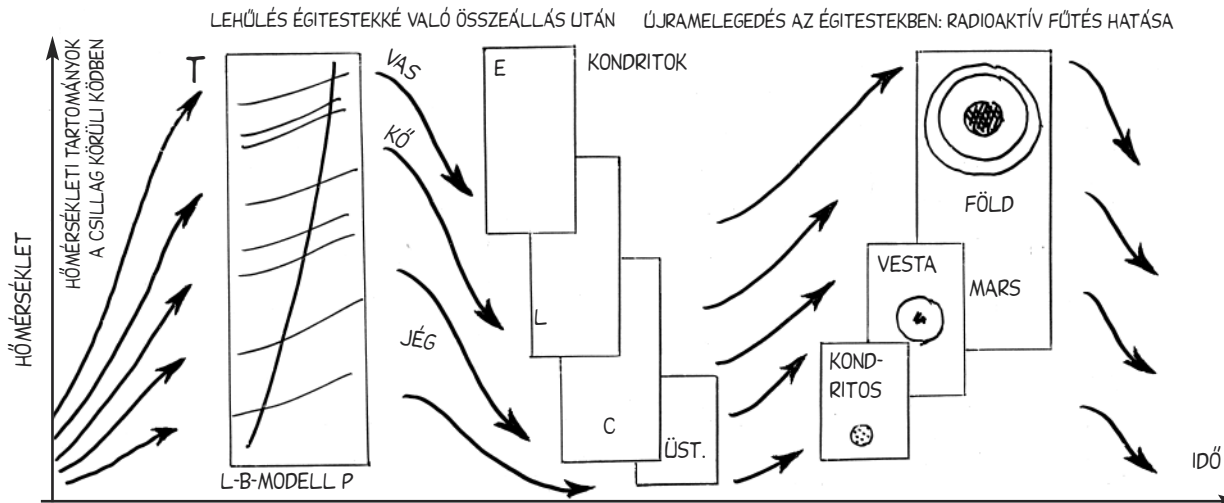
A fölmelegedés mértéke az égitest méretétől függ. A legnagyobb méretű kőzetbolygókban az égitest belső melege máig fönntart konvekciós áramlást, bár a Föld esetében ehhez a Hold is hozzájárul. De élénk a belső erők tevékenysége a Vénuszon is. A kisebb méretű Marson és Merkúron, ill. a még kisebb Holdon az eseményeknek ez a szakasza már megszűnt, igen vastag a „fagyott” kéreg, esetleges olvadt rétegek igen nagy mélységben lehetnek (például a Holdon 1200 kilométeres mélységben).

ÉGITESTTÉ ÖSSZE NEM ÁLLT ANYAG (4.5 MILLIÁRD ÉVE)

ÜTKÖZŐ ÉS SZÉTTÖRŐ KIS ÉGITESTEK



45. ábra. (jobbra és fent): meteoritek lehetséges életútja

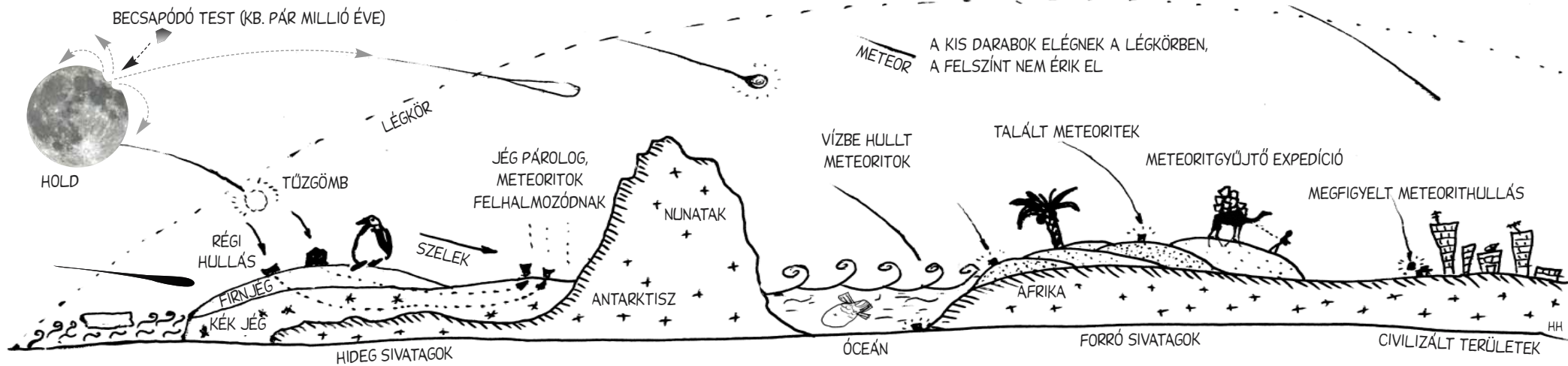


43. ábra. A Nap körüli anyagok fölmelegedése, majd újramelegedése az égitestekben

FÖLDI, HOLDI ÉS METEORIT KÖZETMINTÁK MUTATÓJA

ALHA=Allan Hills; Y= Yamato. A számok utáni betűk a hivatkozás típusára utalnak: o=oldal (a szövegben), á=ábra (rajz), f=fotó (vékonycsiszolat).
Félkövérrel a meteoritok, *kurzíválva* a helynevek szerepelnek.

12002 2o 29á 26o	ALHA 77219 2f	Mócs 33f	Y74355 20f
28o 38f	ALHA 77233 16f	Nakhla 33o	Y74442 24f
12005 31á 27o 40f	ALHA 77256 6f	NWA 1068 31o	Y74450 9f
14305 27o 34á 44f	ALHA 77257 14á 4f	NWA 817 33o	Y74662 28f
15299 46f	ALHA 78109 25f	Nyírábrány 34f	Y75011 18á
60025 25o 26á 27á 41f	ALHA 78113 3f	QUE94201 32o	Y75258 26f
65015 27o 45f	ALHA 81005 29o	Ries-kráter 55f 56f	Y75300 10á
68501 28o 47f	ALHA 84001 31o, 32o	57f	Y790957 21f
70017 2o 30á 27o 32á 28o 39f	ASUKA 881757 12f	Szarvaskő 52f	Y791072 19á
70181 28o 48f	Dhofar 025 29o	Szentbékállá 50f	Y791076 12á
72275 33á 27o 43f	Gov. Valaderes 33o	Szilvaskő 53f	Y791195 8f
74220 28á 26o 37f	Hawaii 54f	Y000593 33o	Y791428 15f
78235 26o 42f	Kaba 35f 36f	Y691 14f	Y791717 29f
Abitibi belt 49f	Kalahari 008/009 29o	Y7308 7f	Y793169 17á
ALHA 769 22f	Knyahinya 32f	Y74014 18f	Y794046 13f
ALHA 77005 10f 58f 59f 60f	Lafayette 33o	Y74036 9á	Y82162 27f
ALHA 77005 31o 32o	Mezőmadaras 31f	Y740448 23f	Y8451 13á 1f
	Mien Ramső 51f	Y74079 17f	Y86032 11f
	MIL03346 33o	Y74097 5f	Y86751 30f
		Y74191 19f	



IRODALOM

Bérczi Sz. (1978): Planetológia. Egyetemi jegyzet, J3-1154. Tankönyvkiadó, Budapest

Bérczi Sz. (1991): Kristályoktól Bolygótestekig. (210 old.) Akadémiai Kiadó, Budapest

Bérczi Sz., Holba Á., Lukács B. (1995): Evolution of Chondritic Parent Bodies I.: Correlation Among Ferrous Components. *Acta Mineralogica et Petrographica*, Szeged, XXXVI. 143-152.

Bérczi Sz., Holba Á., Lukács B. (1995): Thermal Transformations in the Meteorites' Parent Bodies. 20th NIPR Symp. Antarctic Meteorites, Tokyo, p. 26-28.

Bérczi Sz., Lukács B. (1995): A Comparison Among Chondrite Compositions. 20th NIPR Symp. Antarctic Meteorites, Tokyo, p. 30

Bérczi Sz., Holba Á., Lukács B. (1996): On discriminating chondrites on the basis of statistical analysis of iron-bearing compounds: NIPR Antarctic samples. 21th NIPR Symp. Antarctic Meteorites, Tokyo, NIPR, p. 17-19.

Bérczi Sz., Lukács B. (1997): Compositional trends in Fe and Mg contents of chondrites. 22th Symp. Antarctic Meteorites, Tokyo, NIPR, p. 6.

Bérczi Sz., Lukács B., Holba Á., Kiss A., Papp É. (1998): From FeO Reduction to Percolation and Outflow of Iron: Thermal Evolution of Chondrite Parent Bodies. *Acta Mineralogica et Petrographica*, Szeged, XXXIX. 87-105.

Bérczi Sz., Lukács B. (1998): Point of Inflection between E and H chondrites. 23rd NIPR Symposium Antarctic Meteorites, Tokyo, p. 4-6.

Bérczi Sz., Gál-Sólymos K., Holba Á., Lukács B., Martinás K. (1999): On the Thermodynamics of Meteorites and Parent Bodies II: From Chondrites Through the Primitive Achondrite Varieties (Stage A and Stage B) to the Basaltic Achondrites. *Acta Mineralogica et Petrographica*, Szeged, XL. 175-198.

Bérczi Sz., Holba Á., Lukács B. (1999): On the Topology of the Urey-Craig Field, I. In *Lunar and Planetary Science XXX*, Abstract #1014, Lunar and Planetary Institute, Houston (CD-ROM).

Bérczi Sz., Lukács B. (1999): Thermal/Aqueous (2): Competition to Obscure Chondrules in the Van Schmus-Wood Sequence, on a New Scheme. In *Lunar and Planetary Science XXX*, Abstract #1275, Lunar and Planetary Institute, Houston (CD-ROM).

Bérczi Sz. (2000): Holdkőzetek, meteoritok. Kis atlasz a Naprendszeről (1). ELTE TTK KAVÜCS, UNICONSTANT

Bérczi Sz., Hargitai H., Kereszturi Á., Sik A. (2001): Bolygótestek atlasza. Kis atlasz a Naprendszeről (2). ELTE TTK KAVÜCS, UNICONSTANT, Budapest, Püspökladány;

Bérczi Sz., Holba Á., Lukács B. (1999): On the Thermodynamics of Meteorites and Parent Bodies II: Portales Valley and the Borderland between Chondrites and Achondrites. KFKI-1999-01/C, Budapest

Bérczi Sz., Gál-Sólymos K., Lukács B., Martinás K. (1999): Measurements and theoretical studies on the ALHA 77257,77-4 ureilite: igneous/primitive dichotomy in its mineralogy and chemistry, paradoxes and solutions in its thermal history. 24th NIPR Symposium Antarctic Meteorites, Tokyo, 6.

Bérczi Sz., Holba Á., Lukács B. (1999): Splitting of the two Wiik lines in the Urey-Craig field: C-s are related to H-s like as LL-s are related to L-s. (Statistical Analyses of the NIPR dataset: VII). 24th NIPR Symposium Antarctic Meteorites, Tokyo, p. 9-11.

Bogard, D. D.; Johnson, P. (1983): Martian gases in an Antarctic meteorite? *Science*, 221, Aug. 12, 651-654;

Christensen, P. R.; McSween, H. Y., Jr. et al (2005): The Igneous Diversity of Mars: Evidence for Magmatic Evolution Analogous to Earth. 36th LPSC, #1273; LPI, Houston,

Chladni, E. (1794): Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen

Friedman, R. C.; Taylor, G. J.; Treiman, A. H. (1998): Nakhilites and Theo's Flow: Formation of Extrusive Pyroxenites. 29th LPSC, #1190; LPI, Houston, CD-ROM;

Hargitai H., Császár G., Bérczi Sz., Kereszturi Á. (2008): Földön kívüli égitestek geológiai és rétegtani tagolása és nevezéktana *Földtani Közöny* 138/4, 445-468.

Harvey, R. P.; Hamilton, V. E. (2005): Syrtis Major as the Source Region of the Nakhilite/Chassigny Group of Martian Meteorites: Implications for the Geological History of Mars. 36th LPSC, #1019;

Haskin, C.A. et al (2005): Water alteration of rocks and soils on Mars at the Spirit rover site in Gusev crater. *Nature*, 436, 7047, 66-69;

Head J (2001): Lunar meteorite source crater size: Constraints from impact simulations (abstract). LPSC XXXII, #1768, LPI, Houston.

Kargel, J. S. (2005): Aqueous Chemistry, Physical Chemistry, and Sedimentology of Rocks at the Mars Rover Landing Sites. 36th LPSC, #2149; LPI, Houston, CD-ROM;

King, P. L.; Lescinsky, D. T.; Nesbitt, H. W. (2005): Comparison of Predicted Salt Precipitation Sequences with Mars Exploration Rover Data. 36th LPSC, #2300; LPI, Houston, CD;

Kinman, W. S.; Neal, C. R. (2005): Petrology of Nakhilite MIL 03346. 36th LPSC, #1660; LPI, Houston, CD-ROM;

Lentz, R. C. Friedman; Taylor, G. J.; Treiman, A. H. (1999):

Formation of a martian pyroxenite: A comparative study of the nakhilite meteorites and Theo's Flow. *Meteoritics & Planetary Science*, 34, no. 6, pp. 919-932;

Lukács B., Bérczi Sz. (1996): Competition of C and H₂O for Fe in E, H, and C chondrites. 21th Symp. Antarctic Meteorites, Tokyo, NIPR, p. 90-92.

Lukács B. Bérczi Sz. (1997): Statistical Analysis of NIPR Meteorite Compositions, II.: Comparison of Sequences of Differentiated Rocks from an Asteroidal Sized Body and Earth. 22th Symp. Antarctic Meteorites, Tokyo, NIPR, p. 94.

Lukács B., Holba Á., Bérczi Sz. (1999): Gradistic vs. Cladistic Views in the Classification of Chondrites: The (L,H) Dichotomy and the Missing L/LL Precursors. (NIPR Statistics VI.) In *Lunar and Planetary Science XXX*, Abstract #1337, Lunar and Planetary Institute, Houston (CD-ROM).

Lux, G., Keil, K., Taylor, G.J. (1980): Metamorphism of the H-group chondrites: implications from compositional and textural trends in chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44, 841-855.

Madden, M.; Bodnar, R.; Rimstidt J. (2004): Jarosite as an indicator of water-limited chemical weathering on Mars *Nature*, 431, 821-823;

McCooy, T. J., Keil, K., Muenow, D. W., Wilson, L. (1997): Partial melting and melt migration in the acapulcoite-lodranite parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 639-650.

McKay, G.; Schwan, C. S. (2005): Mineralogy and Petrology of New Antarctic Nakhilite MIL 03346. 36th LPSC, #2351; Houston;

McSween, H. Y., Jr.; Milam, K. A. (2005): Comparison of Olivine-rich Martian Basalts and Olivine-Phyric Shergottites. 36th LPSC, #1202; LPI, Houston, CD-ROM;

Mikouchi, T. et al. (2003): Mineralogical Comparison of Y000593 with Other Nakhilites: Implications for Relative Burial Depths of Nakhilites. 34th LPSC, #1883; LPI, Houston, CD-ROM;

Mikouchi, T.; Monkawa, A.; Koizumi, E.; Chokai, J.; Miyamoto, M. (2005): MIL03346 Nakhilite and NWA2737 "Diderot" Chassignite: Two New Martian Cumulate Rocks from Hot and Cold Deserts. 36th LPSC, #1944; LPI Houston, CD-ROM

Ming, D. W. et al. (2005): Geochemical and Mineralogical Indicators for Aqueous Processes on the West Spur of the Columbia Hills in Gusev Crater. 36th LPSC, #2125; LPI;

Molnar, K., Mika, J. (1997) Climate as a changing component of landscape: recent evidence and projections for Hungary. *Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd. 110*, pp. 185-195.

Monders, A. G.; Médard, E.; Grove, T. L. (2005): Primary Martian Basalts at Gusev Crater: Experimental Constraints. 36th LPSC, #2069; LPI, Houston, CD-ROM;

Rose, G. (1864): Beschreibung und Eintheilung der Meteoriten auf Grund der Sammlung im mineralogischen Museum zu Berlin, 138 pp.

Rost, D.; Vicenzi, E.P.; Pauli, E.C. (2005): Halite, Sulfate, and Clay Assemblages in the Nakhla Martian Meteorite. 36th LPSC, #2306;

Rutherford, M. J.; Calvin, C.; Nicholis, M.; McCanta, M. C. (2005): Petrology and Melt Compositions in Nakhilite MIL 00346. 36th LPSC, #2233; LPI, Houston, CD-ROM;

Stopar, J. D.; Lawrence, S. J.; Lentz, R. C. F.; Taylor, G. J. (2005): Preliminary Analysis of Nakhilite MIL 03346, with a Focus on Secondary Alteration. 36th LPSC, #1547; LPI, Houston, CD-ROM;

Sztróky K. I., Tolnay V., Földvárini Vogl M. (1961): Mineralogical and chemical properties of the carbonaceous meteorite from Kaba. *Acta Geol. Hung.* 7, 57-103.

Takeda H., Mori H., (1985): The diogenite-eucrite links and the crystallization history of a crust of their parent body. *Proc. Lunar Planetary Science Conf. 15th, Part 2.; Journal of Geophysical Research*, 90, C636-C648.

Treiman, A. H.; Norman, M.; Mittlefehldt, D.; Crisp, J. (1996): 'Nakhilites' on Earth: Chemistry of Clinopyroxenites from Theo's Flow, Ontario, Canada. 27th LPSC, 1341, LPI Houston, CD-ROM

Urey, H.C., Craig, H., (1953): The composition of the stone meteorites and the origin of the meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4, 36-82.

Vaniman, D. T.; D. L. Bish, S. J. Chipera, C. I. Fialips, J. W. Carey, W. C. Feldman (2004): Magnesium sulphate salts and the history of water on Mars. *Nature*, 431, 663-665;

Van Schmus, W. R., Wood, J. A., (1967): A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31, 747-765.

Warren, P. H.; Bridges, J. C. (2005): Geochemical Subclassification of Shergottites and the Crustal Assimilation Model. 36th LPSC, #2098; LPI, Houston, CD-ROM;

Wasson J. T. (1974): Meteorites. Springer, Berlin.

Wilhelms D. 1987: Geologic History of the Moon, US Geological Survey Professional Paper 1348, <http://ser.sese.asu.edu/GHM/>

Yanai K., Kojima H., Haramura H. (1995): Catalog of Antarctic Meteorites. NIPR, Tokyo

Yen, A. S. et al. (2005): Subsurface Weathering of Rocks and Soils at Gusev Crater. 36th LPSC, #1571; LPI, Houston, CD-ROM;

Yen, A. S. et al. (2005): An integrated view of the chemistry and mineralogy of martian soils. *Nature*, 436, 7047, pp. 49-54

