

A NAPRENDSZER ÉGITESTJEINEK FEJLŐDÉSE

A kisbolygók

Bérczi Szaniszló

ELTE TTK Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék

Az anyag fejlődéstörténetét mozaikdarabjaiból illesztjük össze. A fizika elsősorban a forró Univerzumtól a galaxisokon és csillagokon átívelő szakaszt, valamint a velük párhuzamosan zajló atommagképződést kutatja. A Naprendszer anyagfejlődését az elmúlt évszázadban a meteoritok, később a holdközetek és marsi eredetű meteoritok vizsgálata, valamint a bolygótestek űrszondás kutatásai vitték a figyelem középpontjába. De a bolygók megismerése a Földtest felszínének és anyagának kutatásával kezdődött. A földtan a felszínen található anyagi rendszereket, a kőzettesteket vizsgálta, rendszerezte, eredetüket és egymáshoz való viszonyukat megállapította és rendszerbe foglalta. A születő földtudomány az élővilág kutatóiban jó szövetségesre lelt, és a földtan és a biológia szövetségében született meg a földtan egyik fontos történeti ága, a biosztratiográfia. A földtan fosszília-sorozatokat rekonstruált az egymásra települt rétegekben, és távoli kőzettesteket is össze tudott egyetlen nagy kőzettestté kapcsolni (korreláció a földtanban). A biológia anyagfejlődés-történeti epizódokra tett szert a fokozatosan változó fossziliákban, és rekonstruálni tudta a biológiai evolúció szakaszait (relatív sorrendekkel). A történeti képet pontosítani lehetett egy újabb szövetséges tudományág, a fizika bevonásával. A radioaktivitás volt az a jelenségkör, amely a fizikát a földtan szövetségesévé tette. Az atomok magjára is lehetett alkalmazni azt az elvet, a zárványok bezárásának elvét, amelyet már a biológiai alkalmazásnál is fölhasználtak: „Egy kőzettest, amely be van zárva egy másik kőzettestbe (úgy, hogy az teljesen beágyazza, körbefogja a bezárt testet), mindig egykorú, vagy idősebb a bezárt kőzettestnél.” A zárvány a radioaktív sugárzás esetén a sokféle sugárzó atommag, ezek sokasága – a lebomlási sorok –, amelyek szintén benne maradnak a kőzetekben. A lebomlási sorok megismerése abszolút kormeghatározássá fejlődött, miközben a forró Univerzum modelljét is megalkották a 20. század ötvenes éveiben.

A Naprendszer űrszondákkal végzett kutatása a Föld és a Hold vizsgálatával indult. A Hold anyagainak földtérképezésére ismét a földtan módszereit alkalmazták, és megalkották a Hold rétegtanát (*Shoemaker, Wilhelms, Hackman*, U. S. Geological Survey). Kőzettesteket azonosítottak, melyeket nagy holdi események hoztak létre. Ebben a munkában nem lehetett segítségükre fosszília, ezért az egymást át nem fedő rétegek relatív sorrendjének meghatározására (a korrelációra) a kőzettest felszínén megfigyelhető krátereket kezdték ugyanolyan „fosszília” szerepkörben alkalmazni, mint korábban a biológiai, majd azt követően a radioaktív elemekkel tették. A megszületett kráterstatisztika segítségével ma már a Naprendszer távoli égitestjein azonosított kőzetömbök korát is meg tudjuk határozni.

Nem idézhetjük föl a módszerek sokaságát, melyekkel a Föld korát és belső szerkezetét, a felszínkö-

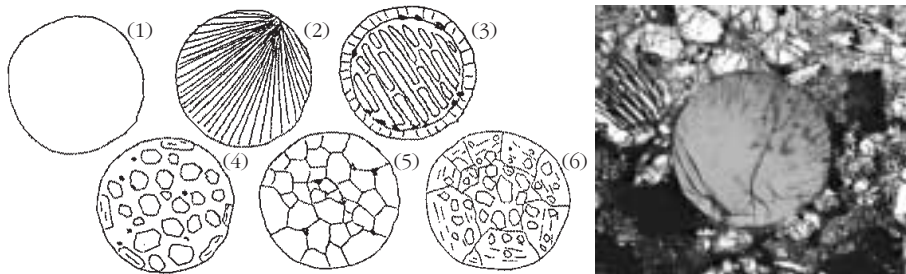
zeli nagy kéreglemezek dinamikáját rekonstruálták. Ez a munka napjainkban is zajlik. De a földtudomány naprendszer-tudománnyá történt kibontakozása (geonómia, *Szádeczky-Kardoss Elemér*) azért is szép és példaértékű, mert vizsgálati stratégiákat is átörökített. Egyik ilyen tudományfilozófiai program (paradigma) az égi és a földi jelenségek összekapcsolásának elve. Korábban a naptár, a geometria égi és földi alkalmazása, a mozgástörvény fölismerése, a színképelemzés is ilyen programok voltak. A Naprendszer kutatása megfiatalította ezt a programot. A földtudomány stratégiai szerkezetében benne van ez a kettős hierarchiaszintű vizsgálat. A földtudományban a testünk mérete alatti és fölötti anyagszerveződési szinteket egyszerűen kutatjuk. Földtérképezzük a kőzettesteket, majd mintát veszünk belőlük és kőzettani, mikroszkópi, s ma már számos más módszerrel is vizsgáljuk az anyagok állapotváltozásait, valamint összevetjük a kőzettestek vizsgálatából levont következtetésekkel. Így járt el a földtan a Föld felszínén és a felszín közelében található kőzettestek vizsgálata során és járhatunk el más égitestek esetén is.

A Naprendszer bolygói és holdjai esetében jobbára csak az egyik hierarchiaszint vizsgálata vált lehetővé: a felszíni rétegek azonosítására nyílt mód a fényképfelvételeken. Ma az űrkutatás egyik nagy kihívása az, hogy egyre szélesebb körben tegye lehetővé a másik fontos vizsgálati szint, a kőzetminták vizsgálatát is. A Hold esetében ez részben már megvalósult. Más égitestek csoportjairól a természeti jelenségek egy másik köréből kaptunk segítséget. Ez pedig a földre hullott meteoritok anyaga.

Meteoritok a kis égitestekről: a kisbolygók fejlődéstörténete

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

A meteoritokat ma három nagy anyag típusba sorolva csoportosítják: kő-, kő-vas- és vasmeteoritokként. Ezek közül a kőmeteoritok két alcsoportra oszlanak: kondritokra és akondritokra. Az akondritokban már nincsenek kondriumok. Hogy hogyan lesznek kondritokból akondritok, izgalmas anyagfejlődés-történeti kérdés és ez a meteoritika tudományának egyik fő területe. Mi is most e kondritos meteoritok átalakulásait tanulmányozzuk, dióhéjban.



1. ábra. A kondrum szemcsék szövete többféle lehet, ahogyan ezt a mikroszkópban a vékonycsiszolatokon megfigyelhetjük (bal oldali rajz). Egy üveges kriptokristályos kondrum a szövetben (jobbra).

égitestzőna, amelyből a szenes kondrit meteoritanyaga leszáradt, sohasem melegeedett fel eléggé (szenes kondritok, 3-as szövettípusúnak osztályozott kondritok). Ha fölmelegeedett volna, a kondritos anyag „át-sült” volna, s kémiaiilag harmonizálódott volna a kondrumok és a mátrix szövetének ásványos anyaga. Ez nem történt meg, meteoritunk tehát

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

A meteoritok több hőtörténeti szakasz átalakulásait hordozzák anyagukban, szövetükben. Mostani vizsgálatainkban két szakaszt fogunk megkülönböztetni. Egy első fölmelegedési (és lehülési) szakaszt, amely a Naprendszer kialakulásakor zajlott le. 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 következnek be, 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 tárgyaink kisebb mennyiségben jelen lévő összetevőket is, mint például a „fehér zárványokat” (CAI), melyek a spinellhez hasonlóan nagy olvadáspontú ásványokból állnak, vagy a kondrumokat körülvevő peremeket.

A kondritos szövet sok esetben ellentmondásos szerkezetű. Míg a mátrix finomszemcsés, 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 „egyenlítődtek ki” kémiai szempontból, azt jelzi, hogy az az égitest vagy

ős, 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 meteoritokat tekintik a Naprendszer ősi kőzetanyagának.

A kondritok ásványtani osztályozása: a kondrittípusok

A kőmeteoritok ásványai leginkább a magmás kőzetek ásványaival rokoníthatók, a kondritokéi pedig a földi köpenyt alkotó ásványokkal: olivinnel 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 kondritcsoportot különítettek el: az enstatit 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, 1. ábra) kondritokat, valamint a szenes kondritokat (C), melyek később a zárójelben álló betűjeles rövidítést kapták. (Az enstatit, 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 illőelem-tartalmuk alapján. A kondritok (egyes szenes kondritok kivételével) mindig tartalmaznak fémek összetevőt, Fe–Ni-ötvetetet és vasszulfidot (FeS) is. A kondritos meteoritok 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 meteoritok vizsgálata. A szilárd felszínű égitestekre simán leszállt űrszondák mérései előtt kizárólag a meteoritok tanulmányozásával gyűjtött közettani ismereteink voltak más égitestek anyagáról. A meteoritok anyagvizsgálata tárta föl, hogy a meteoritok ásványai, szöveti alkotóelemei, ezek ásványai a Naprendszer születésének idejéből származnak. A csillagászati modellekkel összhangban ma elfogadott az a nézet, hogy a csillaggá összehúzódó

| 1. táblázat | | |
|--|--|--------------------|
| Legfontosabb ásványok sorozata a Lewis–Barshay-féle modell szerint | | |
| hőmérséklet (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 7H ₂ O | metán-hidrát |
| 65 | metán, argon kristályosodik | metánjég, argonjég |

kozmosz 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 meteoritok anyagvizsgálata során kérdezhetjük meg, hogy e folyamatnak milyen megfogható lépései maradtak fenn. A meteoritok tehát fontos láncszemek akkor, amikor az anyag fejlődéstörténeti képét 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 anyaghalmozattá álltak össze. A másik erő, a gravitáció, fokozatosan jutott szervező szerephez a bolygók fölhalmozódása és megformálása során. A kilométeres nagyságú égitestek, a planetezimálok, ütközéseikkel egyre nagyobb méretű égitestekké tömörültek, me-

| 2. táblázat | | |
|--|--|--------------------|
| A Naphoz közeli, forró tartományokban kiváló ásványok sorozata | | |
| hőmérséklet (K) | kémiai elemek | ásványok |
| 1785 | Al ₂ O ₃ | korund |
| 1647 | CaO TiO ₂ | perovszkit |
| 1625 | 2MgO Al ₂ O ₃ SiO ₂ | melilit (gehlenit) |
| 1513 | MgO Al ₂ O ₃ | spinell |
| 1471 | Fe Ni | vasnikkel |
| 1450 | CaO MgO 2SiO ₂ | diopszid |
| 1444 | 2MgO SiO ₂ | forszterit |
| 1362 | CaO Al ₂ O ₃ 2SiO ₂ | anortit |
| 1349 | MgO SiO ₂ | ensztatit |

lyek egymás pályáit egyre nagyobb mértékben befolyásolták.

A Naprendszer a Napot körülvevő anyagokból és égitestekből áll. Mind-egyik 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 lehűlt. A Naptól való távolsággal együtt változott a köd hőmérséklete, ezzel a kristályos anyagok összetétele. A legfontosabb ásványok sorozatát az 1. táblázat mutatja be a Lewis–Barshay-féle modell szerint. A kondritos meteoritok főleg ebből az ásványsorból épülnek föl.

A Naphoz közeli, forró tartományokban kiváló ásványok sorozatát *Grossman*

és *Larimer* határozta meg. Ezek jelentőségét az adja, hogy a kondritos meteoritok, kis mennyiségben, ennek a forró övnek az ásványait is tartalmazzák (2. táblázat).

Mindkét ásványsorozat tagjai közvetlenül meg is figyelhetők a meteoritokban. A Lewis–Barshay-modell – ahogy már említettük – 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 anyagaiént ismerjük (pl. a korund). A tűzálló ásványok kicsiny halmazokban gyűltek össze és rétegesen kristályosodtak egymás után. A kondritos meteoritokba beépülten találjuk őket, s ezeket a főleg kalciumból (Ca) és alumíniumból (Al) fölépülő világos színű ásványegyütteseket CAI-knak nevezték el a meteoritkutatásban (CAI = Ca-Al-Inclusions = Ca-Al-zárványok).

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 *Sztrókay Kálmán* magyar kutató mérte meg a kabai meteoritban. Röntgendiffrakciós méréseiben *Sztrókay* a fehér zárványokat spinell összetételűnek találta.

A kondrumok kialakulása

A fő közetalkotó szilikátok alkották a belső bolygók övében kiváló ásványok nagy részét. Ezek olvadáscseppeket alkottak egykor, mert a korai Nap kitörései egyes tartományokban úgy fölforrósították a por- és gázködot, hogy az addig már kialakult és összetapadt kristályok megolvadtak, majd lehűltek. A tizedmilli-

méteres–milliméteres nagyságú gömböcskékre (a kondrumokra) fokozatosan tapadt rá a körülöttük található por is. A kondrumok és a maradék poranyag összetapadással és ütközésekkel egyre nagyobb égitestekké halmozódott. A mai kondritos meteoritok azokból a kisebb méretű kondritos égitestekből származnak, amelyek nem melegek föl a Naprendszer elmúlt 4 és fél milliárd éve alatt.

A megolvadt cseppek kihűltek, kikristályosodtak. E kondrumok, mint a Nap körüli porfelhő szemcséi beépültek az apró szemcsés alapanyagú kondritos meteoritokba. A kondrumok többféle szövetűek lehetnek, ahogyan ezt a mikroszkópban a vékonycsiszolatokon megfigyelhetjük (1. ábra). 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), lemezesek (angolul barred) (3), porfirosak (4), granulárisak vagy szemcsések (5) és poikilites piroxén kondrumok (6). E kondrumok gyorsabban-lassabban lehűlt szilikátolvadék-cseppekből keletkeztek. Az olvadékok összetétele is fokozatosan változott helyről helyre a Naprendszerben. Mind a hatféle kondrum előfordul a különféle kondrittípusokban, de különböző arányban vannak bennük. A kondrittípusokat ásványtani és kémiai tulajdonságaik alapján osztályozták.

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 megszilárdulása után a kondrum 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 szilikát-csepp anyaga. Ezek úgy jöhettek létre, hogy a már megszilárdult kondrum felületére gyűlt port újabb napkitörés megolvasztotta. Egyes kondrumok a külső részeiken vagy a peremükön tartalmazzák a fémes vasnikkelcseppeket. Ez arra utal, hogy a kondrumok forogtak, ezért a nagyobb sűrűségű összetevők fokozatosan a kondrum felületére sodródtak.

A meteoritok anyaga a kisbolygókból származik

A kisbolygók reflexiós színképének a meteoritok színképével történt összehasonlításával már az 1970-es évekre átfogó kép alakult ki a csillagászatban arról, hogy a meteoritok forráshelye a kisbolygók öve. A 80-as évekre már a kisbolygóövön belül is zónákat tudtak elkülöníteni, amelyekre más és más uralkodó kisbolygószínkép-típus volt jellemző (*Gradie, Tedesco*). A kisbolygóöv külső peremén a szenes kondritok a

gyakoriak. S bár ma még nem rendelkezünk kőzettani módszerekkel elemezhető mérési anyaggal a külső Naprendszer jegeket is tartalmazó ősi anyagegyütteseiről, ezeknek a színképében már előfordulnak a vízjégre jellemző elnyelési vonalak. Ugyancsak a reflexiós színképek 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

A kis égitest fölmelegedésének első szakasza: átkristályosodás (metamorfózis)

Amikor az égitestté összeállt anyaghalmazok fejlődéstörténetét kutatjuk, akkor a meteoritokat egy másik szempontrendszer szerint kell megvizsgálnunk. 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.

A Hold 1960-as években megindult kutatása föllendítette a meteoritikat is, így 1967-re összegződött a kondritos fejlődés vizsgálatának eredménye is. *Van Schmus* és *Wood* a kondritokat szövetük és kémiai változásaik alapján átalakulási sorozatba 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, és 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 föl vitt pontok két tartományra különültek el. Ezeket a szerzők H (nagy) és L (kicsi) vastartalmú tartománynak nevezték el.

Három évvel később *Wiik* finn geokémikus tette közzé vizsgálatainak eredményét. Ő 30 kondritos meteorit összetételének nagyon pontos meghatározása alapján (több mérést maga végzett el) azt találta, hogy a H-k és az L-ek két egyenesre esnek az UCD-n. A H-k 27, az L-ek 21 súlyszázalékos összvastartalmat képviseltek. E kondritos meteoritok egy jelentős része azonban

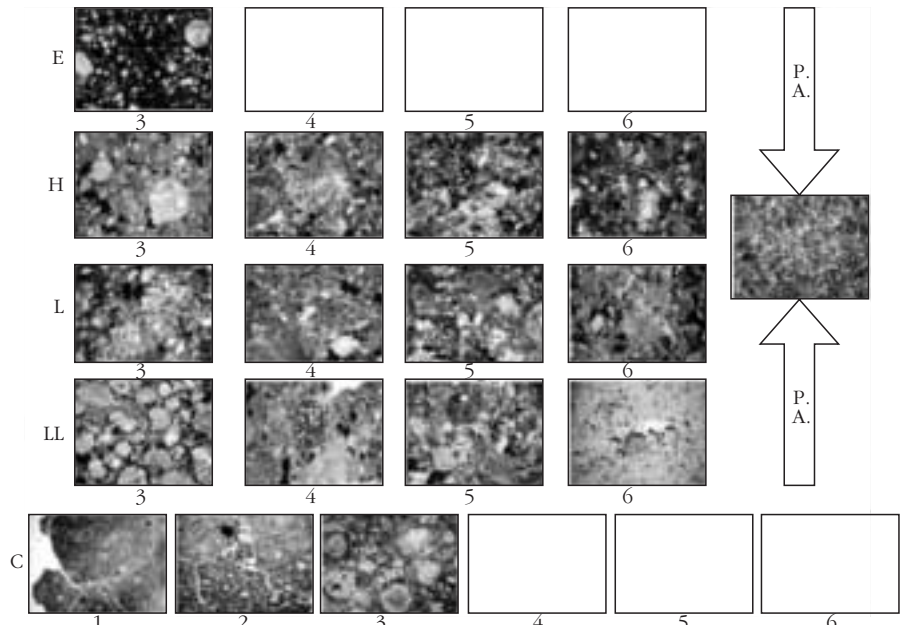
nagy széntartalmú, úgynevezett szenes kondrit volt. Wiik nem sorolta be őket a H csoportba, hanem leválasztotta őket, és a C jelű szenes kondritokat 3 rész-csoportba különítette el az illóelem-tartalom szerint. Később *Friderickson* és *Keil* az L csoporttól elkülönítette a kissé alacsonyabb öszsvastartalmú LL csoportot, és külön definiálták az E (enzstatitos piroxénű) csoportot is. Így alakult ki a kondritok ötös csoportbeosztása.

A fölmelegedés hatására lezajlott szöveti átalakulások mindegyik kondritcsoportban megfigyelhetők. Ezért az összetétel (kezdeti feltétel) szerinti osztályozás (E, H, L, LL, C csoportok) mellett a hőtörténeti fejlődési fokozatokat jelentenek (2. ábra).

A melegedés hatására történő lassú átkristályosodás (metamorfózis) során a kondritos szövet fokozatosan elmosódott körvonalúvá válnak, majd teljesen szétfoszlanak a diffúzió hatására. Ugyancsak a hőmérséklet emelkedésével fokozódó diffúzió hatására kémiai kiegyenlítődés történik az egyes ásványok kémiai összetételében, elsősorban a mátrix és az ásványok között. A leginkább tanulmányozott folyamat az olivinék és a piroxének Fe- és Mg-tartalmában történő kiegyenlítődés. A van Schmus és Wood által definiált szövettani típusok sorozatának végén a még kondritos kémiai összetételű, de a kondrumokat már nem mutató, szemcsés szövet áll.

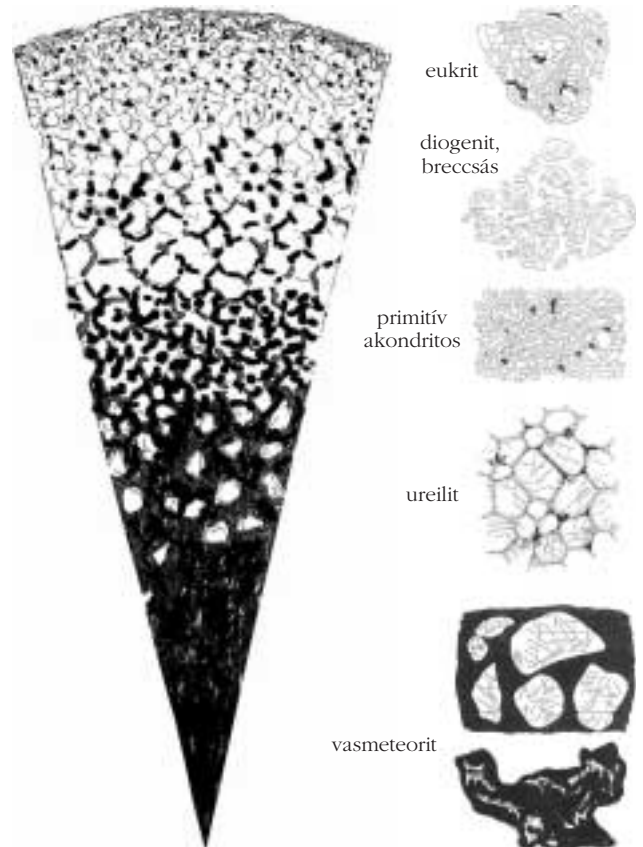
A további fölmelegedés már parciális olvadási folyamatokat indít el. Az idők során egyre több olyan – viszonylag ritka – meteoritot találtak és tanulmányoztak, amely ugyan még kondritos összetételű, de már teljesen elveszítette kondrumos szövetét. Ezeket primitív akondritoknak nevezték el. Ma ezeket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

A primitív akondritok a kondritos égítést fölmelegedésének utolsó szakaszát képviselik. Egy differenciálódás előtti, még kondritos összetételű állapotot rögzítenek. Ezekből olvadnak ki a legalacsonyabb olvadáspontú összetevők: a vas és a bazalt (3. ábra).



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

3. ábra. A kondrumok szétbomlásáig, a szövet átkristályosodásáig eljutott kondritos anyag (primitív akondrit) differenciálódni kezd. A vas- és a vasszulfid-összetevők a kis égítést mélyebb rétegei felé (pallazitok, vasmeteoritok), a nátriumban és kalciumban gazdag összetevők bazaltos parciális olvadéka a kis égítést felszíne felé (bazaltos akondritok) vándorolnak. A visszamaradó ásványtársulások a földi felsőköpenyt alkotó peridotitokhoz hasonlóak (ureilitok, lodranitok). Ezeket a meteoritokat égítetsmetzetre rendezve mutatjuk be.



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 maradékanyagként, amely a kis égitest köpenyét alkothatja. Két fontos akondrit (kondritos szövet nélküli) meteoritcsoportot találtak eddig: ezek az ureilitek és a lodranitok.

Az ureilitek 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 meteorittípusból. Eltávozott azonban egy alacsonyabb olvadáspontú és a bazaltokra jellemző összetételű komponens is belőlük. Ezért az ureilitek egy differenciálódott, eredetileg kondritos összetételű kis égitest köpenyanyagának tekinthetők.

Jellegzetes az ureilitek 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 üvegablakot látnánk szabálytalan poligonokkal kitöltve. A karbon 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 képből.

A kis égitest magja: vasmeteoritok és pallazitok

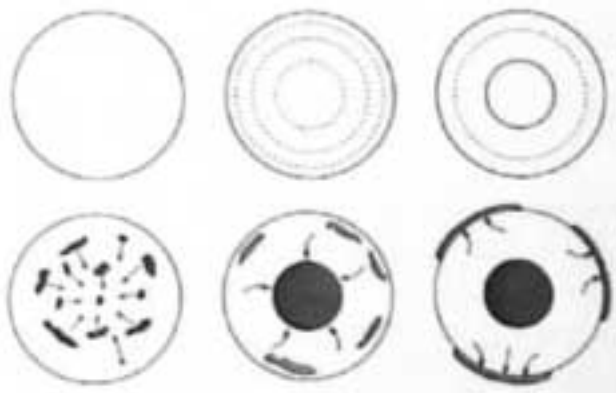
A viszonylag gyakori vasmeteoritok már korábban is arra utaltak, hogy a vas megolvadt és kifolyt az eredetileg kondritos kőzetből jó néhány kis égitesten. Ugyancsak külön meteorittípusként számon tartottak bazaltos akondritokat is, melyek a bazaltot alkotó ásványokból (piroxén és földpát) állnak, s e két típus szépen beleillik abba a folyamatsorba, amit a kondritos égitest fejlődéstörténetének 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 színekű felszínnel, ez a Vesta kisbolygó. Azonban számos kicsiny, 1–10 kilométeres méretű töredék égitest ilyen a kisbolygóövében. Ezek az átalakulási termékek is tanulmányozhatók a NIPR antarktisz 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, s ezért a beágyazott (fémmel körbevett) szilikátok jól megfigyelhetők. A szilikátásványok lehetnek lekerekítettek, máskor pedig kristálylapokkal határoltak vagy éles töréses pereműek. Metszetben az is megfigyelhető a fémes fázison, hogy kisebb-nagyobb vasszulfidtartományok 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-fázisé ezüstsötét. A fémes fázisok színelkülönbségét még inkább előhozza az étetésnek nevezett eljárás. Ennek során savval maratják meg a lecsiszolt fémes felületet.

A láthatóvá vált fémes szövetszerkezetnek a vasnikkel-fázis esetén külön nevet is adtak. *Widmannstättén-mintázat*nak nevezik első leírójának nevével. A nikkeldús fázis a gammavas, taenit (kohászati néven austenit), melynek kristályrácsát laponcentrált köbös elemi cellák alkotják. A nikkelszegény fázis az alfavas, kamacit, melynek kristályrácsát tércentrált köbös elemi cellák alkotják. Lehűlés és lassú kristályosodás során oktaéderlapok szerint elrendeződő lemezek alakjában válik ki az alfavas, peremén pedig a gammavas, s ez a mintázat jelenik meg különböző irányú termetszetekben a levágott és lecsiszolt vasmeteorit-felületeken. Minél nagyobb a nikkeltartalom, annál vékonyabbak az alfavasrétegek.

A kis égitest kérge: bazaltos akondritok

A bazaltos akondrit elnevezés néhány, a kőmeteoritok köréből származó, magmás szövetű kőzettípust jelöl. 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 kezdőbetűivel HED meteoritoknak is nevezik őket.) Ásványtani szempontból ezek a kőzetek piroxénből és földpátból állnak. A diogenitek esetében a piroxén Mg-gazdag rombos piroxén (szövete 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 sok mindenben hasonlít a földi komatiit–pikrit–modernkori tholeiites bazaltsorozatra (például a sorozat közeiben 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, amelyet 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.



4. ábra. Összefoglaló áttekintés a kondritos kis égitest fejlődéstörténetéről. A kondritok és a különféle, kondritos eredetű differenciálódott meteoritok egy kis égitest fejlődéstörténetének egymás után következő időszakában alakultak ki. A kis égitestről időrendben megrajzolt metszeteken egy hosszú anyagátalakulási eseménysor láncszemeit alkotják e kőzetek, melyekből fölvázolhatjuk a kis égitest fokozatosan kialakuló réteges szerkezetét is.

A meteoritok szövetében megfigyelhető jelenségek

A kondritok forráshelyéül szolgáló égitesteken a termikus fejlődéstörténet következő szakaszaira következtethetünk a NIPR 30 vékonycsiszolatból álló mintagyűjteményében is megfigyelhető kondritos szöveti jegek alapján:

- 1) kezdeti kondritos állapotok, ősi szövet, fölmelegedésre utaló nyomok nélkül;
- 2) a fölmelegedés megkezdődik, és ennek hatására a kondriumok 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 vasmegoldadási 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 törekszik anyagokat gyűjteni más égitestekről és a kozmikus anyagok vizsgálatához, mert az égitestekre és a kozmikus környezet anyagaira vonatkozó kutatások a leggyorsabban fejlődő vizsgálati területek közé tartoznak. E cikkben a kisbolygókról származó meteoritokat vizsgáltuk.

A meteoritokat 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.



5. ábra. Az antarktisz meteoritok kőzetgyűjtemény vékonycsiszolatai a National Institute of Polar Research (NIPR, Japán Nemzeti Sarkkutató Intézet) készlete alapján sok érdekes összehasonlító szöveti vizsgálatot végezhetünk el.

A kissé nagyobb kisbolygónak is csak néhány millió éves fölmelegedési idő állt rendelkezésére. De ezalatt olyan fejlődési állomásokon ment végig, amelyek előbb fokozatosan átalakították majd kismértékben szét is válogatták az ősi kondritos anyagegyüttest, és sűrűségük szerint övekre is tagolták (4. ábra).

A sorozat folytatásában több más fontos epizódot mutatunk majd be. Először a holdi eseményeket, amelyekről az Apollo-expedíciókon begyűjtött kőzetminták és meteoritok is rendelkezésünkre állnak. A meteoritok egy különleges csoportját alkotják a marsi eredetűek. Ezekről egy későbbi cikkben szólunk, 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 kőbolygó, a Föld komplex története koronázza meg, ahol a leg hosszabb ideig tartó és legváltozatosabb bolygófejlődési történeti szakaszt láthatjuk működni a lemeztectonika formájában.

A cikkben egy fontos anyagminta-gyűjteményre hivatkoztunk. Ezeken dolgozik űrkutató csoportunk, a Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport az ELTE TTK Fizikai Intézet Anyagfizikai Tanszékén. Ennek az anyagminta-gyűjteménynek a használata tette lehetővé a bemutatott anyagfejlődés-történeti kép kutatását, megismerését és rekonstruálását: ez a NIPR (Japán Nemzeti Sarkkutató Intézet, Tokió) Antarktisz Meteorit Vékonycsiszolat Gyűjteménye (5. ábra). Ezt a gyűjteményt többször is megkaptuk éves kölcsönzési periódusokra. Ez a mintagyűjtemény a legkönnyebben elérhető készlet ma a világon a meteoritok vizsgálatához. Ezúton is köszönet mondunk a National Institute of Polar Research Antarktisz Meteoritok Osztályának a mintakészlet kölcsönzéséért.

Irodalom

- Bérczi Sz., *Planetológia*. Egyetemi jegyzet, J3-1154, Tankönyvkiadó, Budapest, 1978.
 Bérczi Sz., *Kristályoktól bolygóttestekig*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.
 J.T. Wasson, *Meteorites*. Springer, Berlin, 1974.