

Ganymedes, az óriáshold

A Ganymedes a Jupiter és egyben a Naprendszer legnagyobb holdja: 5300 km-es átmérőjével felülmúlja a Merkúr bolygót. Hét nap alatt járja körül a Jupitert, két és félszer olyan távol, mint Holdunk a Földet. Sűrűsége 2 g/cm^3 körüli, tömegének nagyjából felét vízjég, felét pedig kőzet alkotja. Ennek ellenére felszíne nagyrészt vízjégből áll — legalábbis a felső rétegekben a víz és a kőzetanyag elkülönül egymástól. Ha kívül hatalmas jégpáncélt látunk, belül kőzet-felhalmozódásnak kell lennie valahol. Belső szerkezetéről azonban nem rendelkezünk tiszta képpel.

A Jupiterhez 1995 decemberében érkezett Galileo szonda több alkalommal is elhaladt a Ganymedes mellett. Mozgásának elemzésével a hold gravitációs terének jellegére és belső felépítésére próbáltak következtetni. A centrumban 700–800 km sugarú vasmag lehet. Ezt egy 700–1000 km vastag szilikátos kőzetköpeny borítja, majd közel 1000 km vastag jégréteg következik, amely melegebb és képlékenyebb, mint a legkülső 100–150 km-es jégpáncél (l. a hátsó borító ábráját). Régebben folyékony víz is lehetett a Ganymedes belsejében, de egyes elméletek szerint ma is van víz a felszín közelében. A hold felülete viszonylag sima, a magasságkülönbségek általában nem haladják meg az 1 km-t.

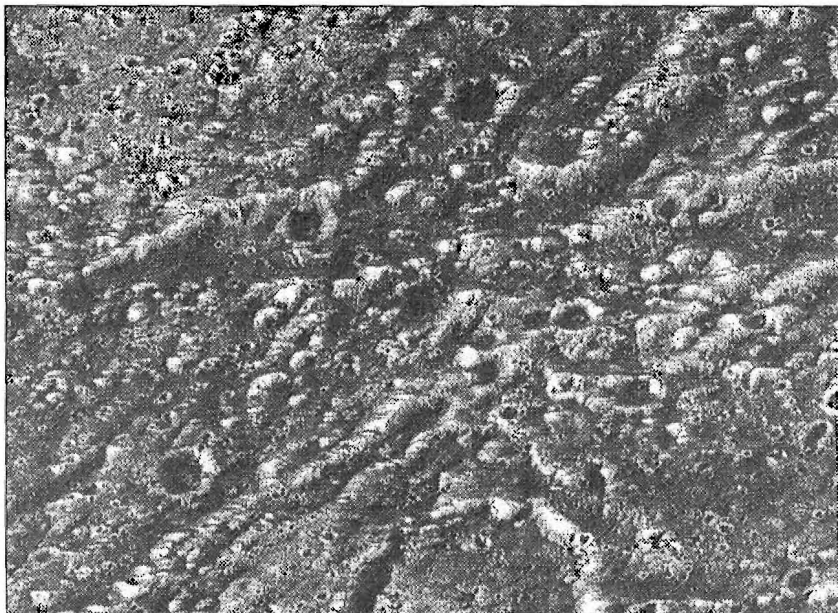
A Ganymedes, akárcsak a többi Galilei-hold, kötött tengelyforgással rendelkezik, mindig ugyanazt az oldalát fordítja a Jupiter felé. A hold pályája a gázóriás nagyenergiájú magnetoszférájában húzódik. Ez megvédi a napszél hatásaitól, de cserében a Jupiter részecskezápóra zúdul rá. A Galileo szonda mérései alapján a Ganymedes önálló mágneses térrel rendelkezik, a Jupiter magnetoszférájával való kapcsolata egyelőre nem ismert. A kötött tengelyforgás érdekes következményekkel jár. A töltött részecskékből a Ganymedes követő féltekéje, avagy a magnetoszféra e feletti térsége kap többet. Elöl haladó féltekéjén a meteorikus bombázás lesz erősebb. Ha a Ganymedes a Jupiternek a Naptól távoli oldalán halad, az óriásbolygó és a hold keringési sebessége összeadódik. Ellenben amikor a Nap felőli oldalon járja útját, a két mozgás egymás ellen hat, és csökken az eredő sebesség. Így a Naphoz és a bolygóközi tér szemcséihez képest hol gyorsabban, hol lassabban halad a Ganymedes — a két féltekét más-más meteoritfluxus éri.

Az óriáshold — akárcsak belső szomszédja, az Europa — ritka oxigénléggkörrel rendelkezik. Erre először földi távcsöves megfigyelések utaltak, de később a Voyager-űrszondák nem erősítették meg a feltevést. Végül a Hubble Űrteleszkóp 1996 júniusában bukkant újból a légkör nyomára, az ultraibolya tartományban készített spektrumfelvétel segítségével. A felszínről a mikrometeorit- és az ionbombázás hatására víz párolog el, majd a vízmolekulákat a napsugárzás szétbontja. A könnyebb hidrogén előbb megszökik, míg a nehezebb oxigén tovább marad és molekuláris állapotot vesz fel. Az atmoszféra anyaga lassan, folyamatosan párolog ki a világűrbe. Elég ritka gázburokkal van dolgunk, felszíni légnyomása nagyjából egyenlő a földi légkörben, az űrrepülőgép keringési magasságában mérhető értékkel. Az Űrteleszkóp eredményei szerint feltehetőleg igen gyenge sarkifényjelenséget játszódnak le a Ganymedes légkörében, pólusai felett.

A Ganymedes sarkvidékeit kiterjedt, nagyon vékony, fagyott jégsapka borítja, melyek létezésére már a földi távcsöves megfigyelések is utaltak. A két világos képződményt a környezeténél tisztább jég alkothatja. Méretük tekintélyes, átlagosan 40–45 fokos szélességig húzódnak le mind az északi, mind a déli sarktól. Határuk nem egyenes: a sötét területeken a pólus felé „betüremkedik”, míg a világosabb

részeken az egyenlítő irányába „kinyúlik”. A sötétebb területek több napfényt nyelnek el, és így melegebbek, rajtuk csak magasabb szélességeken marad meg a pólusapka. A képződmény kialakulására több elgondolást is kidolgoztak. Elképzelhető, hogy valamilyen külső folyamat (pl. ionbombázás) világosabbá teszi a sarki területeket, vagy ez a világosabb anyag, ugyancsak külső hatásra, lepusztult az alacsonyabb szélességekről. Emellett szóba került a légköri szállítás lehetősége is: az egyenlítő vidékéről elpárolgó víz magasabb szélességeken kicsapódik. A légkör azonban igen ritka, és az elméleti számítások szerint a vízpára nem jutna el a sarkokig, hanem 20–50 fokos szélességek között kicsapódna. Elfogadható magyarázattal egyelőre nem szolgálhatunk.

Egy égitest felszínéről sokat elárulnak a becsapódásos kráterek. A hold kisebb kráterei egyszerű mélyedések, míg a nagyobbaknál központi csúcs és belső gyűrűk is megjelennek. A Ganymedes és a Jég felszíni holdak nem őrzik örökké krátereiket. A Jég ugyanis saját súlya alatt lassan elfolyik, kiterül, ezt nevezik viszkózus elernyedésnek. Amennyiben egy nagy hegyet építenénk a Ganymedesen, az idővel magától lelapulna.



1. ábra. Közelkép egy poligonról. A kráterezett területen két gyűrű részlete tűnik fel, egyikük balról jobbra felfelé halad. A kép alján lévő nagyobb kráternél jól látható a viszkózus elernyedés nyomán kilapuló kráteraljzat, valamint egy, a sáncfal tövében futó mélyedés, amelyet talán a süllyedő kráterperem okozott

A kráterek pereme lesüllyed, talapzatuk megemelkedik, és egyre jobban egybemosódik környezetével. Éppen ezért a legidősebb, 100 km-nél nagyobb kráterek ma már nem is emelkednek ki a felszínből, csak világos, kör alakú foltokként, szellem-

kráterekként vehetők észre (1. ábra). Igazán nagy, ősi becsapódásos medencéket — amilyenek a Holdon vannak — nem találunk a Ganymedesen. Ellenben akadnak hatalmas, feltehetőleg becsapódásos eredetű gyűrűrendszerek (1. később). A legfiatalabb kráterekből világos sugársávok ágaznak szét. (Ilyen szerkezeteket a felszín sötétebb és világosabb területein is találunk.) A felszínt a részecskebombázás és a mikrometeorit-zápor fokozatosan sötétítheti. A nagyobb becsapódások felszakítják ezt a burkolatot, kirobantva a mélyebben fekvő, világosabb jeget.

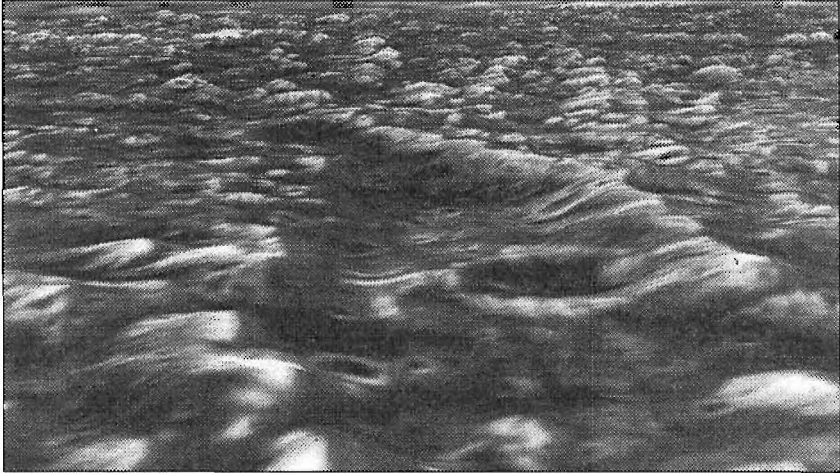
A világos, sugaras kráterek mellett néhány sötét sugarú és sötét talapatú kráter is látható. Ezek a követő oldal egyenlítői vidékén csoportosulnak. Egykor a világos sugaras kráterekhez hasonlíthattak, de a részecskebombázás és a napsugárzás hatására anyaguk megváltozhatott és környezetüknél sötétebbé vált.

Emellett talapatos krátereket is találunk az égítesten. Ezek enyhén megemelkedett platókon találhatóak, hasonlóak a Mars talapatos krátereihez. Többségük 40 km-nél kisebb, és főleg világos területeken látszanak — igaz, itt könnyebben is vehetők észre. Kialakulásuk magyarázatára két elgondolás született: vagy megolvadt és sugárirányba szétfolyt anyagból állnak a talapatok, vagy keletkezésük a szilárd törmelék szétszóródásával áll összefüggésben. Bár a szakemberek többsége az utóbbi megoldásra voksol, elképzelhető, hogy a becsapódás pillanatában megolvadó és részben folyadéként viselkedő anyag sajátosságai felelnek a jelenségért.

A Ganymedes felszínén két dómszerű képződményt fedeztek fel a Voyager-úrszondák. A Voyager-1 jelű dóm 260 km átmérőjű, nagyjából kör alakú, 2–2,5 km magas, tetején egy 60 km átmérőjű fensík található. A szerkezetet 300 km-es távolságig 5 km-nél kisebb kráterek csoportja veszi körül. Az ÉK és DNy felé megnyúlt kráterhalmaz leginkább másodlagos kráterek mezejére hasonlít. Egy nagy becsapódás alkalmával a kirobbanó törmelék visszazuhanáskor apró krátereket üt a központi becsapódás szomszédságában — így keletkezik a másodlagos krátermező. Ha a dómot övező rendszer így jött létre, akkor a központi kráter 75 km átmérőjűnek adódik. Nos, itt nem hogy kráter nincs, hanem egy háromszor ekkora kiemelkedés található! A dóm keletkezése azonban kapcsolatban lehet egy ősi kráterrel. A becsapódás alkalmával a jégben repedések támadhattak, és a mélyebben lévő víz a felszínre jutott — azaz vulkanikus tevékenység hozta létre a formát. Egy másik elgondolás szerint a jégkéreg alatt nagy nyomású vízréteg úszott. A becsapódás révén elvékonyodott a jég, és a mélyben lévő víz nyomása feldomborította a felszínt. Esetleg a két jelenség együtt építette fel a dómot. A Voyager-2 jelű dóm az előbbihez hasonló felépítésű, mindkét képződmény világos, barázdált területeken található.

A Ganymedes felszíne két területtípusra osztható. Sötétebb és idősebb részeket, valamint világosabb és fiatalabb területeket különböztethetünk meg rajta. Ezek nagyjából fele-fele arányban osztoznak a felszínen. A sötétebb területek kora kráterezettségük alapján 3,8–4,0 milliárd év körüli. Ezek kisebb-nagyobb sokszögletű egységek, poligonok formájában, szigetszerűen borítják a felszínt (néha kontinenseknek is nevezik őket). A legnagyobb ilyen poligon a Galileo Régió, melynek átmérője 3200 km. Sok poligon felszínét hatalmas, egymással párhuzamos vonalakkól, ívekből álló szerkezetek borítják — ezeket nevezzük gyűrűknek. Egy-egy gyűrű hosszanti mélyedésből, és ezt két oldalt övező emelkedett peremből áll. Szélességük 5–10 km közötti, hosszuk több száz km is lehet, de a fenék-perem magasságkülönbség csak néhány száz méter (2. ábra). Az égítest legidősebb felszínformái közé sorolják őket. A gyűrűk feltűnően hasonlítanak a Ganymedes külső szomszédján, a Callistón megfigyelt Valhalla-gyűrűrendszer tagjaira. Ennek a szerkezetnek a centrumá-

ban egy hatalmas kráter kilapult maradványa látható. A képződmény becsapódással keletkezhetett. A robbanás során létrejött hatalmas kráter nem csak a szilárd burkolatból, hanem az alatta lévő folyékony anyagból is sokat kirepített az űrbe. A kráter üregébe visszaáramló köpeny anyaga körkörösén felrepesztette a szilárd burkolatot — így keletkeztek a gyűrűk.



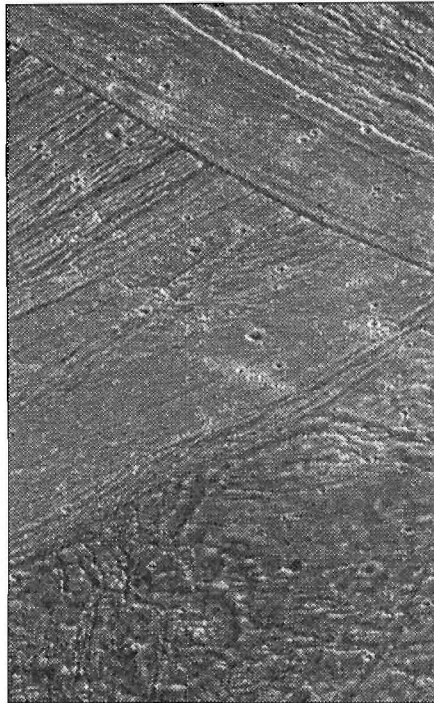
2. ábra. A Ganymedes felszíne, ahogyan közelről látnánk. A Galileo szonda felvételeiből készített sztereofelvétel. A kép aljáról egy gyűrű belső mélyedése fut a távolba, néhány becsapódásos kráterrel a felszínén

A Ganymedes és a Callisto gyűrűinek rokonsága hasonló eredetre utal, de a helyzet sajnos nem ilyen egyszerű. A Galileo Régió területén a gyűrűk átlagosan 10 km szélesek és 50 km-re vannak egymástól. Úgy tűnik, hogy a gyűrűrendszer egy szomszédos poligonon, a Marius Régió felszínén folytatódik. Itt azonban a gyűrűk átlagos szélessége 6 km, és térközük 22 km. De a két gyűrűrendszer elemei nem csak méretben térnek el. A Marius ill. a Galileo Régió gyűrűinek kiszámított centruma sem esik egybe. Az eltérések magyarázatára több elgondolás is született. A gyűrűk mérete és térköze a szilárd kőzetburok mechanikai tulajdonságaitól és vastagságától függ. Ha a Marius területén a kőzetburok vékonyabb volt a Galileóénál, kisebb és sűrűbb gyűrűk keletkeznek rajta. Emellett a gyűrűrendszer tagjainak helyzete sem túl szabályos, nem eléggé párhuzamos. Ezért a litoszféra egyes részeinek jellemzői lehetnek felelősek, valamint ősi, elhalt tektonikai repedésnüntázatok. Elképzelhető, hogy eredetileg egymás mellett volt a két gyűrűrendszer, de a Galileo és a Marius blokkja elmozdult, elfordult egymáshoz képest. Ha képzeletben rekonstruáljuk az egész gyűrűrendszert, a Ganymedes felé kiterjedő komplexumot kapunk. A rendszer központjában nem látni krátert, amit a későbbi aktivitás eltörölt, ma pedig újjászületett, világos felszín található a helyén. Néhol egy-egy gyűrű mentén sima, kráterekben szegényebb terület látható. A gyűrűk keletkezésekor támadt repedések mentén vulkánok törhettek fel, és a felszínre került anyag szinte elmosta a korábbi krátereket. Az előtér vastagsága a becslések alapján átlagosan 300–500 m és 1–2 km

között lehetett. Emellett még több, nagy méretű becsapódásos képződményt találhatunk a felszínen, melyek hasonló gyűrűkkel, ívekkel rendelkeznek. Néhol megvan a központi kráter, és a kidobott törmeléktakaró nyoma is felfedezhető.

A másik fő felszíntípust a világosabb, fiatalabb területek alkotják. Ezek a sötét poligonok közé ékelődnek hosszú, egymáshoz kapcsolódó sávokat alkotva. Kráterezettségük alapján 3,5 milliárd évesek lehetnek. Fiatalabbak tehát a sötét poligonoknál, de csak 300–500 millió évvel. Valószínűleg azért világosabbak, mint a poligonok, mert jéganyaguk kevesebb kőzetszennyezést tartalmaz. A világos és a sötét területeket éles határ választja el. A világos részeket általában mélyedések, barázdák hálózata be, méghozzá hihetetlen sűrűségben (3. ábra). Gyakran barázdált területeknek nevezik őket — akadnak azonban barázda nélküli világos sávok is. A barázdák negatív formák, mélyedések. Peremük nagyjából a környezet szintjén helyezkedik el, fenéjük ez alá süllyed. Mélységük ritkán haladja meg a 300–400 m-t. Szélességük, egymástól mért távolságuk változó. A barázdák egymással párhuzamos futású rendszerekre különülnek el. Két barázdarendszer találkozásánál a fiatalabb rendszer általában felülbélyegzi az idősebbet, annak minden nyomát eltünteti. Néhány kivételes esetben egymást keresztező barázdák is megfigyelhetők, ezek alkotják az ún. hálózatos területeket. A barázdák jellemző iránya gyakran közel párhuzamos a poligonok peremével, de ettől jelentős eltérések is megfigyelhetők. A poligonok és a barázdált terület találkozása mentén néha egy mélyebb barázda húzódik. Ha a barázdák irányának eloszlását vizsgáljuk a Ganymedesen, átlagos orientációjuk egy gömbi főkört jelöl ki, mely 35–40 fokos szöget zár be az egyenlítővel. Ez a tendencia a mély barázdáknál még jobban érvényesül. Mindez globális, az egész hold méretekálján jelentkező erőkre utal, melyek a repedéseket kialakították. A barázdák néhol az idősebb, sötét területekre is behatolnak, ilyenkor sima foltok övezik őket — keletkezésükkor talán anyag ömlött a felszínre, amely eltörölte a sötét felszín krátereit, egyenletlenségeit.

Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy a Ganymedes felszínén a tektonikai formákat elsősorban a barázdák képviselik. Negatív formájuk széthúzó erőkre utal. A felszín tágulására néhol közvetlen bizonyítékot is találunk, elnyírt kráterek, szétdarabolt és széthúzott kalderaszerű mélyedések formájában. A tágulásban fontos szerepet



3. ábra. Egymást metsző barázdarendszerek. Jól megfigyelhető, ahogyan a különböző korú szerkezetek egymásra rakódnak

játszhat, hogy a jég fagyásakor térfogatnövekedés lép fel. Így felrepedhet a felszín, és a belsőből táguló jég, illetve jég–víz keverék juthat ki. A jelek szerint két folyamattal állunk szemben. Egyrészt világos anyag jutott a felszínre, másrészt törés, vagy nyúlás és vékonyodás segítségével barázdák aprózták fel a területet. A két folyamat térben általában együtt jelentkezik.

A képződmények magyarázata persze igen nehéz feladat. Figyelembe kell venni, hogy a mélység növekedésével csökken a jég szilárdsága, amit a közzettartalom is befolyásol. A felszín átalakulásánál az erőhatás tartama is számít, núc egy gyors feszültség törést, egy hosszabb, időben elhúzódó inkább lágy deformációt idéz elő. A felszínformák emellett megtevesztők is lehetnek. Ami kívül törésnek látszik, lehet, hogy mélyebben csak deformáció. Tágulások formákban tehát bővelkedik a Ganymedes — egyes kutatók szerint összenyomódásra utaló jelek is akadnak. Néhány barázdarendszer szimmetrikus felépítésű, peremét mélyebb barázda zárja le. Nem kizárt, hogy a barázdarendszer centrumában anyag került a felszínre, akár csap, a földi óceánközepi hátságok területén. A peremen látható mélyebb barázdákat pedig szubdukciós zónáknak tekintik, ahol összenyomódás lép fel, és a jég a felszín alá bukik. A Ganymedes arculatát a jelek szerint inkább a tektonika, mint a vulkanizmus alakította.

A hold érdekes fejlődési utat járhatott be. A Jupiter körül kőzet és jegek keverékét tartalmazó testekből állhatott össze. Az összeállás és a meteoritbombázás révén felszabaduló hő intenzív felszín átalakító folyamatokat indíthatott meg, vulkanikus és tektonikus aktivitást.

A Ganymedes életének kezdetéről azonban nincsenek ismereteink, hiszen a legidősebb területek is 4,0 milliárd évesek. Fontos kérdés, milyen lehetett a hold belső szerkezete ebben a szakaszban. Külső burkolata bizonyára differenciálódott, itt a jég és a kőzet elkülönült. Kis sűrűségű jégkéreg boríthatta, amely alatt folyékony óceán létezett, ez alatt pedig a víznél sűrűbb, speciális jégállapotok következtek, még beljebb pedig a kőzetburok. Azt sajnos nem tudni, hogy egész belső szerkezete differenciálódott-e. Elképzelhető, hogy magja közepén vegyes összetételű rész maradt, de az is lehet, hogy a víz és jég ott is elkülönült egymástól. A továbbiakban csökkenhetett a belső hő, ami az összeállás felmelegedéséből, a meteorikus bombázásból, a radioaktív elemek bomlásából, és a belső differenciációból származhatott. Élete elején a becsapódásoknak fontos felszínalakító szerepe volt: a nagy kráterek megrepesztették a kérget, vagy akár teljesen át is szakíthatták azt, így a felszínre kerülhetett a víz. A továbbiakban csökkentek a belső hőtartalékok, és a folyékony óceán vékonyodott. Alulról és felülről is egyre több víz fagyott jéggé. A hold azonban még egyszer feléledt, mintegy 3,5 milliárd évvel ezelőtt. Teljesen átalakította arculatát, létrehozva a világos barázdált területeket. Ha a sötét poligonok keletkezése után még aktív maradt volna, most nem csak idős poligonokat és 3,5 milliárd éves világos sávokat látnánk, hanem különböző korú területek egész skáláját.

A fő kérdés az, hogy honnan szerezte elhűz az energiát a kihűlő hold. Erre több lehetőség adódik: időszakos fűtő hatást válthatnak ki például az árapály erők. Egy ilyen összetett holdrendszerben, mint amilyen a Jupiteré, időnként rezonancia pályára kerülhet egy-egy égitest, ez pedig átmeneti fűtést eredményez. Elképzelhető továbbá, hogy ha a mag belsejében differenciálatlan rész maradt, annak összetevői ekkor különültek el, és ez energia felszabaduláshoz vezetett. (Persze további kérdés, erre mért csak ekkor, és nem korábban került sor?) Felmerül a tágulás lehetősége is — a poligonok formái leginkább ezt az elgondolást támasztják alá. A belsőben lévő

folyékony víz fagyáskor kitágul. Ez pedig felrepszti az ősi felszín és a táguló jég kitéremkedhet a belsőből (l. hátsó belső borító). A modellek szerint a felszín 2–5%-kal növekedhetett a tágulás révén. Érdekes elgondolásként említhető még a hő-pulzús elmélete. A Ganymedes belsejében a hő jórészt konvekcióval vándorolhatott. Konvektív áramlások kavargtak a folyékony vízrétegben, de e felett és alatt, a szilárd jéggrétegekben is zajlott konvekció. A hűlés során vékonyodott a folyékony réteg, majd amikor befagyott az óceán, egyetlen nagy konvekciós cella léphetett a korábbi három helyébe. Ez meggyorsította a hőkiáramlást, ami a felszín átalakulásához vezethetett.

Elképzelhető, hogy a fentiek közül több folyamat együtt működött a jelenségben. A tágulással repedések nyíltak a kérgen, ahol jég türemkedett ki a belsőből, avagy híg jég folyt szét a felszínen. A kéreg további tágulásával a terület berogyadozott, összetöredezett. A belsőből kiáramló hő hatalmas, meleg jég–víz buborékokat (köpenysoványakat) indított útnak felfelé. Ezek a anyagtömegek a felszínhez közelkedve a jégburkolatot felbontozták, és szétreperesztették. A jég közvetlenül a felszínre juthatott, vagy csatornákon keresztül, vulkáni folyamatok közreműködésével ömlött szét. A feláramlás elhalásával talán megsüllyedt a terület, és törések keletkeztek rajta. (A jelenség kissé hasonlít arra, amikor bolygónkon forró áramlások indulnak meg a köpenyben, és a felszínen ún. forró foltokat hoznak létre. Ilyen forró foltok működhetnek közre a kontinensek szétdarabolásában is.) De az sem kizárt, hogy az emelkedő meleg anyag nem is jutott közvetlenül a felszínre. A felszín közelébe érve felmelegítette azt, és a képlékennyé váló jégből a kőzetanyag lesüllyedt. Ettől pedig tisztább, világosabb lett a terület.

Az igazság az, hogy még alig ismerjük a Ganymedes szerkezetét, fejlődéstörténetét. Kétségtelen, hogy egykor hatalmas erők szabdalták darabokra felszínét. A világos területek megszületése talán a belső erők utolsó megnyilvánulása volt, és ezzel végleg „nyugalomba vonult” a hold. Ám lehet, hogy még pislákol benne az élet. A Galileo szonda több mérőberendezése szerint a Ganymedes saját mágneses térrel rendelkezik. Ez bizonyos mértékig megvédi a Jupiter mágneses terének részecskebombázásától, bár a folyamat jellege egyelőre nem ismert. Sajátos és egyedülálló jelenséget figyelhetünk meg a Jupiter körül: egy magnetoszféra egy másik belsejében. A tér eredete ugyancsak kérdéses.

Felmerült a lehetőség, hogy folyékony víz van még napjainkban is a jégfelszín alatt. Ebben az óceánban a különböző sók ionjai az áramlásokkal kavargva talán létrehozhatják a mágneses teret. Azonban valószínűbbnek látszik, hogy az olvadt belsőben zajló anyagáramlások révén, a földihez hasonlóan keletkezik a mező. A Ganymedes tehát kívülről jégholdnak tűnik, de belső felépítése, a mágneses tér jelenléte a Föld-típusú bolygókéhoz teszi hasonlóvá. Kétségtelenül érdekes és egyedi objektummal van dolgunk, amely talán átmenetet képvisel a jégholdak és a kőzetbolygók között. A Galileo szonda e sorok olvasásakor is a Jupiter körül kering, és műszerei — többek között — a fenti rejtélyekre próbálnak magyarázatot találni.

KERESZTURI ÁKOS