

# A Jupiter migrációja és a Vénusz

A vénuszi légkör és annak fejlődése sokat kutatott, rendkívül összetett témakör. Ez nem véletlen, hiszen a bolygó olyannyira hasonlít a Földhöz, hogy égi testvérünként szokás emlegetni. Azonban a Vénusz felszíne forró, láva borítja, atmoszférája sűrű, mérgező gázokkal teli, így a felszínén bármilyen életforma létezésének lehetősége kétséges. A kutatások egyik fő motivációja az a feltevés, mely szerint a Vénusz és a Föld múltja valószínűleg sok ponton hasonlított. Feltételezhető, hogy valamikor a Vénuszon is létezett élet, lehetett olyan időszak, amelyben szinte földi körülmények uralkodtak: kellemes időjárás, óceánok, gyengébb üvegházhatású légkör.

A vénuszi légkör jelenlegi állapota számottevően függ a Naprendszer kialakulásának kezdeti időszakaiban uralkodó körülményektől. Számos elmélet született már a korai, a mainál életképesebb Vénusz hirtelen átalakulásáról. Ezek az elképzelések sokszor amellet érvelnek, hogy a kezdeti kellemes körülmények ellenére az életnek nem lett volna elég ideje kifejlődni: a Vénuszon sosem jöhettek létre felszíni óceánok, minthogy hosszúra nyúlt a bolygó „magmaabdaként” töltött kezdeti életszakasza. Ekkor a bolygó egésze egy hatalmas vulkánként működött, felszínét láva és bazalt borította. Hasonló periódus ugyan lezajlott a fiatal Földön is, azonban elég hamar lecsengett, így lehetőség nyílt egy hűvös klíma, a felszíni víz és akár az élet kialakulására. Egy másik feltevés szerint egy eredendően nitrogéndús vénuszi légkör jelentősen felgyorsíthatta az üvegházhatást, így rövid idő alatt jelentős változás mehetett végbe. Az üvegházhatás visszafordíthatatlanná lett, aminek következtében a Vénusz nagyon hamar lakhatatlanul forróvá vált.

Néhány más modell szerint azonban a Vénuszon mérsékelt állapotok uralkodhattak egészen kb. egymilliárd évvel ezelőttig,

ezzel együtt pedig a múltban felszíni víz jelenléte is valószínűvé vált.

Minél jobban megismerjük a Naprendszer működését, annál valószínűbb a feltételezés, hogy az óriásbolygók a Naphoz jelentősen közelebb keletkeztek mostani pozíciójuknál, életük során pedig elvándoroltak onnan. Ezen vándorlás leírására eddig két, szilárd lábakon álló hipotézis született: a Nice (Nizza városa után) modell, illetve a Grand Tack (kb. Nagy Szembefordulás) modell.

A Grand Tack hipotézis szerint a Jupiter a Naptól ~3,5 CSE-re keletkezett), majd 1,5 CSE-re is megközelítette, ezek után pedig kifelé mozgott, egészen a mai, 5,2 CSE messzeségben lévő helyzetének elfoglalásáig. Ez alatt a Szaturnusszal 2:1-es rezonanciába került, tehát mialatt a Jupiter kétszer, a Szaturnusz egyszer kerülte meg a Napot.

Vándorlása során a Jupiter kétszer is áthaladt a mostani aszteroidaöv térségén, szétszórva az ottani kisbolygók nagy részét. Ez egybeesik megfigyeléseinkkel, mely szerint az aszteroidaöv együttes tömege napjainkban relatíve kicsi, a benne keringő égitestek pályájának excentricitása és inklinációja igen változatos.

A nizzai modell szerint a Naprendszer négy gázóriasa eredetileg majdnem tökéletes körpályán mozgott 5,5–17 CSE közti távolságokban. Innen kb. 35 CSE-ig egy újabb, az aszteroidaövhöz hasonló, kisebb égitestekkel teli képződmény volt található. Amikor a Jupiter–Szaturnusz páros rezonanciába lépett, a Szaturnusz kifelé kezdett vándorolni, megzavarva az Uránusz és a Neptunusz pályáját, illetve a külső kisbolygóövet. A modell szerint a két nagybolygó helyet cserélt, így került a Neptunusz kívülre, az Uránusz belültre, annak ellenére, hogy tömegük alapján az ellentétes sorrendet várnánk el, mivel a nagybolygók tömege csillaguktól távolodva általában csökken. A hirtelen változások hatására rengeteg kis

égitest szóródott szét, és a kezdetben jelen lévő gáz- és porkorong nagyrésze is eltűnt.

Az elméletek számos jelenségre adnak magyarázatot: a késői nagy bombázást – mely alatt a belső Naprendszerre nagyságrendekkel több kisbolygó és üstökösmag zúdult – a vándorlások alatt az aszteroidaövet a Nap felé elhagyó kisbolygóknak tulajdoníthatjuk. Sok kis égitestet a Jupiter gravitációs tere fogott be, ezekből születtek a Hilda és Trójai csoportok. Más apró égitesteket a legkülsőbb bolygók fogtak be, innen származik az Uránusz és a Neptunusz rengeteg irreguláris, nem forgási ellipszoid alakú holdja. A nizzai modell által vázolt Uránusz–Neptunusz vándorlás ezen felül a laza szerkezetű, kis tömegű Kuiper-öv és Oort-felhő kialakulására is magyarázattal szolgál.

Egy ilyen horderejű eseménysorozat semmiképpen nem járhat következmények nélkül a belső bolygókra nézve. Két fontos, tisztázatlan kérdés maradt: egyrészt mikor játszódott le a migráció, megtörténtek-e hol tartott a belső bolygók fejlődése, másrészt mennyire volt gyors, kaotikus, mindent felkavaró, vagy épp komótos, nyugalmas a nagybolygók vándorlása?

A Jupiter gravitációjának fontos szerepe van a Naprendszer fejlődéstörténetében. Emellett egy bolygó pályájának lapultsága is nagyban befolyásolhatja a kőzetbolygók klímájának fejlődését. Azoknál a bolygóknál, ahol nagy az excentricitás, azaz elnyúlt a pályájuk, jelentős az árapályfűtés is, ha a Naphoz közel keringenek. Ekkor a bolygó napközelpontban sokkal több hőt kap, mint nap-távolban, ez a jelenség pedig még egy mérsékelt éghajlatú bolygón is üvegházhatást hozhat létre. A Vénusz esetében a forgási periódust is befolyásolhatta a pálya excentricitása. A bolygó tengely körüli forgása 243, Nap körüli keringése 225 földi napot vesz igénybe.

Jelenleg a Vénuszé a legkisebb excentricitás a Naprendszerben (0,006) és itt a legerősebb az üvegházhatás is. Ez azonban nem feltétlenül volt mindig így. Lehetséges-e, hogy a külső bolygók migrációja nagy hatás-

sal volt a Vénusz excentricitására a korai Naprendszerben, ennek következtében pedig segíthette a felmelegedést és akár vízvesztést is okozhatott a Vénuszon?

Ezen kérdéseket tette fel a Stephen R. Kane (Department of Earth and Planetary Sciences, University of California) vezetete kutatócsoport a *The Planetary Science Journal* 2020. szeptember 4-i számában közölt cikkükben, amely a Naprendszer korai fejlődését, különösen pedig a Jupiter helyzetének Vénuszra gyakorolt hatását vizsgálta. A modellben a Vénusz már teljes értékű, kifejlett bolygó, de a pálya magas excentricitása még visszamaradt a Naprendszer kialakulásának kezdeti szakaszából. A szimulációk egy nagyobb, a jupiterpálya méreteinek és excentricitásának teljes Naprendszerre gyakorolt hatását vizsgáló projekt részei voltak, amit Vervoort és Horner irányítottak, MERCURY nevű program segítségével. E program képes hosszú távon kiértékelni különböző pályamódosulások hatásait egy rendszer égitestekre. A Naprendszer nyolc nagybolygóját és azok mostani kimért pályaadatát felhasználva Kane csapata az összesen lefutott 159 201 szimulációból több százat felhasználva vizsgálta az előidézett pályamódosulásokat.

A Vénusz excentricitása jelenleg periodikusan változik kb. 0,006 és 0,07 között, így épp minimumértéket vesz fel. A kutatócsoport megnézte, hogyan változnak ezek a minimum- illetve maximumértékek különböző jupiterpálya-méretek esetén. A kapott adatok szerint több olyan helyzet is létezik, ahol a Jupiter jelentősen elnyújtja a Vénusz pályáját. Az egyik ilyen (5,18 CSE-nél) pedig kifejezetten közel van a gázóriás mostani, 5,2 CSE-s helyzetéhez. A legerősebb maximum 4,3 CSE-nél jelentkezik, ekkor a Vénusz excentricitása 0,31 (tehát a mostani 52-szerese!). A Jupiter helyzete ekkor hosszú távon nem stabil, de elképzelhető, hogy migrációja során áthaladt ezen a ponton, és ha elég sokáig tartózkodott itt, megzavarhatta a Vénusz pályáját. A legmagasabb, évmilliárdokon át stabil maximum 4,05 CSE-nél jelentkezik, ekkor a vénuszpá-

# meteor

lya lapultsága 0,24 (a jelenlegi 40-szerese). Ha ennyire lapult volt a Vénusz pályája, hogyan lehetséges, hogy ma mégis a „legkorszorúbb” az összes bolygópálya közül? A leghatásosabb mechanizmus egy pálya „körösítésére” az árapály. Főként a Nap, de a többi bolygó által keltezt árapályerők is segítik a körpálya kialakulását. Kane és csoportja a POSIDONIUS programmal (Emeline Bolmont, Genfi Egyetem) szimulálták a lehetséges változatokat. Az árapályerők meghatározásának fontos tényezője a bolygó anyagának viszkozitása („képlékenysége”), amely nagyban függ az óceánok jelenlététől vagy hiányától, ami ráadásul az idő előrehaladtával változhat is, így csak tipelni lehet, pontos értékeket számolni nem.

Megvizsgálva, mi történne, ha a vénuszi excentricitást maximumra, 0,31-re emelnénk, azt találták, hogy csak a Föld és a Nap által kifejtett árapályerők nem elegendőek ahhoz, hogy a Naprendszer élete során visszaálljon a körpálya. Ezeket az eredményeket azonban egy viszonylag száraz Vénuszt feltételezve kapták. Ez tehát azt jelenti, hogy a Vénuszon régen sokkal több víz lehetett, akár akkora mennyiségben is, mint a mai Földön. Nagy mennyiségű víz jelenléte, figyelembe véve a bolygó magjának folyamatos hűlését és egy szignifikáns atmoszféra kialakulását, már elegendő lehetne ahhoz, hogy a modell által igényelt időskálán kialakuljon a körpálya.

A Vénuszon tehát valaha rengeteg víz lehetett. Miért uralkodik most rajta mégis szárazság és visszafordíthatatlannak látszó üvegházhatás?

Egy bolygón a tárolt hőnek három fő forrása van: a benne található radioaktív anyagok bomlása, a bolygókeletkezésből visszamaradt hő (ez az idők során egyre fogy, amint a bolygó belseje hűl) és a gravitációs árapály (amely során a felszíni folyadékok és kőzetek sűrűlődsával, valamint a kőzetek deformációja révén hő keletkezik). Szélsőséges esetekben az árapályfűtés drámai változásokat okozhat az atmoszférában, ide sorolható a gyorsan megjelenő, erős üvegházhatás is. Az árapályfűtés mértéke nagyban függ a bolygó pályájának Naptól való távolságától,

illetve annak excentricitásától. A Vénusz esetében a ma mért árapályhatások csak minimálisan növelik a hőmérsékletet. Ezen hatások akkor voltak a legjelentősebbek, amikor a Vénuszon még lehettek óceánok és amikor a Naptól érkező sugárzás mennyisége jóval alacsonyabb volt a mainál.

A fent említett sugárzási érték a csillagok fejlődésével folyamatosan változik, Napunk esetében kb. 30%-kal kevesebb energia érkezhett a bolygókra a Naprendszer életének kezdeti fázisában. A vénuszpálya magas excentricitású időszakát szimulálva a kutatócsoport úgy találta, hogy a bolygó csupán nagy excentricitásának köszönhetően, még egy ennyivel gyengébben sugároz Nap mellett is több mint kétszer annyi besugárzásnak volt kitéve napközben, mint Földünk manapság. Mivel az excentricitásból adódó árapályfűtés önmagában is üvegházhatást hozhat létre, nagy mennyiségű vízvesztés alakulhat ki egy ilyen körülményeknek kitett bolygón. Ráadásul a kezdeti napkitörések is erősebbek és gyakoribbak voltak, amelyek tovább rontották a vízkészlet hosszú távú fennmaradásának esélyeit, főleg, ha a Vénusz tengelyforgása lassult és ettől mágneses tere gyengült.

Tehát a Vénusz ebben a magas excentricitású időszakában sok vizet veszített. De pontosan mennyit? A szimulációk alapján a földi óceánokkal megegyező mennyiségű vízkészlet elvesztése 3 milliárd év alatt történik meg ilyen körülmények között. Ezt az időt ugyan megnyújtja kissé a nagyon magas excentricitás, ugyanakkor lerövidíti a Nap egyre nagyobb sugárzása, és az ezzel együtt járó nagyobb erejű napszél érkezése. Mindezeket figyelembe véve megállapítható, hogy ennél lényegesen gyorsabban veszíthette el a Vénusz kezdeti óceánjait. A Jupiter vándorlása valószínűleg a drasztikus vízvesztés bekövetkezése előtt lezajlott, amikor még a víz stabilan létezett a Vénuszon, de, mivel a körpályára való visszatérés rendkívül sok időbe telik, így a migráció okozta nagy excentricitás, a körpályára állás, és ezzel együtt a vízvesztés, sokáig elhúzódó folyamatnak tekinthető.

Ahhoz, hogy igazán értékelni tudjuk a magas excentricitás jelentőségét, érdemes megnézni azt is, hogy a Föld pályájának excentricitása miként befolyásolta bolygónk klímáját az idők során. A földpálya lapultsága 0 és 0,06 között ingadozik száz- és négyszázezer éves periódusokkal, amelyeket a Marssal, a Jupiterrel és a Vénusszal való gravitációs kölcsönhatások hoznak létre és erősítenek fel. Jelenlegi értéke 0,01. Ezekre a folyamatokra visszavezethető többek között a pólussapkák kiterjedésének ingadozása, amely kb. százezer éves periódussal változik a 45–85. szélességi fokok között, ez pedig a jégkorszakok periodicitásával is kapcsolatos. Az is kimutatott tény, hogy hosszú távon az excentricitás változására szén tör elő, majd vonul vissza a földkéregből, ami szintén közvetlen forrása lehet egy felerősödött üvegházhatásnak. Mindezek mellett a légköri hóáramlatok és az óceánok dinamikája is függ a pálya lapultságától.

A korai pályamódosulások a Vénusz esetében hasonló következményekkel járhattak. A jóval magasabb besugárzás és az így keletkező hő miatt bekövetkező vízvesztés, a vízpára felsőlégrébe kerülése felgyorsíthatta egy nedves üvegházhatás kialakulását. Bár a szén-dioxid önmagában is okozhat erős üvegházhatást, egyáltalán nem elhanyagolható annak a szerepe sem, hogy a bolygón lévő víz hányadrésze tartózkodik az atmoszférában, mivel a vízpára maga is egy üvegházhatású gáz.

Ilyen folyamatok mellett az egyik lehetőség, hogy felgyorsul az üvegházhatás és az ultraibolya sugárzás hatására bomló  $H_2O$  molekulából a hidrogén a világűrbe szökik, míg az oxigén egy részéből ózon ( $O_3$ ) keletkezik. Így az üvegházhatás felélénkül, gyorsan következnek be drasztikus változások.

A magas excentricitás tehát láncreakciót indított be a Vénusz légkörében, melynek végterméke egy vastag, hőviszattartó felhőréteg és a forró felszín révén pozitív visszacsatolású, visszafordíthatatlan üvegházhatás, azaz egy lakhatatlan bolygó.

A Jupiter korai vándorlása a Vénuszon visszafordíthatatlan változásokban műkö-

dött közre. A Vénusz excentricitása nagyban függ a Jupiter helyzetétől, bizonyos helyzetek pedig nagyban megnövelik a pálya lapultságát. Ennek következménye a jelentősen felgyorsult vízvesztés, és ezáltal a gyorsan önfenntartóvá váló üvegházhatás. Nem tudni biztosan, hogy a Vénusz felszínén a kezdetekkor mennyi víz lehetett, ha volt egyáltalán. A szimulációk alapján azonban a pálya újból körré válásához a Vénuszon a földi óceánokkal összemérhető mennyiségű víznek kellett lennie – amennyiben helyes a modell.

A kutatás eredményei az exobolygó-rendszerek felépítésének megértésében is segítséget nyújthatnak. Ha a Jupiter tényleg felgyorsította ezeket a folyamatokat a Naprendszerben, akkor azok máshol is bekövetkezhetnek. Az ilyen rendszerekben megnövekszik a Vénusz-analógiák lehetőség, ami pedig befolyásolja a lakható bolygók számát. Kane és csoportja megmutatta, hogy egy-egy bolygórendszer korai időszaka igencsak kaotikus lehet, ha van a rendszerben egy vándorló óriásbolygó. Egy ilyen égitest jelenléte pedig kritikus szerepet játszhat a kőzetbolygók légkörének és éghajlatának fejlődésében. Ha az efféle vándorok gyakoriak, akkor az excentricitások növekedése majd lecsillapodása is az, ennek fényében pedig gyakoribbak lehetnek azon bolygók, amelyek radikális felmelegedésen és így jelentős vízvesztésen mennek keresztül, kitolva az exobolygó-rendszerekben a „Vénusz-zóna” határait.

A vénuszi klíma fejlődését még mindig témérdek kérdés övezi. Ezen kérdések megválaszolása nem csak a Vénusz, illetve az exobolygók lakhatósága és akár későbbi benépesítése, hanem a Föld, az itteni üvegházhatások, a klímaváltozás, így saját jövőnk szempontjából is fontos.

*Fröhlich Viktória*

*A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont által meghirdetett cikkirői pályázaton megosztott harmadik helyezést elnyert pályamunka.*