

# KÜLÖNLEGES NAPRENDSZERÜNK

Our peculiar Solar System

## GESZTESI ALBERT

A TIT Planetárium ny. igazgatóhelyettese  
gesztesi.albert@gmail.com

### ABSTRACT

Due to the continuous research in astronomy, more and more new results became known and several interesting papers, books were published for experts, adults and children, especially about the Solar System. This paper tries to accentuate some curiosities of the Solar System, among others point of interests of its structure, about the orbit of the planets round the barycentre, the order of the System, some special virtual motions of certain planets, the size and some physical aspects of the System and the visibility of the Cosmos.

**Keywords:** Solar System, planetary system, orbiting bodies, barycentre, inner and outer planets, resonance

### BEVEZETÉS

A Világmindenségről és benne Naprendszerünkről az elmúlt évtizedekben – magyar nyelven is – már számtalan érdekes könyvet írtak szakembereknek, felnőtteknek, fiataloknak és gyerekeknek egyaránt – a teljesség igénye nélkül l. pl. KULIN GY. – RÓKA G. (1980), ALMÁR I. – HORVÁTH A. (1981), HERMANN, D. B. (1981), FRANCIS, P. (1988), MARIK M. (1989), KUTNER, M. L. (2003), GARLICK, M. A. (2009), GÁBRIS GY. et al. (2010), SPOHN, T. et al. (2014), HALL, JAMES A. (2015), SPARROW, G. (2016), KARTTUNEN, H. et al. (2017), GESZTESI A. (2018), COHEN, A. – COX, B. (2023) stb. A mind újabb ilyen témájú könyvek megjelenését az is indokolja, hogy az égitestek kutatása folytonos, sőt fel is gyorsult, mert technikai lehetőségeink is fejlődnek. Mára már valamennyi bolygót sikerült űrszondákkal elérni, valamint több kisbolygót és üstököst is.

Jelen tanulmány – azon túl, hogy igyekszik a legfrissebb ismeretekkel szolgálni – elsősorban Naprendszerünk érdekességeire szeretné a súlyt helyezni. Miért különleges a Napunk? Miért különleges a Mars, a Szaturnusz, vagy éppen a Föld? Miért különleges az egész Naprendszer? Hiszen már több mint 5000 olyan bolygót találtak, amelyek nem a mi Napunk, hanem más csillagok körül keringenek (ezeket nevezzük exobolygóknak), és az eddig ismert „idegen” naprendszerek száma is több száz. Mégis különös módon egyetlen

olyan exobolygót sem sikerült találni, amely olyan lenne, mint a Föld, és egyetlen olyan naprendszert sem, amely a mienkre hasonlítana. Azonban Naprendszerünk valamennyi bolygója külön-külön is rengeteg érdekességgel bír, amelyeket érdemes bemutatni, és amelyek remélhetőleg hasznosíthatók a csillagászati földrajz tanítása során.

Naprendszer vagy bolygórendszer? A kérdés jogos. Amikor a Naprendszerről beszélünk, a legtöbb ember csak a Napra és a körülötte keringő bolygókra gondol. Ám a **Naprendszer** (részletes leírását l. pl. BEATTY, K. J. et al. 1999, SPOHN, T. et al. 2014, COHEN, A. – COX, B. 2023) ennél sokkal több és nagyobb! Minden, ami a Nap gravitációs uralma alatt áll, a Naprendszerhez tartozik, így a nyolc nagybolygón kívül azok holdjai, a kisbolygók és a törpebolygók, a meteoroidoknak nevezett, kisbolygóknál kisebb szilárd testek, az üstökösök és a távoli üstökösök (vagyis az üstökösök jégből, fagyott gázokból és porból álló szilárd központi részei), a bolygóközi por és gáz, valamint a Napból kiáramló töltött részecskék, amelyek a napszelet képezik. Külső határát nehéz meghatározni. Van egy elvi határ, amelyen belül a központi csillagunk gravitációja a meghatározó, ez mintegy másfél fényévnire, másképpen kifejezve nagyjából 100 000 csillagászati egységre van a Naptól, és beszélünk egy másik határról is, az úgynevezett helioszféra vagy magnetoszféra határáról, amely kb. 100 csillagászati egységre található. Ez utóbbi a határa Naprendszer azon tartományának, amelyet a Nap részecskesugárzása, a napszél tölt ki, és amelynek tulajdonságait a Napból kiáramló ionizált és mágnesezett plazma határozza meg. A méretek értelmezéséhez felidézzük, hogy csillagászati egységnek (CsE) a Nap–Föld távolságot tekintjük, ami kerekítve 150 millió km, egy fényév pedig 63 241 CsE-nek felel meg.

**Bolygórendszerünk**, amelyhez az említett nagy-, kis- és törpebolygók tartoznak (holdjaikkal), ennél kisebb méretű, külső határa kb. 50 CsE. Nézzük, milyen is a bolygórendszerünk szerkezete! Középen áll a rendszer legnagyobb méretű és tömegű égiteste, a Nap. Átmérője 109-szerese a Föld átmérőjének és a Naprendszer anyagának 99,8%-át tartalmazza. Érthető tehát, hogy körülötte keringenek a bolygók. Vagy mégsem? Hogy könnyebben megértsük, miről is van szó, kezdjük egy egyszerűbb példával!

## A FÖLD KÖRÜL KERING-E HOLD?

Valószínűleg nincs olyan gyerek, aki ne libikózázott volna. A libikóka (mérleghinta) legegyszerűbb formája egy hosszú deszka, amely középen kb. fél méter magasan alá van támasztva. Lényege, hogy mindkét végére felül egy-egy gyerek és le-föl emelkedhetnek rajta. Általában azonos súlyúak tudnak igazán jól játszani vele. A gyerekek persze tapasztalatból tudják, hogy ha egyikük nehezebb, akkor annak beljebb, vagyis az alátámasztáshoz közelebb kell helyet foglalnia ahhoz, hogy egyensúlyban legyenek. Ha

kétszer olyan nehéz Zolika, mint Anna, akkor Zolinak fele olyan távolságra kell ülnie. Ugyanis a fizikai mérlegelv szerint mindkét oldalon a súly (erő) szorozva az erő karjával egyenlő kell, hogy legyen, azaz kétszer akkora súlyhoz fele hosszúságú kar tartozik, ha meg akarjuk tartani az egyensúlyt.

Különösen hangzik, de most képzeljünk el egy olyan mérleghintát, melynek egyik oldalára a Földet, másik oldalára a Holdat tesszük (1. ábra)! Melyik pontban kellene alátámasztani a hintánkat ahhoz, hogy egyensúlyban legyen? Az égitestek esetében nem a súlyukról (mert az nincs nekik), hanem a tömegükről beszélünk. Durván számolva a Föld tömege 81-szer nagyobb, mint a Holdé. Kozmikus libikókánk hossza pedig 384 400 km, ennyi a Föld és a Hold közötti átlagos távolság. Most egy egyszerű számítás következik: osszuk el a 384 400 km-t 82-vel! Az eredmény kerekítve 4688 km. Tehát ahhoz, hogy Földünk és Holdunk mérleghintázni tudjon, az alátámasztást úgy kell elhelyeznünk, hogy az egyik oldalra 4688 km, a másik oldalra pedig  $384\,000 - 4688 = 379\,712$  km essen. Mit is jelent ez a 4688 km? Nem mást, mint azt, hogy a Föld–Hold rendszer alátámasztási pontja (amit közös tömegközéppontnak nevezünk) 4688 km-re van a Föld középpontjától. E körül a pont körül végzi keringését nemcsak a Hold, hanem a Föld is! Márpedig – mivel Földünk sugara 6378 km – ez a bolygónk belsejében, 1690 kilométerrel a Föld felszíne alatt van!

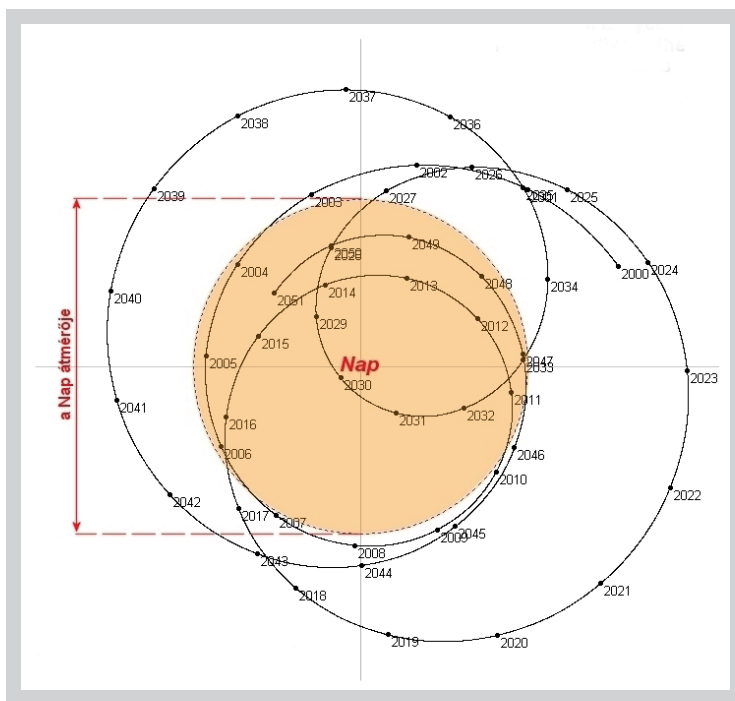
Most már pontosabb választ adhatunk arra a kérdésre, hogy mi körül kering a Hold: **a Föld–Hold rendszer közös tömegközéppontja** körül kering mindkét égitest.



1. ábra. A Föld–Hold mérleghinta (szerk. Gesztési A.)

## A BOLYGÓK KERINGÉSÉRŐL

A Föld–Hold rendszerhez hasonlóan a bolygók – és valamennyi égitest a Naprendszerben, beleértve a Napot is – ugyancsak egy közös tömegközéppont, úgynevezett **baricentrum** körül keringenek. (A fizikában egy részből álló rendszer tömegközéppontja az a nevezetes pont, amely sok szempontból úgy viselkedik, mintha a rendszer tömege ebbe a pontba volna koncentrálna.) Mivel a Föld–Hold rendszer aránytalanságához hasonlóan a Naprendszer tömegeloszlása is aránytalan, a baricentrumnak elvileg a Nap belsejében kellene elhelyezkednie, de valójában a Naprendszer tömegközéppontjának a helye állandóan változik (2. ábra). Az, hogy éppen hol helyezkedik el, azt a bolygók, elsősorban pedig az óriásbolygók pillanatnyi helyzete határozza meg. Mivel a bolygók keringésük közben folytonosan változtatják egymáshoz viszonyított helyzetüket, különös módon gyakran előfordul, hogy ez a közös tömegközéppont a Napon kívülre esik. Az ábrán látható, hogy a baricentrum 2016-ban lépett ki a Nap testéből és 2022–2023-ban távolodik el legjobban tőle. Nagyon érdekes, hogy ekkor a Nap felszínétől mért távolsága kb. akkora, mint a Nap átmérőjének a fele.

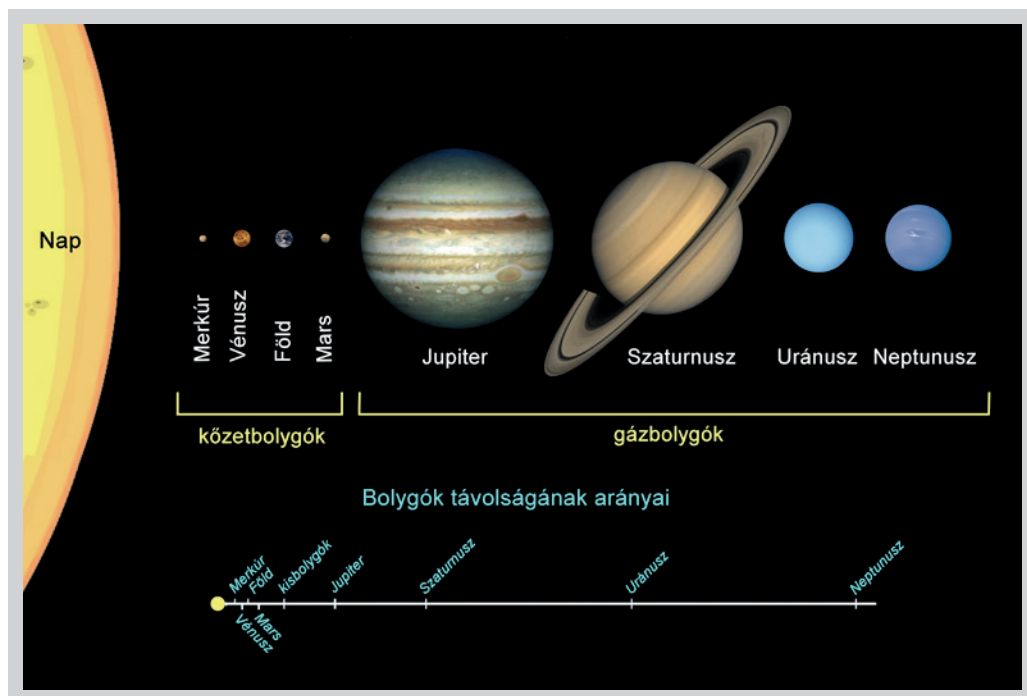


2. ábra. A Naprendszer tömegközéppontjának (baricentrumának) mozgása 2000–2050 között az ekliptika síkjára vetítve (szerk. Gesztesi A.)

## BOLYGÓCSALÁDUNK

Nyolc **nagybolygót** ismerünk, ezek a Naptól távolodva sorrendben a következők: Merkúr, Vénusz, Föld, Mars, Jupiter, Szaturnusz, Uránusz és Neptunusz. Valamennyi bolygó közül a Föld az egyetlen, amelyik nem mitológiai istenről lett elnevezve.

Mindenképpen ki kell térnünk arra, hogy a korábbi tankönyvekben még kilenc nagybolygót tartottak számon. Közülük a Naptól legtávolabbi volt a Plútó, amelyet 1930-ban fedeztek fel. A múlt század végére azonban bizonyossá vált, hogy a korábbi adatokkal szemben a Plútó egy egészen kis égitest, amelyet nem lehet nagybolygónak tekinteni. Átmérője mindössze 2376 km, jóval kisebb, mint a mi Holdunk, tömege pedig kb. 1/400-ad része a Föld tömegének. Ráadásul felfedezték, hogy a Neptunusz pályáján túl nemcsak a Plútó található, hanem egy egész kisbolygóöv, amelyet Kuiper-övnek neveztek el, és amelyben több, a Plútóhoz hasonló méretű égitestet találtak, sőt még nagyobbat is, mint például az Eriszt. Ennek hatására a Nemzetközi Csillagászati Unió (International Astronomical Union, rövidítve IAU) 2006-ban bevezetett egy új kategóriát, a **törpebolygókét**, és ugyanabban az évben a Plútót, a Naprendszer addig kilencedik nagybolygóját átsorolta ebbe az új törpebolygó kategóriába (részletesen l. <https://www>.



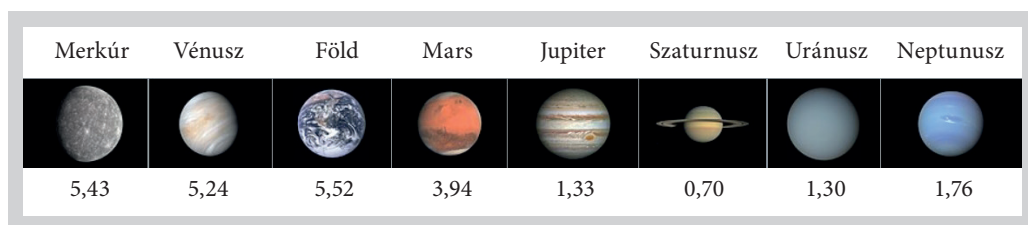
3. ábra. A bolygók típusai és távolságarányai (szerk. Gesztesi A.)

[iau.org/public/themes/pluto/](http://iau.org/public/themes/pluto/)). Bár a döntést sokan támadták, a Plútó „trónfosztottsága” véglegesnek tekinthető.

A nyolc nagybolygó tulajdonságaikat tekintve két nagy csoportra osztható: a kisméretű, de szilárd kéreggel rendelkező úgynevezett Föld-típusú, vagy más néven kőzetbolygókra, valamint a hatalmas méretű, de szilárd felszínnel nem rendelkező Jupiter-típusú óriásbolygókra, más néven gázbolygókra. A négy kőzetbolygó a Naphoz közel, míg a négy gázbolygó a Naptól távol kering.

Ha a fizikai különbségekről beszélünk, vizsgáljuk meg, hogyan alakulnak az **átlagsűrűségek!** A Naptól távolodva csökkennek a sűrűségértékek, de nem egészen folytonosan (4. ábra). Látható, hogy a kőzetbolygók lényegesen nagyobb sűrűségűek, mint az óriásbolygók. A Föld kilóg a sorból a legnagyobb átlagsűrűségével. Ez leginkább azzal magyarázható, hogy a Föld egy viszonylag nagyméretű holddal rendelkezik. Az elképzelések szerint a Naprendszer kialakulását követő első 100 millió éven belül az éppen formálódó Ős-Föld egy kb. Mars méretű égitesttel, a Theiával (Theia a görög mitológiában a Hold, azaz Szelené anyja) ütközött össze (CANUP, R. M. – ASPHAUG, E. I. 2001, MACKENZIE, D. 2003, CANUP, R. M. 2012). Az ütközés nem centrális, hanem érintőleges volt, aminek eredményeként tekintélyes méretű és tömegű anyag szakadt ki bolygónk kérgéből (egyes elméletek szerint a mai Csendes-óceán medencéje helyén). Mivel az akkorra már átolvadt Ős-Földben az anyag sűrűség szerinti elkülönülése nagyrészt megtörtént, a kiszakított kéregdarab sűrűsége kisebb volt, mint a bolygó egészéé. A Theia által kiszakított anyag többsége a Föld körül kezdett keringeni, majd ennek egy részéből összeállt a Hold, amelynek átlagsűrűsége  $3,34 \text{ g/cm}^3$ . Az ütközést követően tehát a Föld átlagsűrűsége kissé megnövekedett. Ha azonban a Föld–Hold kettős együttes átlagsűrűségét nézzük, akkor már bolygónk esetében sem tapasztalunk anomáliát. Az, hogy mennyi lehetett az ütközés előtt az Ős-Föld mérete és átlagsűrűsége, azt azért nem tudjuk megmondani, mert nincs információnk arról, hogy a Theiával való ütközés mennyi anyagot szakított ki a kéregből, ugyanis annak egy része szétszóródott a bolygóközi térben.

Elgondolkoztató, hogy ha ez a kozmikus karambol nem játszódik le 4,5 milliárd évvel ezelőtt, akkor a Föld fizikai paraméterei lehetővé tették volna-e az élővilág olyan evolúcióját, amely később az intelligens élet és a technikai civilizáció megjelenéséhez vezetett.

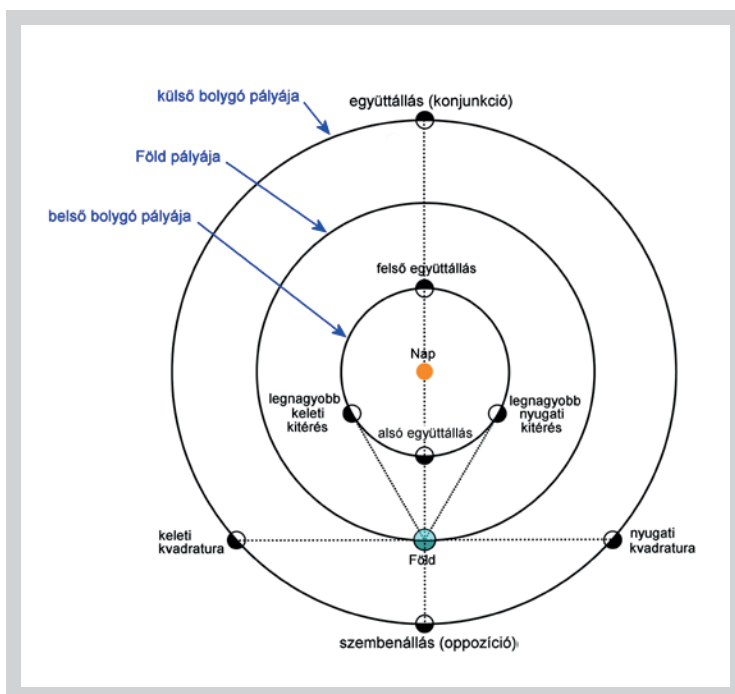


4. ábra. A bolygók sűrűsége ( $\text{g/cm}^3$ ) (szerk. Gesztesi A.)  
Megjegyzés: a méretek természetesen szélsőségesen torzítottak.

Az átlagsűrűség egyenletes csökkenése az óriásbolygók esetében sem áll fenn. Különösen kitűnik a sorból a Szaturnusz  $0,7 \text{ g/cm}^3$ -es átlagsűrűsége, ami kisebb, mint a vízé. Nehezen magyarázható. Hacsak azzal nem, miszerint az óriás gázbolygók eredetileg nem olyan naptávolságban keletkeztek, mint ahol most találhatók, hanem a Naprendszer korai időszakában egy átrendeződés zajlott le (VALLETTA, C. – HELLED, R. 2022).

## REND A RENDSZERBEN

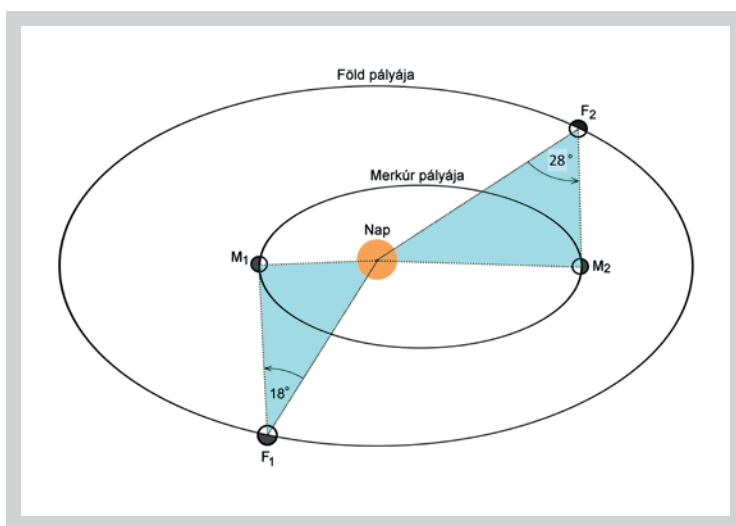
A csillagászatban az égitestek egymáshoz viszonyított helyzete mindig különös érdeklődésre tartott számot, és sok tudományos következtetés levonására adott lehetőséget. A nagybolygók esetében a Földhöz viszonyított helyzetük szerint beszélhetünk belső, azaz a földpályán belül keringő és külső, vagyis a Földnél távolabb keringő bolygókról (tehát maga a Föld egyik kategóriába sem sorolható). Ez csupán geometriai elrendeződésük szempontjából érdekes. Az égitestek helyzetének leírására szolgáló fogalom a **kitérés** (elongáció), az a fokban mért szög, amit a Földről nézve a Nap irányába és egy bolygó irányába meghúzott képzeletbeli egyenesek bezárnak. **Együttállásról** (konjunkció) beszélünk, ha ez a szög  $0^\circ$ . Mint az 5. ábrán látható, három égitest kölcsönös helyzetéből



5. ábra. A Nap, a Föld, valamint a külső és a belső bolygók egymáshoz viszonyított helyzetei (szerk. Gesztési A.)

adódóan kétféle együttállás lehetséges. Alsó együttálláskor a Nap és a Föld között van a bolygó, felső együttálláskor viszont a Nap van a Föld és a bolygó között. Egy harmadik eset a szembenállás (oppozíció), amikor a Föld van a bolygó és a Nap között, ilyenkor az elongáció értéke  $180^\circ$ .

A Föld pályáján belül két bolygó kering, a Merkúr és a Vénusz; ezért ezeket **belső bolygók**nak nevezzük. Pályahelyzetükből adódik, hogy soha nem jutnak szembenállásba (oppozícióba) a Nappal, azaz soha nem kerülhet Nap és az adott bolygó közé a Föld. A Merkúr és a Vénusz megjelenésében és láthatósága körülményeiben sok hasonló vonás van. A Földről nézve mindig a Nap közelében láthatók. Fentebb említett kitérésüket (elongációjukat) illetően keleti kitérésről beszélünk, ha a bolygó kelésben és nyugvásban követi a Napot. Ilyenkor tehát ezek a bolygók, mint „alkonycsillagok” figyelhetők meg napnyugta után. Nyugati az elongáció, ha a bolygó kelésben és nyugvásban megelőzi a Napot. Ilyenkor napkelte előtt, mint „hajnalcsillagok” láthatók. Népünk a Vénuszt nevezi Esthajnalcsillagnak, mert hol az esti, hol a hajnali égbolton látható, de ez a megnevezés ugyanúgy érvényes lenne a sokkal nehezebben megfigyelhető Merkúrra is. A Merkúr maximális elongációja  $28^\circ$ , a Vénuszé közel  $48^\circ$ . Minthogy 15 foknyi elmozdulásuknak egy óra felel meg, kedvező évszakban a Merkúr 2-2,5 órával, a Vénusz 3-4 órával kelhet korábban, illetve nyugodhat később a Napnál. A láthatóság szempontjából ez a kedvező eset csak akkor következik be, ha a keleti elongáció tavaszra, a nyugati pedig őszi esik, mert ilyenkor kellően meredek az ekliptikának – azaz a Föld keringési síkjának – a helyzete a mi látóhatárunkhoz képest.



6. ábra. A Merkúr lehetséges legnagyobb és legkisebb kitérése (szerk. Gesztesi A.)

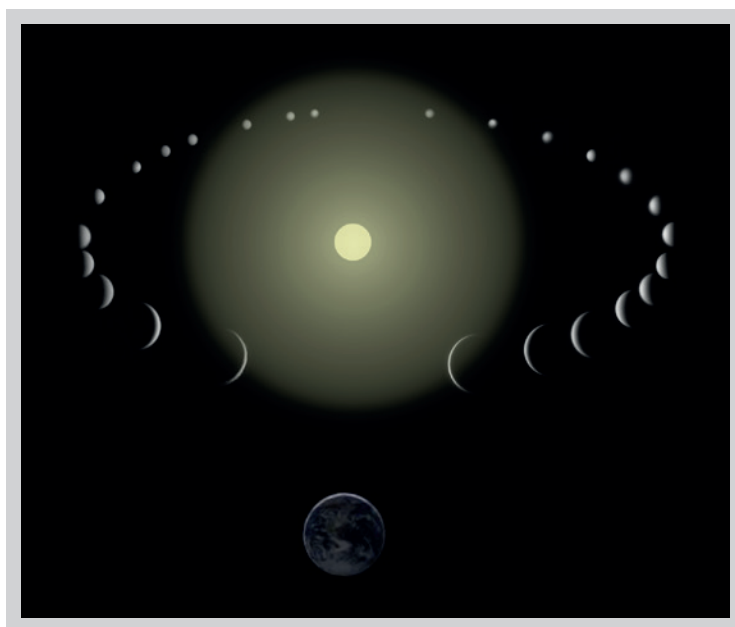


Mivel a Merkúr eléggé elnyújtott pályán kering, a maximális és minimális kitérése elég nagy értékek között változik (6. ábra). Ettől függ, hogy mely időszakok kedvezőbbek a megfigyelésére.

A Merkúr és a Vénusz alsó együttállás idején a Föld és a Nap között van. Ha pályájuk az ekliptika síkjában fekédné, akkor minden alsó együttállás idején elvonulnának a Nap korongja előtt. A Merkúr pályája azonban  $7^\circ$ -kal, a Vénuszé pedig  $3,5^\circ$ -kal hajlik az ekliptikához. Csak akkor láthatunk bolygóátvonulást, tulajdonképpen bolygó okozta „napfogyatkozást”, ha az alsó együttállás a bolygópálya és az ekliptika metszéspontjának közelében következik be. Ezért ritkák az ilyen csillagászati események.

Felső együttállás idején a bolygók a Nap túlsó oldalán járnak, ilyenkor elvileg teljes felénk néző korongjuk meg van világítva, ám éppen a Nap takarja el azokat. Alsó együttálláskor viszont sötét felüket mutatják. A Merkúr és a Vénusz is ugyanolyan fényváltozásokat mutat, mint a Hold, esetükben „újholdnak” az alsó együttállás, első negyednek a keleti kitérés, „holdtöltének” a felső együttállás és utolsó negyednek a nyugati kitérés felel meg (7. ábra).

**Külső bolygók**nak nevezzük azokat, amelyek a Föld pályáján kívül, tehát a Naptól távolabb keringenek. Ezek a Mars, Jupiter, Szaturnusz, Uránusz és a Neptunusz. Megfigyelhetőségük és geometriai elrendezésük más, mint a belső bolygóké (5. ábra). A



7. ábra. Egy belső bolygó megvilágítottsági fázisai a Földről nézve (a Cuaderno de Cultura Científica ábrája alapján szerk. Gesztési A.)

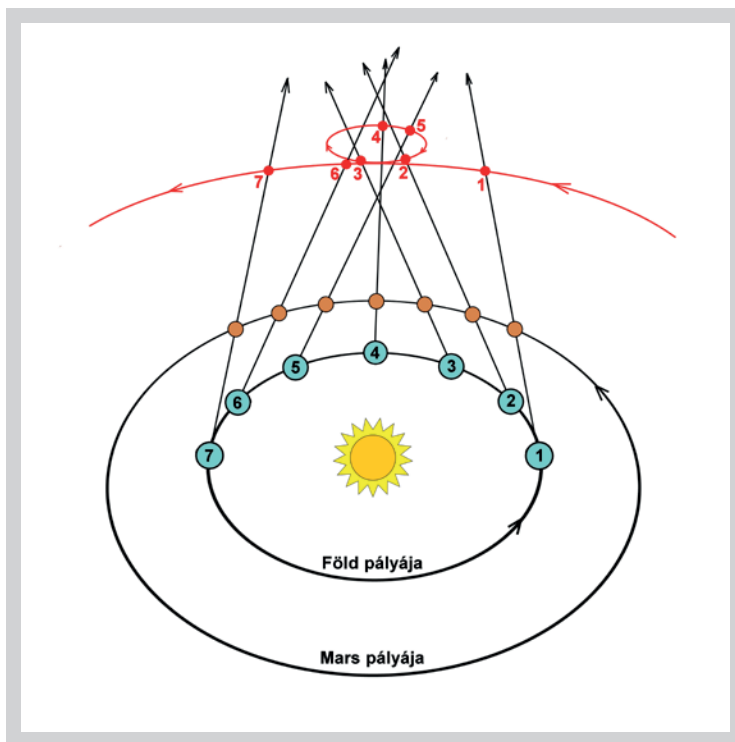
külső bolygóknál is beszélünk együttállásról (konjunkció), de csak felső együttállásról, alsó együttállás sohasem következhet be, ezért ezeket a bolygókat nem is láthatjuk a Nap előtt áthaladni. Esetükben a szembenállás (oppozíció) – amikor a Földről nézve a bolygó a Nappal átellenes irányban látható – fontos, ugyanis a szembenállás ideje a legalkalmasabb egy bolygó megfigyelésére, mert ilyenkor teljes felénk forduló korongja meg van világítva, valamint tőlünk való távolsága ekkor a legkisebb.

A külső bolygók Földhöz viszonyított helyzetének egy másik esete a **kvadrátúra**, amikor a Földről nézve a bolygó látóiránya merőleges a Nap irányára (azaz a korábban említett kitérés vagy elongáció éppen  $90^\circ$ ). Ilyenkor is beszélhetünk keleti, illetve nyugati kvadrátúráról. Kvadrátúra idején a bolygó Földről látható megvilágítottsági viszonyai a Naptól való távolságtól függenek.

Azok a bolygók, amelyek a Földnél távolabb keringenek a Naptól (a Mars, a Jupiter, a Szaturnusz, Uránusz és a Neptunusz) a Kepler-törvények alapján lassabban haladnak pályáikon, hiszen minél távolabb vannak, annál hosszabb idő alatt kerülnek meg a Napot. Emiatt érdekes helyzetek alakulhatnak ki, pl. keringése során a Föld a külső bolygókat időnként „utoléri”, mert gyorsabban mozog. Sőt ilyenkor úgy látjuk, mintha a bolygók a csillagok között mozogva megállnának, majd visszafelé haladnának egy ideig, azután ismét megállnak és folytatják útjukat. Úgy tűnik, mintha bolyonganának az égen (erről kapták „bolygó” nevüket ezek az égitestek; BENKŐ L. 1967). Természetesen csak látszólagos mozgásról beszélhetünk, valójában egyetlen bolygó sem fordul vissza keringése közben. Olyan ez, mint amikor az autóval előzünk egy másikat, és egymás mellé érve úgy látjuk, mintha a leelőzött autó hátrafelé haladna. Ezt retrográd mozgásnak nevezzük. A 8. ábra segíthet a jelenség megértésében.

## A BOLYGÓPÁLYÁK REZONANCIÁI

A Naprendszerünk stabilitását, vagyis azt, hogy hosszú időn keresztül, akár évmilliárdokon át nem változnak a bolygók pályái, a közöttük fennálló rezonanciáknak köszönhetjük. Ha valamely zavaró erő egy adott bolygó pályájának mindig ugyanabban a pontjában hat és ez periodikusan ismétlődik, akkor a hatások idővel összeadódnak és felerősödnek, fellép a **rezonancia** jelensége. A rezonancia a fizikában jól ismert dolog és nagyon sok megnyilvánulási formája van. Ha egy fizikai rendszert – energiabefektetéssel – nyugalmi helyzetéből kimozdítunk, akkor az oda vissza akar térni. A hegedű megpendített húrja például nyugalmi helyzete körül rezegni kezd, ez adja a hangját. Szemléletesebb talán az ingamozgást figyelni. A lógó súly nyugalomban van, az inga nem mozog. Ha eltávolítjuk a súlyt nyugalmi helyzetéből, azaz „meglökjük”, akkor lengő mozgást fog végezni mindaddig, amíg a súrlódási erők meg nem állítják. A gyerekhinta



8. ábra. A Mars látszólagos hurokmozgása a csillagokhoz viszonyítva (szerk. Gesztesi A.)

sem más, mint egy inga. Ha egyszer meglöktük a hintát, akkor könnyű mozgásban tartani (sőt növelni a kilengését), ha a megfelelő mozgásfázisban egy kicsi erőt adunk hozzá. Aki tud hintát hajtani, éppen ezt teszi: lengés közben az előre- és hátrahajlásával a súlypontját emeli és süllyeszti, így mindig egy kicsit hozzátesz a hinta lengési energiájához. Ez is rezonancia.

A keringő égitestek esetében a gravitációs energiáé a főszerep. Két égitest között akkor a legnagyobb a **gravitációs vonzás**, amikor keringésük során éppen közel kerülnek egymáshoz. Ilyenkor a legnagyobb a perturbáló, azaz pályamódosító erő, amely természetesen mindkettőre hatással van. Az egyiket kicsit gyorsítani, a másikat kicsit fékezni fogja. Nagyon hosszú idő és rengeteg keringés után a gyorsítások és fékezések különös periódusokat hoznak létre, létrejönnek a rezonáns keringések. Két bolygó keringési rezonanciában van, ha keringési idejük egész számú többszörösei valamilyen arányban állnak egymással. Bolygórendszerünkben nagyon sok rezonáns pálya található, nemcsak a bolygók, hanem a bolygók holdjai között is. Az 1. táblázatban láthatunk ezek közül néhányat. A táblázat utolsó oszlopában látható pontos értékek azért

különböznek a rezonancia elméleti értékeitől, mert nemcsak a bolygópárok kölcsönhatásait kell figyelembe venni, hanem azt is, hogy minden bolygó mozgását az összes többi bolygó gravitációs hatása befolyásolja.

Bolygópár	Keringési idő* (nap)	Rezonancia (kerekítve)	A rezonancia pontos értéke a valóságban
Merkúr – Vénusz	87,97– 224,70	2:5	2:5,11
Vénusz – Föld	224,70– 365,26	8:13	8:13,00
Föld – Mars	365,26– 686,98	1:2	1:1,88
Mars – Ceresz**	686,98– 1 680,00	2:5	2:4,89
Ceresz** – Jupiter	1 680,00– 4 332,71	2:5	2:5,15
Jupiter – Szaturnusz	4 332,71– 10 759,50	2:5	2:4,97
Szaturnusz – Uránusz	10 759,50– 30 685,00	1:3	1:2,85
Uránusz – Neptunusz	30 685,00– 60 190,00	1:2	1:1,96

1. táblázat. Egyes bolygók és holdjaik pályái között fellépő rezonanciák (szerk. Gesztesi A.)

\* A csillagokhoz viszonyított (sziderikus) keringési idő

\*\* A Mars és a Jupiter között keringő törpebolygó

## A BOLYGÓPÁLYÁK VISZONYLAGOS SZABÁLYSZERŰSÉGEI

Tulajdonképpen ugyancsak a rezonancia az alapja annak, hogy a bolygópályák Naptól mért távolságai is valamiféle szabályszerűséget mutatnak. A 18. század közepén, amikor a bolygók valódi távolságait még nemigen ismerték, csupán a távolságarányaikat, két német csillagász, JOHANN DANIEL TITIUS és JOHANN BODE ezt matematikai formába öntötték. Ezért ezt róluk manapság **Titius–Bode-szabálynak** (vagy röviden csak Bode-szabálynak) nevezzük. BODE folyamatosan kétszereződő számsort választott alapul. Ezután minden értékhez hozzáadott 4-et és elosztotta 10-zel. Így megkapta a bolygók csillagászati egységben (CsE) kifejezett naptávolságait (9. ábra). A Bode-szabály értékei a valósággal jó egyezést mutatnak a Naphoz közeli bolygók esetében, de a távolabbiakra már nem illeszkednek kellőképpen.

	Merkúr	Vénusz	Föld	Mars		Jupiter	Szaturnusz	Uránusz	Neptunusz
a	0	3	6	12	24	48	96	192	384
b	0,4	0,7	1,0	1,6	(2,8)	5,2	10,0	19,6	38,8
c	0,387	0,723	1,000	1,524	-	5,203	9,357	19,191	30,069

9. ábra. A Titius–Bode-szabály kiinduló adatai (a) és számított értékei (b), valamint a közepes bolygótávolságok valós értékei (c) (szerk. Gesztesi A.)

Már a szabály megalkotásakor tapasztalható volt, hogy 2,8 CsE-nél nincs bolygó. Persze ezt a „hiányzó” bolygót lázasan kezdték keresni a 18. század végén, de 1801. újév napjáig nem jártak eredménnyel. Ekkor talált egy halvány kis égitestet GIUSEPPE PIAZZI (1746–1826) olasz csillagász, amely 2,76 CsE-re volt a Naptól, és amelynek a Ceresz nevet adta. Bár mérete ahhoz túl kicsi volt, hogy a hiányzó bolygónak megfeleljen, de a sikeren fellelkesülve egymás után több kis égitestet fedeztek fel e távolság közelében, így derült ki, hogy ebben a távolságban, a Mars és a Jupiter pályája között található a kisbolygók, vagy más néven az aszteroidák övezete. Kb. 950 km-es átmérőjével mindaddig a Ceresz a legnagyobb égitest ebben a kisbolygóövben. (Valójában a Ceresz nem kis-, hanem törpebolygó, mert – mint ahogy fentebb a Plútó „trónfosztása” kapcsán már említettük – amikor a Nemzetközi Csillagászati Unió 2006-ban bevezette a „törpebolygó” kategóriát, akkor a Cereszt ebbe a bolygótípusba sorolta). Az öv kisbolygóinak száma ma már sok ezer, közülük jó néhányat magyar csillagászok – köztük KULIN GYÖRGY – találtak meg.

## BOLYGÓRENDSZERÜNK NÉHÁNY ÉRDEKESÉGE

Szólnunk kell először is **bolygórendszerünk arányairól**, ugyanis a legtöbb emberben ezzel kapcsolatban hamis képzetek élnek. A valóságban olyan hatalmas távolságokról és égitestméretekről van szó, amelyeknek magunk elé képzelése lehetetlen. Arányosan le kell hát kicsinyítenünk a bolygórendszert, hogy a mindennapi életben megszokott méretek tartományába jussunk. A 2. táblázat – amely a kicsinyített modell adatait tartalmazza – kiindulásaként fogadjuk el, hogy Napunkat, amelynek átmérője a valóságban közel 1 400 000 km, fociabdánál nem sokkal nagyobb méretűnek választjuk, legyen tehát a Nap átmérője 30 centiméter! Ilyen kicsinyítés esetén a kőzetbolygók egy borsszemnél

Név	Átmérő (cm)	Távolság (m)
Nap	30,00	-
Merkúr	0,10	12,49
Vénusz	0,26	23,30
Föld	0,27	32,24
Mars	0,14	49,11
Jupiter	3,08	167,71
Szaturnusz	2,50	307,57
Uránusz	1,01	618,64
Neptunusz	0,97	969,88

2. táblázat. Bolygórendszerünk arányai (szerk. Gesztési A.)

is kisebbek, a két legkülső bolygó nem sokkal nagyobb egy jól kifejlett borsószemnél, és még a két óriás gázbolygó sem sokkal nagyobb, mint a híres germersdorfi cseresznye egy szeme. Mindenképpen említésre érdemes, hogy ilyen arányok mellett a legközelebbi csillag (alfa Centauri) 8700 kilométerre lenne tőlünk.

Jól látható, hogy a kőzetbolygók lényegesen kisebbek az óriásbolygóknál. A Jupiter átmérője például 11-szer nagyobb a Föld átmérőjénél. A holdakról se feledkezzünk meg (HALL, J. A. 2015), pl. a Jupiter Ganümedesz és a Szaturnusz Titán nevű holdjai nagyobbak a Merkúrnál, és a Jupiter körül keringő Kallisztó is alig marad el a Merkúr méretétől. A bolygók holdjai, a törpe- és kisbolygók (és azok holdjai), az üstökösmagok, valamint a meteoroidok és a keringő porszemcsék méretei között szinte folytonos az átmenet.

Egyéb érdekességek közül megemlítendő, hogy van két olyan bolygó, amelyeknek nincs egyetlen holdjuk sem, ezek a Merkúr és a Vénusz. A legtöbb holddal a Szaturnusz (jelenlegi ismereteink szerint 83, további 20 felfedezése megerősítésre vár) és a Jupiter (legalább 92) rendelkezik. A Szaturnuszon kívül a Jupiternek, az Uránusznak és a Neptunusznak is van gyűrűje, bár ezek jóval kisebbek és sötétebbek. Van olyan bolygó, amelynek nincs légköre, ez a Merkúr, és van olyan hold, amelyik a földinél is sűrűbb atmoszférával rendelkezik, ez a Szaturnusz legnagyobb holdja, a Titán. Azt gondolhatnánk, hogy a legforróbb bolygó a Merkúr, mert ez kering legközelebb a Naphoz. Azonban míg a napsütötte oldalán légkör hiányában a sziklák +450-480 °C-ig melegedhetnek fel, addig az éjszakai oldalon -200 °C-ig hűlnek le. Emiatt a Merkúr átlaghőmérséklete elmarad a Vénuszétól, amelynek sűrű atmoszférája a bolygó egészén +470 °C-ot biztosít.

## MIÉRT LÁTJUK AZ ÉGITESTEKET?

Az égitesteket alapvetően azért láthatjuk, mert a **Föld légköre átlátszó**, természetesen akkor és azokon a helyeken, ahol éppen nem borítja felhőzet. Átlátszó az atmoszféránk, pedig a felszínen 1 köbdeciméter levegő 1022 atomot tartalmaz.

A légkörön túl azonban még nagyobb az átlátszóság. 130 km nem nagy távolság, autóval autópályán haladva egy óra alatt meg lehet tenni, ám ha függőlegesen haladunk 130 km-t, akkor már elhagyjuk a Föld számottevő légburkát és kijutunk a világűrbe. A bolygóközi térben – földi értelemben – vákuum van. Ebben a vákuumban már átlagosan csak 1000 részecske van  $\text{dm}^3$ -enként, azaz a földfelszíni levegő sűrűségének milliárdod-szor milliárdod részénél is kisebb! Ez a bolygóközi tér átlagos **sűrűsége** (ami a Naptól távolodva csökken, a bolygók közelében pedig kicsit nagyobb lehet). Földi laboratóriumokban a legjobb vákuumszivattyúkkal sem tudjuk megközelíteni ezt az értéket. A csillagközi térben tovább csökken a sűrűség, ott mindössze 1-2 részecske található köbméterenként. Nem csoda hát, hogy ennyire átlátszó a világűr.

Összefoglalva elmondható, és a fentebb leírtakból látható, hogy Világmindenségünk és benne Naprendszerünk számos különlegességet, érdekességet rejt. Sajnos földrajzoktatásunk kevés lehetőséget, csekély óraszámot biztosít a csillagászati ismeretek tanítására. Csak remélhető, hogy a tanulmányban említett érdekességek és különlegességek tanórai felhasználásával ez a kevés ráfordítható idő is felkelti a tanulók érdeklődését – a Világmindenség méreteit tekintve még hatalmas fejlődés előtt álló – csillagászat iránt.

## IRODALOM

- ALMÁR IVÁN – HORVÁTH ANDRÁS (szerk.) (1981): Űrhajózási lexikon. – Akadémiai Kiadó – Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest. 999 p.
- BEATTY, KELLY J. – PETERSEN, CAROLIN C. – CHAIKIN, ANDEW (1999): The new Solar System. – Cambridge University Press, Cambridge. 421 p.
- BENKŐ LORÁND (főszerk.) (1967): A magyar nyelv történeti-etimológiai szótára I. – Akadémiai Kiadó, Budapest. 1142 p.
- CANUP, ROBIN M. (2012): Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. – *Science* 338. 6110. pp. 1052–1055. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1226073>
- CANUP, ROBIN M. – ASPHAUG, ERIK IAN (2001): Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. – *Nature* 412. 708. DOI: <https://doi.org/10.1038/35089010>
- CLARK, STUART (2011): Nagy kérdések: világegyetem. – Geographia Kiadó, Budapest. 208 p.
- COHEN, ANDREW – COX, BRIAN (2023): A bolygók élete. Naprendszerünk bolygóiról. – Akkord Kiadó, Budapest. 288 p.
- FRANCIS, PETER (1988): A bolygók – Gondolat Kiadó, Budapest. 421 p.
- GÁBRIS GYULA – MARIK MIKLÓS – SZABÓ JÓZSEF (2010): Csillagászati földrajz – Nemzedékek Tudása Tankönyvkiadó, Budapest. 338 p.
- GARLICK, MARK A. (2009): Az Univerzum atlasza. – Szalay Könyvek, Budapest. 304 p.
- GESZTESI ALBERT (2018): Csillagképek. – Kossuth Kiadó, Budapest. 256 p.
- HALL, JAMES A. III. (2015): Moons of the Solar System – From giant Ganymede to dainty Dactyl. – Springer. 217 p. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20636-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20636-3_13)
- HERRMANN, DIETER B. (1981): Az égbolt felfedezői. – Gondolat Kiadó, Budapest. 277 p.
- HERMANN, JOACHIM (1992): Csillagászat. SH Atlasz. – Springer Hungarica, Budapest. 288 p.
- JOHNSON, MARCUS (2019): A világegyetem. – Kreatív Kiadó, Budapest. 64 p.
- KARTTUNEN, HANNU – KRÖGER, PEKKA – OJA, HEIKKI – POUTANEN, MARKKU – DONNER, KARL J. (2017): Fundamental astronomy. – Springer Berlin, Heidelberg. 550 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53045-0>
- KULIN GYÖRGY – RÓKA GEDEON (1980): A távcső világa. – Gondolat Kiadó, Budapest. 886 p.
- KUTNER, MARC L. (2003): Astronomy: A physical perspective. – Cambridge University Press, Cambridge. 582 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511802195>

- MACKENZIE, DANA (2003): The Big Splat, or how our Moon came to be. – John Wiley et Sons, Hoboken. 240 p.
- MARIK MIKLÓS (szerk.) (1989): Csillagászat. – Akadémiai Kiadó, Budapest. 867 p.
- SPARROW, GILES (2016): A vörös bolygó. – Gabó Könyvkiadó, Budapest. 144 p.
- SPOHN, TILMAN – BREUER, DORIS – JOHNSON, TORRENCE V. (szerk.) (2014): The encyclopedia of the Solar System. – Elsevier, 1311 p.
- VALLETTA, CLAUDIO – HELLED, RAVIT (2022): Possible in situ formation of Uranus and Neptune via pebble accretion. – The Astrophysical Journal 931. 1. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac5f52>