

DEME BARNABÁS

Kis égitestek a Naprendszerben

Szakmailag ellenőrizte: Érdi Bálint

Absztrakt

A 19. századtól kezdve – a gyorsan fejlődő megfigyelési technikának köszönhetően – mind több és több kisbolygót fedeznek föl Naprendszerünkben. Túlnyomó többségük a Mars és a Jupiter közötti régióban helyezkedik el, de az 1970-es évek óta egyre több ilyen objektumot fedeznek föl a Jupiter és a Neptunusz közötti térségben is. Kettős természetük miatt (mivel egyszerre rendelkeznek aszteroidákra, illetve üstökösökre jellemző jegyekkel) kentauroknak hívják őket. Vizsgálatuk a Naprendszer-kutatás szerves részét képezi, mert nagyban hozzásegíthetnek bennünket ahhoz, hogy teljesebb kép alakuljon ki bennünk csillagrendszerünk összetételéről, illetve keletkezéséről.

Kulcsszavak: kentaurok, kisbolygók, égi mechanika

1. Bevezetés

Az itt közölt dolgozat összefoglaló jellegű: arról az igen terjedelmes tudásanyagról szól nagyvonalakban, amit Naprendszerünk kisbolygóiról eddig összegyűjtöttünk (különös tekintettel azok egy bizonyos típusára, a kentaurokra). Megemlítésre kerülnek azok a vizsgálati módszerek, amelyekkel a csillagászok igyekeznek földéríteni felszíni viszonyaikat és belső szerkezetüket, továbbá szó lesz a kutatások eredményeiről, végül pedig ezen égitestek mozgásáról, dinamikai jellegzetességeiről.

Nagyvonalakban a témának két okból van komoly jelentősége.

Egyrészt - és ez a teljes társadalmat érinti és izgatja - a Naprendszer kisbolygói valós fenyegetést jelentenek a Földdel való kataklizmikus összeütközésük nemnulla esélye miatt. Erre számtalan esetben volt

példa bolygónk 4,5 milliárd éves élete alatt, melyek közül én most csak néhány nevezetese emelek ki:

- Bolida Chelyabinsk fölött 2013 februárjában (1100 ember sérült meg)
- A Tunguzka-meteor 1908 nyarán (1250 km² tajgát tarolt le)
- Chixulub-meteorbecsapódás 65 millió évvel ezelőtt (dinoszauruszok tömeges kihalása)

A becsapódások gyakorisága és ereje erősen csillapított a Föld atmoszférájának köszönhetően, a fenti események viszont hű képet nyújtanak az ütközések elsöprő erejéről (ezt kevésbé fenyegető körülmények között is sikerült alaposan megvizsgálni 1994-ben, amikor a 21 darabra szakadt Shoemaker-Levy-9 üstökös becsapódott a Jupiter légkörébe). Konkrét információkkal szolgál egy földi becsapódási kráter részletes vizsgálata is: pillanatnyilag 185 darab ilyen képződmény ismert bolygónk felszínén, melyek közül a legöregebb 2 milliárd évvel ezelőtt keletkezett. Ennél régebből az erózió miatt nincsen ilyen jellegű nyomunk.

A másik ok, ami a kutatások homlokterébe helyezi a kisbolygók vizsgálatát, az az általuk hordozott ismeret a Naprendszer hajnaláról - úgy összetételi, mint dinamikai szempontból. A holisztikus kép kialakítása végett most fölvezöljük a legvalószínűbb forgatókönyvet, amely alapján Naprendszerünk mai arculatát elnyerte.

2. A Naprendszer eredete

Naprendszerünk nagyjából 4,6 milliárd évvel ezelőtt keletkezett egy gázból és porból álló felhőből. Ennek központi tartománya a gravitációs összehúzódás (az objektum a saját súlya alatt kezd összeroskadni) révén erősen fölmelegedett (protocsillag-fázis), míg a külsőbb tartomány egy lapos, korong alakú struktúrába rendeződött az előbbi körül (akkréciós korong). Utóbbiban a nanométeres nagyságrendbe eső porszemcsék folyamatosan összetapadtak, mígnem kilométeres nagyságú tömbökké nem váltak: ezeket planetezimális testeknek hívjuk. Ezek többsége - esetenként megszaladó ritmusban - tovább folytatta a bővülést, kialakítva azokat a bolygóembriókat, melyek a mai kőzetbolygókat, vagy a gázbolygók szilárd magjait képezik. A megmaradó planetezimális testek közül a nagyobbakat ma törpebolygóként tartjuk számon, míg a kisebbeket aszteroidaként vagy

üstökösként. Megjegyzésként hozzáfűzendő, hogy a kialakulás pontos mechanizmusa a mai napig tisztázatlan. Sokáig több alternatív forgatókönyv is elképzelhető volt (kaptációs, nebuláris, majd ez utóbbiból a turbulencia-, illetve a Hoyle-féle modell), míg manapság az exorendszerek (más csillagok, illetve a körülöttük keringő bolygórendszerek) vizsgálata a kört egyre jobban leszűkíti, kitüntetve a fentebb vázolt folyamatot.

A fizikai alak elnyerése azonban csupán egyik fele a fejlődésnek: hasonló fontosságnak örvend a dinamikai történet is. A Naprendszer óriásbolygói (Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz) a kezdeti szakaszban különösen instabil pályákon mozogtak, ami nagy bolygóvándorlásokhoz vezetett (migráció-elmélet). A gravitációs potenciáltérkép átrajzolódásával járó folyamat a már kialakult kisbolygók pályáit is jelentősen befolyásolta: főleg az Uránusz és a Neptunusz migrációjának köszönhetően kisebb objektumok egy jelentékeny csoportja sodródott ki a Naprendszer peremére, ahol most két fő tartományban helyezkednek el: a Kuiper-Edgeworth-övben (gyűrű alakú térrész a Naptól nagyjából 40 AU távolságra - $1 \text{ AU} = 150 \text{ millió km}$); precízebben Neptunuszon túli térség) és az Oort-felhőben (gömb alakú térrész a Naptól kb. 100 ezer AU távolságra). Az itt keringő objektumoknak a sziklás anyagok mellett fontos összetevője még a különféle megfagyott gázok jege, amelyek - ahogy az égitest megközelíti perihéliumpontját - szublimálnak, és a mag körül kómát alakítanak ki (ez a napszéllel, vagyis a Napból kiáramló elektromosan töltött részecskék gyors áramlatával kölcsönhatva csóvát eredményez). Az ilyen jellegű aktivitást mutató objektumokat üstökösöknek nevezzük.

Az előbb említett kettő mellett a Naprendszerben más régiók is vannak, ahol a migráció lezárulása után kellően stabil pályára tudtak állni kisbolygók. Legnagyobb számban egy ugyancsak gyűrű alakú zónában a Naptól 3-4 AU távolságra, a kisbolygó-övben halmozódtak föl. Az itt keringő planetáris testek (aszteroidák) már főleg sziklás felépítésűek és szilikátokból, szénhidrogénvegyületekből, illetve egyéb fémekből állnak.

3. A kisbolygók osztályozása

Az előző fejezetben - főleg a kialakulás körülményeiből levezetve - a

kisbolygókat első közelítésben két nagy kategóriába soroltuk: üstökösök és aszteroidák. A fölöstásnak azonban létezik egy ennél kifinomultabb verziója is, amit alább írunk le.

3.1. Az üstökösök

A jellegzetes megjelenésű üstökösök alapvetően két nagy csoportba sorolhatók (P-vel a keringési idejüket jelöljük; az értékek természetesen a továbbiakban is földi években értendők):

- rövid periódusú üstökösök ($P < 200$ év)
- hosszú periódusú üstökösök ($P > 200$ év)

A két halmaz között az átjárás meglehetősen gyakori, ami az üstökösök pályáját befolyásoló három fő tényező hatásának tudható be.

Ezek közül az első - és legfőbb - az óriásbolygók perturbáló (pályaháborgató) hatása. Gravitációs kölcsönhatásba lépve ezekkel (főleg a Jupiterrel) az üstökösök alkalmanként még pályára is állhatnak az adott égitest körül - ez történt a már említett Shoemaker-Levy-9 üstökösrel is.

A második pályaalakító faktor a Nap. Egyrészt ez még a Jupiternél is erősebb gravitációs hatással van a kométákra (a Napot nagyon megközelítő üstökösöket napsúrolóknak hívjuk; nem ritka, hogy ezek a perihélium környékén teljesen szétesnek, vagy belezuhnnak a Napba), másrészt hősugárzása révén beindítja azokat a már említett folyamatokat, amik a kóma és a csóva kialakulásához vezetnek: a másodpercenként elszublimáló anyag mennyisége könnyen elérheti a néhányszor 10 tonnát, sebessége pedig akár a 100 km/s-ot. Az üstökös felszínének ezek a gázkilövellései egyrészt jelentősen átalakítják a kb. 10^{10} tonna tömegű mag belső szerkezetét (és akár mérhető méretváltozást is eredményezhetnek), ugyanakkor - egyfajta rakéta-elvvel - módosíthatják a pályát is. Nem elhanyagolható emellett a napszél hatása sem, ami nemcsak a magot burkoló kómára, de esetleg magára a mozgásra is hatással lehet.

A harmadik tényező leginkább az Oort-felhőben lévő objektumok esetében számottevő. Ezeknek a Naptól vett távolsága - ahogy az már szerepelt - nagyságrendileg 100 ezer AU, ami már összemérhető az intersztelláris távolságokkal (a legközelebbi csillag a Naptól 4,26 fényévre van, ami kb. 900 ezer AU). Mindez azt jelenti, hogy az ottani üstökösök mozgását a Napon kívül más csillagok is alakíthatják, elindítva ezzel őket a Naprendszer belseje felé.

A fentiekből az következik, hogy az üstökösök pályája cseppet sem állandó, vagyis pályaelemeik jelentősen megváltozhatnak. Emiatt elvileg előfordulhatna az, hogy egy üstököst „újra felfedezünk” azt követően, hogy pályája szinte teljesen átalakult. Van azonban egy számérték, ami még a perturbáció ellenére is jó közelítéssel állandó marad, így ennek segítségével könnyen azonosítható egy már korábban is fölbukkanó üstökös: a Tisserand-paraméter (jele: TJ; részletek egy későbbi fejezetben). Segítségével a rövid periódusú üstökösök kategorizálása tovább pontosítható:

- Jupiter-család (JFC: Jupiter-family comets): $2 < TJ < 3$
- Halley-típusú üstökösök: $TJ < 2$

3.2. Az aszteroidák

Bár a vizsgálatunk tárgyát képező kentaurok inkább emlékeztetnek az üstökösökre, a teljesebb kép kedvéért most röviden bemutatjuk a Naprendszer fő kisbolygó-övének objektumait is (esetenként előfordul, hogy a kentaurok is besodródnak a Naprendszer belső régióiba; átlagosan 880 évente 1 kentauro lesz ún. földközeli objektum: ld. lentebb).

Ezek a Mars és a Jupiter között keringenek 3-4 AU távolságra a Naptól. A gázóriás ebben az esetben is fundamentális hatással van a kisbolygók keringésére: erre példa a rezonancia jelensége. Ilyenkor az adott objektum és a Jupiter keringési ideje arányos egymáshoz, mint „kicsi” természetes számok. Ez bizonyos esetben ahhoz vezet, hogy egy meghatározott térségben felgyülemlenek a kisbolygók (ez történik például a korlátozott háromtest-probléma megoldását jelentő L4 és L5 Lagrange-pontokban; itt 1:1 rezonanciában keringenek az ún. Trójai-kisbolygók), máskor pedig azt eredményezi, hogy egy régió instabillá válik és kiürül (pl. a Kirkwood-hézagok; de ugyanez történik a Szaturnusz gyűrűinek réseivel is a pásztorholdak hatására). Az itt leírtak valamivel részletesebben később kerülnek kifejtésre.

Az aszteroidák pályaelemeik szerint ugyancsak különböző családokba sorolhatók (precízebben az ún. saját pályaelemekről van szó; azok a kisbolygók, amelyekre ezek megegyeznek, minden bizonnyal hajdanán egy nagyobb égitestet alkottak, ami aztán ütközés révén darabokra tört). Amennyiben perihéliumpontjuk (pályájuk Naphoz legközelebb eső pontja; a legtávolabbi pont neve aphélium)

1,3 AU távolságon belül van a Naptól számítva, földközeli aszteroidáknak hívjuk őket (a továbbiakban NEA (Near-Earth asteroids); ennek analógiájára beszélhetünk földközeli üstökösökről is (NEC: Near-Earth comets)). Ezt a csoportot - egy-egy jellegzetes képviselője alapján - további alcsoportokra oszthatjuk az alábbiak szerint (q: perihélium, Q: aphélium, a: a pályaellipszis fél nagytengelye; az elkövetkezőkben minden távolság-jellegű mennyiség AU-ban értendő):

- Amor: $1,017 < q < 1,3$ és $a > 1$
- Apollo: $q < 1,017$ és $a \geq 1$
- Aten $Q > 0,983$ és $a < 1$
- Atiras $Q < 0,983$ és $a < 1$

Ez utóbbi alcsoport csak később került bele a rendszerezésbe: gyakorlatilag a Vénusz és a Merkúr pályáját alkalmasint szelő kisbolygókról van szó, amiket földpályán belüli objektumoknak szokás hívni (IEO: Inner-Earth objects; a NEA-csoport 1,6%-át teszik ki).

További kiegészítés, hogy amennyiben egy kisbolygó 0,05 AU távolságra megközelíti a Földet, potenciálisan veszélyes aszteroidának hívjuk (PHA: potentially hazardous asteroid). Pillanatnyilag 1548 ilyen ismert.

4. A kentaurok fizikai tulajdonságai

A bevezető részben látott általános tárgyalásmód után a következőkben már kifejezetten a kentaur típusú kisbolygókra fogunk szorítkozni. Mint azt majd látjuk, a különböző kategóriák közti határvonalakat a kentaurok esetében sem érdemes szigorúan meghúzni.

4.1. Definíció

Bár a kisbolygó-családokra vonatkozó definíciók tulajdonképpen önkényesek, praktikusnak tűnik a kentaurokra ezeket bevezetni:

- aJupiter < akentaur < aNeptunusz
- aJupiter < qkentaur < aNeptunusz

Ez kiegészítendő még azzal, hogy a kentaurok metszik valamelyik nagybolygó pályáját. Ahogy viszont arra néhány sorral fentebb már utaltunk, elképzelhető más definíció is - érzékeltetés céljából most közlünk egy másikat is:

- $a_{\text{Jupiter}} < a_{\text{kentaur}} < a_{\text{Neptunusz}}$
- $q > 7,35$
- $TJ > 3,05$

Összességében mindez azt jelenti, hogy a kentaurok a négy gázóriás közti térségben mozognak elszórta, miközben azok perturbációs hatása pályájukra igen nagy mértékű destabilizáló hatással van (néhány 100 millió évig maradnak egy adott pályán; ekkor keringési idejük Kepler 3. törvényének értelmében 10 év nagyságrendű). Ha azonban megvizsgáljuk egy ilyen objektumnak az egyéb jellemzőit is (pl. Tisserand-paraméter), akkor könnyen azt találhatjuk, hogy egy kentaur alkalmasint más kisbolygó-típusba is sorolható (pl. JFC). Ennek természetesen nem csupán elvi szinten van jelentősége, hanem az átmeneti jelleg az égitest fizikai jellemzőiben is megmutatkozik (maga a kentaur elnevezés onnét ered, hogy az azonos nevű mitológiai lények is „hibridek” voltak). Ennek kapcsán az egyik leggyakoribb követendő szempont, hogy a kentaur mutat-e üstökösökre jellemző aktivitást, vagyis alakult-e ki kóma (ideiglenes gáz- és porléggör) a központi mag körül. Az égitestet körülölelő burok vizsgálata kiterjesztettebb értelemben is fontos, mivel a benne föllelhető anyagok a Naprendszer korai állapotairól árulkodnak. A kómában megfigyelhető leggyakoribb emissziós vonalak (anyagösszetételre utaló spektroszkópiai „ujjlenyomatok”): C_2 , C_3 , CN, CH_2 , NH, NH_2 , NH_3 , CO, CO_2 , OH, illetve CO^+ , CO_2^+ , N_2^+ , CH^+ , H_2O^+ , OH^+ (az ionizáltság a Nap UV-sugarai hatásának tudható be); ezek mellett általában kimutatható a kilövellések során kiszakadó porrészecskék reflexiós fénye is.

Pillanatnyilag néhány száz kentaur ismeretes (2013 februárjában 211 volt katalogizálva). Eredetük nem teljesen tisztázott, több lehetséges forrás is elképzelhető (valószínűleg a valóságban sem csupán egy helyről származnak):

- Gázóriások trójai („befogott”) kisbolygói
- Instabil, kis excentricitású (lapultságú) pályán keringő TNO-k (Trans-Neptunian object - Neptunuszon túli objektum)
- SDO-k (Scattered disk object – a külső-Naprendszerbe szóródott kisbolygók korongjának objektumai; nagy excentricitás és pályahajlás)
- Instabil plutinók (Plutohoz hasonló kisbolygók)
- Belső Oort-felhő

4.2. Megfigyelés és eredmények

A csillagászati adatszerzés elsődleges forrása az elektromágneses sugárzás. Az elektrodinamika alapegyenleteinek egy megoldását jelentő hullámok a vákuumban állandó sebességgel terjednek, de hullámhossz vagy frekvencia alapján több tartományba sorolhatók. Az emberi szem egy néhány száz nm-es intervallumban érzékeny, technikai eszközeink segítségével azonban egészen más hullámhosszúságú fényt is képesek vagyunk detektálni.

A termodinamika statisztikus fizikai értelmezése alapján elmondhatjuk, hogy a véges hőmérséklettel rendelkező testek - gyakran töltött - részecskéi hőmozgást végeznek, eközben pedig sugárzást bocsátanak ki. Az intenzitás hullámhossz szerinti eloszlása a kibocsátó test hőmérsékletére jellemző: az ezzel kapcsolatos vizsgálódások vezettek a 20. század első éveiben a kvantummechanika kialakulásához.

Abszolút fekete testnek hívjuk azokat az objektumokat, amelyek a rájuk eső sugárzás teljes egészét elnyelik (ezt tipikusan egy vékony furattal ellátott üreggel modellezik, de ilyen minden csillag is). A magasabb hőmérséklethez kisebb hullámhosszúságú maximum tartozik (Wien-törvény): $T \cdot \lambda_{\text{maximum}} \approx 2900 \mu\text{mK}$ (itt a hőmérséklet értelemszerűen K-ben, a hullámhossz pedig μm értendő).

Bár a kentaurok nem tekinthetők abszolút fekete testnek (a rájuk eső napfény egy jelentős részét visszaverik pl. láthatóban), a fenti összefüggések segítségével közelítőleg kiszámolható, hogy sugárzási intenzitásuk maximuma melyik hullámhossz-tartományba esik. 10 K nagyságrendű hőmérsékletet feltételezve a Wien-törvény alapján ez az érték 300 μm köré tehető, ami az infravörös tartományba esik. A kentaurok tehát a rájuk eső (nem feltétlenül látható) fény egy részét visszaverik, másik részét pedig abszorbeálják, melynek folytán kissé fölmelegednek, és emiatt infravörösben sugároznak.

Az ilyen típusú megfigyelésekhez kitűnően használható volt a Herschel Űrtávcső. A 3.5 m-es Ritchey-Cretien-távcsővel felszerelt, 2009 és 2013 között működő űreszköz PACS-kamerája (Photoconductor Array Camera and Spectrometer) éppen az 55-210 μm -es intervallumon volt a legérzékenyebb. Az ilyen távcsövek egyik legnagyobb hátulütője, hogy saját hőmérsékleti sugárzásuk is van (ami szintén ebbe a tartományba esik), és ez erősen befolyásolhat-

ja a mérést. Ezt kikerülendő igen fontos gondoskodni a hűtésről (a Herschel esetében ezt 2300 l folyékony héliummal oldották meg, ez fogyott ki végül 2013-ban).

Földön elhelyezett teleszkópokkal is lehet infravörös tartományban észlelni, de bolygónk légköre (ellentétben az optikai és rádióablakkal) ebben a tartományban nem ereszt át olyan jól (a légkör bizonyos komponensei elnyelik az ilyen energiájú sugárzást).

Maguknak a kentauroknak a távcsővel történő vizsgálatát 1 órás nagyságrendű ideig szokták végezni. Mivel ezek a felvételek a háttér termális zajával erősen terheltek, célszerű a mérést néhány órával később is elvégezni, hogy aztán a két képsorozat segítségével a zavaró konstans háttérsugárzást eliminálhassuk. Ez az idő egyébként egy naprendszerbeli égitest számára ugyan elegendő ahhoz, hogy a képmezőben észrevehetően elmozduljon (égi koordinátaiban néhány 10" változás következik be), de az eredmények a megfelelő szoftve-
rekkel így is kezelhetők, emellett pontosabbak.

A kentaurok tömege általában sokkal kisebb annál, mint amennyi a hidrosztatikai egyensúlyhoz szükséges, ebből kifolyólag szabálytalan alakúak. Ha abból indulunk ki, hogy tengely körüli forgásuk sokkal gyorsabb, mint a térbeli helyváltoztatásuk, akkor egy rövidebb ideig tartó mérés során a fényességre egyedül a tengely körüli forgásuk van hatással. Elfordulása során a kentaur - szabálytalan alakja miatt - eltérő méretű felületekről veri vissza a sugárzást, vagyis változik a fényessége. A forgás ismétlődő jellege okán ez periodikus fényesség-ingadozást eredményez, amiből már egyszerűen kiszámítható a forgásidő.

Szót kell még ejtenünk azoknak az eljárásoknak az alapelveiről, amelyek révén a kentaurok méretét meghatározhatjuk. Neptunuszon túli égitesteknél csak a legritkább esetben nyílik lehetőség az átmérő közvetlen megmérésére látószög alapján (pl. a Pluto esetében). Egy másik alternatívát jelent viszont az, amikor a kentaur éppen elhalad egy állócsillag előtt: bár a távcső képmezőjében mind a kettő objektum pontszerűnek tűnik, a fedés mégis véges időt vesz igénybe, melynek hosszából következtethetünk a „fogyatkozást” okozó test méretének a nagyságrendjére. A harmadik eshetőség a radiometriai módszer: itt a visszavert látható, illetve infravörös fény „mennyiségéből” következtetünk a reflektáló felszín nagyságára.

Érdekes információkat szolgáltat még a kentaurok színe. Ez nem a klasszikus, az emberi szem által egyedi módon érzékelt szín, hanem egy objektívebben használható fogalom: más-más hullámhossz-tartományokban átengedő színszűrők által mért magnitúdóértékek (fényességértékek) különbségével definiálják. A vizsgálódások azt mutatják, hogy a kentaurok bimodális viselkedésűek: kettő populációba, egy „szürkébe” és egy „vörösbe” tömörülnek, ellentétben a folytonos színi eloszlást mutató SDO-kkal és JFC-kkel. Különösen jellemző ez a viselkedés a kisebb kentaurokra, továbbá azokra, amelyek viszonylag sok időt töltenek a Nap közelében ($q < 35$ AU). Több lehetséges elméletet is fölláttottak a jelenség magyarázatára. Az egyik szerint a kentaurok anyagi összetétele áll a háttérben, ami azért alakult így ki a Naprendszer őanyagából, mert arra egy bizonyos hőmérsékleti viszonyokra visszavezethető „összetételei gradiens” (eltérés) volt jellemző. Egy másik elképzelés szerint a Nap hatásának jobban kitett kentaurok aktívabbak, ebből kifolyólag a felszíni körülményeik is mások: szürkés színüket az illékony anyagok elszublimálása után visszamaradt szilikátosabb pornak tudhatjuk be.

5. A kentaurok dinamikája

5.1. Az n-test probléma

A Naprendszer égitestjeinek (látszólagos) mozgását leíró elméletek évszázadokon keresztül kinematikai jellegűek voltak, vagyis egyedül arra korlátozódtak, hogy az adott objektumok mikor, hol vannak, és mekkora a sebességük – a rájuk ható erőkről mit sem mondtak. Ennek a tulajdonképpen tudományfilozófiai hozzáállásnak a gyökerei Eudoxosz instrumentalista elképzeléséig nyúlnak vissza: szerinte az égi objektumok helyeinek a meghatározása egy praktikus feladat, így kiváltó okainak a keresése meddő próbálkozás. Sok évszázadnak kellett eltelnie ahhoz, hogy fölbukkanjanak az első, modern tudományos szemléletmódunknak is megfelelő teóriák: Kepler a 17. században - ellentétben az ezzel erőst szembeszegülő Galileivel - már távolhatásról beszél (ha elhelyezünk a világűrben két követ egymástól nem messze, azok „maguktól” elkezdnek közeledni egymáshoz), Newton pedig végül matematikai köntösbe bújtatja azt az erőtvényt, amely lényegében a Naprendszer mozgatórugóját jelenti:

$$F_{ij} = \gamma \cdot m_i \cdot m_j \cdot (r_{ij})^{-1} \cdot r_{ij},$$

ahol a jól ismert módon

F_{ij} : az i . tömegpontra a j . által kifejtett gravitációs erő

γ : a gravitációs Cavendish-állandó

m_i, m_j : a pontok tömege

r_{ij} : az i . tömegpontból a j .-be mutató vektor, és $r_{ij} = |r_{ij}|$, vagyis a vektor hossza

De annak ellenére, hogy ezen utóbbi összefüggés segítségével Newton már nagyon precíz képet tud festeni az égitestek dinamikájáról, végső soron tartja magát Eudoxosz elveihez, és tartózkodik megválaszolni a gravitáció mély természetére irányuló kérdéseket („hypotheses non fingo - nem gyártok hipotéziseket”). Ezekre a feleletet csak a 20. században adja meg Einstein, de az csak olyan apró eltéréseket eredményez a newtoni képtől, hogy azok elhanyagolható korrekciónak számítanak a kentaurok esetében.

A gravitációs erőtvény matematikai formulájának az ismerete egy rendkívül egyszerűnek tűnő, de valójában igen nehéz feladatkörre irányítja a figyelmünket: hogyan mozog - adott kezdeti feltételek mellett - n darab tömegpont egymás gravitációs terében? Ez a kérdés tulajdonképpen leegyszerűsített, absztrahált megfogalmazása a Naprendszer dinamikájára vonatkozó feladatunknak, mivel az égitestek mérete nagyságrendekkel kisebb a közöttük levő távolságoknál, vagyis pontszerűeknek tekinthetők. Az így kimondott n -test probléma mozgásegyenletei egy $6n$ -edrendű differenciálegyenlet-rendszert alkotnak (vagyis formálisan $6n$ db deriválás van bennük - ezeket szemléletesen $6n$ db integrálással lehet „kiejteni”, „ellensúlyozni”).

Amennyiben - fizikai megfontolások alapján - találunk olyan egyenleteket, amelyek az égitestek hely-, illetve sebességkoordinátái között teremtenek kapcsolatot, az formálisan olyan, mintha már egy integrálást elvégeztünk volna. Ez azt jelenti, hogy az ilyen összefüggések - első integrálnak hívjuk őket - csökkentik a mozgásegyenlet-rendszer rendjét. A 19. század matematikai vizsgálódásai azonban kimutatták, hogy csak tíz darab első integrál létezik - emiatt az n -test probléma teljesen nem integrálható, vagyis még a legegyszerűbb esetekben is - $n = 2, 3$ - számítógépes módszerekre, továbbá „trükkökre” kell hagyatkoznunk.

5.2. A kentaurok mozgási jellegzetességei

A Naprendszer tömegének túlnyomó többsége (több mint 99%-a) magába a Napba koncentrálódik (tömege nagyságrendileg 1030 kg). Ez azt jelenti, hogy ha egy kentaur mozgását vizsgáljuk, akkor elsősorban a központi csillaggal történő kölcsönhatását kell figyelembe venni – a nagyobb bolygókkal való gravitációs kapocs első közelítésben elhanyagolható.

Az így fölvázolt kéttest-probléma (vagy egycentrum-probléma) megoldása már egészen Newton kora óta ismeretes. Igen nagy tehetetlensége miatt a Nap gyakorlatilag egyhelyben áll (figyelman kívül hagyva a galaktikus skálán történő mozgását, melynek sebessége 10 km/s-os nagyságrendű), körülötte pedig a kentaur kúpszelet alakú pályán kering. Ennek a speciális geometriai alakzatnak az első leírását az ógörög Apollóniosz könyvében találjuk. Háromfajta kúpszelet létezik: az ellipszis (ennek egy speciális, nulla excentricitású fajtája a kör), a parabola, illetve a hiperbola. A kentaur (és persze a Naprendszer minden további égitestje) annak megfelelően mozog ezek valamelyikén, hogy mekkora az energiája.

A megfigyelések és a számítógépes szimulációk azonban azt mutatják, hogy nem elég egyedül a Nap tömegvonzását figyelembe venni ahhoz, hogy egy kentaur mozgását kielégítően leírjuk. Az óriásbolygók (leginkább a Jupiter, aminek a tömege majdnem pontosan egy ezrede a Napénak) ugyancsak jelentős hatással vannak ezek a kis égitestekre – amennyiben pl. a Jupiter tömegvonzását is hozzávesszük a képhez, már háromtest-problémával van dolgunk.

A háromtest-probléma már annyira bonyolult, hogy a minden esetre kiterjedő általános megoldása nem ismeretes. Tehetők azonban bizonyos megkötések, melyek leszűkítik és így egyszerűsítik a problémát annyira, hogy már tudunk egzakt állításokat tenni a megvalósuló mozgásról. Az egyik ilyen specifikáció az ún. körpályás korlátozott háromtest-probléma: ebben két, viszonylag nagy tömegű test szerepel (pl. a Nap és a Jupiter), melyek körpályán keringenek egy közös tömegközéppont körül (ebben az esetben gyakorlatilag a Nap középpontja körül); továbbá jelen van egy elhanyagolható tömegű kentaur is, melynek pályáját szeretnénk meghatározni. A számítások azt mutatják, hogy létezik öt olyan pont a rendszerben, melyekben elhelyezve a kentaurt az ugyanazzal a szögsebességgel fog mozogni,

mint a másik kettő (vagyis esetünkben csak a Jupiter). Ezeket a speciális pontokat Lagrange-pontoknak nevezik, az ott lévő kisbolygókat pedig trójaiaknak (ahogy azt már fentebb írtuk, a kentaurok egy bizonyos hányada valaha ilyen trójai lehetett).

A körpályás korlátozott háromtest-probléma még egy jellegzeteséget tartogat: a már ugyancsak említett Tisserand-paramétert. Ha a kentaur pályájára túlságosan nagy hatással van a Jupiter, akkor azt jelentősen eltorzíthatja: ez azt jelenti, hogy a pálya alakját megadó számértékek (fél nagytengely, excentricitás, pályahajlás) szignifikáns változáson mennek át. Létezik azonban egy ezekből kiszámítható számérték, történetesen a

$$TJ = 1/a + 2(a(1-e)^2)^{1/2} \cdot \cos(i),$$

mely nem változik a pályaháborgatás hatására sem (bár ehhez ki kell kötni azt is, hogy a kentaur ne közelítse meg túlságosan a Jupitert). A képletben természetesen

- TJ: a Jupiterre vonatkoztatott Tisserand-paraméter
- a: a kentaur fél nagytengelye
- e: a kentaur pályájának excentricitása
- i: a kentaur pályahajlása

Az egészen precíz számítások (ezeket elég nagy teljesítményű számítógépekkel végzik) már nemcsak a Nap és a Jupiter, hanem a többi óriásbolygó hatását is figyelembe veszik. Ezek segítségével plasztikusabb képet alkothatunk a kentaurok mozgásáról. A szimulációk tanúsága viselkedésük erősen kaotikus, vagyis nagyon érzékeny a kezdeti feltételekre: a kezdő konfiguráció egy kicsiny változtatása is képes tekintélyes eltéréssé terebélyesedni.

Van két motívum, amit a számítógépes vizsgálatok alapján hangsúlyozhatunk a kentaurok dinamikája kapcsán. Az egyik az ún. „resonance-hopping”, a másik a „random-walking”. Előbbi azt jelenti, hogy a kentaurok egyik rezonáns állapotból a másikba ugranak (a rezonancia jellemzője, hogy ekkor a keringési idejük úgy aránylik valamelyik óriásbolygóéhoz, mint két kicsi egész szám), utóbbi pedig, hogy a gázrészecskékhez hasonló módon diffúz mozgást végeznek (legalábbis fél nagytengelyük egy annak megfelelő matematikai formula szerint változik az időben).

6. Diszkusszió

A kentaúr típusú kisbolygók családja egy néhány évtizede létező kisbolygó-kategória. Tagjait kevésbé jellemzi az egyértelmű rokonság, viszont felszíni viszonyaik beható vizsgálata kifejezetten sok információt szolgáltat a Naprendszer hajnaláról; emellett dinamikai viselkedésük egyre pontosabb szimulálása az égi mechanika alapvető kérdéseire világíthat rá, melyek nélkülözhetetlenek a világegyetem egészen alapvető természetének megismerése terén.

Irodalom

ÉRDI BÁLINT: A Naprendszer dinamikája. Budapest, 2001, ELTE Eötvös Kiadó.

PÁL ANDRÁS ET AL.: Physical properties of extreme centaur and super-comet candidate 2013 AZ60. *Astronomy & Astrophysics*. 2015.

MATTHEW S. TISCARENO, RENU MALHOTRA: The dynamics of known centaurs. *The Astronomical Journal*. 2003.

Abstract

From the beginning of the 19th century – thanks to the improving observational techniques – more and more minor bodies are discovered in the Solar System. Most of them are located in the region between Mars and Jupiter, but since the 1970s many have been found between Jupiter and Neptune. Due to their binary features (they resemble both to asteroids and comets) they are called centaurs. Observing them is an organic part of understanding the Solar System, as they help us creating a more holistic picture about the System's composition and origin.

Key words: centaurs, minor bodies, celestial mechanics

