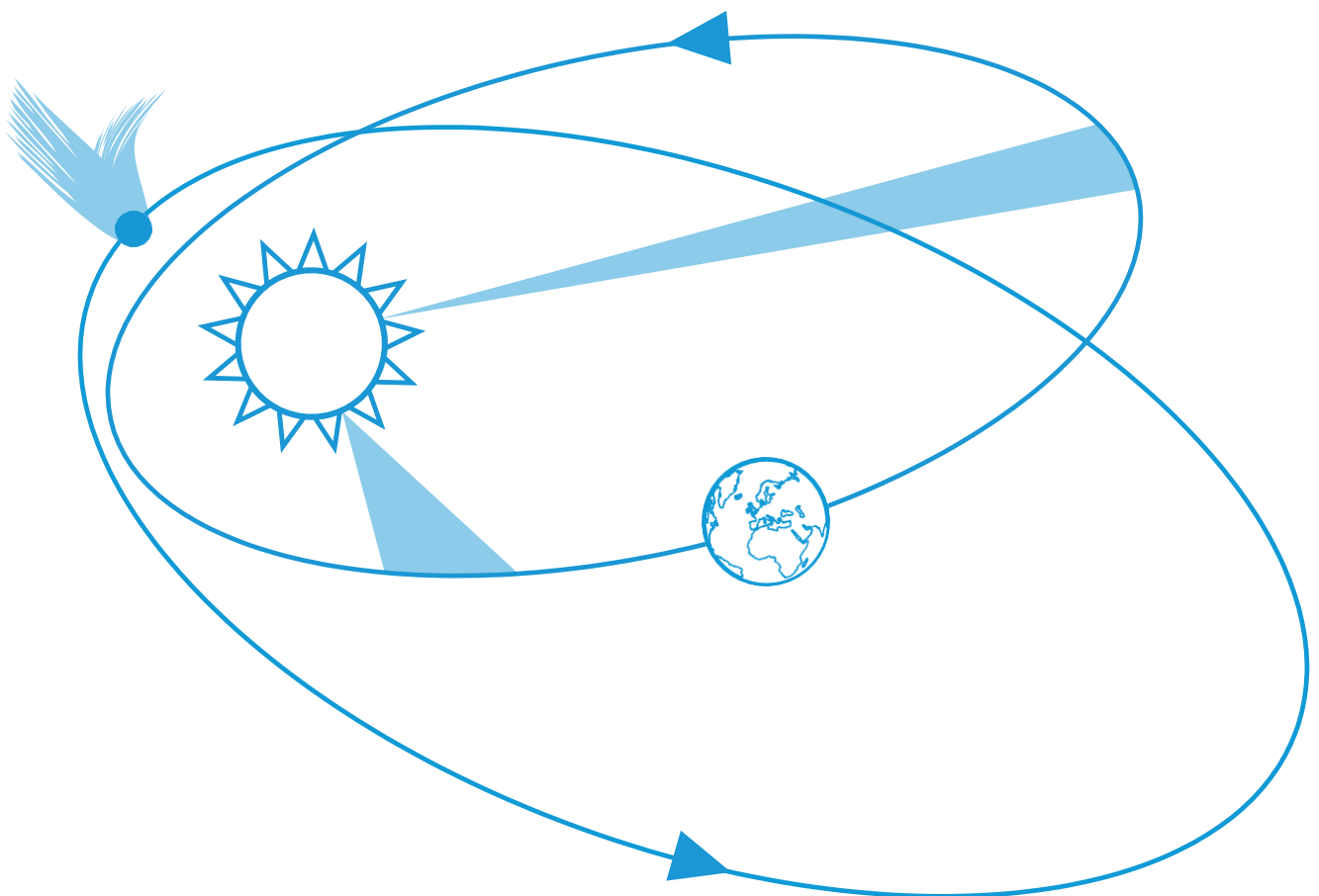


Tanítsunk a világűrrel!

→ ELKÉPESZTŐ ELLIPSZISEK

Az égitestek keringési sebessége és ideje



→ BEVEZETÉS

A bolygók, üstökösök és más égitestek pályájának megértéséhez meg kell vizsgálni, hogy a gravitáció és az objektum sebessége egymásra hatva hogyan alakítja ki a pályát. A tanulók között gyakori tévhit, hogy a bolygók pályája kör alakú. Ebben a gyakorlati tevékenységben sebesség-idő grafikonokat tanulmányozunk a világűr viszonylatában. Megfigyeljük, hogyan változik az ellipszispályájú égitestek sebessége a Nap körül keringve. A tananyag tartalmaz egy kiegészítő tevékenységet, amely az ellipszisek geometriáját és a Naprendszer fizikai paramétereivel való kapcsolatukat vizsgálja.

Alapadatok	3. oldal
Háttérismeretek	4. oldal
Tevékenység - Ellipszistábla	12. oldal
Megbeszélés	14. oldal
Kiegészítő megbeszélés	16. oldal
Konklúzió	18. oldal
Tanulói munkalap	19. oldal
Space context @ ESA	21. oldal
A Rosetta űrszonda	21. oldal
A Nemzetközi Űrállomás	23. oldal
Melléklet	26. oldal
Ellipszistábla elkészítési útmutató és sablon	26. oldal
Szójegyzék	33. oldal
Linkek	34. oldal

→ ELKÉPESZTŐ ELLIPSZISEK

Az égitestek keringési sebessége és ideje

ALAPADATOK

Korosztály: 14–16 év

Típus: tanulói tevékenység

Nehézségi fok: közepes

Tanári felkészülési idő: 1 óra

Tanítási idő: 15 perc – 1 óra

Költség: alacsony (0–10 euró)

Helyszín: tanterem

Eszközök: üveggolyók, vonalzők, nem veszélyes anyagok

Előzetes tanulói ismeretek

1. A mozgási energia és a gravitációs potenciális energia fogalma.
2. A sebességvektor fogalma.

Tanulási eredmények

1. A tanulók ábrázolni tudják grafikonon a sebességet az idő függvényében, és ezt össze tudják kapcsolni a gyorsulás és a távolság fogalmaival a keringési mechanika alapelveinek megértéséhez.
2. Megértik, hogy a gravitáció erőssége hogyan változik a bolygótól vagy csillagtól való távolság függvényében.
3. Ezt kapcsolatba tudják hozni azzal, hogy egy bolygó vagy műhold hogyan gyorsul és lassul az ellipszispályáján.

Erre is szükségünk lesz



↑ A tananyaghoz kapcsolódó videót lásd a Linkek részben.

Tantervi relevancia

Fizika

- Keringési pályák
- Műholdak
- Üstökösök
- Bolygók
- Csillagok
- Gravitáció (a gravitációs erő változása a távolság függvényében)
- Kepler törvényei

Matematika

- Grafikon: a sebesség az idő függvényében
- A grafikon alatti terület egyenlő a távolsággal
- Egy adott pont meredeksége egyenlő a gyorsulással
- Grafikonok megrajzolása és értelmezése
- Geometria: ellipszisek, excentricitás, fő- és melléktengelyek

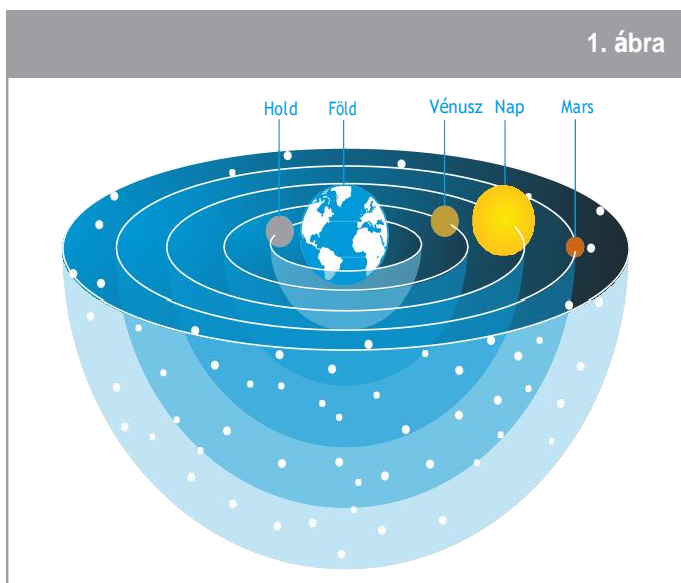
Rövid ismertetés

A tevékenység során a tanulók egy ellipszis alakú tábla segítségével sebesség- és távolságméréseket végeznek egy ellipszispályán keringő objektumra vonatkozóan. Az eredményeket ezután a sebesség és az idő függvényében ábrázolják egy grafikonon, hogy megértsék, hogyan befolyásolja (vagy változtatja meg) a gravitáció egy ellipszispályán keringő bolygó vagy műhold sebességét.

→ HÁTTÉRISMERETEK

A geocentrikus világtkép rövid története

A filozófusok és csillagászok évezredek óta vitatkoztak a Naprendszer és az azon túli világ szerkezetéről. Naprendszerünkre vonatkozóan két ellentétes elképzelés alakult ki: a geocentrikus (vagy Föld-központú) és a heliocentrikus (vagy Nap-központú) modell.

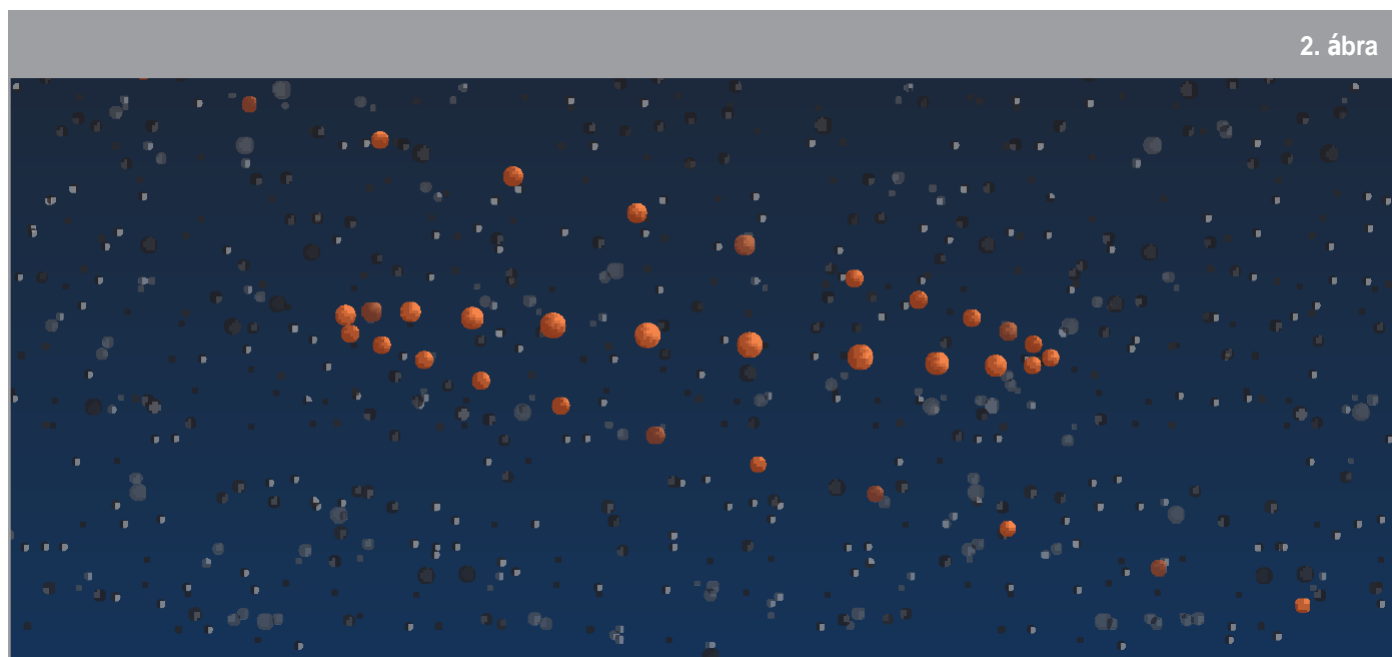


1. ábra

A Kr. e. 200 körül élt ókori görög csillagász, Arisztotelész a geocentrikus modell híve volt (1. ábra). Úgy vélte, hogy a bolygók és a Nap egyenletes sebességgel, körkörös pályákon mozognak a Föld körül, amely a világegyetem középpontjában helyezkedik el.

Ezzel a modellel azonban voltak problémák. Bizonyos időszakokban úgy tűnt, hogy a Mars furcsa mozgást végez (2. ábra). Ahelyett, hogy rendszeresen haladt volna előre, rövid ideig visszafordult, mielőtt folytatta volna útját az égbolton. Ezt a jelenséget nem lehetett megmagyarázni egy tisztán geocentrikus modellel.

↑ Geocentrikus modell: a Föld az Univerzum középpontjában helyezkedik el.

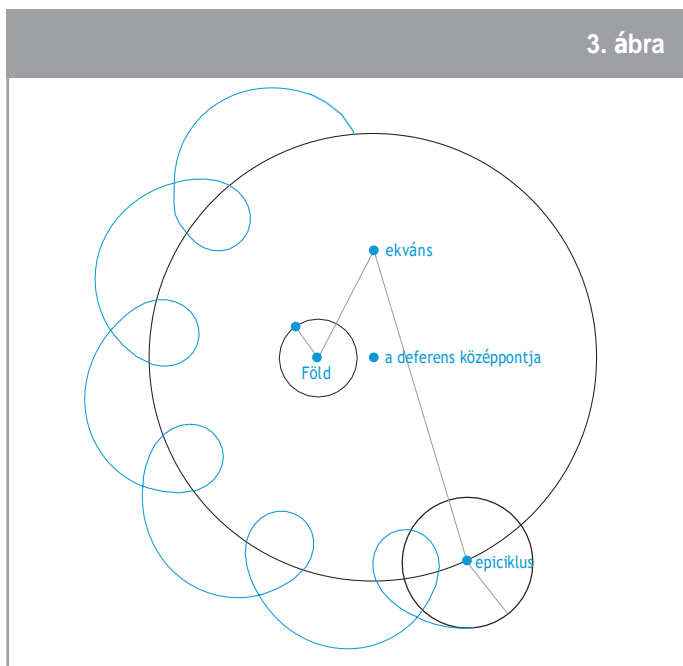


2. ábra

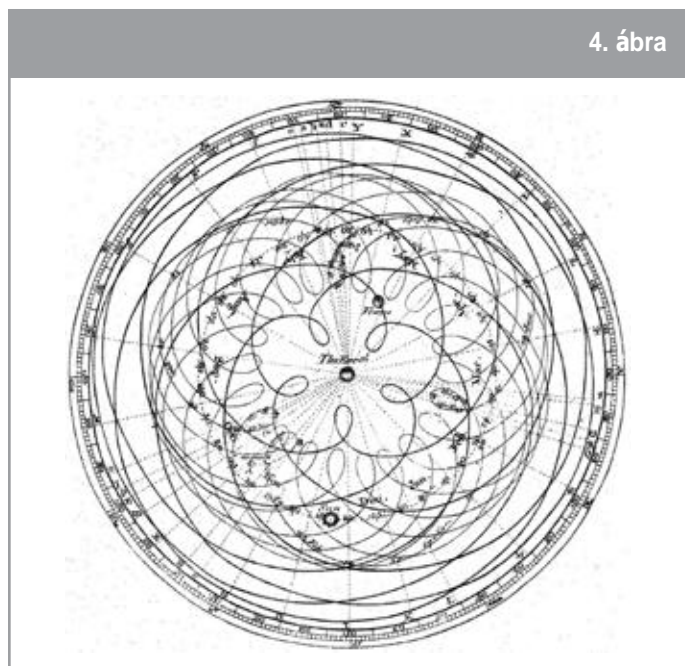
↑ A Mars látszólagos útja az égen a retrográd mozgás során. A Mars mozgását az éjszakai égbolton bemutató animáció a Linkek részben található.

Közel 400 évvel később Ptolemaiosz előállt egy megoldással erre a problémára. Eszerint a Föld továbbra is az Univerzum középpontjában helyezkedik el, de a bolygók a fő keringési pályájuk mentén epiciklusnak nevezett másodlagos pályákon mozognak (3. ábra). Ez az elképzelés részben megmagyarázhatta és megjósolhatta a megfigyelt retrográd mozgást*.

Ahhoz azonban, hogy ez a rendszer működjön, Ptolemaiosznak egy sor bonyolult epiciklust kellett megkonstruálnia (4. ábra). Ezzel valójában inkább csak „foltozgatta” a geocentrikus modellt, hogy az a megfigyelésekkel összeegyeztethető legyen.



↑ Az epiciklusok segítségével megmagyarázható a retrográd mozgás. Az epiciklusokról szóló animációkat lásd a Linkek részben.

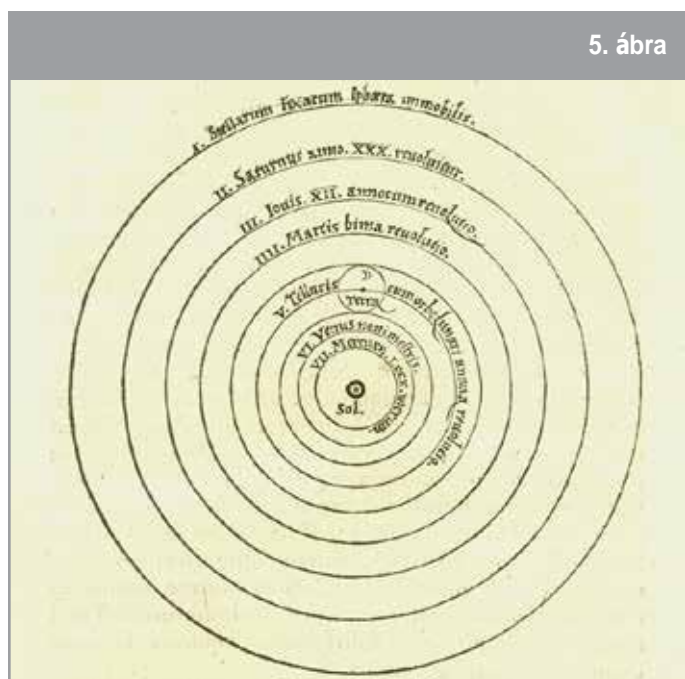


↑ A Ptolemaiosz által kidolgozott modell rendkívül bonyolult volt.

A heliocentrikus világkép rövid története

1543-ban Nikolausz Kopernikusz kiadta a „De revolutionibus orbium coelestium” (Az égi pályák körforgásairól) című művét, amelyben azt állította, hogy a világegyetem valójában egy Nap-központú modellel írható le (5. ábra). Ez indította el a kopernikuszi forradalmat. A nagy gondolkodók lassan kezdték elfogadni ezt az úttörő elképzelést.

Egy probléma azonban továbbra is fennállt. Változatlanul úgy gondolták, hogy minden keringő égitest pályája kör alakú, így a heliocentrikus modell sem tudta megmagyarázni a bolygók mozgására vonatkozó összes megfigyelést. Különösen a Mars mozgása nem felelt meg a körkörös pályára vonatkozó elképzelésnek.



↑ Kopernikusz heliocentrikus modellje a Naprendszeréről.

* **Retrográd mozgás:** amikor egy bolygó látszólagos mozgása az éjszakai égbolton ellentétes a szokásos iránnyal (prográd mozgás).

Kepler felfedezése a pályák természetéről

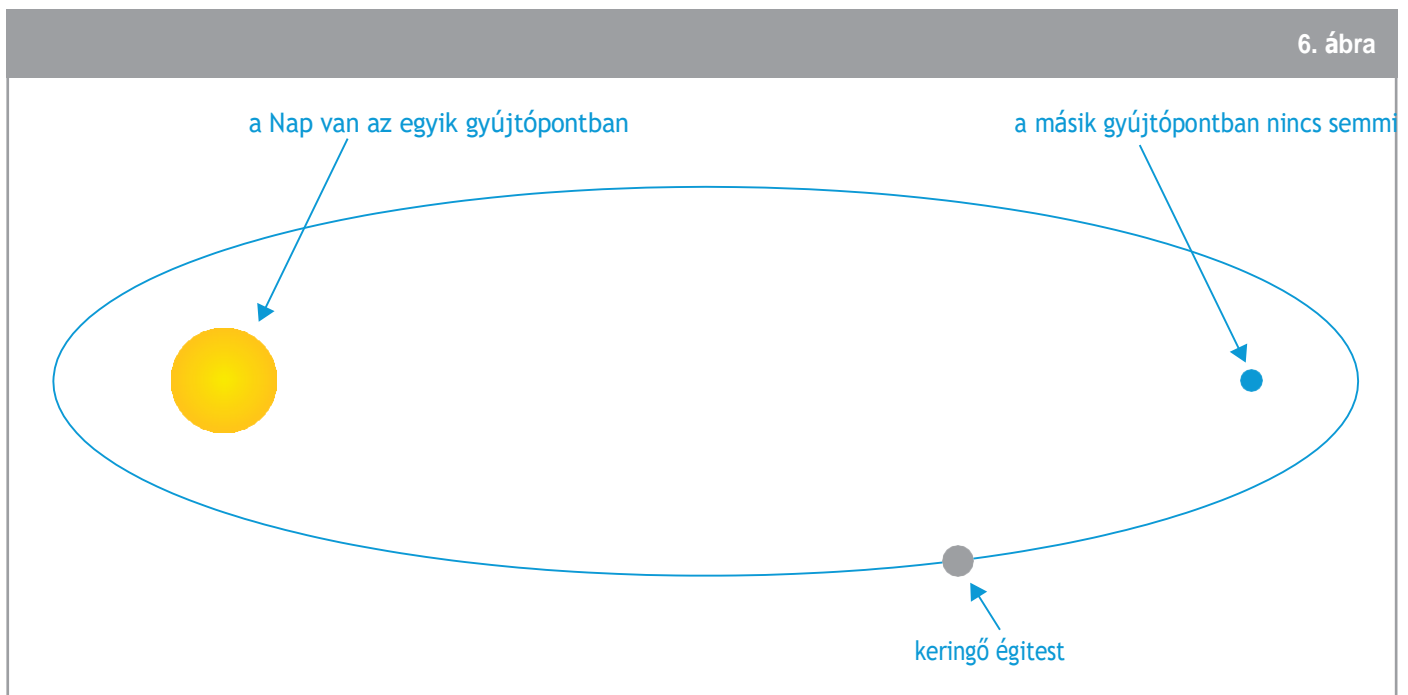
Az 1600-as évek elején Johannes Kepler csillagász forradalmasította a Naprendszerről és a pályák természetéről alkotott képünket. A Marsnak az éjszakai égbolton megfigyelt mozgásáról gyűjtött adatok aprólékos elemzése után Kepler arra a következtetésre jutott, hogy a bolygók pályájának inkább ellipszis, semmint kör alakúnak kell lennie. További vizsgálódásokkal és számításokkal Kepler három törvényt állított fel, amelyek minden pályán keringő objektumra érvényesek.

Kepler törvényei a bolygók mozgásáról

Kepler első törvénye: a Nap körül keringő bolygók pályája ellipszis, amelynek egyik gyújtópontjában a Nap áll (6. ábra).

Kepler második törvénye: a bolygót és a Napot összekötő vonal azonos idő alatt azonos területet sűrol.

Kepler harmadik törvénye: a bolygók keringési idejének négyzetei* úgy aránylanak egymáshoz, mint az ellipszispályák fél nagytengelyeinek köbei.



↑ Kepler forradalmi felfedezés tett, miszerint a bolygópályák elliptikusak.

További információkért lásd a Kepler első, második és harmadik törvényét bemutató animációkat, valamint az ESA ATV-2 „Johannes Kepler” című oktatóvideóját a Linkek részben.

E törvények jelentőségét a bolygópályák és a Naprendszer felfedezése szempontjából az útmutató későbbi része tárgyalja.

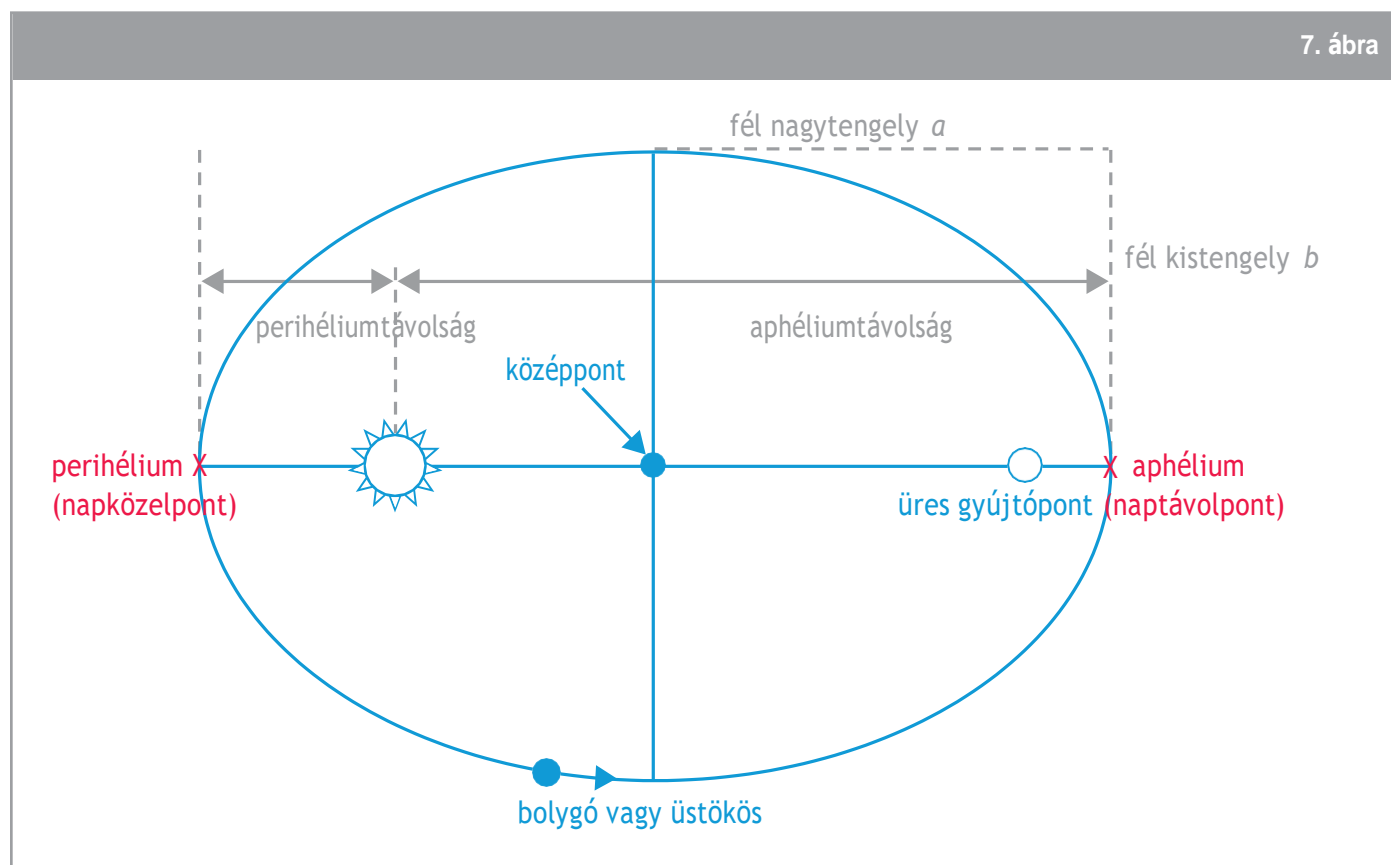
* **Keringési idő:** a keringési pálya teljesítéséhez szükséges idő.

Az ellipszispályák tulajdonságai

Ahhoz, hogy hatékonyan elemezhessük egy pályán keringő objektum tulajdonságait, és megfelelően alkalmazhassuk Kepler törvényeit, meg kell határoznunk néhány kulcsfogalmat:

Tengelyek

Az ellipszis egy síkban elhelyezkedő görbe, amely két gyújtópontot (fókuszpontot) vesz körül. Az ellipszis bármely pontjától a két gyújtópontig mért távolság összege mindig azonos. Ezt egy zsinórdarabbal szemléltethetjük (lásd az A1. ábrát a Tevékenység részben).



↑ Az ellipszispálya tulajdonságai, beleértve a (fél) nagy- és (fél) kistengelyeket, valamint a perihélium és az aphélium helyét.

A pályák megértéséhez két tulajdonságot – a nagy tengelyt és a kis tengelyt – kell meghatároznunk (7. ábra). A nagy tengely az ellipszis leghosszabb átmérője, amely áthalad a két gyújtóponton és a középponton. A kis tengely az a vonal, amely középen metszi a nagy tengelyt. E két vonal, valamint a keringő objektum elhelyezkedése az ellipszisen fontos szerepet játszik a keringő objektum sebességének és energiájának elemzésében.

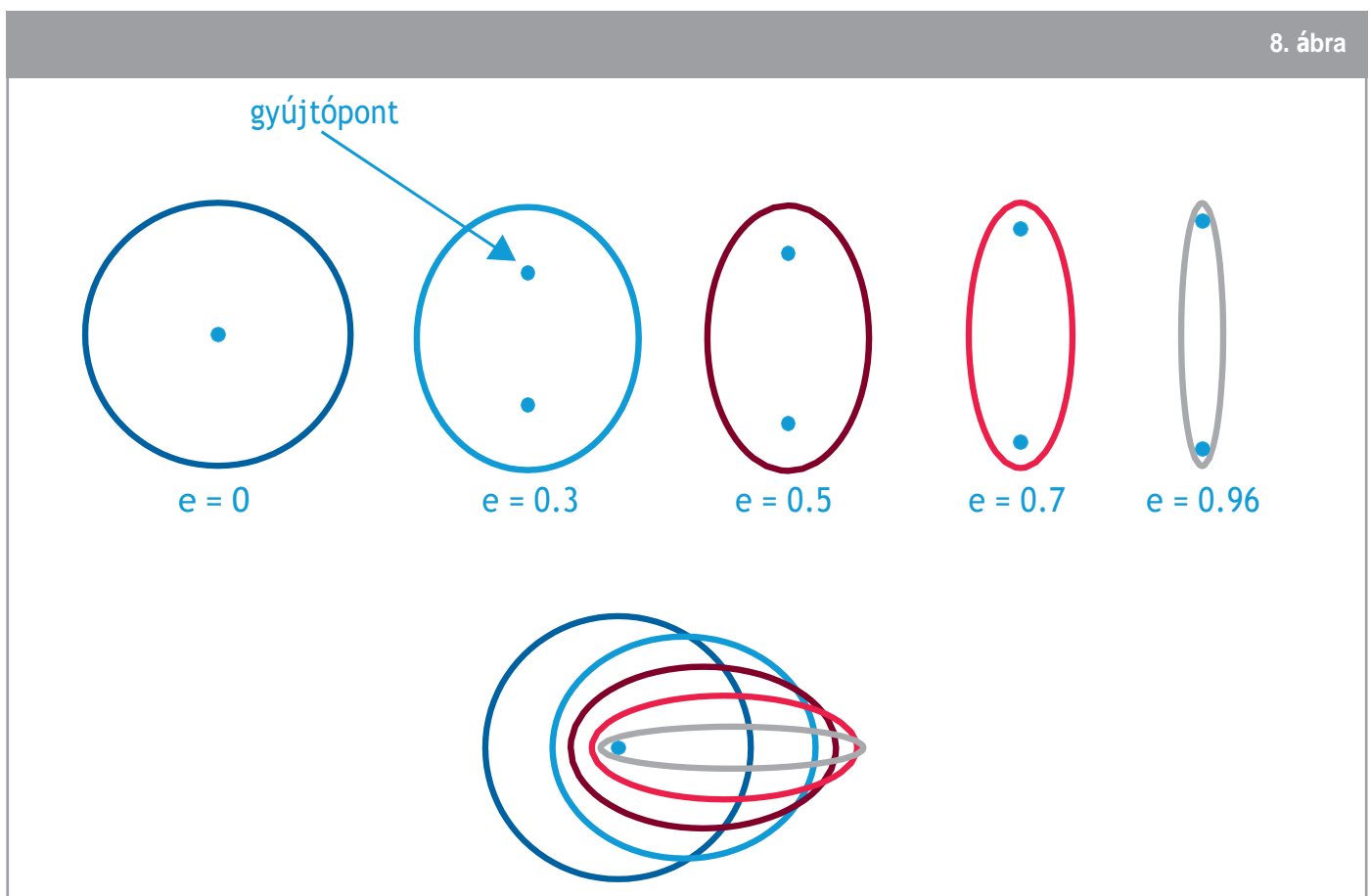
További fontos fogalmak a pálya tulajdonságainak kiszámításához a fél nagy tengely és a fél kis tengely (7. ábra). A fél nagy tengely a nagy tengely hosszának fele, a fél kis tengely pedig a kis tengely hosszának fele. Egy kör esetében mindkét tengely azonos hosszúságú, gyakorlatilag a kör sugara.

Excentricitás

Az excentricitás annak a mértékegysége, hogy egy ellipszis formája milyen messze van a tökéletes körtől (8. ábra). A 8. ábrán az excentricitást „ e ” betűvel jelöljük.

A kör egy olyan speciális ellipszis, amelynek két gyújtópontja egybeesik, és egyetlen fókuszot alkot. A tökéletes körök excentricitása 0.

Ahogy az ellipszis excentrikusabbá válik, úgy nő az „ e ” értéke. Az ellipszis excentricitásának tartománya a következő: $0 < e < 1$. A parabola excentricitása 1. Ha $e > 1$, akkor a görbe hiperbola.



↑ Különböző excentricitású ellipszisek. Az excentricitás növekedésével az ellipszis egyre „összenyomottabbnak” tűnik.

Keringési pozíciók

Amikor egy keringő objektum energiáját és sebességét vizsgáljuk, számításba kell vennünk, hogy mely ponton lesz maximális az objektum mozgási energiája (és ezért minimális a gravitációs potenciális energiája), és hol lesz minimális a mozgási energiája (és ezért maximális a gravitációs potenciális energiája). Ezt a kérdést a Kiegészítő megbeszélés részben és az A5. ábrán bővebben kifejtjük.

Azt a pontot, ahol a nagytenyely a Naphoz legközelebbi részén metszi a keringési pályát, perihéliumnak vagy napközelpontnak nevezzük (7. ábra). Azt a pontot, ahol a nagytenyely a Naptól legtávolabbi részén metszi a pályát, aphéliumnak vagy naptávolfpontnak hívjuk.

Üstökösök

A Nap körül erősen elliptikus (erősen excentrikus) pályán keringő objektumok egyik csoportja az üstökösök (9. ábra). Ezek a kis, jeges világok elsősorban a Naprendszer két régiójából származnak. A rövidperiódusú üstökösök (amelyek keringési ideje 200 évnél kisebb) a Kuiper-övből származnak, amely a Naprendszer kialakulásából visszamaradt fagyott maradványok korongszerű gyűjteménye a Neptunusz pályáján túl.

A hosszúperiódusú üstökösök (amelyek keringési ideje akár több tízezer év is lehet) feltehetően a Naprendszerünk peremén elhelyezkedő, jeges anyagból álló, gömb alakú Oort-felhőből származnak. Az Oort-felhő több ezer csillagászati egység (AU)* távolságig terjed, de túl messze van ahhoz, hogy közvetlenül leképezhető legyen. Ehelyett egy hosszúperiódusú üstökös pályáját kell visszakövetnünk, hogy meghatározhassuk az eredetét (10. ábra).



9. ábra

↑ Horvátországban készült felvétel a Hale–Bopp-üstökösről.

Az üstökösök többnyire stabil pályán keringenek a Nap körül. A Kuiper-öv objektumait azonban befolyásolhatják az óriásbolygók (Jupiter, Szaturnusz, Uránusz és Neptunusz) gravitációs mezői, az Oort-felhő objektumait pedig a más csillagok mozgása által okozott gravitációs perturbációk*. Ezek a perturbációk időnként megváltoztathatják az üstökösök pályáját, és a Naprendszer belseje felé terelhetik őket.

Ahogy az üstökös közeledik a Naphoz, felmelegszik, és a benne lévő jég szublimál*. Az eredeti szerkezetét ekkor „magnak” nevezzük. Ahogy a mag felmelegszik, gázt és port bocsát ki egy rendkívül ritka, de kiterjedt „légkört” alkotva, amit kómának hívunk (11. ábra).

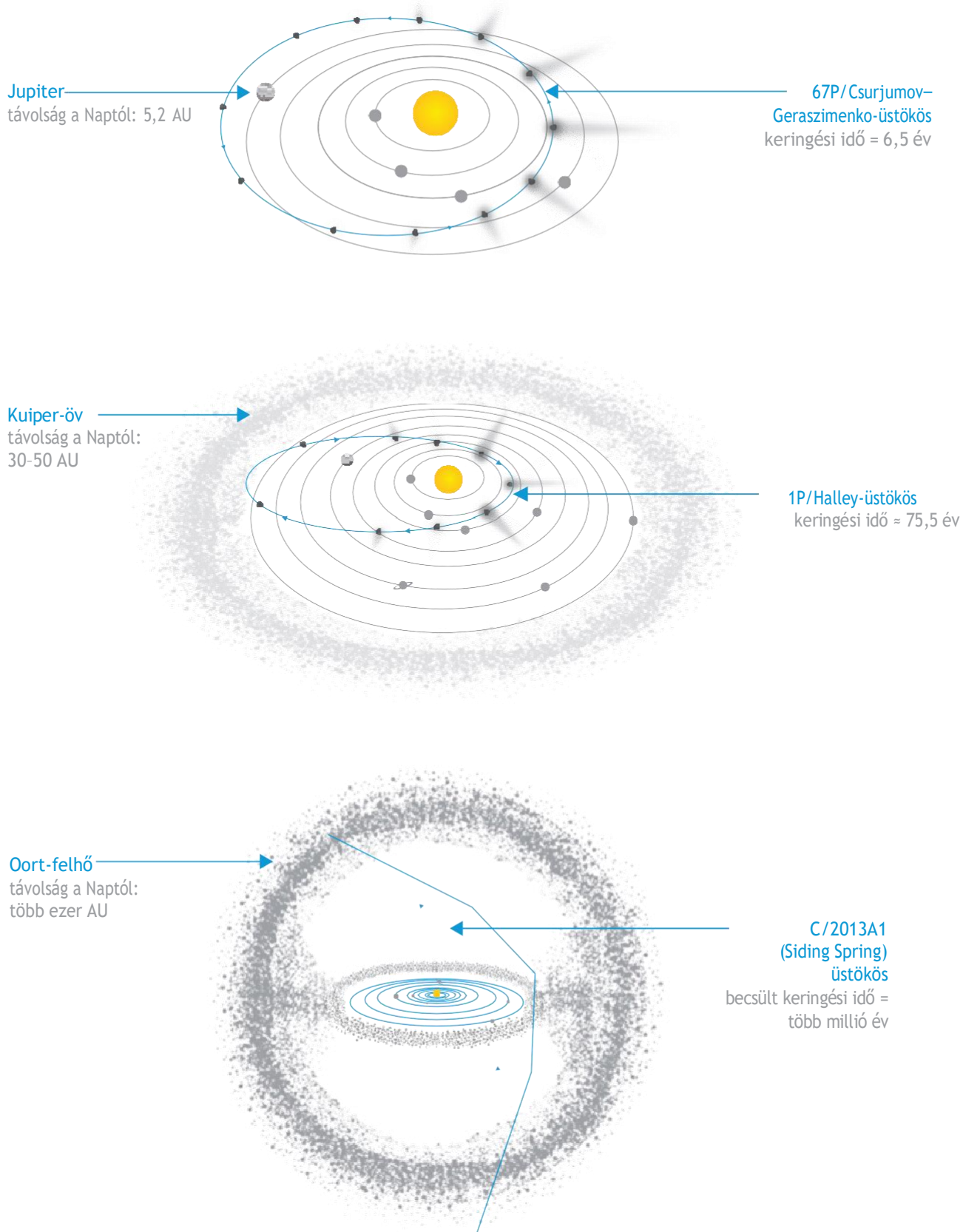
Ahogy az üstökös még közelebb kerül a Naphoz, a kómának az erősödő napsugárzással és a napszéllel való kölcsönhatása létrehozza a látványos „csóvát”, amely az üstökösök legismertebb jellegzetessége. Ritka esetben a csóva elég fényes ahhoz, hogy a földi megfigyelő nappal is láthassa.

***Csillagászati egység (astronomical unit, AU):** 1 AU a Föld és a Nap közötti átlagos távolság, vagyis a Föld keringési sugara, ami körülbelül 150 millió km.

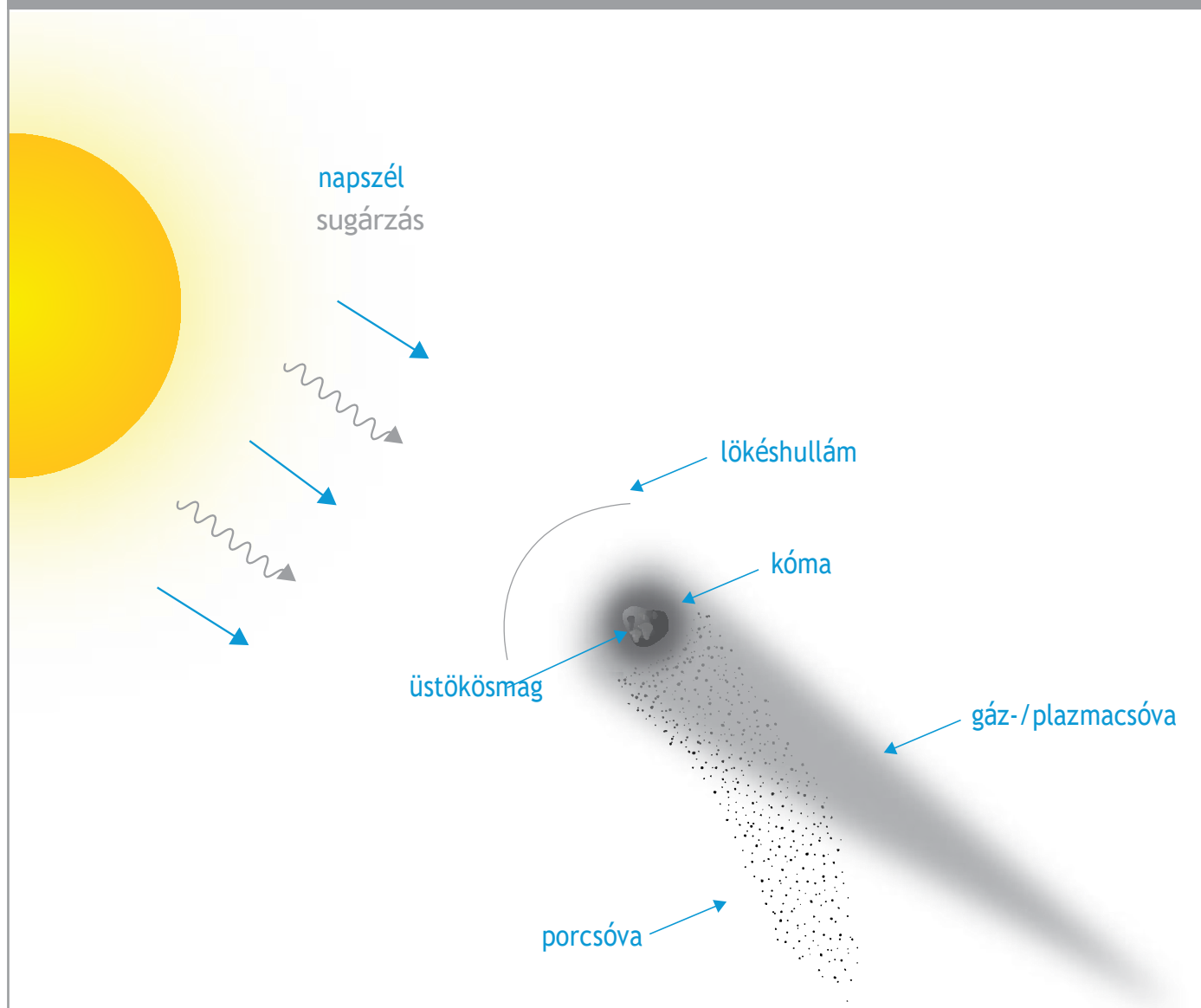
***Gravitációs perturbáció:** amikor egy égitest (pl. bolygó, üstökös) pályája más égitestek (pl. óriásbolygók, más csillagok) gravitációs mezőjével való kölcsönhatás következtében megváltozik.

***Napszél:** a Nap felső légköréből minden irányba kibocsátott nagyenergiájú részecskék (plazma) áramlása. Többnyire elektronokat és protonokat tartalmaz.

***Szublimáció:** amikor melegítés hatására egy anyag szilárd halmazállapotból közvetlenül gáz halmazállapotúvá válik, kihagyva a folyékony halmazállapotot. Visszahűlve a gáz jellemzően szilárd lerakódást képez.



↑ Üstökösök keringési pályája a Naprendszerben.



↑ Az üstökös felépítése.

A Megbeszélés rész további tudnivalókat tartalmaz az üstökösök pályájáról.

Az üstökösök szerkezetéről, összetételéről és jelentőségéről további információk található az „ESA tanítsunk a világűrrel! – üstökös az üstben | P06” oktatási segédanyagban (lásd a Linkek részt).

***Lökéshullám (üstökös):** az üstökös kómájában lévő ionok és a napszél közötti kölcsönhatási felület. A lökéshullám azért alakul ki, mert az üstökös relatív keringési sebessége és a napszél sebessége szuperszonikus. A lökéshullám az üstökös előtt, a napszél áramlási irányában jön létre. A lökéshullámban nagy koncentrációban halmozódnak fel az üstökösből származó ionok, és plazmával töltik meg a nap mágneses terét. Ennek eredményeként a tér erővonalai az üstökös körül elhajlanak, az üstökösből származó ionokat magukkal ragadják, és kialakul a gáz-/plazma-/ioncsóva.

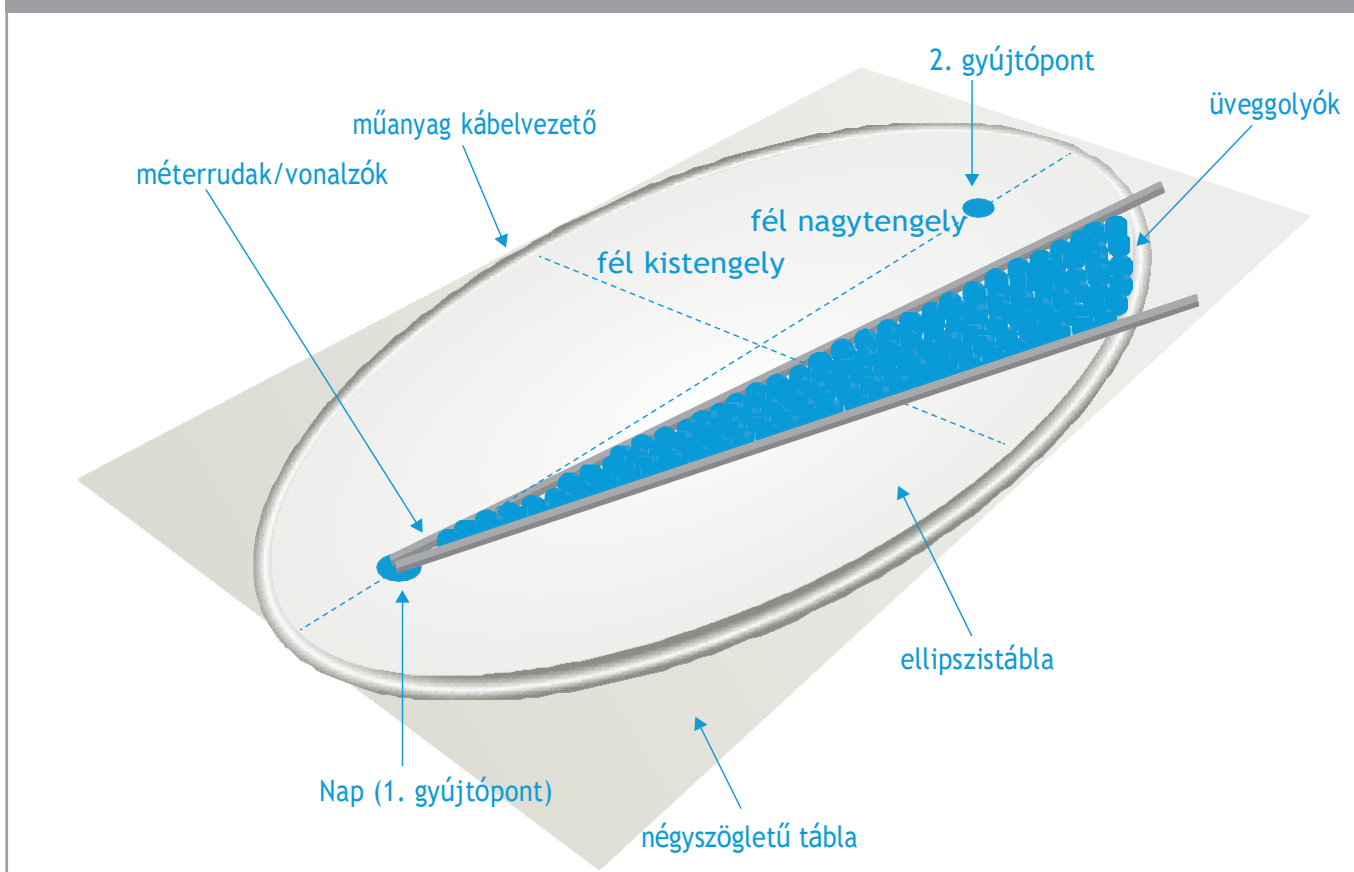
Sebesség és távolság mérése az ellipszisztáblán

A tevékenység keretében a tanulók egy ellipszis alakú tábla segítségével sebesség- és távolságméréseket végeznek egy ellipszispályán keringő objektumra vonatkozóan. Az eredményeket ezután grafikonon ábrázolják a sebesség és az idő függvényében, hogy megértsék, hogyan befolyásolja (vagy változtatja meg) a gravitáció egy ellipszispályán keringő műhold sebességét. A tanulói munkalapokat és az elkészítési útmutatót a tananyag későbbi része tartalmazza.

Eszközök

- Ellipszisztábla – előre elkészítve, ehhez a Melléklet tartalmaz segédletet (Ellipszisztábla elkészítési útmutató és sablon)
- Kb. 75 db kisméretű üveggolyó (a kisebbekkel könnyebben kitölthető az ék hegye)
- 2 db vonalzó vagy méterrúd
- 50 cm zsinór
- letörölhető filctoll

A1. ábra



↑ A kísérlet szemléltetése. A tábla elkészítéséhez a segédletet a Melléklet tartalmazza (Ellipszisztábla elkészítési útmutató és sablon).

Egészségügyi és biztonsági szabályok

A tevékenység csekély kockázattal jár, nincs szükség különleges óvintézkedésekre.

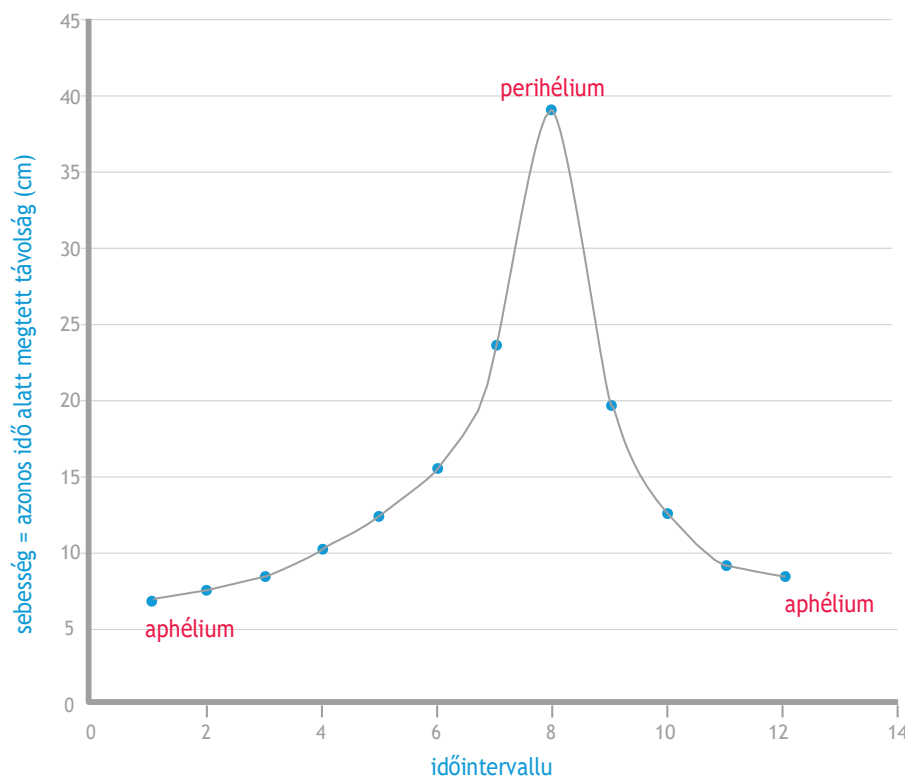
Gyakorlat

Megjegyzés: az ellipszistábla egy üstökös Nap körüli pályáját szemlélteti. Ajánljuk a mellékelt videót is: ESA tanítsunk a világűrrel! - elképesztő ellipszisek | VP02.

1. Egy letörölhető filctollal jelöljük meg azt a pontot az ellipszisen, amely a lehető legtávolabb esik a Naptól (1. gyújtópont) – ez lesz az aphélium. Egy vonalzóval vagy méterrúddal kössük össze ezt a pontot a Nappal. Ez a vonalzó a kísérlet során mindvégig a Nap körül fog forogni. Lásd az A1. ábrát.
2. Fekteszünk a táblára egy másik vonalzót vagy méterrudat úgy, hogy egyik vége ennek is a Naphál (1. gyújtópont) legyen. Ez a vonalzó szintén a Nap körül fog forogni a kísérlet során. Helyezzük az üveggolyókat a két vonalzó közötti térbe. Mozgassuk a második vonalzót úgy, hogy a golyók éppen kitöltsék a két vonalzó közötti teret. Jelöljük meg a második vonalzó metszéspontját az ellipszis belső vonalán. Figyelem! A kísérlethez használt golyók száma határozza meg a mérések számát – kevesebb golyóval több adatpontot kapunk.
3. Mozdítsuk el mindkét vonalzót az ellipszis mentén, amíg az első vonalzó odaér, ahol eredetileg a második vonalzó volt (a második vonalzó pedig tovább halad). Ezután mozgassuk a második vonalzót úgy, hogy a golyók éppen kitöltsék a két vonalzó közötti teret, mint a 2. lépésben (A1. ábra). Ismét jelöljük meg a második vonalzó metszéspontját az ellipszis belső vonalán.
4. Ismételjük meg a 3. lépést, amíg az ellipszis teljes területét le nem fedjük.
5. Zsinórral mérjük meg a jelölések közötti távolságokat az ellipszis külső vonalán. Jegyezzük fel ezeket az értékeket egy táblázatba az időintervallumokkal együtt (az időintervallumok megegyeznek a mért területek számával – az első terület az 1. intervallum, a második terület a 2. intervallum stb.). A mért távolságok lesznek a sebességértékek, mivel ezek megfelelnek az egyenlő időintervallumokban megtett távolságoknak.
6. Ábrázoljuk grafikonon a sebességet (a mért távolságok) az idő (az intervallum száma) függvényében minden szakaszra vonatkozóan. Az A2. ábra bemutat egy példát a táblázatra és a grafikonra. A görbe/vonal meredeksége a grafikonon az ellipszis excentricitásától függ – egy excentrikusabb ellipszis meredekebb görbét ad, míg egy kevésbé excentrikus (körhöz hasonlóbb) ellipszis esetében kevésbé határozott a görbe csúcsa.
7. Figyeljük meg, hogy minél elliptikusabb a tábla, annál meredekebb a sebesség-idő grafikon görbéje.

A2. ábra

terület száma	távolság
időintervallum	sebesség
1	6,7
2	7,5
3	8,4
4	10,1
5	12,2
6	15,5
7	23,6
8	39,2
9	19,8
10	12,5
11	9,2
12	8,4



↑ Táblázat és grafikon példa.

Megbeszélés

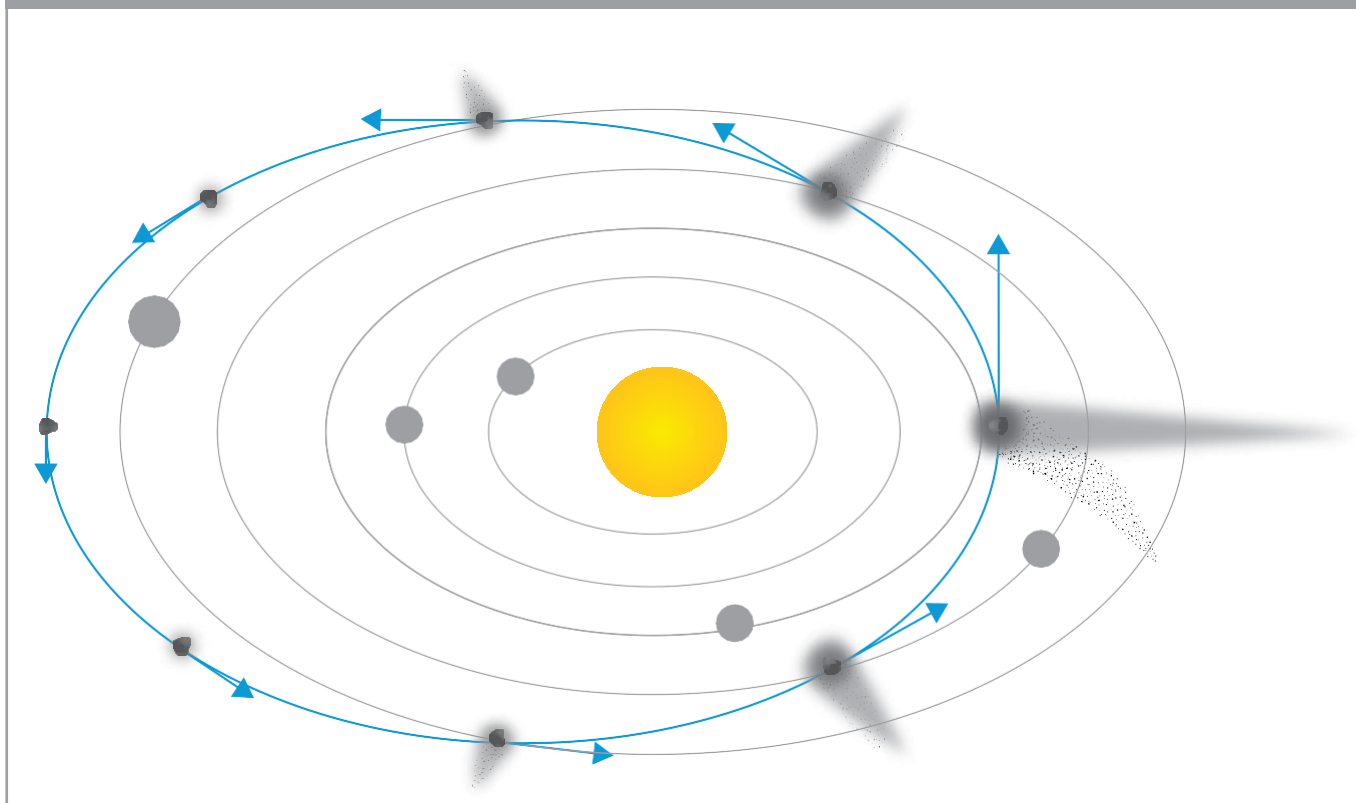
Üstökösökkel kapcsolatos megfigyelések és magyarázatok

Az üstökösöket a rájuk ható gravitációs erő a Nap felé vonzza.

Az üstökös pályája két tényezőtől függ: a sebességétől és a kiindulási irányától. Ahhoz, hogy egy objektum egy másik körül keringjen, centripetális erőre (a középpont, azaz a Nap felé ható erő) van szükség, amely folyamatosan változtatja a mozgás pályáját, és közben gyorsítja vagy lassítja a keringő testet (A3. ábra).

Stabil pályán a Nap gravitációs vonzása felgyorsítja az üstököst, így a sebessége növekszik, amíg el nem éri a perihéliumot. A perihéliumon való áthaladás után a Nap gravitációs vonzása már ellentétes az üstökös mozgásával, ami lassulást és sebességcsökkenést eredményez.

A3. ábra



↑ Így változik a Nap körül keringő üstökös sebességvektora (kék nyilak) a keringési helyzettől függően. A változást a Nap gravitációs vonzása által előidézett centripetális gyorsulás okozza. Az üstökös csóvjának változása is megfigyelhető.

Ha az üstökös körpályán keringene, a centripetális gyorsulás mindig merőleges (90°) lenne az üstökös sebességére. Ellipszispályán a centripetális gyorsulás és a sebesség közötti szög változik. A centripetális gyorsulásnak ez a változása az, ami az ellipszispályán keringő objektum sebességének változásához vezet.

Mit árul el a görbe meredeksége (A2. ábra) bármely ponton?

Mivel a sebesség-idő grafikon meredeksége a sebesség változásának mértékét adja meg, a görbe meredeksége az üstökös adott ponton mért gyorsulását mutatja. A maximális gyorsulás (meredekség) akkor következik be, amikor az üstökös a perihéliumhoz közeledik, vagyis ahhoz a ponthoz, ahol az üstökös a legnagyobb sebességgel halad a pályáján. A perihéliumon való áthaladás után bekövetkezik a maximális lassulás, és az üstökös tovább lassul, amíg el nem éri az aphéliumot, azaz a pálya azon pontját, ahol a legkisebb sebességgel halad.

Mit árul el a grafikon alatti terület?

A grafikon alatti terület az üstökös által megtett távolságot mutatja. Jól látszik, hogy a perihéliumhoz közeledve az üstökös által egységnyi idő alatt megtett távolság a növekvő sebességnek köszönhetően nő. Ahogy pedig közeledik az aphéliumhoz, kisebb sebességgel halad, és rövidebb távolságot tesz meg időegységenként.

Kiegészítő megbeszélés

A tevékenységet kibővíthetjük annak megvitatásával, hogy milyen tényezők befolyásolhatják a pályát, például a keringő objektum eredeti sebessége és iránya, valamint a keringő objektum és a központi csillag tömege.

További információért lásd az ATV-4 „Albert Einstein” című oktatóvideót (elérhető a Linkek részben).

A tanulók Kepler harmadik törvénye segítségével azt is elemezhetik, hogy a fél nagytengely (r) hogyan hat az üstökös keringési idejére.

Kepler harmadik törvénye

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM} \right) a^3$$

T = keringési idő

a = a keringési pálya átlagos sugara

G = gravitációs állandó

M = a Nap tömege

Minél nagyobb a fél nagytengely, annál hosszabb a keringési idő. Ez a Naprendszer bolygóinál is megfigyelhető – minél távolabb van egy bolygó a Naptól, annál hosszabb a keringési ideje.

Az üstökös energiája és földközeli objektumok

Ahogy halad az ellipszispályáján, az üstökös energiája folyamatos ciklusokban változik: a Nap felé közeledve a gravitációs potenciális energiája mozgási energiává alakul át, a Naptól eltávolodva pedig ennek az ellenkezője megy végbe. Az A5. ábra azt mutatja, hogyan változik egy keringő objektum mozgási és gravitációs potenciális energiája a keringési pályája során.

Mivel az üstökös teljes energiájának állandónak kell maradnia, ez azt jelenti, hogy:

mozgási energia (E_k) + gravitációs potenciális energia (E_p) = állandó

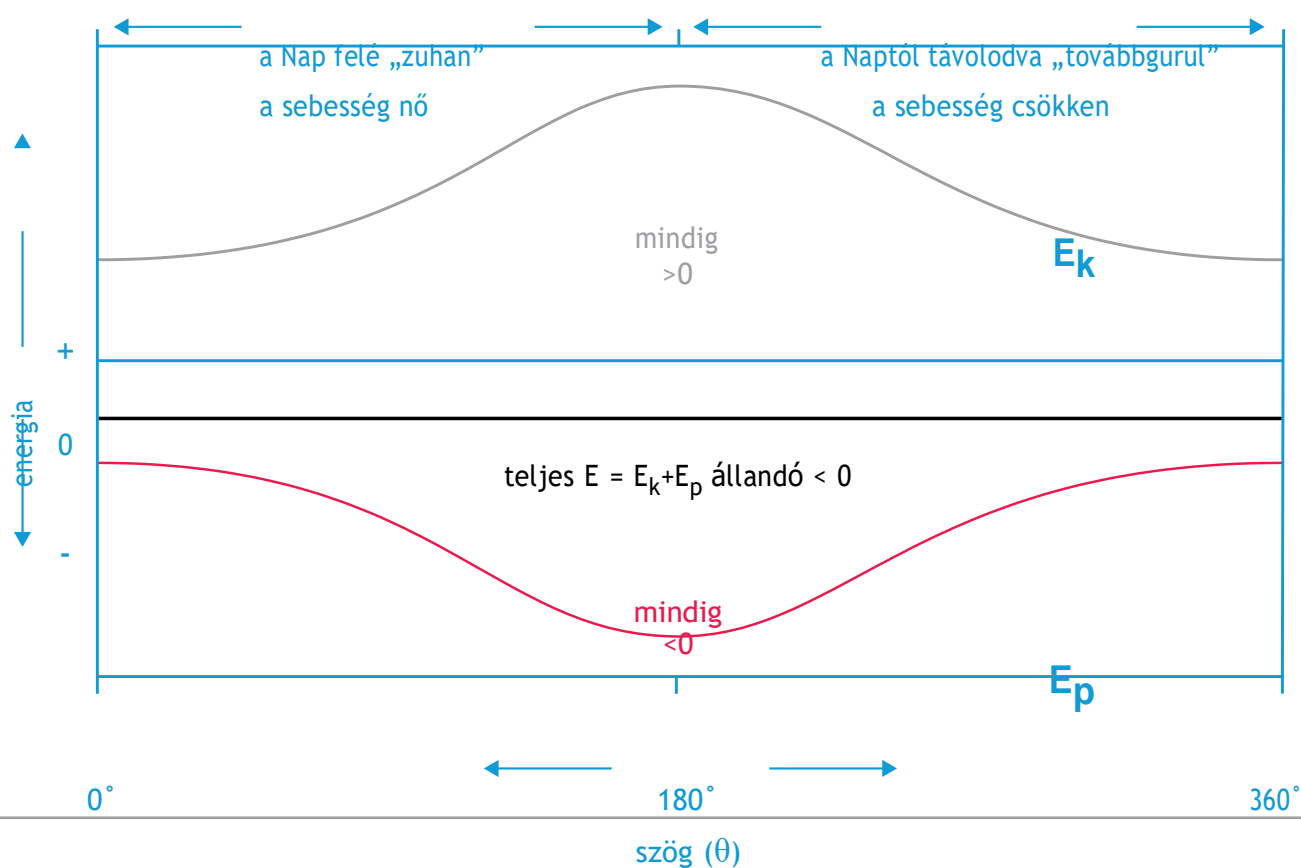
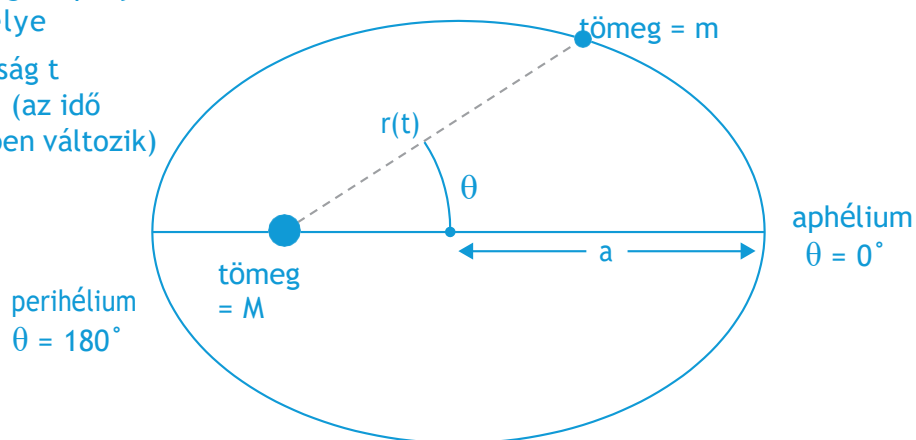
Ezt az információt felhasználva, illetve a Kepler-törvények alapján a keringési pálya paramétereinek kiszámításával az Európai Űrügynökség Olaszországban, Róma mellett működő Földközeli Objektumok Koordinációs Központja tudósai ki tudják számítani egy üstökös vagy aszteroida mozgási energiáját pályájának bármely pontján.

Ez azért fontos, mert időnként egy üstökös vagy aszteroida ellipszispályája átfedésbe kerül a Föld pályájával, ami ütközéshez vezethet. A Kepler-törvények, valamint a gravitációs potenciális energia és a mozgási energia egyenleteinek felhasználásával az ütközés lehetséges hatása megbecsülhető.

A4. ábra

a = a keringési pálya fél nagytengelye

$r(t)$ = távolság t időpontban (az idő függvényében változik)



↑ Így változik egy keringő objektum mozgási és gravitációs potenciális energiája a keringési helyzet függvényében. A teljes energia mindig állandó marad.

→ KONKLÚZIÓ

A keringési pályák természetének megértése kulcsfontosságú az égitestekkel kapcsolatos megfigyelések magyarázatához. Ha összekapcsoljuk Kepler törvényeit a kinetikus és a gravitációs potenciális energiára vonatkozó ismereteinkkel, akkor értelmezni tudjuk az üstökösök pályáját, és megbecsülhetjük egy esetleges ütközés hatásait, továbbá modellezni tudjuk azokat az összetett keringési rendszereket is, amelyek a Rosetta űrszondához hasonló, a világűrrel alkotott ismereteink bővítése érdekében újukra bocsátott űreszközökre hatnak. A tevékenység keretében tanárként arra is lehetőségünk nyílik, hogy megbeszéljünk és fejlesszünk olyan gyakorlati készségeket, mint a pontos és precíz mérés, táblázatok megtervezése, jól használható grafikonok elkészítése, görbe megrajzolása és a gradiensek értelmezése.

Sebesség és távolság mérése az ellipszistáblán

A tevékenység keretében egy ellipszis alakú tábla segítségével sebesség- és távolságméréseket végzünk egy ellipszispályán keringő üstökösre vonatkozóan.

Keplernek a bolygók mozgására vonatkozó második törvénye szerint a bolygót és a Napot összekötő vonal azonos idő alatt azonos területet sűrol.

Az érintett területeket üveggolyók segítségével fogjuk szemléltetni. Fel kell jegyeznetek a keringési pályán az egyes időintervallumok során megtett távolságokat.

Az átlalatok mért távolság valójában az üstökös átlagos sebességét jelenti. Ennek kiszámításához használjátok a $v=d/t$ egyenletet, ahol: d a távolság méterben (m), t az idő másodpercben (s), v pedig a sebesség $m\ s^{-1}$ -ben.

Rögzítsétek az eredményeiteket az alábbi táblázatba. A mértékegységeket a pálya méretétől függően válasszátok meg. Ebben a kísérletben az időtartamot mérhetjük például másodpercben, az átlagsebességet pedig $cm\ s^{-1}$ -ben. Körülbelül tíz mérésre készüljétek, de a feljegyzett mérések száma az üveggolyók számától függően változhat.

Idő	Sebesség ($cm\ s^{-1}$)

Készítsetek egy sebesség-idő grafikont, ahol az y tengely a sebességet, az x tengely pedig az időt mutatja. Ezt négyzetrácsos lapon vagy táblázatkezelővel is megtehetitek. Jelöljétek meg az aphéliumot és a perihéliumot.

Fontos, hogy a grafikonotok nagyméretű legyen, és töltsé ki a lapot.

Rajzoljátok be az üstökös mozgását ábrázoló görbét.

Olvassátok el a következő kérdéseket, majd vonjatok le következtetéseket és keressetek magyarázatokat a görbe alakjára vonatkozóan, és próbáljátok meg minél több kérdésre válaszolni.

Kérdések

1. A görbe meredeksége az üstökös gyorsulásának mértékét mutatja. A lefelé irányuló meredekség lassulást jelez. Hogyan változik a meredekség a keringési pálya során?
2. A grafikon alatti terület az üstökös által megtett távolságot jelzi. Hogyan változik ez a távolság?
3. Hol halad az üstökös a leggyorsabban és a leglassabban? Miért?
4. A gravitáció a Nap közelében erősebb, távolabb gyengébb. Hogyan befolyásolja a gravitáció az üstökös sebességét?
5. Milyen energiaváltozások mennek végbe a keringés során?
6. Milyen különbségek adódnának egy excentrikusabb pályán keringő üstökös esetében?
7. A bolygók szintén a Nap körül keringenek, és saját gravitációs mezővel rendelkeznek. Hogyan befolyásolhatják egy üstökös pályáját?

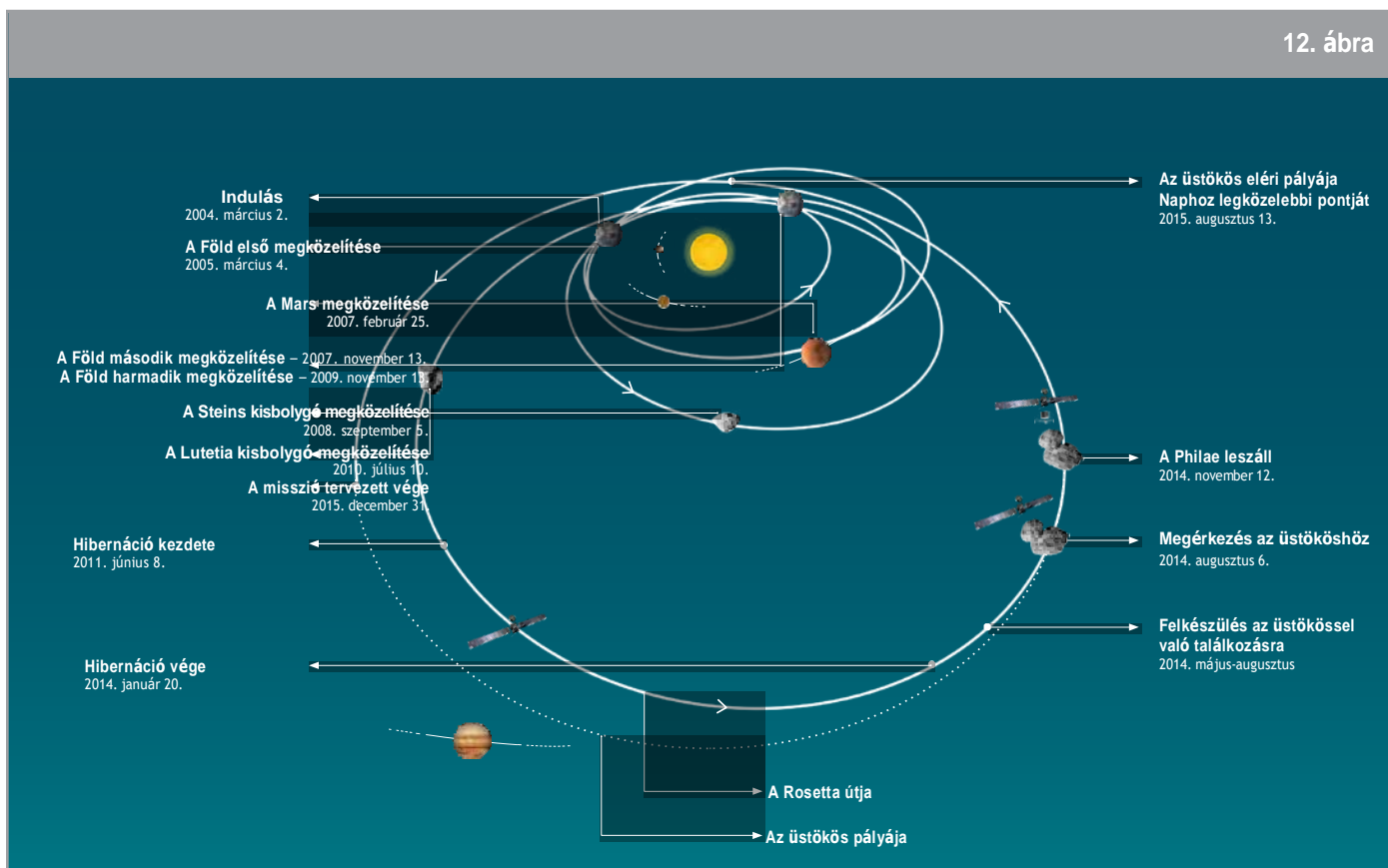
→ SPACE CONTEXT @ ESA

A Rosetta űrszonda

Az Európai Űrügynökség Rosetta-missziója 2004-ben indult 10 éves útjára a 67P/Csurjumov–Geraszimenko-üstököshöz, melynek végén az űrszonda elérte az üstökös magját, és leszállt rá.

A Rosetta fő célja az volt, hogy segítsen megérteni a Naprendszer eredetét és fejlődését. Az üstökös összetétele tükrözi annak a preszoláris ködnek az összetételét, amelyből a Nap és a Naprendszer bolygói több mint 4,6 milliárd évvel ezelőtt kialakultak. A tudósok azt várták, hogy a 67P/Csurjumov–Geraszimenko-üstökös alapos elemzése a Rosetta űrszonda és annak leszállóegysége segítségével alapvető információkkal szolgál a Naprendszer kialakulásának megértéséhez.

Meggyőző bizonyítékok szólnak arról, hogy az üstökösök kulcsszerepet játszottak a bolygók fejlődésében, mivel az üstökösök becsapódása sokkal gyakoribb volt a korai Naprendszerben, mint napjainkban. Az üstökösök például vizet hozhattak a Földre. A Rosetta-misszió ezért többek között a 67P/Csurjumov–Geraszimenko-üstökösben lévő víz kémiai összetételét is elemezni tervezte, hogy kiderüljön, megegyezik-e a földi óceánokéval. Az üstökösök a jég és a por mellett számos összetett molekulát tartalmaznak, köztük szerves anyagokat is, amelyek döntő szerepet játszhattak a földi élet kialakulásában.



↑ Az Európai Űrügynökség Rosetta nevű űrszondájának „gravitációs csúzli-manőverekkel” tarkított útja a 67P/Csurjumov–Geraszimenko-üstököshöz.

***Megközelítés (flyby):** amikor egy űreszköz elhalad egy bolygó vagy más égitest közvetlen közelében. Ha az űreszköz egy égitest gravitációs mezőjét felhasználja a sebessége növelésére és a pályája megváltoztatására, akkor ezt hintamanővernek (swing by) vagy gravitációs manővernek (gravity assist maneuver) nevezzük.

Az üstökös eléréséhez a Rosetta egy sor „gravitációs csúzli-manővert” hajtott végre, melyek során egy-egy égitest gravitációját használták fel az űrszonda felgyorsítására (12. ábra). Ahhoz, hogy mélyebbre repülhessen az űrben, a Rosettának négy csúzli-manővert kellett véghez vinnie: a Földet három, a Marsot egy alkalommal **közelítette meg***. Minden egyes csúzli-manőver megváltoztatta a Rosetta mozgási energiáját, és ezáltal a sebességét, illetve az ellipszispályája méretét.

Hosszú útja során a Rosettát 2011 júniusában hibernált üzemmódba helyezték, hogy csökkentsék az energia- és üzemanyag-fogyasztását, és minimalizálják a működési költségeket. Ezalatt az űrszonda szinte valamennyi elektromos rendszerét kikapcsolták, kivéve a számítógépet és néhány fűtőberendezést.

2014 januárjában a Rosetta előre beprogramozott belső „ébresztőórája” óvatosan felébresztette az űrszondát, hogy felkészüljön a 67P/Csurjumov–Geraszimenko-üstökössel való találkozásra. Az ébresztést követően a keringőegység 11 tudományos műszerét és a leszállóegység 10 műszerét újra aktiválták, és készenlétbe helyezték a tudományos megfigyelésekhez. Ezután tíz kritikus pályakorrekciós manővert hajtottak végre, hogy csökkentsék az űrszonda sebességét az üstököshöz képest, és így összhangba hozzák az üstökös ellipszispályájával.

Miután a Rosetta 2014. augusztus 6-án megérkezett a 67P/Csurjumov–Geraszimenko-üstököshöz, további manőverekbe kezdett, hogy „pályára álljon” az üstökösmag körül. Ebből a megfigyelési helyzetből a Rosetta műszerei különleges alapossggal tanulmányozhatták az üstököst, és soha nem látott részletességgel vizsgálták és térképezték fel a felszínét (13. ábra).

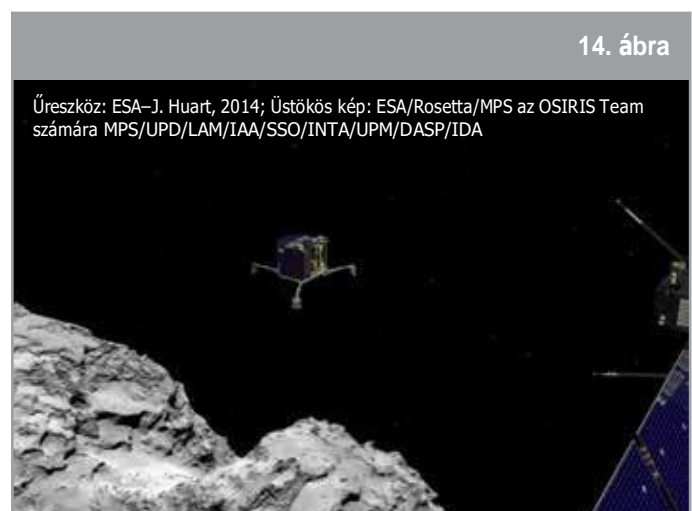


↑ Négy képből álló NAVCAM-mozaik a 67P/Csurjumov–Geraszimenko-üstökről 2014. szeptember 19-én készült képek alapján, amikor a Rosetta 28,6 km-re járt az üstököstől.

Leszállás után a Rosetta tovább kísérte az üstököst ellipszispályáján. A terv az volt, hogy az űrszonda az üstökössel együtt tér vissza a Naprendszer belseje felé, és közelről figyel, ahogy a jeges üstökösmag a Naphoz közeledve felforrósodik.

2014 novemberében, az üstökösmag több hónapos megfigyelése és elemzése után a Rosetta útjára indította Philae nevű leszállóegységét, hogy a történelemben először megkísérelje a leszállást egy üstökösmagra. Mivel az üstökös gravitációja nagyon alacsony, a Philae szigonyokkal és jégcsavarokkal rögzítette magát a felszínhez. A 14. ábra a Philae landolását illusztrálja.

A leszállóegységet 10 műszerrel, köztük egy fúróval szerelték fel felszíni minták gyűjtéséhez, valamint **spektrométerekkel***, hogy közvetlenül elemezhesse az üstökös szerkezetét és összetételét.



↑ A Philae leszállóegység feladata az volt, hogy új ismereteket szolgáltatson az üstökös felszínéről és belső szerkezetéről.

A Nemzetközi Űrállomás és az Automated Transfer Vehicle

Az Egyesült Államokkal, Oroszországgal, Japánnal és Kanadával együttműködve Európa részt vesz minden idők legnagyobb nemzetközi projektjében, a Nemzetközi Űrállomásban. A 360 tonnás Nemzetközi Űrállomás (International Space Station, ISS, 15. ábra) több mint 820 m³ nyomás alatt álló térrel rendelkezik, ami hat fős legénységnek ad otthont, és tudományos kísérletek széles skálájának biztosít terepet. Az űreszköz építése 1998 novemberében kezdődött az orosz Zarya modul elindításával. Az űrállomás utolsó nagyobb részét, az AMS-02 műszert a Space Shuttle űrrepülő szállította 2011 májusában.

Most, hogy az űrállomás összeszerelése befejeződött, és hat asztronauta állandóan a fedélzetén tartózkodik, minden eddiginél több olyan kísérletre nyílt lehetőség, amelyeket a Földön nem lehet elvégezni.

Európa fő hozzájárulása a programhoz a Columbus modul, amely a legfontosabb európai kutatási létesítmény az ISS fedélzetén. A Columbus egy általános laboratóriumot, valamint kifejezetten biológiai, orvosi biológiai és a folyadékfizikai kutatások céljára kialakított létesítményeket biztosít.

A tudományos vizsgálatok sokféle területet ölelnek fel az alapfizikától az emberi élettanig, az új ötvözetektől a növényi gyökerekig. A programban mintegy 1500 tudós vesz részt több száz kísérletben, az ipari kutatás-fejlesztés eredményeit felhasználók nagy és sokszínű csoportja mellett. Az ISS tehát biztosítja a kutatók és az orvostudomány közössége számára a szükséges csatornát ahhoz, hogy többéves vizsgálatokat végezhessenek konzisztens mikrogravitációs környezetben.

15. ábra



↑ Az Automated Transfer Vehicle (ATV, automatikus szállítójármű) összekapcsolódik a Nemzetközi Űrállomással.

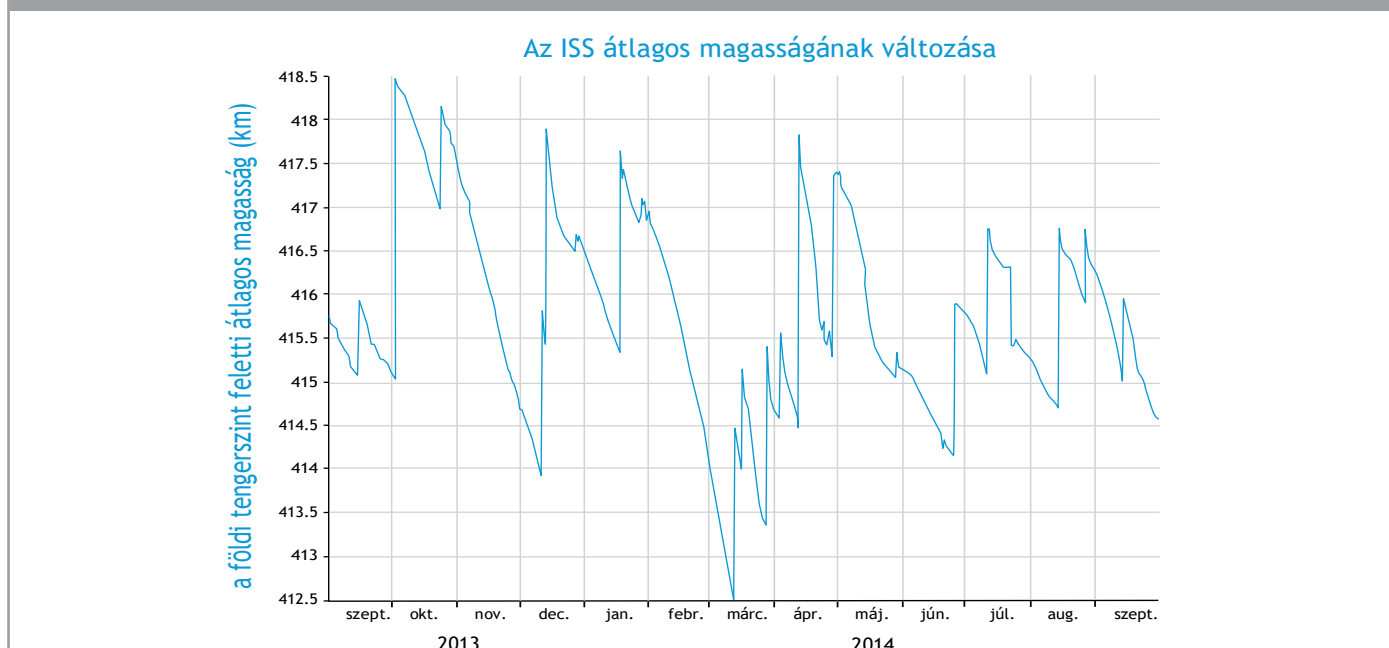
Speciális **pályahajlásából*** az ISS a Föld lakott területeinek 90%-át (a felszín 75%-át) lefedi, így fontos szerepet játszik bolygónk és az éghajlat megfigyelésében. A világűrben zajló kísérleti lehetőségeknek köszönhetően a naptevékenység és a kozmikus sugárzás is vizsgálható az űrállomásról.

Bár a program minden résztvevőjének különböző kutatási céljai vannak, mindannyiuk közös törekvése a tudományos és mérnöki ismeretek bővítése az életminőség javítására a Földön és azon túl.

A Columbus modul mellett Európa másik legnagyobb hozzájárulása az ISS-hez az Automated Transfer Vehicle (ATV, automatizált szállítójármű), az Ariane-5 hordozórakétával pályára állított teherszállító űrhajó. Az ATV akár 7 tonna rakományt is szállíthat, többek között élelmiszert, tudományos felszerelést és hajtóanyagot. Összekapcsolódást követően az űrhajó hajtóműveivel magasabb keringési pályára tudja emelni az űrállomást, ellensúlyozva a Föld légkörének gyenge légellenállását. Az első űrhajó, az ATV Jules Verne 2008-ban indult, ezt 2011-ben az ATV Johannes Kepler követte. A harmadik, az ATV Edoardo Amaldi 2012-ben, míg a sorozat negyedik tagja, az ATV Albert Einstein 2013-ban startolt. Az ötödiket és egyben utolsót, az ATV Georges Lemaître-t 2014 júliusában bocsátották fel.

A Nemzetközi Űrállomás adott **magasságban***, a Föld egyenlítőjéhez képest meghatározott dőlésszögben és **helyzetben*** kering. Az ATV segíteni tud az ISS-nek megváltoztatni a magasságát és a helyzetét – az előbbinek a tananyagunk szempontjából is van jelentősége.

16. ábra



↑ Az ISS magassági tartománya az ábrázolt időszakban a szokásosnál nagyobb volt az ATV közreműködésének köszönhetően.

***Magasság:** az ISS földi tengerszinthez viszonyított magassága.

***Helyzet:** az ISS elhelyezkedésének a keringési pályájához viszonyított iránya.

***Pályahajlás (inklináció):** az ISS pályasíkjának a Föld egyenlítőjéhez viszonyított szöge.

Az ISS magasságát elsősorban biztonsági és logisztikai megfontolások alapján határozzák meg. Elég alacsonyan kell lennie ahhoz, hogy optimalizálni lehessen a szállítási műveleteket, ugyanakkor 278 km felett kell tartani (ez az ún. minimális visszaállítható magasság), hogy elkerülhető legyen a légkörbe történő visszatérés veszélye. Az ISS magasságát a hajtóanyag-takarékosság és a személyzet sugárterhelésének minimalizálása érdekében is szabályozzák.

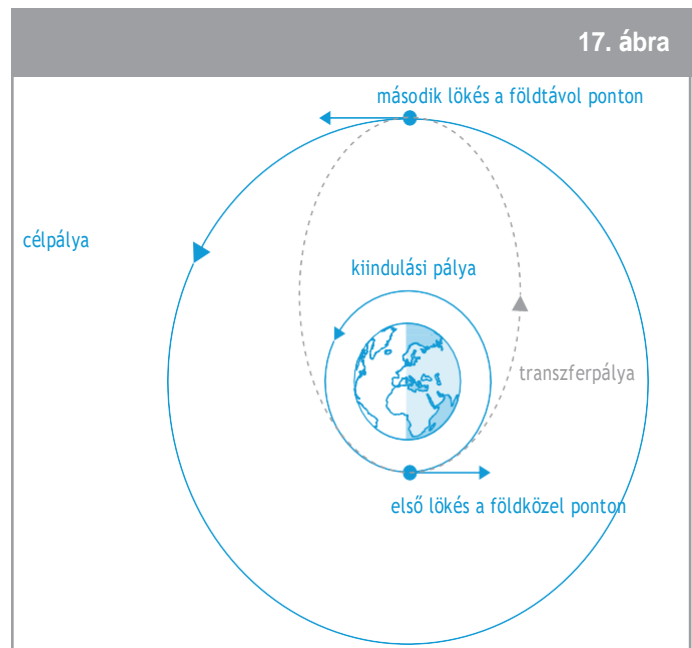
Körülbelül 400 km-en a légellenállás miatt az ISS naponta körülbelül 100–200 m-t veszít a magasságából. A süllyedés mértékének változását a külső légkör sűrűségének változása okozza, ami a naptevékenység következménye.

Az ISS-hez látogató űrhajók, mint például az ATV, a Progress vagy a Szojuz segítenek ellensúlyozni a süllyedést és visszaállítani az űrállomás magasságát, vagy akár kikerülni az űrszemetet is. Az ISS orosz szegmense szintén rendelkezik hajtóművekkel, amelyek látogató űrhajók híján is lehetővé teszik az ISS magasságának kisebb módosítását. Az űrállomás magasságát 10–80 naponta korrigálják.

Az ISS magasságának változásait 2013 szeptembere és 2014 szeptembere között a 16. ábra mutatja.

A keringési pálya módosítása többlépcsős folyamat, amely során két ellentétes irányú lökéshez kell az űrhajó meghajtását igénybe venni (lásd a 17. ábrát).

Az első lökés növeli a pálya excentricitását, míg a második csökkenti azt, de nagyobb magasságban, ami Kepler harmadik törvényének megfelelően a magasság növekedését és a sebesség csökkenését eredményezi. Hasonló eljárásokat alkalmaznak az ütközéselkerülő manővereknél is: ilyenkor a lökéseket jóval előre végrehajtják, hogy növeljék az ISS magasságát, így maximalizálva az idegen objektum és az űrállomás közötti távolságot.



↑A keringési pálya módosítása többlépcsős folyamat, amely során két ellentétes irányú lökést hajtanak végre. A transzferpályát Hohmann-pályának nevezik.

→ MELLÉKLET

Ellipszistábla elkészítési útmutató és sablon

Ez a rész a tevékenységhez szükséges ellipszistábla elkészítési útmutatóját tartalmazza.

Eszközök

- Kemény kartonlap vagy fatábla
 - ha a mellékelt sablont használjuk, kb. 75 x 60 cm-es táblára lesz szükségünk
 - az X1. ábrán látható módszerrel bármilyen méretű táblára megrajzolhatjuk az ellipszist
- Sima fehér papír vagy nyomtatott/fénymásolt ellipszispálya-sablon
- Erős ragasztó
- Toll vagy ceruza
- Zsinór (az X1. ábrán látható módszerhez)
- 2 db tű
- Kábel vagy műanyag kábelvezető (kb. 8 mm vastagságú)
 - 2 m (ha a sablont használjuk)

Elkészítés 1

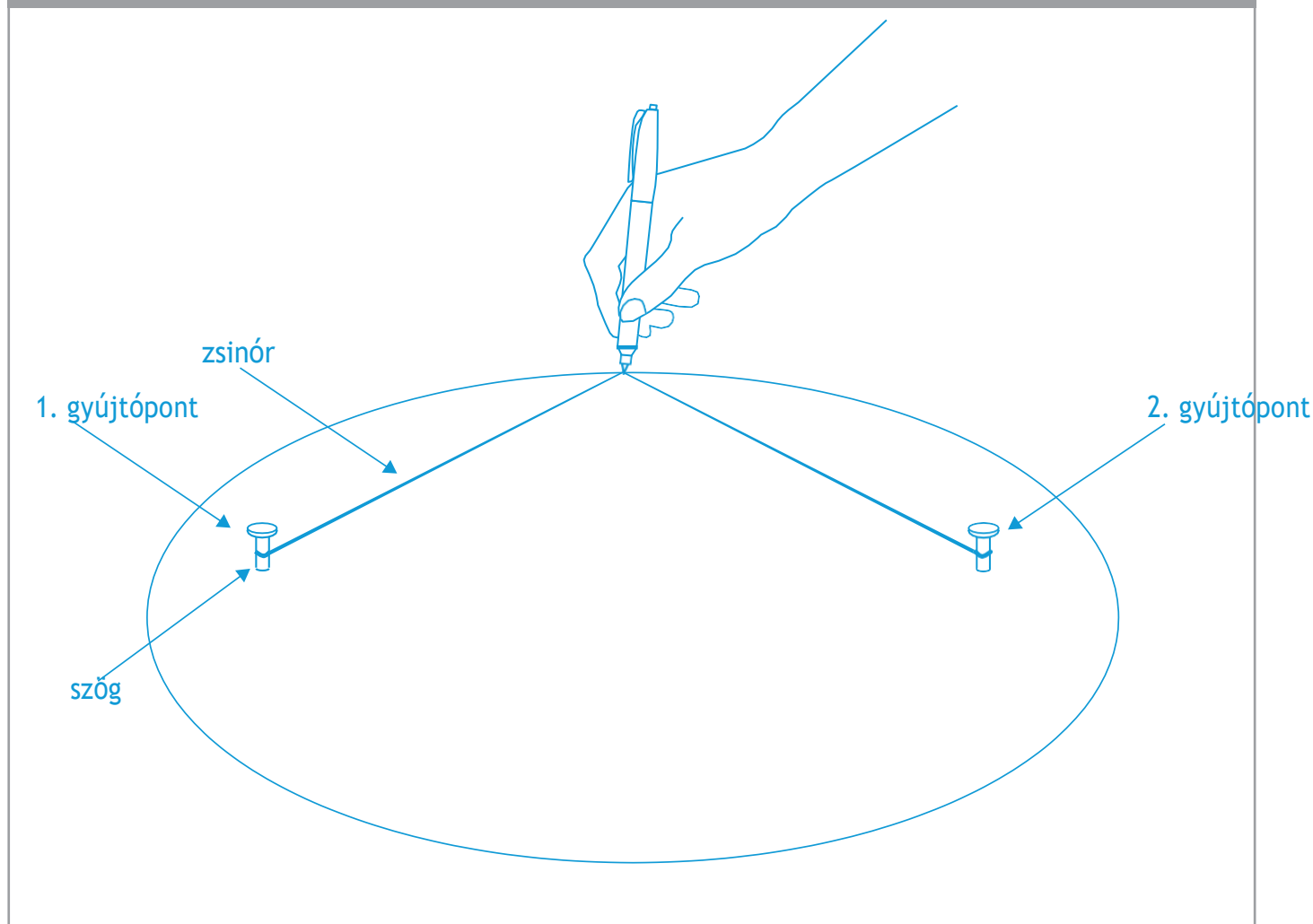
Ezzel a módszerrel a mellékelt sablont használjuk.

1. Nyomtassuk ki (vagy másoljuk ki méretarányosan) a 29–32. oldal ábráit egy A3-as lapra.
2. Ragasszuk össze a papírdarabokat úgy, hogy ellipszist alkossanak.
3. Ragasszuk a kábelt vagy műanyag kábelvezetőt a táblára az ellipszis vonala mentén.

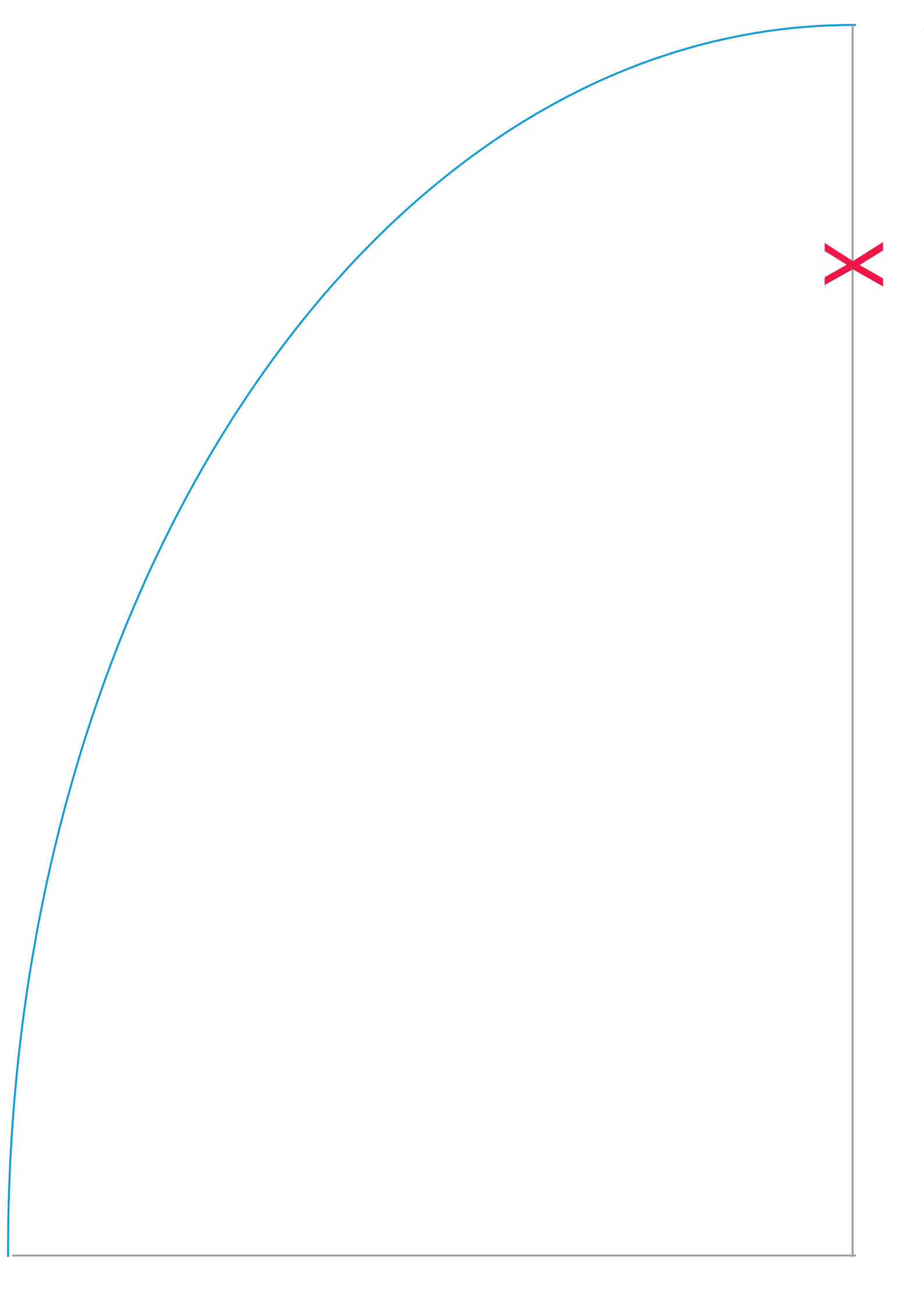
Elkészítés 2

Ezzel a módszerrel egy zsinór segítségével rajzoljuk meg az ellipszist.

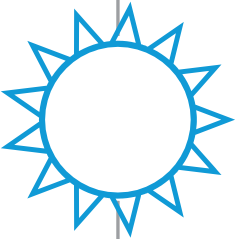
1. Fedjük be a táblát sima fehér papírral.
2. Két szög segítségével rögzítsük a zsinórt a tábla középvonalához két pontban (az X1. ábrán látható módon).
3. Helyezzünk egy tollat vagy ceruzát körülbelül a zsinór feléhez, és óvatosan húzzuk ki, amíg a zsinór meg nem feszül.
4. A tollat mozgatva rajzoljuk meg az ellipszist. A madzag végig maradjon feszes.
5. Ragasszuk a kábelt vagy műanyag kábelvezetőt a táblára az ellipszis vonala mentén.

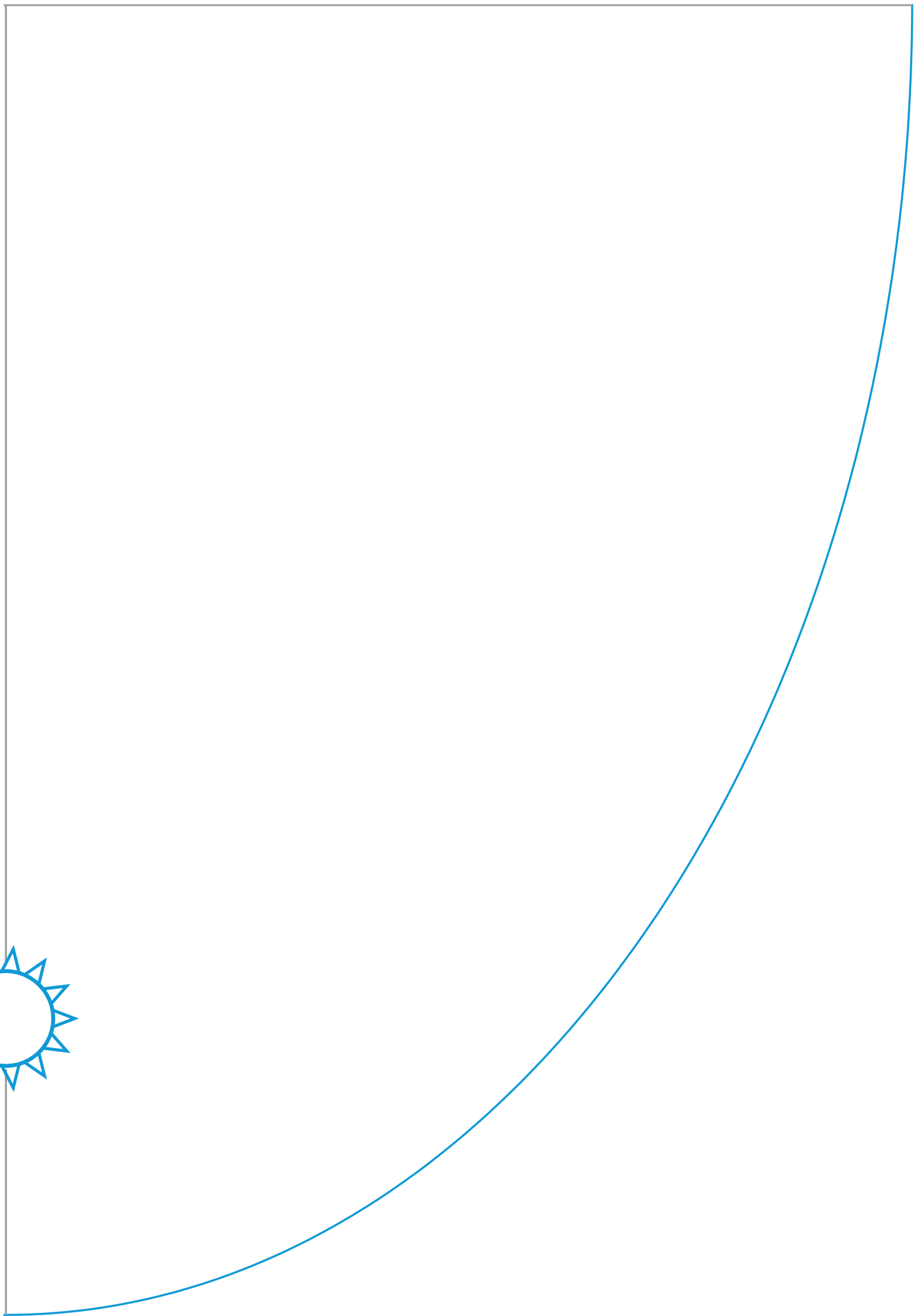
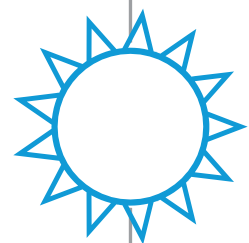


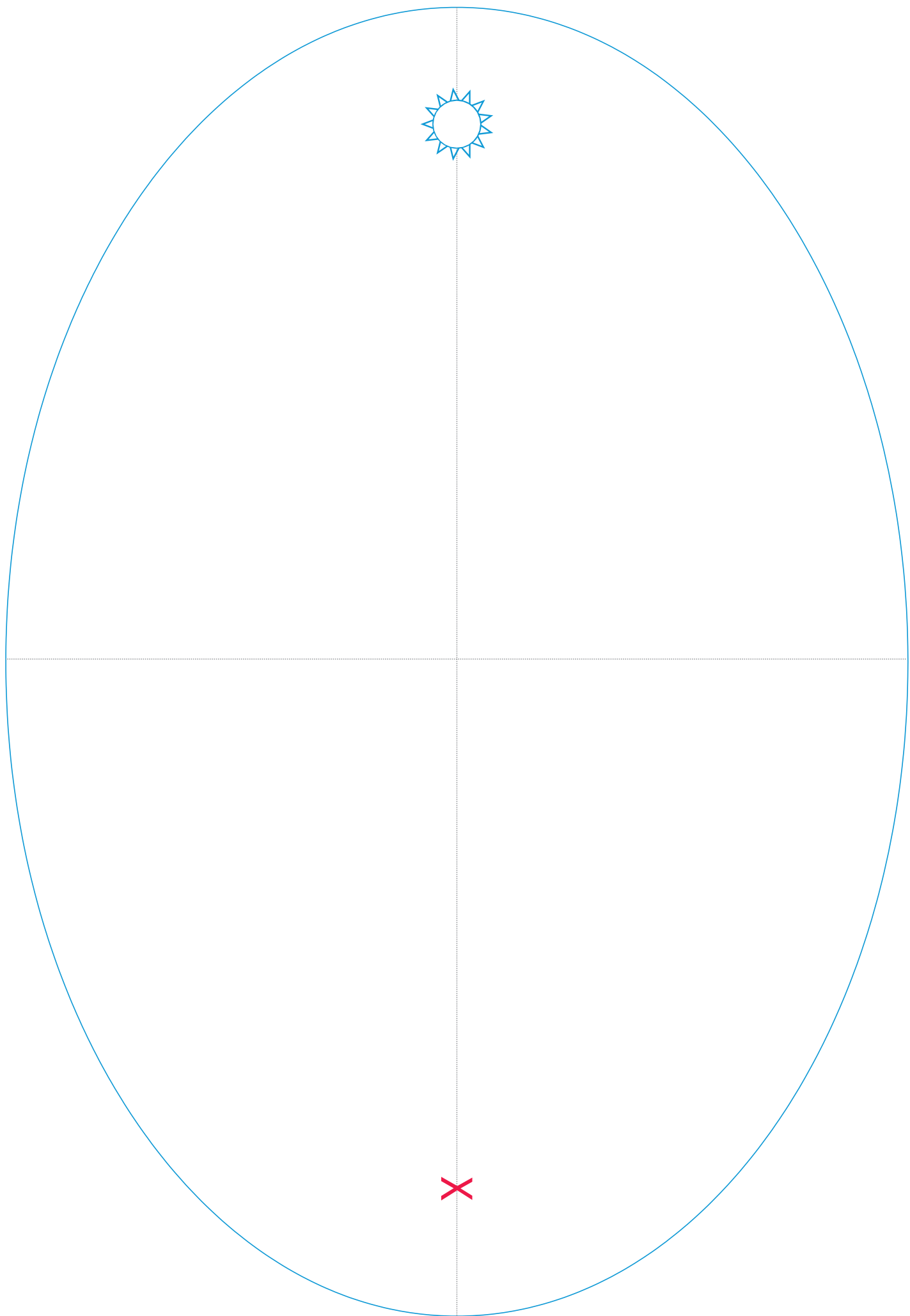
↑ Így rajzoljuk meg az ellipszist.











Szójegyzék

Magasság: az ISS földi tengerszinthez viszonyított magassága.

Helyzet: az ISS elhelyezkedésének a keringési pályájához viszonyított iránya.

Csillagászati egység (astronomical unit, AU): 1 AU a Föld és a Nap közötti átlagos távolság, vagyis a Föld keringési sugara, ami körülbelül 150 millió km.

Lökéshullám (üstökös): az üstökös kómájában lévő ionok és a napszél közötti kölcsönhatási felület. A lökéshullám azért alakul ki, mert az üstökös relatív keringési sebessége és a napszél sebessége szuperszonikus. A lökéshullám az üstökös előtt, a napszél áramlási irányában jön létre. A lökéshullámban nagy koncentrációban halmozódnak fel az üstökösből származó ionok, és plazmával töltik meg a nap mágneses terét. Ennek eredményeként a tér erővonalai az üstökös körül elhajlanak, az üstökösből származó ionokat magukkal ragadják, és kialakul a gáz-/plazma-/ioncsóva.

Megközelítés (flyby): amikor egy űreszköz elhalad egy bolygó vagy más égitest közvetlen közelében. Ha az űreszköz egy égitest gravitációs mezőjét felhasználja a sebessége növelésére és a pályája megváltoztatására, akkor ezt hintamanővernek (swing by) vagy gravitációs manővernek (gravity assist maneuver) nevezzük.

Gravitációs perturbáció: amikor egy égitest (pl. bolygó, üstökös) pályája más égitestek (pl. óriásbolygók, más csillagok) gravitációs mezőjével való kölcsönhatás következtében megváltozik.

Pályahajlás (inklináció): az ISS pályasíkjának a Föld egyenlítőjéhez viszonyított szöge.

Keringési idő: a keringési pálya teljesítéséhez szükséges idő.

Retrográd mozgás: amikor egy bolygó látszólagos mozgása az éjszakai égbolton ellentétes a szokásos iránnyal (prográd mozgás).

Napszél: a Nap felső légköréből minden irányba kibocsátott nagyenergiájú részecskék (plazma) áramlása. Többnyire elektronokat és protonokat tartalmaz.

Spektrométer: olyan műszer, amely a fényt alkotó hullámhosszaira bontja, hogy a fényforrás tulajdonságai mérhetők legyenek.

Szublímáció: amikor melegítés hatására egy anyag szilárd halmazállapotból közvetlenül gáz halmazállapotúvá válik, kihagyva a folyékony halmazállapotot. Visszahűlve a gáz jellemzően szilárd lerakódást képez.

Linkek

Rosetta

ESA Rosetta honlap: www.esa.int/rosetta

ESA Rosetta blog: blogs.esa.int/rosetta/

Rosetta videók és animációk: www.esa.int/spaceinvideos/Missions/Rosetta

Rosetta képek: [www.esa.int/spaceinimages/Missions/Rosetta/\(class\)/image](http://www.esa.int/spaceinimages/Missions/Rosetta/(class)/image)

Rosetta adattár és a küldetés idővonala: www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/Rosetta_factsheet

Mi történt eddig?: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_the_story_so_far

Az üstökös nyomában: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Chasing_a_comet

12 év utazás az űrben: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2013/10/Rosetta_s_twelve-year_journey_in_space

A Rosetta pályája az üstökös körül: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet

Keringés az üstökös körül: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/08/How_to_orbit_a_comet

Üstökösök

ESA Kids cikk az üstökösökről: www.esa.int/esaKIDSen/SEMWK7THKHF_OurUniverse_0.html

ESA Rosetta honlap (technikai): www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta

ESA Giotto honlap: sci.esa.int/giotto/

ESA Kids cikk a világegyetemről: www.esa.int/esaKIDSen/SEMYC9WJD1E_OurUniverse_0.html

Keringési pályák

Animáció a Mars mozgásáról az éjszakai égbolton: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet

Animáció az epiciklusokról – ESA Studio Epiciklusok: www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Studio_Epicicles

Animáció az epiciklusokról – ESA Studio Retrográd mozgás: www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/ESA_Studio_Retrograde_Motion_Explanation

A Rosetta pályája az üstökös körül: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/01/Rosetta_s_orbit_around_the_comet

ESA Kids kvíz a keringési pályákról: www.esa.int/esaKIDSen/SEMZPCMVGE_q.html

Kepler első törvénye – ESA Studio 1. törvény: www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Law_1

Kepler második törvénye – ESA Studio 2. törvény: www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Law_2

Kepler harmadik törvénye – ESA Studio 3. törvény: www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/09/Law_3

Bolygórendszer szimulátor játék: phet.colorado.edu/sims/my-solar-system/my-solar-system_en.html

Super planet crash szimulátor játék: www.stefanom.org/spc/

A Nemzetközi Űrállomás és az Automated Transfer Vehicle

ESA ATV-2 oktatóvideó „Johannes Kepler”: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/ATV_Johannes_Kepler_-_Orbits_and_body_motion_in_space

ESA ATV-4 oktatóvideó „Albert Einstein”: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/ATV_Albert_Einstein_-_Relativity_of_space_and_time

Tanítsunk a világűrrel! sorozat

ESA tanítsunk a világűrrel! – gravitációs kutak – videó | VP04: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Gravity_wells_-_classroom_demonstration_video_VP04

ESA tanítsunk a világűrrel! – üstökös az üstben – tanári útmutató és tanulói tevékenységek | P06:

https://www.esa.int/Education/Expedition_Home/Marble-ous_ellipses_-_speed_and_time_of_orbiting_bodies

ESA tanítsunk a világűrrel! – üstökös az üstben – videó | VP06:

www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/10/Cooking_a_comet_in-gredients_for_life_-_classroom_demonstration_video_VP06

ESA tanítsunk a világűrrel! – elképesztő ellipszisek – videó | VP02: www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Marble-ous_ellip-ses_-_classroom_demonstration_video_VP02

tanítsunk a világűrrel! – elképesztő ellipszisek | P02
www.esa.int/education

Készült a Nemzeti Űrakadémia (National Space Academy, Egyesült Királyság)
gondozásában az Európai Űrügynökség számára
Illusztráció: Kaleidoscope Design, Hollandia

Az Európai Űrügynökség oktatási programja
Szerzői jogok © Európai Űrügynökség 2014