

**A csillagászat tanítása, különös tekintettel
napjaink kutatási eredményeire**

Doktori értekezés

Horváth Zsuzsa

Témavezető: Dr. Érdi Bálint, egyetemi tanár

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Fizika Doktori Iskola

Vezető: Dr. Gubicza Jenő, egyetemi tanár

Fizika Tanítása Doktori Program

Vezető: Dr. Nguyen Quang Chinh, egyetemi tanár



2022.

DOI azonosító: 10.15476/ELTE.2022.094

Tartalom

Bevezetés.....	5
1 Csillagászati ismeretek tanítása.....	7
1.1 A csillagászat és a fizika kapcsolata.....	7
1.2 Hazai helyzetkép a csillagászati ismeretek oktatásáról	8
1.2.1 Csillagászat tantárgy és érettségi.....	8
1.2.2 Csillagászati ismeretek oktatása különböző tantárgyakban	9
1.3 Tanórán kívüli csillagászati ismeretszerzési lehetőségek.....	11
1.4 Miért, mi célból tanítsunk csillagászatot?	12
1.4.1 Korunk csillagászhai	12
1.4.2 Csillagászati ismeretek gyakorlati haszna.....	14
1.4.3 A csillagászati ismeretek hozzátartoznak a 21. századi műveltséghez	15
1.5 Milyen csillagászati ismereteket tanítsunk?	16
1.6 Csillagászat tanítása kisgyermekkoról kezdődően	18
1.7 Csillagászzal kapcsolatos tévképzetek	19
1.7.1 Csillagászati alaptudást mérő teszt (TOAST) alapján feltárt tévképzetek	19
1.7.2 Tanulóink csillagászzathoz való viszonyulása.....	21
1.8 Csillagászat tanításával kapcsolatos módszertani gondolatok.....	23
1.9 A csillagászat elsősorban megfigyelő tudomány.....	24
2 Üstökösökkel kapcsolatos ismeretek tanítása	27
2.1 Az égbolt.....	27
2.2 Üstökösprojekt két budapesti gimnáziumban.....	28
2.2.1 Diákjaink üstökösökkel kapcsolatos előzetes tudása, tévképzeteik	29
2.2.2 Üstökösökkel kapcsolatos programjaink.....	32
2.2.3 Egy üstökösrag megismerésének nyomomonkövetése, tanórai projekt	35
2.2.4 Milyen eredményt várhatunk az üstökösök megismerése által?	36
2.3 Mit érdemes tudni az üstökösökről?	37
2.3.1 Üstökösökkel kapcsolatos ismeretek az oktatásban	37
2.3.2 Üstökösökkel kapcsolatos ismeretanyag	39
2.3.3 Üstökös vadászat régen és ma	40
2.3.4 Üstökösökkel kapcsolatos ismeretek fejlődése	43
2.3.5 Az üstökösök anyagi összetételének megismerése	46
2.3.6 A Naprendszer külső vidékei	49
2.3.7 Földközeli égitestek veszélyessége	49

2.3.8	Üstökösökkel kapcsolatos hiedelmek, áltudományos nézetek terjedése.....	52
2.3.9	Üstökös katalógusok, magyar felfedezések.....	54
2.3.10	Az ISON-üstökössel kapcsolatos ismeretanyag.....	55
3	Az üstökös-mag és iskolai modellezése	59
3.1	Az üstökös-magok	59
3.2	Üstökös-mag-modell készítése	61
3.2.1	Az üstökös-mag-modell összetevői	62
3.2.2	Az üstökös-mag-modell biztonságos elkészítése.....	63
3.2.3	Az üstökös-mag-modellhez felhasznált anyagok bemutatása	64
3.2.4	Az üstökös-mag-modell elkészítésének lépései	65
3.2.5	Diákjaink biztonságos üstökös-mag-modell készítése	68
3.2.6	A tanulói üstökös-mag modellezésének előkészületei	68
3.2.7	A modellkészítés diákok általi megvalósítása.....	69
3.2.8	Néhány látványos kísérlet szárazjéggel.....	70
3.2.9	Lányokat is érdekli az üstökösök témája.....	71
4	Új utak keresése a Kepler-törvények tanításánál	73
4.1	Kepler személye, kapcsolata az asztrológiával, tudománytörténeti és irodalmi vonatkozások	73
4.2	Kepler törvényeinek helye a tantervben, tankönyvekben.....	75
4.3	A bolygómozgást leíró Kepler-törvények tanítása, a diákok motiválása a témával való foglalkozásra	76
4.3.1	Kepler törvényeinek tárgyai a bolygók	76
4.3.2	Az égitestek pályái	78
4.3.3	Hogyan mozognak az égitestek a pályájukon?.....	93
4.3.4	Égi harmóniából tömegmeghatározás (Kepler harmadik törvénye).....	96
4.4	Kepler törvényeinek jelentősége	103
5	Exobolygók sokszínű világának bemutatása a fizika tanításában	106
5.1	Diákjaink exobolygós ismeretei	106
5.1.1	Mit tudnak diákjaink az exobolygókról?.....	106
5.1.2	Hol kerülnek kapcsolatba diákjaink az exobolygókkal?	109
5.1.3	Ismeretszerzési lehetőségek az exobolygók témájában.....	110
5.2	Az exobolygók témájának aktualitása	114
5.2.1	Több ezer éves emberi kíváncsiság	115
5.2.2	Fizikai Nobel-díj exobolygó felfedezésért	115
5.2.3	Az exobolygókutatás vezető csillagászati és űrkutatási téma	116
5.3	Miért érdemes exobolygókkal kapcsolatos ismereteket tanítani?	124

5.3.1	A bolygófogalom megszilárdítása.....	124
5.3.2	A tudomány működésének bemutatása az exobolygók felfedezésének segítségével	128
5.3.3	Magyar vonatkozások	132
5.3.4	Az exobolygók sokféleségének ismerete gazdagítja világszemléletünket.....	133
5.3.5	Az exobolygók felfedezési módszerei és hasznosságuk a fizika tanításában ..	136
5.4	Exobolygós feladatok a fizika oktatásban	144
5.5	Asztrobiológiai ismeretek tanítása.....	150
5.5.1	Diákjaink érdeklődése az asztrobiológiai témák iránt.....	150
5.5.2	Asztrobiológia szakkör.....	153
5.5.3	Lakható exobolygók	155
5.5.4	Asztrobiológiai témák versenyeken	157
6	Csillagászati tehetséggondozás	161
6.1	Csillagászattal kapcsolatos tehetséggondozás formái	161
6.2	Csillagászati témák versenyeken	163
6.3	Hazai csillagászati versenyek	166
6.4	Nemzetközi csillagászati versenyek	168
6.4.1	Nemzetközi természettudományos diákolimpiák.....	170
6.4.2	Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia (IOAA)	171
6.5	Felkészítés az IOAA-ra	184
6.5.1	A válogatóverseny és a diákolimpiai felkészítés megismertetése.....	184
6.5.2	Olimpiai felkészítő szakkörök.....	186
6.5.3	A diákok kiválasztásának és felkészítésének változása az évek során.....	186
6.5.4	Magyar diákolimpiai mozgalom kialakulása	189
7	Összefoglalás.....	191
8	Summary	193
9	Köszönetnyilvánítás	195
10	Hivatkozások.....	196

„A tudományok között pedig talán legkönnyebb a csillagászatot szeretni.”

Klebelsberg Kúnó

Bevezetés

Az új évezredben a technika fejlődése robbanásszerűen felgyorsult. Ennek révén a világ is egyre jobban kitágul az ember előtt. Gondoljunk csak az űrkutatás fejlődése révén megvalósuló űrturizmusra. Számos eszköz, információs és kommunikációs technológia segíti mindennapjainkat mind a munkánkban, mind hétköznapi életünkben, ezen felül tágít(hat)ja látókörünket is. A legtöbb ember megelégszik ezen „okos” eszközök (egyszerű) használatával és nem is érdekli, hogyan működnek vagy miből, milyen módon épülnek fel. Ennek egyik oka, hogy ezek a használati eszközök méretüket tekintve egyre kisebbek és egyre bonyolultabbak. Kevesen értik teljes egészében felépítésüket, működésüket, azonban ezek elkészítéséhez, fejlesztésükhöz nagy szükség van természettudományos, technikai és matematikai ismeretekre. Nagy a hiány megfelelő szakemberekből ezen a téren.

Talán az oktatásban nem beszélhetünk olyan gyors változásról, mint a technikában, de mindenki érzi a változtatás szükségességét. Sokan gondolkodnak, vitatkoznak arról, hogy mit és hogyan kellene tanítani az iskolákban, megszorodtak az ilyen irányú kutatások is. A 2020 tavaszán kialakult világjárvány a tanítás, tanulás módjában alapvető változást hozott, hiszen a diákok hosszabb ideig nem járhattak iskolába. Reméljük ennek az élet által kikényszerített oktatási kísérletnek lesznek pozitív hozadécai. Mindenesetre diákjainknak (vagy bárkinek) soha nem volt ennyi lehetősége az ismeretekhez való hozzájutáshoz, mint napjainkban, itt az iskolán kívüli jórészt internetes lehetőségekre gondolok. Ugyan a polihisztorok kora lejárt, de majdnem mindenki kezében, okostelefonján ott van szinte minden ismeret, amelyet eddig felfedeztek. A világjárvány ezen kívül azt is megmutatta, hogy rengeteg tanulást segítő anyag, tanfolyam is létezik és ezek közül több olyan is ingyenesen elérhetővé vált a diákok és tanáraik számára, amelyért addig fizetni kellett. Jó volt látni, milyen sokan segítették a tudásátadást, tudásszerzést, a tanítást, tanulást.

A természettudományokkal kapcsolatos tantárgyak (különösen a fizika és kémia) még mindig népszerűtlenek, ezért a diákok tanulásra való motiválásának kérdése, érdeklődésük felkeltése vált az egyik legfontosabb feladattá. Legtöbb módszertani munka azzal foglalkozik, hogy hogyan tudnánk megszerettetni a természettudományokkal kapcsolatos tantárgyakat

diákjainkkal. Ennek egyik eredményes módja lehet a csillagászati ismeretek oktatása, különös tekintettel napjaink tudományos eredményeire.

Matematika és fizika szakos tanárként tanóráimon, délutáni foglalkozásokon és iskolán kívüli programokkal segítettém diákjaimat csillagászati ismeretekhez. Ezzel kapcsolatos tapasztalataimat és kutatásaimat mutatom be értekezésemben. Utalok mások csillagászat tanításával kapcsolatos munkáira, jó gyakorlataira is, hiszen egyes csillagászati témák tanításának kérdéskörét már többen vizsgálták, azt gondolva, hogy ez által motiválhatják diákjaikat más természettudományos tárgyak például a fizika tanulására is.

Értekezésemben az elmúlt időszak új csillagászati felfedezései közül foglalkozom az exobolygókkal, az asztrobiológiával és az üstökösök témájával, tanítási lehetőségeikkel. Csillagászati tehetséggondozással kapcsolatosan a nemrég megalakult csillagászati diákolimpiát és a hozzá kapcsolódó országos válogató versenyt, illetve olimpiai felkészítést mutatom be. Kitérek általánosságban a csillagászat tanításának hazai és nemzetközi helyzetére, lehetőségeire. A csillagászat oktatásával kapcsolatos problémák között jelentős a tanárképzés vagy még inkább a tanárok továbbképzésének a kérdése. Saját tapasztalataim alapján ajánlok megbízható szervezeteket, honlapokat, amelyek sok színvonalas anyaggal segítik egy-egy csillagászati jelenség, vagy téma feldolgozását.

A téma aktualitását mutatja, hogy a Nemzetközi Csillagászati Unió, amely 2019-ben ünnepelte 100 éves fennállását, meghirdetett egy programsorozatot, amelynek egyik kiemelt témája az „Astronomy for Education” [1]. Egyrészt az emberek természettudományos műveltségének gazdagítását, bővítését tűzték ki célul, főleg a csillagászzal kapcsolatos területekre koncentrálván. Másrészt mivel a csillagászat és űrkutatás eredményei gyorsan beépülnek munkánkba, mindennapi életünkbe, most az oktatásban is szeretnék, ha a csillagászat, mint eszköz is hozzájárulna az eredményes, hatékony tanításhoz. A csillagászat az egyik legősibb tudomány, minden nép kulturális gyökereiben is megtalálható, és azon néhány tudományterület egyike, amely az emberek többségét érdekli, ezért lehet jelentősége a korszerű oktatásban is.

1 Csillagászati ismeretek tanítása

A csillagászattal kapcsolatos tudásanyag tanításánál felmerülnek alapvető kérdések: kinek, mit, hol, mikor, miért és hogyan tanítsunk. Ezekhez kapcsolódik a csillagászat tanulásának, a csillagászati ismeretszerzésnek kérdése is, hiszen a tudományok sorában a csillagászat hasonló szerepet tölt be, mint a labdarúgás a sportban, mindenki hall róla, hiszen vezető hírtípus, majdnem mindenki szereti, beszél róla, mert úgy gondolja, hogy valamilyen mértékben ért hozzá, vannak ismeretei e téren. Fontosnak tartom, hogy minél több csillagászati ismerettel iskolai keretek között is találkozzanak a diákjaink, amennyire lehet, minél tudományosabb megközelítésben, de egyben a téma érdekességét, szépségét is megtartva.

1.1 A csillagászat és a fizika kapcsolata

Nem célom a csillagászat (és űrkutatás) definiálása, de egy számomra is tetsző meghatározása Kulin Györgytől (1905-1989), a magyar csillagászat (és oktatásának) meghatározó alakjától származik, aki a csillagászatot a Világegyetem fizikájának nevezte. „A mai csillagászat ismeretszerzésének alapjai a megfigyelés és a mérés, ugyanúgy, mint a fizikáé, ezért a csillagászat végeredményben nem más, mint a Világegyetem fizikája.” [2]. Fizikához való szoros kapcsolatát a legrangosabb tudományos elismerés, a Nobel-díj is alátámasztja, hiszen a kiemelkedő csillagászati eredményeket fizikai Nobel-díjjal jutalmazzák.

Az asztronómia az egyik legősibb tudományág, már az ókorban is tanították, a gyakorlati élet szempontjából szükséges ismereteket foglalta össze, a térbeli és időbeli tájékozódást segítette a mindennapokban. A középkori egyetemeken oktatott hét szabad művészetek egyikeként, külön tárgyként oktatták a csillagászatot. A fizika fellendülésével, önálló tudományággá válásával, a XVII. századtól szorult vissza a csillagászat, mint külön tantárgy. Ismeretanyaga a természetismeret, fizika vagy geológia tantárgyakban került átadásra.

1.2 Hazai helyzetkép a csillagászati ismeretek oktatásáról

Az elmúlt évtizedekben, az űrkorszak kezdetével újra felmerült a csillagászati és űrtani ismeretek tanításának fontossága. Születtek tényfeltáró, helyzetelemző írások a csillagászat magyarországi tanításával kapcsolatosan is, amelyek közül a 2003-ban készült Hargitai Henrik: Csillagászat és űrkutatás és oktatása Magyarországon [3], és a Csillagászat Nemzetközi Évében (2009) megjelenő Szatmáry Károly: Csillagászati oktatás és ismeretterjesztés – körkép [4] művek a legátfogóbbak az utóbbi időszakban születettek közül. Ezekben szó van a csillagászati tartalmak különböző tantárgyakban való megjelenéséről és a közoktatást segítő kiadványokról, internetes lehetőségekről. A csillagászképzéssel kapcsolatban a csillagász tanárképzés tervéről, a tanártovábbképzési lehetőségekről, illetve ezek hiányáról. Részletesen bemutatják az egyetemi csillagászképzést, valamint a gazdag csillagászati ismeretterjesztési lehetőségeket.

1.2.1 Csillagászat tantárgy és érettségi

Természetesen első gondolatként egy új, csillagászat tantárgy bevezetése tűnik a legjobb megoldásnak, ha a csillagászat tanítására gondolunk. Néhány országban lehet csillagászat tantárgyat is választani az iskolában és ez Magyarországon is megvalósult néhány éven keresztül. Szijártó Sándor 2006-ban, szakdolgozatában a csillagászat, mint új középiskolai (szabadon választható, fakultációs) tantárgy és vizsgatárgy tantervét, vizsgakövetelményeit dolgozta ki [5]. Terveit egy sikeres akkreditáció (2007) után a megvalósítás követte, amelynek eredményeként 2009-től 2014-ig lehetett csillagászat tantárgyból érettségizni [6], igaz csak az ország egy iskolájában (a kecskeméti Katedra Informatikai és Művészeti Szakközépiskolában), ahol a csillagászat tantárgyat fakultációs keretek között tanították is. Lehetőség volt más iskolák tanulóinak is érettségizni csillagászatból ugyanezen iskolában, ha vendégtanulói jogviszonyt létesítettek. Csillagász szakkörbe járó lelkes diákok az ország más területeiről is eljöttek ebbe az intézménybe, hogy kedvenc tárgyukból, csillagászatból érettségizzenek. Úgy tűnt, hogy miközben egyes természettudományos tantárgyak óraszámai csökkennek, a csillagászat önálló tantárggyá válik. Igaz nem mindenki tanulta volna kötelező jelleggel, de a szabadon választhatóság csak növeli a tantárgy iránti érdeklődést legalábbis, ha tudnak róla a diákok. Tíz éve még azt lehetett gondolni, hogy ez a kedvező lehetőség csak terjedni fog és más iskolákban is lehet majd érettségizni csillagászatból, de sajnos nem ez történt. Öt éven át 221 fő tett sikeres

érettségi vizsgát csillagászatból, majd 2014-ben megszűnt a csillagászat érettségi lehetősége. Eközben a fizika érettségi követelményrendszere, a főbb témakörök részarányai is változtak, de a „Gravitáció, csillagászat” maradt 10%.

Az utóbbi évtizedben már másodjára változott a Nemzeti alaptanterv, új tankönyvcsalád került kifejlesztésre, de mégis úgy gondolom, hogy ezen jelentős változások is eltörpülnek amellet, amelyet az okos telefonok megjelenése és gyors, széleskörű elterjedése okozott az oktatásban. Ez állandó internethez való csatlakozást és így bármilyen ismeret azonnali elérhetőségét jelenti. Könnyebbé vált a diákok együttműködése, egy-két kattintással megoszthatnak egymás között dokumentumokat, képeket, videókat. A mobil eszközökön elérhető alkalmazások közül sok segíti a tanulást, ismeretszerzést és ezek közül a csillagászattal kapcsolatosak száma is egyre nő. Elég csak a csillagos égbolton való eligazodást segítő alkalmazásokra, digitális planetáriumokra gondolni, amelyek között sok jó minőségű program ingyenes is (például a Stellárium). Több országban már a fizika, kémia, biológia és földrajz tantárgyakat is egyben, természetismeret (science) tantárgy keretein belül oktatják, így a csillagászati ismeretek új tantárgy keretein belül való tanítására is kevés az esély. Viszont a csillagászati ismeretterjesztés egyre hatékonyabb, amely segédanyagait természetesen az iskolai oktatáson belül is eredményesen használhatjuk. Űrszervezetek, egyetemek, csillagvizsgálók csillagászati egyesületek, science centerek, múzeumok készítenek tanítást segítő anyagokat, főleg az aktuális csillagászati témákhoz, jelenségekhez kapcsolódóan. Az értekezésemben szereplő témákhoz (például üstökösökhöz, exobolygókhöz) kapcsolódóan ismertetek ilyen segédanyagokat.

1.2.2 Csillagászati ismeretek oktatása különböző tantárgyakban

Jelenleg csillagászati ismereteket főleg a fizika és földrajz, illetve természetismeret tantárgyak tanítása során oktatunk. Az elvárt csillagászattal kapcsolatos tudásanyagot az érettségi vizsgakövetelmények alapján tekintem át a következőkben [7].

A 2017-től érvényes fizika érettségi vizsgakövetelményeknél egy témakör, a *Gravitáció és csillagászat*, ezen kívül az *Optika* témakörben a távcső szerepel, és *Az atomfizika, magfizika* témakörnél a Nap energiatermelése. A *Fizika- és kultúrtörténeti ismeretek* témakörnél Kopernikuszt és Keplert kell ismerniük a vizsgázóknak, valamint a geo- és heliocentrikus világméretet, illetve az „Égi és földi mechanika egyesítését”. A távcső szerepe, illetve az űrkutatás történetének legfontosabb eredményei is megtalálhatóak a követelményrendszerben.

A földrajz érettségi követelményrendszerében is egy témakör teljes egészében csillagászzal kapcsolatos a *Kozmikus környezetünk*. Ebben a Világegyetem és benne a Naprendszer leírása az elvárás, majd a Földdel, mint bolygóval kapcsolatos ismeretek szerepelnek, hangsúlyozva a Föld mozgásait és ennek következményeit például a napszakok vagy az évszakok váltakozásában. Ennél a tantárgynál is ismerni kell az űrkutatás szerepét a Naprendszer megismerésében külön hangsúlyt helyezve a magyar vonatkozásokra.

A természettudomány érettségi tárgy követelményrendszerében is jelentős mértékben találhatunk csillagászzal kapcsolatos ismeretek. Az első témakör *Az Univerzum*, amely az idő és tér fogalma köré csoportosít sok csillagászati és fizikai ismeretet. A következő témakör *A Föld*, amelynél a csillagászati hatások szerepét kell ismerni az éghajlat kialakulásában. Sajnos úgy is leérettségizhet egy diák, hogy nem vizsgáljuk természettudományos tantárgyból így a fentebb említett követelményekről kevés diák ad számot.

Csillagászati ismeretekkel más tantárgyak tanulása során is találkozhatnak tanulóink. Talán a matematikával való kapcsolatát kell a legkevésbé magyarázni, hiszen a természettudományok nyelve a matematika. Kedvező, hogy sok szöveges matematikai feladatban szerepel valós jelenség, adat, köztük csillagászzal kapcsolatos is. Az utóbbi időben újra előtérbe kerülő tudományág, az asztrobiológia sok ismeretéhez szükségesek a biológiában és kémiában tanultak. A csillagászati mennyiségű adathalmaz feldolgozásához, a jelenségek szimulációkkal való modellezéséhez számítástechnikai tudásra van szükség.

A társadalomtudományokban is sok helyen találkozhatunk csillagászati témákkal. A csillagászat történelemmel való kapcsolatát akár azzal is elintézhethetnénk, hogy aki a távoli égitesteket, csillagokat, galaxisokat nézi, egyben a múltat látja, kutatja. Maga az időszámítás is égitestek periodikus mozgásával kapcsolatos, úgy lett egyre pontosabb, ahogyan a csillagászati megfigyelések fejlődtek. Sok történelmi esemény időpontjának megállapításánál segített egy akkor éppen megfigyelhető égi jelenség (például napfogyatkozás vagy egy üstökös feltűnése). A közelmúlt történéseinek pedig egyik meghatározója az űrverseny.

Különböző irodalmi művekben és egyéb műalkotásokban találhatunk égitesteket, csillagászzal kapcsolatos jelenségeket, bátoríthatjuk diákjainkat is saját alkotómunkára, akár egy vers vagy novella írására, rajzok, képregények készítésére, de művészi alkotás lehet a Naprendszer modelljének elkészítése is. Az égboltot már az ősidőkben benépesítette az ember, a csillagképekben állatokat, tárgyakat vagy éppen mitológiai személyeket látott. A hozzájuk tartozó mondavilág szintén fontos kapcsolódási pont az irodalommal vagy egyéb

művészetekkel. Minden kort áthatott a világ megismerésére, felépítésére irányuló kérdésekre adandó válasz keresése. Míg kezdetekben a mítoszok, később már különböző filozófiák, majd a tudományosan megalapozott elméletek segítették a Világegyetem keletkezésének, fejlődésének és felépítésének, benne a Föld helyének megértését. Gyakran felmerülő kérdés, hogy egyedül vagyunk-e az Univerzumban. A csillagászati kutatások között manapság is kiemelt figyelem övezi azokat, amelyek közelebb visznek ennek megválaszolásához, például az exobolygókkal kapcsolatos, illetve más asztrobiológiai kutatások.

1.3 Tanórán kívüli csillagászati ismeretszerzési lehetőségek

Igen fontos az iskolán belüli, tanórai tudásátadás, de a csillagászati ismeretszerzés hatékonyan valósítható meg tanórán kívül, például szakköri (délutáni) foglalkozásokon, ismeretterjesztő előadások, csillagvizsgálók, planetáriumok, csillagoségbolt-parkok felkeresésével is. Bekapcsolódhatunk neves napok programsorozataiba is diákjainkkal. Többek között a *Kutatók Éjszakája*, a *Csillagászat napja* vagy a *Magyar Tudomány Ünnepe* egyes eseményein találkozhatunk csillagászati ismeretterjesztéssel. Részt vehetünk diákjainkkal együtt más ismeretterjesztő előadásokon is, az ELTE *Atomoktól a csillagokig* vagy *Alkímia ma* előadás sorozata kifejezetten középiskolások számára készül és sok előadás témája kapcsolódik a csillagászathoz. Az előadások archív felvételét is megnézhetjük, ha nincs lehetőségünk az eseményen való részvételre. Természetesen ezen alkalmak jó hangulatát kár lenne csak kényelmi szempontok miatt kihagyni. A *Galileo Webcast* [8] sok tudományos előadást közvetít élőben, majd ezek felvételének későbbi megnézhetőséget is biztosítja. A Magyar Csillagászati Egyesületnek is van videótára [9] és az ELKH CSFK KTM CSI (Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet) Svábhegyi Csillagvizsgáló Interaktív Csillagászati Élményközpont is videósorozatot indított: *Élő csillagászat Kiss Lászlóval* címmel, amelyben csillagászati hírekről, újdonságokról hallhatunk közérthető és szórakoztató stílusban.

Az okostelefonok, tabletek világában akár önállóan is végezhetnek diákjaink csillagászati megfigyeléseket, hiszen gazdag választék áll rendelkezésre az ingyenes planetáriumi, csillagfelismerő programokból is [10]. Természetesen minden diáknak (mindenkinek) át kellene élnie a távcsöves észlelés „Galilei élményét”, és egy fényszennyezéstől távoli helyen is látnia kellene a csillagos égboltot, benne galaxisunkat, a Tejutat is (Kulin György volt ennek

nagy szorgalmazója). Az amatőr csillagász mozgalom napjainkban is virágzik, helyi szakköreiken örömmel segítenek érdeklődő tanulóinknak a csillagok égbolt megismerésében.

Ajánlhatunk csillagászati ismereteket is nyújtó folyóiratokat is, mint például a *Természet Világát*, az *Élet és Tudományt* vagy a *Földgömböt*, érdeklődőbbeknek akár a *Fizikai Szemlét* is. Diákjaink már inkább okostelefonjukon olvasnak, tájékozódnak, így megbízható honlapokat is mutathatunk nekik. Csillagászattal kapcsolatosan a csillagászati hírportált kell elsőként említeni [11], ahol az aktuális híreken kívül csillagásztörténet és tudástár rovat is van. Az MCSE (Magyar Csillagászati Egyesület) [9] és a MANT (Magyar Asztronautikai Társaság) honlapját [12], az *Űrvilág Űrkutatási hírportált* [13] is érdemes ajánlanunk, de sok hasznos és megbízható anyag található egyetemek, kutatóintézetek, csillagvizsgálók honlapján is. Többen szerveznek csillagászattal vagy űrkutatással kapcsolatos nyári táborokat is az érdeklődő tanulóknak. Egyre több tartalomgyártó készít minőségi videós tartalmakat különböző online platformokra, ilyen például az Űrkutatás magyarul Youtube-csatorna. Talán a tanár és diák nem ugyanazokat a lehetőségeket találja meg, így érdemes a diákok által megemlítettékkel is megismerkedni, megvizsgálni a hitelességét, felhasználhatóságát az ismeretszerzésben.

1.4 Miért, mi célból tanítsunk csillagászatot?

1.4.1 Korunk csillagászhai

Legtöbb diákunk nem ismer ma élő csillagászokat és azt sem tudja, hogyan dolgoznak, milyenek a munkakörülményeik, ezért fontos megismertetnünk őket ezzel a szakmával. Manapság már az sem igaz, hogy csak pár csillagászra van szüksége a társadalomnak. Egyre több fizikus, mérnök, informatikus és más kutató (például biológus, kémikus) is bekapcsolódik csillagászati vagy űrrel kapcsolatos kutatásokba. Az igen nagyszámú csillagászati adat kezelése, feldolgozása is egyre több embernek ad munkalehetőséget. Kedvező tendencia a nők részarányának növekedése ezen a munkaterületen, amely arra enged következtetni, hogy lánytanulóinkat is sikeresen tudjuk a csillagászat segítségével természettudományos irányba terelni.

A *Nemzeti Pályaorientációs portál* a (FEOR 2162-00 kódú) csillagászt a (FEOR 2161-00 kódú) fizikussal rokon szakmaként írja le [14], [15]. A csillagászok felsőfokú képzettség önálló alkalmazását igénylő munkája, a műszaki, informatikai és természettudományi foglalkozások

csoporthoz tartozik. *„A csillagászok kutatásaik során a matematika és a fizika alapelveinek alkalmazásával a Naprendszer, a bolygókról, a csillagokról és a galaxisokról nyernek új információkat, a légi és a tengeri navigáció számára táblázatokat állítanak össze.”*

Jellemző tevékenységeik: „Elméleti, tudományos, matematikai modellek alkotása és elemzése, a világegyetem működési szabályszerűségeinek vizsgálata. Égitestek és csillagászati jelenségek megfigyelése, követése, elemzése, magyarázata. A Naprendszer, a csillagok, a csillagrendszerek, a csillagközi anyagok, a pulzárak tulajdonságainak, jellegzetességeinek meghatározása. Tudományos közlemények készítése, szakmai fórumokon való részvétel. Gyakorlati alkalmazás számára hasznosítható táblázatok, számítások készítése pl. légi vagy tengeri navigáció számára.” Diákjaink számára is hasznosak e tevékenységek, hasonló elvárások szerepelnek az alaptantervben, érettségi követelményrendszerben bár ezek nyilván nem kutatói szintűek. Egyre több pályázaton, versenyen van szükség tudományos előadás, esszé készítésére és az ilyen típusú versenyeken a döntő egyfajta szakmai fórumként is felfogható. A csillagász foglalkozáshoz szükséges képességek közül sok az iskolában elvárt, fejlesztendő terület. Ilyenek például: a matematikai képesség, térbeli tájékozódás, problémamegoldás, kreativitás, figyelem, koncentráció, pontosság, precizitás, kommunikációs készség, az önállóság, de az együttműködő képesség is.

A csillagász folyamatosan korszerű technológiákat alkalmazó eszközökkel dolgozik, több mérő- és kutatási eszközük vált a mindennapi élet segítőjévé (GPS, CCD kamerák stb.). Fontos területe a csillagász munkájának az ismeretterjesztő tevékenység végzése és az oktatás is. Lényegében a szakcsillagászok által készített ismeretterjesztő anyagok és hírfolyamok alkotják a megbízható bázisát az iskolai csillagászati ismeretszerzésnek, főleg, ha az új eredményekre gondolunk. Egy fizika vagy földrajz szakos tanártól nem várható el, hogy a tudományos kutatások minden területét folyamatosan kövesse, de gyakori felkeresése egy-egy kutatók által készített, felügyelt ismeretterjesztő portálnak már nemcsak elvárható, hanem szükséges is. Diákjaink szinte csak a közösségi médiából szerzik információikat, fontos, hogy tudományosan megbízható webhelyeket ajánljunk nekik, például olyanokat, amelyeket úrszervezetek, kutatóintézetek, egyetemek vagy planetáriumok, csillagvizsgálók, science-centerek, múzeumok készítenek és folyamatosan frissítenek. Mindenki megtalálhatja a számára legmegfelelőbb formát: feliratkozhat hírlevelekre, tagja lehet speciális facebook csoportoknak, Twitter üzeneteket olvashat, flickr képek között válogathat, küldhet tovább ismerőseinek, YouTube-csatornákon követheti a legfrissebb, néhány perces filmeket, sokszor van lehetőség események, előadások, konferenciák élő közvetítésének követésére, esetleg (például más

időzóna okozta rossz időpont miatti) későbbi megtekintésére. Más lehetőségek között még fontos megemlíteni az okostelefonokra készített alkalmazások között a csillagászati témákkal, hírekkel kapcsolatosokat is, és persze a fő forrást jelentő gazdag honlapokat. Több kutatónak ad munkát az említett internetes helyek folyamatos frissítése.

Az Európai Űrügynökség (ESA) sok más szervezettel együtt szintén fontosnak tartja a csillagászzal kapcsolatos foglalkozások (csillagász, asztrobiológus, asztrokémikus, tudománytörténész, de többek között még az űrjogászra, űrpszichológusra vagy éppen az űrúha tervezőre is gondolhatunk) megismertetését minél szélesebb körben. Egy honlapon [16] gyűjtötték össze a szakmák jellemzőit, valamint láthatunk rövid interjúkat is e foglalkozások gyakorlóival, köztük sok nővel, biztatva ilyen irányú pályaválasztásra lánytanulóinkat.

Több helyen olvashatunk magyar csillagászokkal készített interjúkat is, például egy a továbbtanulással is kapcsolatos oldal [17] is közölt ilyet: *„Érdekes és tanulságos karriereket bemutató interjú-sorozatunkban ezúttal - a Csillagászat Nemzetközi Évében - egy fizikus-csillagász szakembert ismerhettek meg, aki komolyzenei ambícióit tette félre, hogy a nap- és űrfizikának szentelhesse életét. Ludmány András, a debreceni Napfizikai Observatórium tudományos osztályvezetője szerint a természeti jelenségek feltárása, kiismerése semmi máshoz nem hasonlítható élményforrás - ám ez a szakma korántsem annyira romantikus, mint sokan hiszik.”* A részletes interjúból megtudhatjuk, hogyan lehet valaki csillagász, hogyan dolgoznak a csillagászok. Az interjúalany szerint a jó csillagászt csillapíthatatlan kíváncsiság és kitartás jellemzi. A csillagász nemcsak különleges, fantáziát megmozgató jelenségekkel dolgozik, hanem szeme előtt zajlik le sok fantasztikus fejlemény, amilyen horderejű fejlődés kevés másik tudományterületen történik meg. Ugyan mára már a csillagász szakma is szinte „ülőmunka”, de a legújabb szuper eszközök, távcsövek észlelési anyagaihoz, adataihoz is hozzáférnek, kutathatják, feldolgozhatják azokat. Sok lehetőség van külföldi tapasztalatszerzésre, munkára, konferenciákon való részvételre.

Család mellett is lehet valaki jó szakember, sőt van példa arra is, amikor egy házaspár mindkét tagja csillagász (például Almár Iván és Illés Erzsébet).

1.4.2 Csillagászati ismeretek gyakorlati haszna

A csillagászat élményeket adó, kíváncsiságot felkeltő és kielégítő voltán kívül természetesen hasznos ismeretekkel is szolgált az emberiség számára. Elég csak az időbeli és térbeli

tájékozódást említeni bármelyik korban. Az egyre pontosabbá váló időszámítás, naptár az évszakok követését, a mezőgazdasági munkavégzés tervezését tette lehetővé. A hajózásnál az éjszakai tájékozódás a csillagok állása alapján történt, majd az egyre pontosabb csillagászati táblázatok segítették a navigálást és a Föld feltérképezését. A csillagászati ismeretek fejlődésével bolygónk felfedezése után kozmikus környezetünk megismerése is lehetővé vált távcsövek, műholdak, űrszondák segítségével. Ez a felfedező munka napjainkban is folytatódik egyre nagyobb pontossággal. Sokszor nem a konkrét csillagászati ismeretek, hanem a felfedezésükhöz használt módszerek, eszközök használhatók eredményesen a mindennapokban [18]. Gondolhatunk például a fényképezés, adatfeldolgozás fejlődésére, az űrkutatásban kifejlesztett anyagok hétköznapi használatára. A memóriahabot eredetileg az űrhajósoknál ütközések alkalmából fellépő gyorsulások csökkentésére fejlesztették ki, de ma már az egészségügyben, sőt otthon a matracainkban is alkalmazzák. Téli ruházatunk is könnyebb lett amellet, hogy a meleget is jobban tartja, mint egy régi bunda. Az űrruha fejlesztése során a biztonság az egyik fő szempont, így a védőruházatoknál (például tűzoltóknál) is felhasználták az újításokat. A steril munkavégzés is fontos az űrszondák készítésénél, az ottani fejlesztések megjelennek például az egészségügyben, a steril műtőkben. Szinte mindenki használja mobilját fényképezésre, amelyet a csillagászati képalkotáshoz kifejlesztett CCD technika tett lehetővé. A drótnélküli net (WLAN) is először csillagászok munkáját segítette.

A NASA évenként ad ki egy *Spinoff* kiadványt [19] és erről egy képes összefoglalót is, amelyben bemutatja az új technológiai fejlesztéseinek a mindennapi életben vagy gazdaságban való alkalmazását. Többek között az egészségügy, közlekedés és áruszállítás, a köz- és egyéni biztonság területén, a fogyasztási cikkekénél, információs és ipari technológiáknál vagy környezetkímélő energiagazdálkodásnál lelhetjük fel a csillagászathoz és űrkutatáshoz kapcsolódó fejlesztéseket, amelyeket egy honlapon is bemutatnak [20].

1.4.3 A csillagászati ismeretek hozzátartoznak a 21. századi műveltséghez

Mi tartozik a 21. századi műveltséghez? Erre a kérdésre nem egyszerű válaszolni, de miután már magáncégek is foglalkoznak az űrbe történő szállítással, sőt lassan az űrturizmus is egyre szélesebb körben válik lehetővé, ezért az űrrel, csillagászattal kapcsolatos ismeretek biztosan hozzátartoznak az alapműveltséghez. Mindig fontos volt környezetünk ismerete, a bennünket körülvevő világ jelenségeinek értése, és ez most már a Földön kívüli térséget is jelenti.

Alapvető csillagászati ismeretek híján könnyebb áltudományos nézetek felé terelni az embereket, napjainkban is sokan olvasnak horoszkópot (nem kevesen hisznek is bennük) és például a laposföld-hívők tábora is létezik. Sajnos ebben a klikkvadász korszakban sokan nem riadnak vissza az álhírek, a félelmet keltő vagy jobb esetben csak nagyon ritka, különleges dolgokról való írástól és ezek között nagyon sok a csillagászáttal, ürrel kapcsolatos. A blogokat, magán honlapokat, az ott szereplő írásokat nem lektorálják, ugyan lehet hozzászólni, de azt már kevesebben olvassák és a megfelelő tudás híján sokan nem tudják eldönteni, kinek van igaza egy esetleges vitában. Ezért is nagyon fontos, hogy az iskolában is reagáljunk a diákok által olvasottakra, igyekeznünk kell megbízható, tudásszintüknek megfelelő honlapokat ajánlani tanulóinknak és elérni, hogy onnan tájékozódjanak. Nyilván az ember kíváncsi voltát kielégítő fantasztikus filmeknek, regényeknek is lehet szerepe a kikapcsolódásban, szórakozásban, de tudatosítani kell, hogy az csak egy emberi (művészi) alkotás, nem a világ leírása, még akkor sem, ha olyan „élethűen” mutatják be a filmekben. Az oktatás szempontjából hasznosak lehetnek az olyan tudományos fantasztikus művek, amelyek törekednek a valósághű ábrázolásra, de például a történet „váratlan” fordulataival mégis izgalmasak, szórakoztatóak. Diákjaink sokat játszanak a számítógépeiken, telefonjaikon, gyorsan elsajátítva a játékszabályokat, kiismerve az ok-okozati összefüggéseket, „törvényszerűségeket”. Ritkán adják fel a küzdelmet, újra és újra megpróbálják a következő szintre való jutást. Remélhetőleg lesz majd az oktatásban is annyi pénz, hogy megérje hasonlóan hatékony módszerrel a valós világot is bemutatni, megtanítani minden diáknak minél magasabb szintig.

Sok alkotó embert ragadott meg a csillagos ég és láthatjuk különböző műalkotásokban az égitesteket. Ezek megcsodálása esztétikai élmény, de a csillagok titkának megértése, a tudósok évezredekken át folyó megfigyeléseire, kutatásaira való rácsodálkozás, a világképünk változásainak követése legalább ilyen élményszerű, bár itt már az agyunkat is meg kell dolgoztatnunk. Nem is annyira a tények, adatok ismerete fontos, hanem a hozzájuk vezető út. A kritikus és egyben logikus gondolkodásmód, amely szükséges a Világegyetem megismeréséhez, hasznos az élet más területein is.

1.5 Milyen csillagászati ismereteket tanítsunk?

A csillagászat nem önálló tantárgy ezért egy több évfolyamon átívelő, alapos és átgondolt felépítésű tananyagra nincs lehetőség. Már az is előrelépés, ha legalább egy-egy tankönyvi

fejezet tárgyalja a csillagászzal kapcsolatos ismereteket és nem anyagrészenként, vagy csak érdekességekként vannak elszórva a fizika vagy földrajz tankönyvekben. Természetesen egy-egy tantárgy esetében is mérlegelni kell, hogy mennyi tudásanyag fér bele az órakeretbe, sok hasznos ismeret kimarad emiatt, de egyfajta alaptudás, rálátás a tantárgyhoz kapcsolódó tudományág felépítésére megvalósítható. Csillagászatból sem taníthatunk „mindent”, amit szeretnénk, de az érdeklődő diákok szívesen vállalják a tanórán kívüli például szakköri foglalkozásokat is, így ezzel már növelhető az időkeret. Előnyös, ha a tanítandó ismereteket keretbe foglaljuk, valamilyen rendszer szerint csoportosítva tanítjuk. Néhány ilyen szempontrendszert említék meg a következőkben.

Mindenképpen fontos a megfigyelhetőségre alapuló megközelítési mód, hiszen valamilyen mértékű égboltismeretre mindenkinek szüksége van. Itt érdemes beszélni a fényszennyezés problémájáról is [21]. A média szívesen foglalkozik a látványos vagy ritka, különleges égi jelenségekkel (napfogyatkozás, holdfogyatkozás, holdfázisok, üstökös, közeli aszteroida, meteorrajok stb.) így ezek tárgyalása is hasznos.

A megfigyeléssel kapcsolatos felépítéssel sok helyen megegyezhet a történeti, idővonal szerinti felépítés. A különböző korok csillagászati ismeretei nemcsak érdekesek, de sokszor meglepheti tanulóinkat, hogy milyen régóta ismerünk bizonyos tényeket, illetve milyen kevés tapasztalatból tudtak logikus következtetésekkel eljutni ezekhez az ismeretekhez. Később egy-egy csillagász, tudós életével színesíthetjük a megtanulandó ismereteket. Felhívhatjuk diákjaink figyelmét a magyar csillagászokra és kutatókra, a ma élők bemutatása kapcsán pedig kedvet kaphatnak tanulóink a kutatói pálya választására.

A tudománytörténeti felépítés egy másik módja lehet, ha a megfigyelési, megismerési módszerek szerint csoportosítunk. Kezdetünk a szabad szemmel láthatóakkal, majd a távcső segítségével megfigyeltek után a különböző mérőeszközökkel (fotométer, spektroszkóp, űrtávcsövek különböző hullámhosszakon stb.) mért adatok alapján megismert tudásanyaggal foglalkozhatunk.

Érdekes felépítés, amelyik a Földtől távolodva mutatja be az Univerzumot. Mindenképpen fontos a Föld Világegyetemben való helyének ismerete továbbá a közvetlen kozmikus környezetünké, a Naprendszeré is. Ez a felépítési mód lehetőséget ad a távolságmérés egyre nehezedő voltának bemutatására is.

Lehetséges egy csillagászati téma alaposabb feldolgozásán belül is előhozni a kapcsolódó csillagászati ismereteket. Például asztrobiológia szakkör keretén belül az égitestek lakhatósági

vizsgálata ad sok csillagászati ismeret tanítására lehetőséget. Diákjaink szeretik a tudományos fantasztikus filmeket, játékokat, ezeket is feldolgozhatjuk aszerint, hogy mi valósul meg az Univerzumban és mi csak a képzelet szüleménye.

Vannak csillagászati olimpiai felkészítő szakkörök is, ahol a csillagászat klasszikus felosztása szerint szerepelnek a témakörök sok feladattal, észleléssel, adatfeldolgozással együtt. A csillagászati diákolimpia követelményrendszere a következő témakörök szerint került felosztásra: asztrofizikai alapok, koordináták és idők, Naprendszer, csillagok, csillagrendszerek, kozmológia, műszerek és űrtechnológia, ezen kívül még a csillagos égbolt ismerete és csillagászati adatok elemzése, feldolgozása szerepel [22].

A csillagászat fakultatív tantárgy felépítése egy történeti bevezető fejezet után a tájékozódás és helymeghatározás keretén belül az időszámítással és földrajzi, valamint csillagászati koordinátarendszerekkel foglalkozik. Majd a Naprendszer részletes ismerete után a csillagok és fejlődésük, a csillaghalmozatok és galaxisok következnek végül alapvető kozmológiai ismeretekkel zár [5].

Akármilyen rendszer szerint is építjük fel a tananyagot a mindenki által megtapasztalt jelenségeket (alap égboltismeret), a média által állandóan szerepeltetett csillagászati témákat mindenképpen érdemes tárgyalnunk. A diákok természetes érdeklődésének, kíváncsiságának kielégítése is mérvadó szempont lehet. Ezen témák alapján természetesen előkerülnek további csillagászati ismeretek és a köztük levő összefüggések, kapcsolatok. Ugyan a pontos matematikai leírásra már általában nincs igénye a legtöbb tanulónak, de látványos szimulációkkal szemléletesen bemutathatjuk a mennyiségek közötti összefüggéseket is.

1.6 Csillagászat tanítása kisgyermekkortól kezdődően

Mikor, milyen életkorban, kiknek tanítsunk csillagászatot? A válasz egyszerű: mindenkinek, minden gyereknek, diáknak érdemes csillagászati ismereteket oktatni. A csillagászat fogalmai könnyen bekerülnek a média világába, így a közgondolkodásba is, ezért közérthetőek. Előfordul azonban, hogy csak használnak, érteni vélnek egy-egy csillagászati fogalmat, kifejezést tanulóink, de nem tudják a helyes definícióját. Például a bolygófogalmat említeném, mert sok diák nem tudja megfogalmazni mit is ért ezen, mit nevezhetünk bolygónak. Értkezésemben megvizsgálom a bolygófogalom fejlődését is (a 4.3.1. fejezetben), amelynek megismerése által

sok hasznos ismeretre tehetnek szert diákjaink. A természettudományos világkép megalapozását már az óvodában is el lehet kezdeni [23]. Készültek már kisgyerekek számára olyan könyvek, amelyek a mesék segítségével terjesztenek csillagászati ismereteket. Közülük azok a megbízhatóak, amelyeket csillagászok lektorálnak [24].

1.7 Csillagászattal kapcsolatos tévképzetek

A fiúkat mindig is jobban érdekelték a természettudományos, műszaki vagy éppen technikai ismeretek. Lánytanulóinkat a csillagászat érdekli nagyobb számban, de sajnos ez az érdeklődés általában nem párosul számottevő tudással. Sok csillagászattal kapcsolatos tévképzet is rögzülhet diákjainkban, ha nem tárjuk fel és nem helyesbítjük a tanítás során ezeket. Születtek cikkek már csillagászati tévképzetekről magyarul is [25], [26].

1.7.1 Csillagászati alaptudást mérő teszt (TOAST) alapján feltárt tévképzetek

A csillagászati ismeretek tanításának eredményességét nehéz mérni, hiszen sokszor a tárgyi tudás nem feltétlenül társul megértéssel, amely az ismeret későbbi alkalmazását teszi lehetővé. Készült egy olyan teszt (Test Of Astronomy STandards, TOAST) amely a legalapvetőbb csillagászati ismereteket méri, különös figyelemmel a gyakori tévképzetek feltárására [27]. A TOAST egy rövid (félórás), feleletválasztós teszt, amellyel a tanulók általános csillagászati tudását lehet mérni. Ezt a tesztet a már középiskolát végzett tanulók számára készítették, az amerikai egyetemek bevezető csillagászati kurzusaira jelentkezők tudásának mérésére. A teszt kérdései között szerepel az égbolt napi és évi változása, az évszakok kialakulásának oka, a Hold fázisai, égitestek nagyságrendi és távolságbeli összehasonlítása, a Naprendszer keletkezése, fejlődése és felépítése, a csillagok és az Univerzum fejlődése, a fúzió és a nehezebb elemek keletkezése, az elektromágneses sugárzás és a gravitáció. A teszt nyelvezete egyszerű, így széles körben felhasználható csillagászati tudás felmérésére, de alapvető célja a közoktatásból kikerülő tudásának mérése. Magyarországon a Patrona Hungariae Katolikus Iskolaközpont (leánygimnáziuma, Berezhvainé Borus Klára fizikatanárnő segítségével) és az Uzsoki utcai Középsiskolai Leánykollégium tanulói közül 86 leánytanuló töltötte ki ezt a tesztet magyar nyelven. A diákok többsége tizenegyedikes volt, a többiek végzősök vagy OKJ-s képzésben résztvevők, így már befejezték fizika és földrajz tanulmányaikat, amelyek során csillagászati

ismereteket is tanultak. Az értekezés 1. számú függelékében a teszt kérdéseinek ismertetése után megadom az egyes válaszok részarányát mind a magyar leánytanulóknál, mind az eredeti felmérésnél [28]. Utalok a feltárt tévképzetekre is, amelyek közül néhányat a következőkben ismertetek.

Diákjainknál a szakirodalmi adathoz képest is erősebben jelentkezett az a tévképzet, hogy a csillagok nem mozognak az égbolton. Kevesen voltak tisztában a csillagos égbolt évi változásával is. Többen azt hitték, hogy a Hold egy nap alatt is jelentősen változtatja „alakját” (fázisát). Ugyan a holdfázisok okaként a többség helyesen jelölte be azt a választ, hogy mi csak a Hold megvilágított felszínét látjuk a Hold Földhöz és a Naphoz viszonyított helyzetétől függően, a szakirodalomban ismert az a gyakori téves elgondolás is, amely a Hold fázisait a Föld Holdra vetett árnyékával magyarázza. Jelentős arányban találunk a Nap delelési magasságával, az évszakok okával kapcsolatosan is rossz válaszokat, amely a Föld tengelyferdesége következményeinek gyenge megértésére utal. A diákok többségének hiányos az égboltismerete, nem ismerik az égitestek mozgását az égbolton.

Fellelhetők alapvető hiányosságok az égitestek nagyságának és Földtől való távolságainak ismeretében is. A csillagok meghatározásával, energiatermelő folyamatával sincsenek sokan tisztában. Fellelhető annak az ismeretnek a hiánya is, hogy a Nap is egy csillag. Ezután azon sem csodálkozhatunk, hogy a csillagok jellemzőivel, keletkezésükkel, fejlődésükkel sincsenek sokan tisztában.

Az Ősrobbanással kapcsolatosan a válaszadók egy jelentős része gondolta, hogy a tér az Univerzum keletkezése előtt is létezett és többen keverték össze a Világegyetem keletkezését a bolygórendszerek kialakulásával. Szakirodalomban is fellelhető tévképzet a tér Világegyetemtől való függetlensége, önálló volta, az Univerzum keletkezése előtti létezése. A válaszolók több, mint fele úgy gondolta, hogy az összes elem (atommag) az Ősrobbanás során keletkezett. A kevés helyesen válaszoló mutatja, hogy nemcsak a csillagfejlődés vagy az Ősrobbanás folyamatát ismerik kevéssé a diákjaink, hanem a bolygórendszereket, így a sajátunkét, a Naprendszerét sem ismerik eléggé.

A súllyal, súlytalansággal kapcsolatos kérdésekre adott válaszokból kiderült, hogy a diákok többségének nem biztos a tudása a gravitációs kölcsönhatással kapcsolatban. Szakirodalomban találhatóéhoz hasonlóan fellelhető volt az a téves elképzelés, hogy az űrben nincs gravitáció, illetve több tanuló a légkör, levegő hiányát azonosította a gravitáció hiányával.

Az elektromágneses hullámokkal, a fény természetével, keletkezésével, elnyelődésével kapcsolatosan is tapasztaltam hiányosságokat.

A tesztet átlagosan 32%-os eredménnyel oldották meg a lányok, amely az irodalmi értékhez, 44%-hoz képest ugyan jóval kevesebb, de a résztvevőket sem lehet egyértelműen összehasonítani, hiszen eredetileg egyetemi csillagászati bevezető kurzusra jelentkezők között végezték a tesztelést és természetesen nemcsak lányok szerepeltek közöttük [29]. Nyilván eltérést okozhat az eltérő oktatási- és követelmény-rendszer is.

Egy másik felmérés szerint már nem tűnik olyan kevésnek a lányaink által elért eredmény, amelynek átlaga 8,7 jó válasz (az összesen 27-ből), és a medián, illetve a módusz is 8. A szintén amerikai egyetemisták között történt felmérés átlaga 7, míg mediánja és módusza is 6 [30].

Célom nem az adatok összehasonlítása volt az egyes kérdéseknél sem, hanem a diákok hiányos csillagászati tudására, felszínes gondolkodásukra és csillagászattal kapcsolatos tévképzeteikre szerettem volna a felhívni a figyelmet. Ezzel is alátámasztva a csillagászat tanításának, tanulásának fontosságát. Sajnos a gyenge eredménynek az alapvető csillagászati ismeretek tanításának kis hatékonysága is lehet az oka.

1.7.2 Tanulóink csillagászathoz való viszonyulása

A teszt után további kérdésekre is válaszolhattak a diákok. Rákérdeztem arra, hogy szeretik-e a csillagászatot, milyen csillagászattal kapcsolatos hírt hallottak legutóbb, honnan szerzik csillagászati ismereteiket. Milyen kérdésekre szeretnének választ kapni fizika órán, illetve milyen csillagászattal kapcsolatos témákat kellene kutatni szerintük?

A válaszadók közül 13-an (15%) nem szeretik a csillagászatot. Általában nem indokolták, de volt olyan, aki azt írta, hogy nem különösebben érdeklődik iránta, mert nem ismeri. Egy másik lány azért nem szereti, mert nem érti, majd hozzátette, hogy de egyébként inspiráló. És volt, aki azért szereti kevésbé, mert a fizikán alapszik ebben a tudományágban sok minden. Akik szeretik a csillagászatot, ezt leginkább érdekességével indokolták, de szerepelt a csillagos égbolt szépsége és az űr titokzatossága is. („Szeretem nézegetni a Hubble képeit is. Az űr nagyon szép, de félek tőle.” „Szeretem, mert érdekes témának tartom, hátborzongató belegondolni, hogy egy hatalmas végtelenség vesz körül bennünket, amikor sokszor a „földi” méreteket sem tudjuk felfogni.”) Megemlézték a Világegyetem keletkezését a földön kívüli (értelmes) élet keresését

is, mint érdeklődésre számot tartó csillagászati témát. Volt, aki utalt a hasznosságára és találtam olyan megfogalmazást is, hogy „...ez a tudomány lesz legnagyobb kihatással a jövőre”.

Kevesen követték a csillagászati híreket, a lányok ötöde tudott említeni aktuálist. Csillagászzal kapcsolatos ismereteiket főleg az internetről, tévéadásokból szerzik, de többen hivatkoztak az iskolai tanórákra is (főleg a földrajz órára, kisebb mértékben pedig a fizika órára). Említették hírforrásként a szülőket, rokonokat és barátokat is. Néhányan újságokból, könyvekből tájékozódnak és volt egy lány, aki a NASA honlapjait olvasgatja.

Bár többen nem tudtak említeni olyan csillagászzal kapcsolatos kérdéseket, amelyekre szeretnének választ kapni, de voltak olyanok is, akik többet is felsoroltak. Kíváncsiak az űrutazásra (főleg a fénysebességgel történőre), űrhajósok életkörülményeire az űrben, más bolygókon kolóniák létrehozásának feltételeire (főleg a Marssal kapcsolatosan), a földönkívüli élet létezésével kapcsolatos kérdésekre. Szeretnének a bolygókról és a Holdról is többet tudni. Népszerű kérdés a fekete lyukak természete, az Univerzum mérete, felépítése, keletkezése.

(„Szeretnék a lehető legtöbb információról tudni a világűrrel kapcsolatban, a tudósok közti vitákról a különböző világnézeteik, elméleteik miatt, részletesebben megismerkednék a modern fizika mai álláspontjairól a világ keletkezésével kapcsolatban.”) („Miért fényesebb néhány csillag a másikonál? Hogyan alakult ki a gravitáció?”)

Érdeklődnek a csillagképek és a horoszkópok hitelessége iránt is. Volt, aki a teszt kérdéseire szeretett volna választ kapni. Természetesen a helyes válaszokat mindenki megismerte, sőt akik mélyebben érdeklődtek, azokkal személyesen is átbeszéltem részletesebben az egyes kérdéseket, de sajnos kevesen szántak erre már külön időt.

A kutatóterületek az előzőekben említettekkel nagyban átfednek. Írták a fekete lyukakat, az Ősrobbanást („vajon mi okozta az Univerzum létrejöttét”) a földönkívüli élettal kapcsolatos kutatásokat, más bolygók lakhatóvá tételét (sőt: „Hogy lehet lehűteni a Napot, hogy élni lehessen rajta?”). A fénysebesség elérését az űrutazásban, az űrszemét problémáját is kutatóterületnek említették.

1.8 Csillagászat tanításával kapcsolatos módszertani gondolatok

A néhány idézett mondatból is látszik, hogy nagy szükség van csillagászati ismeretek tanítására és ehhez a diákok meglévő érdeklődése nagy segítség, ezt kell folyamatosan fenntartanunk. Figyelembe kell vennünk diákjaink aktuális érdeklődési körét, tudásszintjét, tanulási szokásait. Ahogyan más tudományok tanításánál sincsen egyedül helyes módszer, a csillagászati ismeretek oktatásánál is fontos a tanári leleményesség, alkalmazkodás az adott tanulói csoporthoz, amely módszer az egyik osztályban eredményesen működik, nem biztos, hogy egy másikban is hatékony lesz. Legfontosabb szempont a szemléletesség, amelyben az önálló megfigyelésen kívül, gazdag kép és ábraanyag, szimulációk, animációk és kisfilmek segítenek. Leglátványosabb módja egy planetáriumi látogatás, de osztálytermi kivetítés, saját számítógép, tablet vagy akár egy mobil telefon is segíthet. Egy-egy tanulók által készített modell is hasznos az ismeretek elmélyítésében, ha diákjaink tudják, hogy miben hasonlít és miben nem modelljük a valóságra. Fontos történeti vonatkozásokat bemutatni, a többi tudományághoz kapcsolni a csillagászati felfedezéseket, folyamatában láttatni a hozzájuk vezető utat. Anekdoták, érdekes életrajzi adatok mesélése közben is taníthatunk fontos csillagászati ismereteket, a kerettörténet segíti az információk megjegyzését. Legalább ennyire fontos az aktuális hírekre való reagálás, ezek felhasználása további ismeretek átadásához. A csillagászati új ismeretek vagy éppen aktuális jelenségek terén nehéz naprakésznek lenni, de a legtöbb csillagászati, űrkutatási szervezet, csillagvizsgáló vagy éppen csillagászzal foglalkozó egyetem készít olyan segédanyagokat, részletes projektleírásokat, óravázlatokat, amelyek hasznos és megbízható segítséget nyújtanak. Ezek az anyagok egyre színesebbek, interaktív elemeket tartalmaznak és nagy előnyük, hogy valódi adatok felhasználásával készülnek.

A csillagászzal kapcsolatos érdeklődés átgyűrűzhet olyan területekre is, amelyek első hallásra meglepőek, például bolygótorták készítése, de lehet olyan tanulócsoport, amelynél segíthet kapcsolódó ismeretek átadásához. [31] (Fellelhető itt is a tévképzetek terjedése, mint például egy „Naprendszer tortánál”, ahol „kis” csillagok díszítik a bolygók közötti tért, mintha a Napon kívül más csillagok is részei lennének a Naprendszernek. Készíthetünk a Hold fázisainak változását, vagy éppen egy holdfogyatkozás egyes részeit bemutatni segítő kekszeket is [31].)

1.9 A csillagászat elsősorban megfigyelő tudomány

Csillagászati megfigyelésekről és eszközeikről is fontos említést tenni a tanítás során. Mindenekelőtt tudatosítani kell diákjaink számára mit értünk Világegyetemen, csillagászati megfigyeléseken. Ismét Kulin György megfogalmazására utalnék: „A csillagászatban Világegyetemen a megfigyeléssel elérhető világot értjük, amelybe, mint égitest, a Föld is beletartozik. A megfigyelő csillagászat távol tartja magát minden elképzeléstől, kijelentéstől, amely a Világegyetem egészére, annak ismeretlen részére vonatkozik, csak a konkrétan megfigyelhető égitestekkel, jelenségekkel foglalkozik, s azok kölcsönhatásait, keletkezését és fejlődését kutatja. A mai csillagászati ismeretszerzésének alapjai a megfigyelés és a mérés, ugyanúgy, mint a fizikáé, ezért a csillagászat végeredményben nem más mint a Világegyetem fizikája.” [2]. A megfigyelés szerepének (jelentőségének), mint ismeretszerzési formának a visszaállítása igen fontos feladat napjainkban, amikor diákjaink többsége a négy fal között, sokszor a virtuális világban tölti idejének nagy részét. Rohanó világunkban, amikor a házi feladat elkészítésére sincs idejük tanulóinknak igazi kihívás rávenni őket egy folyamatos, hosszabb ideig tartó tevékenységre, megfigyelés sorozatra. Bár a modern csillagászati adatokból nyert igen szép csillagászati képekkel nehéz felvenni a versenyt, a (fényszennyezéstől mentes helyen látott) csillagos égbolt látványa szinte mindenkit rabul ejt. Erre jó példa a ma már csillagászként dolgozó Dobos Vera története, aki egy interjúban így vallott pályaválasztásának okáról: „Eredetileg zeneművészeti középiskolába jártam, gitározni tanultam és mondhatjuk, hogy gitártanárnak készültem. Aztán amikor kiköltöztünk szüleimmel a város szélére, és zavaró fények nélkül gyönyörködhettem a csillagos égboltban, elhatároztam, hogy csillagász leszek. Nekiálltam fizikát, matematikát tanulni, hogy felvegyenek az ELTE csillagász szakára.” [32]. Osztálykirándulások, erdei iskolák, táborok kedvelt éjszakai programja a csillagos égbolttal való ismerkedés. Természetesen városi környezetben is adhatunk csillagászati megfigyelési feladatokat, például a Nappal (megfelelő biztonsági tanácsokkal) és a Holddal kapcsolatosan. A tanórai megfigyelésre ritkán van alkalom, de például a 2015-ös részleges napfogyatkozásnál nyílt erre lehetőség egy esetleges óracserével, vagy éppen szervezett programokon való részvétellel. Iskolánkból az egyik osztállyal az MTA előtti téren figyelhettük meg ezt a látványos jelenséget, biztonságos eszközök használatával, szakértők magyarázatainak segítségével. Érdekes és figyelemreméltó, ahogyan a NASA készült az amerikai teljes napfogyatkozásra 2017-ben. Már jó egy évvel az esemény időpontja előtt segédanyagokkal, tanártoábbképzésekkel biztosították, hogy senki ne maradjon le róla. Ebben

az esetben fontos volt az előzetes felkészülés, felkészítés, hiszen a nyári szünetre esett a napfogyatkozás. Az időjárástól nagymértékben függ a megfigyelhetőség, mert a felhős, csapadékos idő nagy ellensége a csillagászati észleléseknek. Volt, ahol kedvező, felhőtlen égen szépen megfigyelhették a napfogyatkozást, de voltak felhős területek is, ott meg kellett elégedniük az élő közvetítéssel (amelyre a Föld távoli részén élőknek is lehetőségük volt), illetve később a képekkel, videókkal. Érdekességként és összehasonlításként a Marsi napfogyatkozást is bemutathatjuk egy kisfilmen, amely gyors és sosem teljes [33].

A megfigyelhető jelenségeket, égitesteket már előre megtervezhetjük például a Magyar Csillagászati Egyesület évkönyvét vagy honlapját tanulmányozva [34]. Tanulóink megfigyeléseinek dokumentálására segítséget nyújtanak a mobiltelefonjaik, kameráik, de oktatási szempontból egy igényes rajz jelent többet, még ha a pontossága nem is érheti el a modern eszközök nyújtotta szintet. Sajnos az iskolák többsége nem rendelkezik távcsővel, de vannak olyan diákok, akik igen, nekik távcsöves megfigyelési feladatok is adhatóak.

Hangsúlyozva, hogy a planetáriumban, vagy számítógépes programokban látottak nem helyettesítik a saját megtapasztalás élményét, olyan lehetőségekkel rendelkeznek, amelyek a szabadszemes megfigyeléseket korlátozhatják. Nincs felhős égbolt, kiküszöbölik a légkör zavaró hatásait és még az időben is szabadon mozoghatunk akár visszafelé, akár előre, nemcsak az egyes időpontokban megfigyelhető jelenségekhez, hanem az idő felgyorsításával megfigyelhetünk olyan jelenségeket is, amelyek csak évszázadok, évezredek (vagy sokszor még hosszabb időtartamok) alatt változnak lényegesen. Hasonlóan az észlelés helyszínét is szabadon változtathatjuk, amely arra ad lehetőséget, hogy a különböző földrajzi helyeken való láthatóságát hasonlíthassuk össze egy-egy égitestnek vagy eseménynek. Talán kijelenthetjük, hogy a legnépszerűbb planetáriumi program a Stellárium, amely annak ellenére, hogy ingyenesen elérhető szinte mindenféle platformra (a PC-től kezdve a mobiltelefonokig), egy könnyen kezelhető, ám professzionális program. Ezen felül nagy előnye a programnak, hogy teljes körű magyar nyelvű támogatással is rendelkezik, így a diákok az anyanyelvükön ismerkedhetnek meg az égbolttal.

Napjainkban elérhetőek olyan megfigyelési módszerek is, amelyek túlmutatnak az emberi érzékelés határán. Nemcsak látható fényben, hanem más (elektromágneses) hullámhosszokon is lehetővé vált az ismeretszerzés, sőt egy merőben új ablak is nyílt az Univerzumra a gravitációs hullámok detektálásával. A csillagászati mérőeszközök fejlődése, adataik pontos feldolgozása olyan részletekben gazdag (több hullámhosszon szerzett információt megjelenítő) csillagászati képekhez vezetett, amelyek korábban elképzelhetetlenek voltak. Ezen képek,

adatok gyakran szerepelnek a médiában, és az oktatás számára is általában ingyen hozzáférhetőek. Több projekt vonja be az adatok feldolgozásába az érdeklődő embereket (citizen science), mert az eltérés vagy éppen mintázat és alak felismerő képességünk még jobb a számítógépes programokénál. Bemutathatjuk ezek segítségével a csillagászok munkáját is, amely már nem feltétlenül éjszakai észlelést jelent, hanem inkább csillagászati mennyiségű adathalmaz feldolgozását.

Fontos diákjaink tudásszerzési mechanizmusaival is tisztában lenni, bemutatni nekik a természettudományos megismerési módszert, annak kritériumait. Hangsúlyoznunk kell, hogy mindig a megfigyelések, mérések szolgáltatnak alapot a helyes kérdésfelvetéshez, hipotézisállításhoz. A feltételezéseinkből fakadó jóslatokat, előrejelzéseket tesztelni kell újabb, tervezett megfigyelésekkel, kísérletekkel. Ha elgondolásunk kiállja a megfelelő tesztelési próbákat, akkor újabb területeken is ki kell próbálni, meg kell állapítani érvényességi körét, határait. Természetesen, ha feltételezéseink megbuknak az újabb megfigyelések vagy kísérletek, mérések próbáján, akkor azokat módosítani kell, vagy ha ez sem segít, el kell vetni, újat kell alkotni. Egy tudományos modell, hipotézis alkotásánál érdemes amennyire lehet egyszerűségére is figyelni (Occam borotvája). Helyes feltételezések tágabb körben érvényes törvényekhez vezetnek, amelyek alapját szolgáltatják tudományos elméleteknek. Olyankor beszélhetünk elméletekről, ha néhány egyszerű törvénnyel széleskörű magyarázatát adhatjuk a megfigyelt természeti jelenségeknek, nagyszámú bizonyíték (tapasztalat) áll rendelkezésre az elmélet mellett, de egy sem található, amely ellent mondana neki. A csillagászati megfigyeléseket, modellek alkotása, elméletek kidolgozása is követi, ez a tudományos módszer legalábbis a múlt évezred közepétől.

2 Üstökösökkel kapcsolatos ismeretek tanítása

Magának az üstökösöknek a témája általában egy-egy üstökös megjelenése kapcsán kerül előtérbe az oktatásban, ismeretterjesztésben. A Halley-üstökös 1986-os visszatérése nemcsak egy látványos üstökös megjelenéssel (amely látványossága sajnos elmaradt a várakozásokhoz képest) kecsegtetett, hanem akkor több űrszondát is felbocsájtottak azzal a céllal, hogy megfigyelje a leghíresebb üstökösünket, legfőképpen annak magját. Abban az időszakban, legalábbis a nyugati világban, már látszottak a jelei annak, hogy a természettudományos tantárgyakat nem szeretik tanulni a diákok, szükség van a motiválásukra, amelynek egyik hatásos módja volt az üstökösökkel való foglalkozás. Már ebben az időben elkezdődött a tanulást segítő, ismeretterjesztő anyagok készítése szakcsillagászok segítségével. Ezek a szakmailag megbízható anyagok idővel egyre színesebbek lettek, sok animációt, szimulációt tartalmaznak, valós adatokkal dolgoznak, gyakran aktualizálják őket így mindenképpen hasznosak mind tanórai segítségül, mind projektfeladatok elvégzésénél, vagy csak színesítendő a tanítottakat.

Ebben a fejezetben az üstökösök megismerését segítő, illetve a téma iránti érdeklődést felkeltő lehetőségeket tárgyalom. Bemutatom az üstökösökkel kapcsolatos programsorozatunkat és az üstökösökről középiskolás szinten tanítható ismeretanyagot. Ez a fejezet az első tézisem háttéranyagát fejt ki [S1].

2.1 Az égbolt

Az éjszakai égbolton a csillagok kiszámíthatóan róják köreiket. Ezt az égi rendet csak pár égitest zavarja meg (műholdaktól, űrállomástól eltekintve), ilyenek a bolygók, a „vendégcsillagok” (nóvák, szupernóvák) az üstökösök és esetleg még az igen rövid ideig látható hullócsillagokat is ide lehet sorolni. Elég körülményesen, de a bolygók mozgását le tudták írni már az ókorban is (ptolemaioszi világkép), amely egyben elég jó előre jelezhetőséget is jelentett. Rémisztő égi jelenségek voltak a hold- és a napfogyatkozások, de ezek bekövetkezésének időpontjait is meg tudták mondani előre (például szároszciklus). Szupernóvát, nóvát ritkán láttak, csak az eget jól ismerőknek tűnt fel egy új fényes csillag az égbolton. Közeli, mindenki számára észrevehető szupernóva nem volt az elmúlt évezredekben,

így ez nem okozott annyira nagy problémát, ellentétben a jóval gyakoribb, és látványosabb üstökösökkel, amelyek megjelenését senki sem tudta előre megjósolni. Az igazán fényes, napsúroló üstökösök szinte egyik éjszakáról a másikra váltak mindenki számára láthatóvá, és a legtöbb esetben hamar el is tűntek. Ma már tudjuk, hogy üstökösök mindig vannak az égbolton, a halványabbakat is vizsgálhatjuk nagy távcsövek vagy űrtávcsövek segítségével. A szabad szemmel vagy binokulárral láthatóak közeledtét előre jelzik, tudósítanak róla a különböző hírforrásokban, a csillagászati portálokon pedig segítséget adnak az égbolton való megtalálásukhoz, megfigyelhetőségükhöz. Természetesen mindenki a korábbi évszázadokban leírt, látványával a fél égboltot betöltő üstököst szeretne látni (2.1. ábra).



2.1. ábra. Liever Verschuier: Az 1680-as nagy üstökös Rotterdam felett.

2.2 Üstökösprojekt két budapesti gimnáziumban

Diákjaink többsége nem látott még üstököst, sőt lassan ez már szüleikről is elmondható, viszont az üstökösökről készült részletgazdag képek csak fokozzák a kíváncsiságukat, így az üstökösökkel kapcsolatos tanulás, ismeretszerzés sok diák számára vonzó. Az elmúlt évtizedben sokat foglalkoztak az emberek az üstökösökkel, először úgy tűnt, hogy végre az ISON-üstökös igazán látványossá válik, mindenki számára megfigyelhető lesz az északi féltekén, majd a Csurjumov-Geraszimenko-üstökösön landolt egy űrszonda a történelemben először. E két esemény volt meghatározója az üstökösökkel kapcsolatos programjainknak is.

A programsorozat alapötletét 2013 tavaszán a Fizika Tanári Ankéton Nyerges Gyula: Az évszázad üstököse!? című előadása adta. Kolléganőmmel (Gócz Évával) együtt terveztünk tanulóink (a Lónyai Utcai Református Gimnázium és a Kosztolányi Dezső Gimnázium diákjai)

számára (fakultatív) rendezvénysorozatot¹ az őszi félévre. Mindkét iskola nyolcosztályos gimnázium, így a résztvevők között voltak alsóbb és felsőbb évfolyamos tanulók is. Programsorozatunkkal hiteles tudást szeretnénk volna átadni diákjainknak az üstökösökkel és kozmikus környezetünkkel, a Naprendszerrel kapcsolatosan. Emellett úgy gondoltuk, hogy az ISON-üstökös megfigyelésével életre szóló élményben is részünk lesz. Fizika szakos tanárként természetesen az is fontos cél volt, hogy tanulóinknak a fizika iránti érdeklődését is felkeltsük, növeljük az üstökösök témájával foglalkozva.

2.2.1 Diákjaink üstökösökkel kapcsolatos előzetes tudása, tévképzeteik

Az üstökös projekt tervezésekor először a diákok előzetes tudását mértük fel. Az ötödik és hatodik évfolyamos diákok nem tanultak még az üstökösökről, de a hetedikesek vagy annál idősebbek már egy földrajz tanóra keretében foglalkoztak a témával. Kollégáink is érdeklődéssel figyelték a terveinket és felajánlották segítségüket is. Az alsóbb évfolyamos diákok tudását úgy mértük fel, hogy lerajzolták milyenek képzelik el az üstökösöket.



2.2. ábra. Montázs a kisdíákok üstökösös rajzaiból, festményeiből.

Rajz szakos kolléganőm szívesen áldozott erre egy-egy tanórát, majd a programsorozat plakátjának elkészítésében is segített. Az elkészült képek (2.2. ábra) arról tanúskodnak, hogy a

¹ Programjaink a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0030 számú projekt keretében és iskoláink támogatásával valósultak meg.

kisdiákok üstököséről való elképzelései a bulvármédia információin alapulnak, a rajzokon látható színes üstökösök a Föld felé száguldanak, becsapódással fenyegetve bennünket és a csóvájuk is általában a Nap irányába mutat.

Felsőbb évfolyamos diákjaink tudását kérdőíves módszerrel mértük fel. Megkérdeztük többek között, hogy láttak-e már üstökösöt, milyen anyagokból állnak, milyen méretűek az üstökösök. Rákérdeztünk arra, hogy miért van csóvája egy üstökösnek és az milyen sűrű lehet. Kíváncsiak voltunk arra is, hogy tudják-e tanulóink, honnan származnak az üstökösök és mit gondolnak, mennyire veszélyesek. Legalább elemi szintű tudást vártunk, hiszen földrajz órán már tanultak az üstökösökről, de a kapott válaszokból kiderült a diákok többségének teljes tájékozatlansága a témában. A következőkben a tipikus válaszokat említem meg és rámutatok a felmerülő tévképzetekre is. A kérdőívek kitöltését mindig azonnal követte az üstökösökkel kapcsolatos alapvető ismeretek közlése, a kérdésekre adott helyes válaszok alapján. A kérdőívek feldolgozása után, már ismerve a diákok válaszában leggyakrabban szereplő téves, hiányos elgondolásokat, világossá vált, hogy mely ismereteket szükséges hangsúlyozottan tanítani.

A kérdőívet kitöltő tanulók (127) közül 15-en írták, hogy láttak üstökösöt. A kérdőív kitöltése után rögtön rákérdeztem szóban is arra, hogy ki látott már üstökösöt és azokkal, akik azt mondták, hogy láttak, elmagyaráztattam, hogy milyen is volt ez az üstökös. Kivételesen mindenki a gyorsan fel- majd eltűnő, fényes csíkot említette az éjszakai égbolton, amely egyértelműen hullócsillagra, meteorra utal. A válaszadók több mint felének megfogalmazásaiból is kiderül, hogy az üstökösöket keverik a hullócsillagokkal. Legtöbben le is írták, hogy az üstökösök kapcsán a hullócsillagok jutnak eszükbe, de voltak, akik körbeírták a hullócsillag fogalmát: „hulló égitest, ami világít”, „kívánni kell valamit, mielőtt elmegy”, „általában augusztusban” figyelhetjük meg, „egy csillag az űrben, ami éppen zuhan, és nagyon fénylik”, „fényes gyorsan elmúló jelenség az égen, kívánság”. Tehát az üstökösöket sokan összekeverték a hullócsillagokkal a meteorhullással, amely tévképzet ismert a szakirodalomban is [35]. Voltak olyan tanulók, akik bolygómaradványnak, kődarabnak vagy éppen csillagnak gondolták az üstökösöket. A követ, szikladarabot emlegetők általában ennek a fényességét, többen a tüzet is említették („egy tüzes golyó, ami tűzcsóvát húz maga után”). Az üstökösök gyakoriságára adott válaszok a fentiekben leírtak alapján sokszor inkább a hullócsillagok megfigyelhetőségére vonatkoztak, és a naponta láthatóságtól a nagyon ritkáig mindenféle „találgatás” szerepelt. Az üstökösök anyagára vonatkozó kérdésnél sokan említették a kőzeteket, törmelékeket, más bolygók anyagának töredékét, és voltak, akik úgy gondolták, hogy űrszemétből állnak az üstökösök. Az üstökösök méretére a kicsitől a nagyig mindenféle

válasz előfordult. Sokan hasonlították egy szekrényhez, autóhoz, buszhoz, hegyhez, kontinenshez, a Holdhoz, bolygóhoz, de volt, aki csillagnyi méretről beszélt. Többen (11) nem válaszoltak, vagy azt írták, hogy nem tudják milyen méretűek az üstökösök. Sokan (27) nem válaszoltak az üstökös csóvájának sűrűségére vonatkozó kérdésre sem, a válaszolók nagy része viszont (nagyon) sűrűnek gondolta. Néhányan magyarázatot is fűztek a válaszukhoz: „nagyon sűrű lehet, mert ha nem lenne sűrű, akkor biztosan nem látnánk szabad szemmel.”, „Elég sűrűnek kell lennie, hogy innen a földről is megpillanthassuk.”, „sűrű lehet látni ahogy húzza maga után”, „Hát mivel ha innen a Földről is lehet látni gondolom nagyon sűrű.”, „Eléggé sűrű, tűzszerű”. Egyértelműen fellelhető az a tévképzet, hogy (csak) a sűrű dolgok láthatóak, főleg messziről. Külön érdekes az utolsónak idézett válasz, ahol a tűzszerűt is sűrűnek tartja a tanuló. A csóva kialakulásának okára is inkább találgatások érkeztek válaszként, mint helyes elképzelések és itt sem tudtak sokan (33) válaszolni. Néhány magyarázat: „talán a folyamatos lemorzsolódás miatt”, „az iszonyatos sebessége miatt”, „mert a nagy sebessége miatt egy lángcsóva követi”, „nagy sebességgel megy, ennek következtében kigyullad, és minél gyorsabban megy, annál nagyobb ez a csóva”, „Ahogy a Föld légkörébe beérkezik, felforrósodik és ahogy izzik mi azt egy szép csóvának látjuk.”, „mert épp ég”. Sokak magyarázata inkább a hullócsillag jelenségre vonatkozhat, bár nem mindenki utalt a Föld légkörére. A nagy sebességet említették többen a csóva okának és néhányan a törmelék leválását is. Az idézett mondatokból ugyan nem egyértelműen tűnik ki, de a válaszok megbeszélése közben kiderült, hogy az űrben is el tudják képzelni az égést, nem gondoltak az ottani hidegre és a szinte vákuumhoz hasonló körülményekre (vagy az oxigén hiányára). A csóva irányára vonatkozóan, az alsóbb évfolyamosok rajzai szerinti és a szakirodalomban is leírt tévképzet lelhető fel, miszerint a csóva mindig a haladási iránnyal ellentétes és akár a Nap felé is mutathat [35]. Az üstökösök származási helyéről sem rendelkeztek biztos tudással diákjaink, amely azt mutatja, hogy a Naprendszer felépítésével kapcsolatosan is hiányosak az ismereteik. Sokan írták, hogy az üstökösök az űrből, a (távoli) világűrből jönnek, de voltak többen is, akik származási helyként a Galaxis másik részére, egy másik galaxisra, az Univerzum egy távoli pontjára gondoltak. Nagyon érdekes válasz a következő: „a világűr bármely pontjáról, az űsrobbanáskor keletkezettek is lehetnek még”. Természetesen itt is megjelent a hullócsillagokkal való összekeverése az üstökösöknek, mert volt, aki az égből, a légtérből származónak gondolta őket.

A konkrét ismeretre irányuló kérdéseknél sokan nem tudtak válaszolni, de a többi kérdésre adott, részletes válaszaik alapján úgy gondolom, ez inkább tudáshiányra utal, mint arra, hogy

nem akartak válaszolni. Ezt támasztja az is alá, hogy a kérdőív végén az üstökösök veszélyességére való rákérdezésnél újra szinte mindenki írt valamit. A katasztrófafilmekkel összhangban az üstökösök veszélyességét a Földre való esetleges becsapódással magyarázták. Sokan különbséget tettek kis és nagy üstökös között és a kisebb méretűeket már nem tartották annyira veszélyesnek. Előfordultak utalások arra is, hogy az atmoszférában elégnék, amely, főleg méret említése nélkül szintén az üstökösöknek a hullócsillagokkal való összekeverésére utal. Érdekes elképzelést mutat a következő válasz: „ha kitér a pályájáról, akkor veszélyesek lehetnek, főleg, ha pl. a Föld légterébe kerül.”, egy másik: „de módosítható a pályájuk, így elkerülhető a földdel való ütközés”. A sok fantasztikus filmből szerzett benyomásaik alapján úgy gondolhatják, hogy könnyű az űrbéli pályamódosítás, de ezt a valóságban a nagy tömegű és hajtóművel nem rendelkező üstökösöknél már sokkal nehezebb megvalósítani.

Arra a kérdésre, hogy miért fontos tanulmányozni az üstökösöket a legtöbbben az előzőekkel összhangban azt írták, hogy ismernünk kell, melyik üstökös veszélyes a Földdel való esetleges ütközés szempontjából: „Mert, ha véletlenül egy Armageddon-szerű üstökös jönne akkor jóval előre tudnánk róla. És lehet meg is tudnánk előzni a becsapódást.”. Volt, aki az érdekességüket említette, illetve „hogyan megértsük, felfedezzük az űrben lévő világot”, „mert nagyon látványos és számunkra valamennyire ismeretlen, és az embert általában hajtja előre a kíváncsiság”. Megjelent néhány diáknál a földönkívüli élet keresésével kapcsolatos gondolat is: „Új kőzeteket, esetleg maradványokat találhatunk rajtuk, mely bizonyítja, hogy nem csak a Földön lehet élet.”, „találhatunk rajtuk földönkívüli mikroorganizmusokat”, vagy csak „mert a Földön nem fellelhető anyagokat tartalmazhat”.

2.2.2 Üstökösökkel kapcsolatos programjaink

Diákjaink nem láttak még üstökösöket, valójában nem is nagyon volt lehetőségük erre, hiszen igazán látványos, hosszabb ideig könnyen megfigyelhető üstökös 1997-ben fénylett az égboltunkon, a Hale-Bopp-üstökös. A hazai csillagászok, amatőr csillagászok az utóbbi időben már vadásztak az üstökösökre, mert volt, amikor egy fényes üstökösnél a kedvezőtlen időjárás akadályozta a megfigyelést. Voltak, akik a déli féltékere utaztak üstököst nézni, hiszen ott 2007-ben a McNaught-üstökös, majd a Lovejoy-üstökös 2011-ben nyújtott feledhetetlen látványt. 2013-ban több szabad szemmel is megfigyelhető üstököst jeleztek előre és közülük is fokozott figyelem irányult az ISON-üstökösre. A hírforrások is jó előre felkeltették az érdeklődést

hangzatos címekkel a várható látványosságra: „Telihold nagyságú üstököst láthatunk majd az égen 2013-ban”², „Tűzkigyó az égen”³, „A Föld felé száguld a szuperüstökös”⁴, „Napi 50 millió kiló port okád az ISON üstökös”⁵. Ezeket és hasonlókat olvashattak diákjaink mielőtt ősszel elkezdődött volna az iskola. Természetesen a tudományos ismeretterjesztő oldalak (mint például: <https://www.csillagaszat.hu/>) is foglalkoztak a témával, hitelesen tájékoztatva és üstökösökkel kapcsolatos ismeretanyaggal ellátva az érdeklődő olvasókat. A NASA honlapján is az évszázad üstököseként beszéltek az ISON-üstökösről, amelyről úgy gondolták, hogy akár a nappali égen is látható lesz.

Az üstökösökkel mindig érdekes, érdekes foglalkozni, de 2013-ban, az üstökösök évében különösen aktuális volt ez a téma. Az előzetes tudásfelmérésből pedig kiderült, hogy fontos is az üstökösökkel, illetve a Naprendszerrel kapcsolatban diákjaink tudását bővítenünk, megalapoznunk. A programsorozat tervezésénél igyekeztünk minél változatosabb lehetőségeket felkutatni, terveztünk a két iskola tanulói számára együttes planetáriumi látogatást és egy klubdelutánt, majd legvégül közösen szeretnénk volna megfigyelni az ISON-üstökösöt is. Iskoláinkban kiscsoportos beszélgetések során folyamatosan nyomon követtük az üstökösökkel kapcsolatos híreket, a helyettesítési óráim egy része is üstökösökkel kapcsolatos beszélgetéssel telt. Igyekeztünk minden hónapra egy nagyobb, közös programot szervezni, és ezt ki is plakátoltuk mindkét iskolában (2.3. ábra). A konkrét időpontokat az érdeklődő diákokkal egyeztetve határoztuk meg. Szeptember az előzetes tudásfelméréssel, tervezéssel, a programok meghirdetésével telt. A budapesti Planetáriumban már hónapok óta szerepelt az *Évszázad üstököse* című műsor, amelynek közös megtekintését októberre terveztük, de a Kutatók éjszakája programsorozat keretében lehetőség volt az ingyenes részvételre, így egy csoport diákkal részt vettünk ezen az előadáson is. A látványos üstökösökről szóló műsort egy, az aktuális hírekről szóló kiselőadás követte és a végén még kérdéseket is fel lehetett tenni. Akadtak olyan tanulók is, akik mindkét alkalommal részt vettek a planetáriumi programon. A műsor még inkább felkeltette sok tanuló érdeklődését az üstökösök iránt, szívesen néztek utána a kapcsolódó ismereteknek, készítettek kiselőadásokat társaiknak a témában, amelyeket szívesen jutalmaztunk egy-egy jó jeggyel.

² https://femina.hu/terasz/nagy_ustokos_2013_ban/

³ <https://szabadsfold.hu/csalad-otthon/tuzkigyo-az-egen-243374/>

⁴ <https://www.origo.hu/tudomany/20130704-ison-a-fold-fele-szaguld-a-szuperustokos.html>

⁵ https://index.hu/tudomany/2013/08/14/ontja_magabol_a_port_az_ison/



2.3. ábra. A programsorozatunk plakátja, amelyet diákjaink rajzainak, festményeinek felhasználásával készítettünk.

A következő közös programot november végére terveztük az ISON-üstökös napközelsége és reményelt felfényesedése elé. Egy egész délutáni programsorozattal készültünk a diákoknak. Készítettünk ismert üstökösök képeiből puzzle kirakókat és játékos kvízzel szeretnénk volna felmérni, hogy mit tudnak, mit tanultak eddig tanulóink az üstökösökről. A kvíz szövege és az egyes válaszok aránya a 2. számú függelékben található meg. Az üstökös kvíz eredménye megmutatta, hogy érdemes volt diákjaink számára ezt a projektet megszervezni, megvalósítani. A kezdetekkor még igen hiányos tudással rendelkező diákjaink már megbízható, alapvető tudást mutattak az üstökösökkel kapcsolatosan. Meghívott előadóink mégis le tudták kötni a figyelmüket érdekes előadásukkal. Lukács Béla (MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont) *Üstökösök, avagy a látható semmik* címmel időrendben mutatta be az üstökös kutatás legfontosabb állomásait, miközben az üstökösökhöz kapcsolódó fontos ismeretekről is összefoglalást hallottunk. Ismert médiaszereplőhöz mérten előadónk nemcsak szerteágazó tudásával, hanem érdekes, érthető stílusával, meglepő gondolatmeneteivel is lenyűgözte diákjainkat. Másik előadónk Vizi Pál Gábor (MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont) másképpen közelített a témához, mérnökként az üstökös megfigyelő űrszondák eredményeiről beszélt *Az égi anyagok* című előadásában. Szó esett hobbjáról a meteoritkeresésről is, mondandóját kalandos történetekkel fűszerezte. A projektnap fő látványossága egy üstökös mag modelljének

elkészítése volt, amelyről bővebben fogok írni később az értekezésemben. Igyekeztünk a jó hangulatot egy kis pogácsával és üdítővel is segíteni és mindenki kapott egy akkoriban éppen árusított, üstökösre emlékeztető kis csokoládét (2.4. ábra).



2.4. ábra. Üstökössel dekorált csokoládé.

A kvíz kérdéseire legjobban válaszolók csillagászati könyvet kaptak jutalmul. Diákjaink nagyon élvezték a programjainkat, de természetesen mindenki egy szép látványos üstököst szeretett volna már látni. Terveink szerint az üstökös-projektünknek az „évszázad üstököseként” várt ISON-üstökös közös megfigyelése lett volna a fénypontja 2013 decemberében. Olyan látványban reménykedtünk, ami egész életükre elkísérhette volna tanítványainkat. A projekt rendezvényein az ISON-üstökös folyamatosan téma volt, akkor is, ha az üstökösök sajátságai általánosságban foglalkoztunk, vagy akár az üstökös-kutatásokról beszélgettünk. Felkért előadóink is kiemelt figyelmet szenteltek az ISON-üstökösnek. Minél többet tudtunk meg róla, annál érdekesebbnek ígérkezett a pillanat, amikor élő valóságában megláthatjuk a decemberi égbolton. Természetesen egész programsorozatunk alatt tisztában voltunk azzal is, hogy mennyire veszélyes egy üstökösnek a Napot megközelíteni, akár meg is semmisülhet, mégis bíztunk abban, hogy ehelyett egy erőteljes felfénylésben, szép égi látványban lesz részünk. Sajnos az ISON-üstökös nem élte túl a Nap közelségét, így a projektünk záró programja, az üstökös szabadszemes és távcsöves megfigyelése elmaradt. Karácsonykor sem tudták családjuknak, barátaiknak, ismerőseiknek megmutatni az üstököst diákjaink, büszkélkedve addigra megszerzett üstökösökkel kapcsolatos tudásukkal.

2.2.3 Egy üstökös mag megismerésének nyomonkövetése, tanórai projekt

Természetesen csalódottság volt bennünk, nem is gondoltuk, hogy az üstökösökkel kapcsolatban lesznek még hasonlóan izgalmas, várakozással teli hónapjaink a közeljövőben. Már a kvíz egy kérdésénél felmerült, hogy melyik üstökösre száll le 2014-ben a Rosetta-űrszonda leszálló egysége, de ezt még akkor nem sokan tudták helyesen megválaszolni, nem

volt a figyelem középpontjában. Tudtam, hogy nem szerencsés úgy lezárni egy projektet, hogy a záró és egyben legnagyobb élményt jelentő program elmaradt, ezért figyelmünk most más szempontból irányult az üstökösökre, magát az üstökös magot szeretnénk volna jobban megismerni diákjainkkal a Rosetta-űrszonda nyomán követésével. A 2014 januárjában sikeresen felbresztett űrszonda, a tanév végéig egyre jobban megközelítette a Csurjumov-Geraszimenko-üstökösöt, egyre részletgazdagabb képeket láthattunk az üstökös magjáról. Ősszel a nyolcadik osztályos fizika csoportomnak már úgy terveztem a Naprendszer témakör feldolgozását, hogy ott is az üstökösökre koncentráltunk, hiszen megint az egyik fő hír volt a médiában a sikeres űrmisszió, illetve a leszállóegységnek (Philae) az üstökösön való landolása először az emberiség történelmében. Kidolgoztam az üstökösöknek egy öt tanórás feldolgozását, amelyet elsősorban kilencedikes diákok számára ajánlok akár fizika vagy földrajz órára, de alkalmas egy projekt keretében való megvalósításra is. Természetesen kis módosításokkal akár nyolcadik osztályosoknak, vagy magasabb évfolyamúaknak is alapul, segítségül szolgálhat, ha az üstökösöket szeretnék részletesebben tárgyalni, feldolgozni. Az öt óra sem túl sok az üstökösök nagyon érdekes és szerteágazó témájának megismeréséhez, de arra elég, hogy egy alapos, átfogó képet tudjunk közvetíteni diákjaink számára. A téma egy javasolt tanórára bontása a 3. számú függelékben található meg.

2.2.4 Milyen eredményt várhatunk az üstökösök megismerése által?

Miért is olyan fontos az üstökösök vizsgálata, miért terveztek üstökös anyagmintát visszahozó, illetve az üstökösöt helyben vizsgáló űrmissziókat? Az üstökösök anyagukban őrzik annak a gázködnek a jellemzőit, amelyből bolygórendszerünk keletkezett. Ennek az őszanyagának a vizsgálata nemcsak a Naprendszer keletkezésének folyamatát segít megérteni, hanem elvezethet az élet kialakulásának kérdéséhez is, hiszen szerves vegyületeket, aminosavakat is kimutattak már az üstökösökben. Jeges anyaguk szerepet játszhatott légkörünk, óceánunk kialakulásában, vagy a későbbi becsapódások során a földi éghajlat jelentős megváltoztatásában.

Az üstökösök Nap közelében kialakuló kómájának és csóvájának vizsgálata a bolygóközi tér, a napszél és a Naprendszer mágneses terének tanulmányozásában segített. Az üstökös különböző részeinek (mag, kóma, csóva) felépítését, az ott lévő anyag viselkedését, is fontos tanulmányozni, hiszen a Földön nem könnyű űrbéli körülményeket létrehozni, főleg nagy méreteken és tartósan.

A tudományos szempontok mellett további fontos érv az üstökösök minél jobb megismerése mellett, hogy még mindig élnek hiedelmek számos más csillagászati jelenséghez hasonlóan az üstökösökkel kapcsolatosan is az emberekben, amely egyik oka a megfelelő ismeretek hiánya.

2.3 Mit érdemes tudni az üstökösökről?

2.3.1 Üstökösökkel kapcsolatos ismeretek az oktatásban

A legújabb (2020-as) Nemzeti Alaptanterv egyszer említi csak az üstökös szót. A fizika tantárgynál 9-10. évfolyamon, a *Mozgások a környezetünkben* témánál tartják fontosnak, hogy tanulóink ismerjék a bolygók, üstökösök mozgásának jellegzetességeit. Ugyan mind a földrajz mind a fizika tantárgynál szerepel a Naprendszer témája, de ott nem említik külön az üstökösöket [36].

A Nemzeti Köznevelési Portálon megtalálható tankönyveknél már több helyen is szerepel üstökösökkel kapcsolatos ismeretanyag, amelyeket a következőkben ismertetek [37].

A 6. osztályos természetismeret-könyv I. *A Föld* fejezetében a magyar kiválóságok közül Kulin Györgyöt említik egyebek közt, mint aki az üstökösök megfigyelésével is foglalkozott.

A 8. osztályos fizikakönyv IV. fejezete a *Naprendszer*, amelynek 3. tananyaga a *Bolygók*, és itt szerepelnek üstökösökkel kapcsolatos ismeretek: a Halley-üstökös periódusa és az üstökösök, mint a Naprendszer alkotóelemei.

A 9. osztályos fizika könyvnél a IV. fejezet, *Mozgások a Naprendszerben* egyik tananyaga (15.) *Kepler törvényei*, amelynél megemlítik, hogy a Kepler-törvények a bolygókon kívül az üstökösökre is érvényesek majd a Halley-üstökössel kapcsolatban is szerepel egy feladat (az üstökös pályáját bemutató ábra értelmezése, elemzése).

A 9. osztályos földrajz tankönyv első fejezete a *Kozmikus környezetünk és életterünk ábrázolása*, amely negyedik leckéje: *A Naprendszer*. Ezen belül szóba kerül az Oort-felhő, mint a Naprendszer külső része, ahol sok milliárd üstökösmag kering, majd *Az égbolt vendégei* résznél az üstökösök, hullócsillagok, meteorok, meteoroidok, meteoritok kerülnek definiálásra, az üstökösök pályáját és részeinek (kóma, csóva) kialakulását is tárgyalják.

A 11. osztályos fizika tankönyvben két nagy fejezet több leckéjében is található üstökösökkel kapcsolatos ismeret. A VII: fejezet *A Naprendszer fizikai viszonyai*, amelyen belül a 38. lecke *Utazás a Naprendszerben-Föld típusú bolygók*. Ebben olvasmányt találunk a meteorokról, metorrajokról, majd az üstökösökkel kapcsolatos tudásunk fejlődésének rövid összefoglalása következik, és szerkezetüket is tárgyalja a tankönyv. Találunk egy korábbi érettségi feladatot az üstökös sebességével kapcsolatosan, és utána kell nézniük a Stardust-expedíciónak, valamint a Rosetta-misszióknak is.

A következő, 39. lecke a *Gázóriások*, amelyben a Jupiterbe csapódó Shoemaker-Levy- üstökös kapcsán a Naprendszerben történő ütközések, becsapódások kerülnek tárgyalásra.

A 11. osztályos fizika tankönyv utolsó (VIII.) fejezete *Az űrkutatás hatása mindennapjainkra*. A 41. leckéje *Az űrkutatás néhány állomása*, amelyben az *Üstökösök vizsgálata* résznél a Halley-üstököst vizsgáló űrszondákat, a Stardust-missziót és a Rosetta üstökösszondát említi a tankönyv, külön felhívva a figyelmet arra, hogy milyen nehéz egy üstökösra szállni. A 42. lecke *Az űrkutatás az emberiség szolgálatában*, amelyben újra előkerül a Rosetta üstökösszonda leszállóegysége, illetve annak lábához felhasznált többrétegű szénszálal anyag, amely jóval kisebb sűrűségű, de merevebb, mint az acél és a Földön nagy pontosságú lézeres vágógépekben is használják. A Stardusthoz tervezett aerogélt is megemlítik ebben a részben.

A 10. osztályos természetismeret tankönyvben *Az anyag szerkezete* fejezetben a *Részecske és hullám* leckében a fénynyomás bizonyítékeként említik az üstökösök Nappal ellentétes irányú csóváját.

A 9/A kémia tankönyv első fejezete (Milyen részecskékből állnak az anyagok?) összefoglalásánál található egy természettudományos gondolkodást segítő problémafelvetés a különböző izotópokból álló vízmolekulákkal kapcsolatosan. Ennek második részében a Naprendszer égitestjeinek nehézvíz-víz arányával kapcsolatosan a Rosetta-űrszonda mérési eredményét is közlik. Eszerint a 67P/Csurjumov-Geraszimenko-üstökösön mért arány háromszorosa a földinek. Ebből pedig az következik, hogy ilyen típusú üstökös nem hozhatott vizet a Földre. (A földi víz eredetének a kutatása jelenleg is folyik. Vannak olyan üstökösök is (például a 103P/Hartley), amelyek deutérium-hidrogén aránya megközelíti a földi arányt, így az üstökösökkel való ütközés is hozzájárulhatott a Föld vízkészletéhez.)

A 10. osztályos biológia tankönyv is említést tesz az óshüllők kihalása legvalószínűbb okaként egy üstökös vagy kisbolygó becsapódásról.

A 7. osztályos matematika tankönyv a normálalak tanításánál egy kis tudománytörténet keretében utal a Rosetta-űrszondára, majd valós adatokkal való számolás keretében gyakoroltatja a normálalak használatát.

A 11. osztályos irodalom tankönyv Vajda Jánossal foglalkozó leckéjében (20.) *Az üstökös* című versét is elemzik.

A fentiek alapján látszik, hogy sok helyen említik az üstökösöket a tankönyvek, de inkább más anyagrészek kiegészítéseképpen vagy érdekességképpen szerepelnek üstökösökkel kapcsolatos ismeretek, mint a témára koncentrálni, együtt kezelve, tárgyalva az összetartozó ismereteket.

2.3.2 Üstökösökkel kapcsolatos ismeretanyag

Az üstökösökkel kapcsolatosan mindenképpen fontos beszélni arról, milyen az égbolton való látványuk, hogyan figyelhetjük meg őket, és talán a legfontosabb, hogy mik is ezek az üstökösök. Tudva, hogy a Naprendszer kis égitestjei közé tartoznak, fontos ismerni a pályájukat, a pályájukon való mozgásuk során történő változásaikat (kóma és csóvaképződést) részletesebben is érdemes tanítani. Fontos tudnunk, hogy honnan származnak, honnan jönnek, milyen anyagokból állnak. Milyen végük lehet, ezzel kapcsolatosan a Földre való esetleges veszélyességüket célszerű megbeszélni és megemlíthetjük kapcsolatukat egyes meteorrajokkal. Érdemes a híres üstökösökről, üstökös vadászokról mesélni, kihangsúlyozva az amatőr csillagászok szerepét az üstökösök felfedezésében, megfigyelésében. A legfontosabb üstököst megfigyelő űrszondákat és eredményeiket is meg kell ismertetni tanulóinkkal. Nem maradhatnak el a magyar vonatkozások sem az üstökösök megfigyelésével, felfedezésükkel, illetve az üstökös vizsgálat űrszondák egyes műszereiben való mérnöki munkával kapcsolatosan. Szükséges lenne egy-egy valódi üstökös megfigyelése is akár távcső segítségével. Kísérletezésre, modellkészítésre is van lehetőség ebben a témában, igazi látványosság az üstökös mag modell készítése, amelyet összeköthetünk más szárazjeges kísérletek elvégzésével is.

A fent említett üstökösökkel kapcsolatos ismereteket csak röviden, vázlatosan, egy-egy érdekességet kiemelve ismertetem, hiszen gazdag szakirodalom, ismeretterjesztő anyag áll rendelkezésre a világhálón, és könyveket is tudunk ajánlani diákjainknak, hiszen a híres üstökösök megjelenése előtt születtek az üstökösök témáját részletesen feldolgozó, bemutató művek.

A Halley-üstökös 1910-es visszatéréséhez kapcsolódóan íródott *Dr. Wodetzky József: Üstökösök* című könyve, amely régies helyesírása ellenére is érdekes olvasmány [38]. A Halley-üstökös következő, 1986-os visszatérése előtt jelent meg *Hédervári Péter: Üstökös kutatás az űrkorszakban* című könyve, amely részletesen tárgyalja az üstökösökkel kapcsolatos addig felgyülemlett ismeretanyagot és a Halley üstökös vizsgálatához tervezett űrszondákról is ír [39]. Az Uránia Csillagvizsgáló is készített egy kiadványt ezen alkalomból 1985-ben, amelyben a Halley-üstököséről és az azt megfigyelni tervezett űrszondákról írnak [40]. 1986-ban jelent meg *Szécsényi-Nagy Gábor: A Naprendszer parányai* című könyve, amely szintén részletesen foglalkozik az üstökösökkel [41].

2.3.3 Üstökös vadászat régen és ma

Az üstököszt régiesen kométának, népiesen hajás, csóvás, söprűs, szakállas, farkas, lidérc, bujdosó vagy éppen lángos csillagnak is nevezték. Előfordul az is, hogy csóvás égi vándorként, baljós égi jelként utalnak rá [42].

Mostanában, legalábbis az északi féltekén nem volt részünk látványos üstökösben, de előfordult, hogy valaki élete során többet is megfigyelhetett. Tycho de Brahe (1546-1601 dán csillagász) először az 1577-es üstököszt vizsgálhatta 70 napon át, majd lehetősége volt még az 1585-ben és 1590-ben megjelenteket is megfigyelni akkor még távcső segítségével nélkül. Johannes Kepler (1571-1630 német csillagász) az 1607-ben és 1618-ban feltűnt üstökösöket tanulmányozhatta. Ezeket láthatta Galileo Galilei (1564-1642 itáliai tudós) is. Az 1618. évi üstökös az első, amelyet távcsővel is megfigyeltek (Johannes Baptista Cysatus 1586-1657, svájci jezsuita csillagász), és ezután már halványabb, szabad szemmel kevésbé észrevehető üstökösöket is felfedeznek távcső segítségével.

Az 1800-as évek sem szűkölködtek a látványos üstökösökben, az 1858. évi Donati-üstököszt a legszebbként emlegetik, az 1843. és 1882. évi üstökösök pedig igen fényesek, a nappali égen is láthatóak voltak. Nemcsak rajzokon, festményeken, de versekben is megemlékeztek a látványos üstökösökről, Vajda János: Az üstökös című verse tananyag is tizenegyedik évfolyamon. Keletkezésének körülményeit a költő feleségének beszámolója alapján ismerjük, az 1882. évi nagy szeptemberi (C/1882 R1, Cruls) üstököszt csodálhatták meg, amelyet a valaha látott legfényesebbként emlegetnek [43]. A múlt században Juhász Ferenc: Üstökös-látók című költeménye írja le hogyan szaladt össze egy falu népe, mert „az égen valami nagy csoda” volt.

A költő 1928-ban született és verse már 1951-ben megjelent (Új versek című kötetében), így az 1930-as, 1940-es években láthatta azt az üstökösöt, amelyről költeményében ír. Ezekben az évtizedekben láttak, fedeztek fel üstökösöket, de igazán látványos üstökösről nincs leírásunk. A verset viszont a költő előadásában is meghallgathatjuk⁶.

Az üstökösök a Nap közelében lesznek igazán látványosak, így keresésük is a hajnali vagy az alkonyat utáni, esti égbolton történik. Érdeemes fényszennyezésmentes helyet választani az észleléshez, de zavaró lehet akár a Hold fénye is. Jó eséllyel évtizedenként láthatunk fényes üstökösöt, 2-3 évente szabad szemmel is észrevehető, binokulárral még gyakrabban, távcsővel pedig szinte mindig találhatunk üstökösöket az égbolton. Megfigyelésükhöz részletes, szakszerű segítséget kaphatunk az *Amatőrcsillagászok kézikönyve*, üstökösökről szóló fejezetéből [44]. Itt olvashatunk érdekes leírást az „üstökös vadászokról” is, akik rendszeresen vizsgálták át az égboltot egy-egy új üstökös felfedezésének reményében. Ez a tevékenység nagy kitartást igényel, de jutalmul a felfedező nevét is megkapja az üstökös a hivatalos elnevezésén kívül, amelyről szintén részletes leírást találunk ebben a fejezetben. Manapság is érdemes még üstökösöt keresni saját távcsővel, példaképpen egy ma is élő, több üstökösöt is felfedező amatőr csillagászt is bemutat a könyv, Donald Machholzot, aki legutóbb 2018-ban fedezett fel egy üstökösöt (negyven év alatt 12 felfedezés köthető hozzá⁷).

Célszerű diákjainknak is megmutatni egy üstökösöt az égbolton, akár csak távcsővel láthatót is, de fontos először megbeszélni, hogy milyen látványt várhatnak, mert lehet, hogy „csak” egy ködös foltot fognak látni. A saját észlelés mellett az igazán látványos, művészi képekkel, fotókkal is felkelthetjük, fenntarthatjuk a téma iránti érdeklődést.

Ugyan vannak visszatérő, periodikus üstökösök, de még ezek égbolton való látványa és helyzete is változó. Minden üstökös megfigyelés egyedi és ez még izgalmasabbá teszi az üstökös vadászatot. Egy híres kanadai amatőr csillagász, David H. Levy az üstökösöket a macskákhoz hasonlította, mert mindkettőnek van farka és mindig pontosan azt teszik, amit akarnak [45]. Az üstökösök megjelenésének, viselkedésének kiszámíthatatlanságát saját tapasztalataiból vonta le, hiszen 19 évnyi hiábavaló üstökös keresés után fedezte fel az első üstökösét 1984-ben, de mára már 21 üstökös kötődik a nevéhez.

Megfigyelhető egy éjszaka folyamán is az üstökösök helyzetének változása az égbolton a többi égitestéhez hasonlóan, és a hosszabb ideig láthatóaknál a napról-napra való elmozdulás is:

⁶ youtu.be/watch?v=ftAN_Y-qLg

⁷ <http://donmachholz.com/>



2.5. ábra. NEOWISE-üstökös (C/2020 F3) a svájci Alpok felett, 2020.07.12. éjszaka félóránként fényképezve⁸.



2.6. ábra. A Holmes-üstökös (17P/Holmes) három hónapon keresztül az égbolton 2008-ban⁹.

A 2.5. és 2.6. ábrákon látható, hogy mennyire különböző lehet egy üstökös megjelenése az égbolton. Célszerű erre felhívni tanulóink figyelmét, mert sokan úgy gondolják, hogy az üstökösök nem változtatják alakjukat az égbolton, sőt olyan tévképzet is ismert miszerint az üstökösöknek mindig van csóvájuk. Ezen téves elképzelések a hosszabb idejű üstökösmegfigyelések hiányából adódnak, illetve abból, hogy az üstökösökről a nagyközönség számára készült képeken szinte mindig szépen látszanak a csóvák is.

Az előzőekben részletesen tárgyalt égi látvány ismertetését (saját szemű megfigyelését, ha lehetséges) egyrészt azért tartom fontosnak, mert ilyen tapasztalataik, élményeik nincsenek tanulóinknak. Másrészt fontos azt is tudatosítani diákjainkban, hogy sok üstökösökkel kapcsolatos ismeretanyagot az égbolton való megfigyelésük alapján következtettek ki a csillagászok egészen az 19. század második feléig, amikortól már spektroszkóp, fotométer is segítette munkájukat, sőt fényképet is készíthettek az üstökösökről. A kóma takarásában levő üstökösanyag alaposabb megismeréséhez az utóbbi fél évszázad űrszondái kellettek, amelyek

⁸ <https://apod.nasa.gov/apod/ap200715.html>

⁹ <https://apod.nasa.gov/apod/ap080205.html>

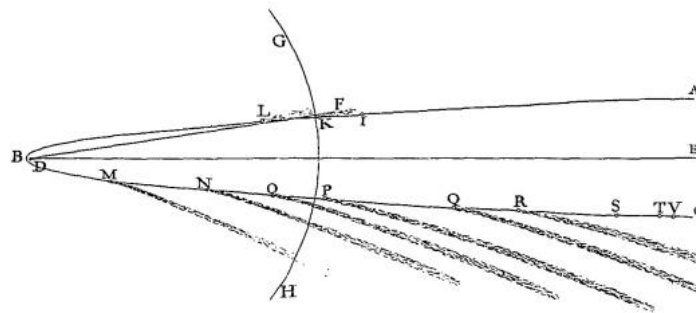
megközelítettek egyes üstökösöket, sőt egy le is szállt a Csurjumov-Geraszimenko-üstökös magjára.

2.3.4 Üstökösökkel kapcsolatos ismeretek fejlődése

Hosszú ideig azt sem tudták az emberek, hogy az üstökösök is az égitestek közé tartoznak. Arisztotelész, akinek nézetei a 15. századig meghatározóak voltak, úgy gondolta, hogy az üstökösök a föld kigőzölgései, mocsarakból, vagy barlangokból felszálló gázok, amelyek meggyulladnak a légkör felsőbb rétegeiben. Az égi világot a kiszámíthatóság, állandóság jellemezte, amelynek nem feleltek meg a hirtelen, megjósolhatatlanul megjelenő és változó alakú üstökösök. Nem is voltak hosszabb ideig láthatóak, nem tértek vissza olyan szabályszerűséggel, mint például a bolygók. Akadt ugyan olyan római filozófus, Seneca, aki égitesteknek tartotta az üstökösöket, de ez inkább egy elképzelés, elmélet volt, megfigyelésekkel ezt nem támasztotta alá, bár ez abban a korban nem is volt elvárás. Tycho de Brahe bizonyította be először, hogy az üstökösök égitestek, ugyanis az 1577-es üstökös parallaxisát jóval kisebbnek találta a Holdénál, amely azt jelentette, hogy messzebb van a Földtől, mint a Hold, tehát az égi világhoz tartozik, vagyis égitest. (Közeli égitestek, mint például a Hold, bolygók vagy éppen egy közelben haladó üstökös, a Föld két, egymástól távoli helyéről nézve más irányban látszanak az állócsillagok égi háttéréhez képest. Minél messzebb van egy égitest a Földtől, annál kisebb mértékű ez az irányváltozás, a parallaxiszög.) Mások is próbálkoztak már korábban az üstökösök távolságának meghatározásával, de nem tudtak olyan pontos (ívperces pontosságú) méréseket végezni, mint Tycho de Brahe, akinek lehetősége volt ellenőrizni is állítását még két üstökösnél (az 1585-ben és az 1590-ben megjelenőeknél). Ezek a mérései is megerősítették azt, hogy az üstökösök égitestek, de ezt csillagász kortársai nehezen fogadták el, még Galileo Galilei is légköri fényjelenségeknek tartotta továbbra is az üstökösöket.

Az égitesteknek nemcsak az égbolton való mozgásának ismerete volt fontos, hanem a valóságos pályájukon való is. Kepler hosszas számolások után megalkotta a bolygók keringését helyesen leíró törvényeit. Az első törvénye szerint a bolygók ellipszis pályán keringenek a Nap körül, de az üstökösök pályáját egyenes vonalúnak gondolta. Tévedését főleg azzal magyarázhatjuk, hogy amíg a bolygókat folyamatosan meg lehet figyelni az égbolton, addig az üstökösöket általában csak rövid ideig, így nem gyűlik össze elég adat a pontos pálya meghatározásához. Felmerült az a kérdés is, hogy miért ellipszisek a bolygópályák, de ennek helyes

megválaszolására Isaac Newtonig (1643-1727) kellett várni. Newton felismerte a gravitációs erőtvényt, és hogy annak következményeként az égitestek pályája csak kúpszelet lehet. Kimutatta, hogy egy égitest pályájának meghatározásához elegendő három (különböző napon történő) megfigyelés majd az 1680-as üstökösre alkalmazta is pályaszámítási módszerét. Ez az igen látványos, napsúroló üstökös több hónapig is megfigyelhető volt, így elegendő megfigyelési adatot biztosított pályájának meghatározásához. Megjegyzendő, hogy a tömegvonzás törvényének alkalmazhatósága az üstökösökre egyben azt is jelentette, hogy tömeggel rendelkező égitestek, amely nem volt addig nyilvánvaló. Egyben a tömegvonzás törvényének egyetemességét is bizonyította, hiszen a bolygók és a Jupiter-holdak után az üstökösökre is alkalmazható volt, így gondolhatták, hogy az egész Naprendszerben is érvényes minden égitestre.



2.7. ábra. Newton rajza az 1680-as üstökös pályájáról. (Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, 1687)

Newton ugyan a pályát ellipszis helyett parabolának gondolta (2.7. ábra), de ez a Nap közelében igen jó közelítés és a majd tízezer éves periodusidő, az 1-hez közeli ($e=0,999986$) excentricitás is magyarázza. Newton kortársa és barátja Edmund Halley (1656-1742) régebbi üstökösök megfigyelési adataiból meghatározta azok pályáját és felfigyelt néhány üstökös (1531. évi, 1607. évi és az általa is észlelt 1682. évi) pályadatainak hasonlóságára. Ebből helyesen arra következtetett, hogy vannak visszatérő, ellipszis pályán mozgó üstökösök is. Meg is jósolta az 1682-es üstökös következő megjelenésének időpontját, az általa kiszámolt közel 76 éves periódusidő alapján. Az üstökös az előre jelzett időben tért vissza, de ezt már Halley nem élte meg. Előfordul az is, hogy egy üstökösöt nem felfedezőjéről, hanem pályájának meghatározójáról nevezik el, így történt ez elsőként ebben az esetben is, ezt az üstökösöt azóta is Halley-üstökösként (1P/Halley) emlegetjük. Több évszázadon keresztül az egyik meghatározó tudományos probléma volt az üstökösök megismerése, a leghíresebb matematikusok foglalkoztak a pályaszámítás pontosításával, figyelembe véve a nagybolygók

hatását is. A kiszámolt pályákon az egyre nagyobb távcsövek segítségével már nagyon halvány üstökösöket is sikerült megtalálni, és távolodásukat is egyre tovább nyomon követni. A szaporodó üstökös felfedezések szükségessé tették az üstökösök kategorizálását, hiszen fontos volt tudni, hogy egy új üstököst, vagy egy már korábban felfedezett, visszatérését látjuk. Az egyik leghíresebb üstökös vadászt, Charles Messiert (1730-1817) is foglalkoztatta ez a probléma. Gyakori égbolt megfigyelései alatt észrevette, hogy vannak olyan ködszerű foltok is az égen, amelyek az üstökösöktől eltérően nem változtatják égi helyzetüket, hanem mindig ugyanazon a helyen látszanak, a csillagokhoz hasonlóan. Ezek a ködök olyannak látszottak, mint az üstökösök a kezdeti megfigyelésekben, így üstökös kereséseinek megkönnyítése céljából Messier elkezdte katalogizálni az általa megfigyelt ködszerű égi objektumokat. Messier 21 üstökös fedezett fel, bár akkoriban a független megfigyelések híre nem terjedt olyan gyorsan, mint ma így néhány üstökös felfedezésében mások megelőzték. A 18. század végén még az üstökösök felfedezése, vizsgálata, egyre jobb megismerése volt az egyik meghatározó kutatási terület, a közben katalogizált ködszerű égi objektumok nem tűntek fontos, érdeklődésre számottartó témának, de napjainkban Messier nevére inkább a katalógusa jut eszünkbe, mint az általa felfedezett, vagy alaposan megvizsgált nagyszámú üstökös. Katalógusában galaxisok, csillaghalmazok (nyílthalmazok és göbhalmazok) valamint ködök (diffúz ködök, planetáris ködök, és egy szupernóva-maradvány) szerepelnek [46]. Ezek nemcsak szépségük, különlegességük miatt érdekesek, hanem a hivatásos csillagászok által vizsgált égi objektumok között is egyre fontosabbak lettek (Sok, de nem mindegyik Messier-objektum Hubble-űrtávcsővel készített képét találjuk egy honlapon¹⁰.)

A távcsöves megfigyelések egyre pontosabb részleteket tártak fel az üstökösökkel kapcsolatosan. Már korábban ismert tény volt, hogy a csóva mindig a Nappal ellentétes irányban látszódik, volt olyan üstökös, amelynek több csóvája látszott, legyezőszerűt is megfigyeltek (az 1744. évi üstökösénél). A csóva Nap felőli részén fényes „magot” láttak, amelynek nemcsak változott a fényessége, de az is előfordult, hogy fényes kiáramlást is megfigyeltek belőle (szintén az 1744. évi üstökösénél, Heinsius). 1773-ban a Jupiter-holdjai között elhaladó üstököst figyeltek meg, amely a holdak mozgását nem befolyásolta, így ebből arra következtettek, hogy az üstökösök kis tömegű égitestek. 1811-ben Heinrich Wilhelm Olbers (1758-1840) a csóván át is látta a csillagokat, ez pedig a csóva igen ritka anyagára utal. 1846-ban a Biela-üstökös magját látták darabokra szétesni. Megfigyeltek a Nap közelében szétporladó (napsúroló) üstökösöket is, de láttak olyanokat is, amelyek „túléltek”, a Nap

¹⁰ <https://www.nasa.gov/content/goddard/hubble-s-messier-catalog>

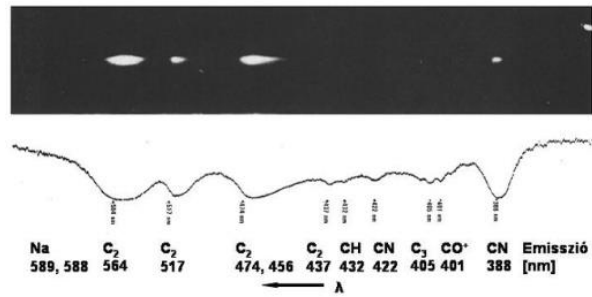
közelségét és attól távolodva váltak igazán látványossá, az égbolt nagy részén átívelő csóvával. Egyre elfogadottabbá vált, hogy az üstökösök egy viszonylag kis kiterjedésű magból, az azt körülvevő kómából és a mindig a Nappal ellentétes oldalon megfigyelhető csóvából állnak (2.8.ábra).



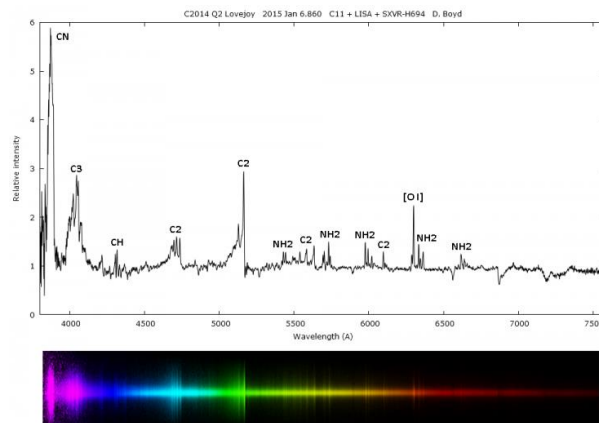
2.8. ábra. Az üstökös részei.

2.3.5 Az üstökösök anyagi összetételének megismerése

Az üstökösök felépítését, pályáját már elég jól ismerték, de arról, hogy miből épülnek fel sokáig csak feltételezéseik lehettek a csillagászoknak. Az üstökösök anyagi összetételéről a 19. század közepétől vannak spektroszkópiai mérési adataink, először 1864-ben Giovanni Battista Donati (1826-1873) vizsgálta meg a (C/1864 N1) Tempel-üstökös színeképét. Nem sokkal ezután, 1871-ben már Konkoly Thege Miklós (1842-1916) is végzett üstökös színeképelemzést ógyallai obszervatóriumában [47]. Gothard Jenő (1857-1909) pedig 1892-ben le is fényképezte egy üstökös spektrumát. Az észlelt színeképvonalakból szénhidrogén vegyületekre és kétatomos szénmolekulára következtettek a kómában. A Halley-üstökös színeképében cianra utaló jeleket is találtak 1910-ben, sőt olyan közel haladt el az üstökös Földünkhöz képest, hogy még a csóvája is érintette bolygónkat. Az igen ritka anyagú csóva cian tartalmát nem tudták a földi légkörben kimutatni. A 2.9. és 2.10. ábrákon látható üstökös spektrumok nemcsak az üstökösök anyagi összetételét mutatják, hanem a spektroszkópia évszázados fejlődését is.



2.9. ábra. A Halley-üstökös rés-spektrográffal 1910. május 7-én a Lowell Obszervatóriumban felvett színeke (V. M. Slipher 1911-ben megjelent közleménye alapján).



2.10. ábra. A (C/2014 Q2) Lovejoy-üstökös (mesterségesen színezett) spektruma, felette az üstökös fényének intenzitása látható a hullámhossz függvényében. (David Boyd, Newbury Astronomical Society)

A csóva és a kóma anyagi összetételéről egyre többet tudtak meg, de az üstökös magjára vonatkozóan a tudósoknak hosszú ideig csak feltevések, sejtések voltak, hiszen a kóma takarásában nehéz volt megfigyelni. Néhány esetben láttak fényes anyagkiáramlást az üstökösök Nap felőli oldalán, és ezekkel magyarázták az üstökösök periodusában jelentkező kisebb változásokat. Egy ilyen fékező, visszalökő erőhatáshoz egy darabból álló, szilárd magot kellett feltételezni. Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) ilyennek gondolta az üstökösök magját (1813-ban), az üstökösök kómáját párának, gőznek tartotta, amely naptávolban visszafagy az üstökös magra, jégtömbbé változtatva azt. Elképzelései azonban nem váltak széleskörűen ismertté.

Voltak megfigyelések egyes üstökösök darabokra hullására (például az 1618. évinél), vagy csak kettéválására. 1845-ben a Biela-üstökös két részre szakadt, eleinte távolodó, majd napközben újra közeledő két üstökösre. Következő visszatérésekor 1852-ben nagyon halványan látták ezt a két üstökösöt, majd ezt követően már nem is találták meg őket. A visszatérő üstökösök

fényének gyengülését korábban is megfigyelték, bár ez nagyon függ az üstökös és a Föld helyzetétől is egy-egy megfigyelésnél. Ezek alapján az üstökös magot a csillagászok többsége több darabból összeállt testnek, egyesek jeges por szemcsékből álló kondenzátumnak gondolták (homokzátony-modell). A laza szerkezetű mag modelljével szemben súlyos ellenérv volt, hogy egy ilyen mag nem élhetné túl a Nap közelségét, pedig ezt több megfigyelés is bizonyította.

A múlt század közepén alkotta meg Fred Lawrence Whipple (1906-2004) az üstökösök magjának ún. „piszkos hógolyó” modelljét, amelyet lényegében ma is elfogadunk főleg középiskolás szinten. A mag egyetlen anyagdarabbá összefagyott, szilárd, vízjeget tartalmazó test. A Nap sugárzása a mag felszíni rétegét felmelegíti, az illékony anyagok szublimációja során a magból folyamatosan gáz és por áramlik ki, amely az üstökös mag mozgását is befolyásolhatja (főleg forgását és kis mértékben keringését is). A Halley-üstökös közelében elhaladó űrszondák 1986-ban megerősítették ezt a modellt, viszont meglepő volt az üstökös fekete színe (0,04 körüli albedó). A Deep Impact űrszonda Tempel-1-üstökössel 2006-ban történt találkozásakor az űrszonda egy becsapódó egységet lőtt az üstökös magjába, és az így kirobbantott anyag összetételét vizsgálta. A magot porózus szerkezetűnek (átlagsűrűsége $0,6 \text{ g/cm}^3$) találta, és a korábban feltételezetténél jóval nagyobb volt a por részaránya. Az új modellt „jeges porcsomó” elnevezéssel emlegetik, egyszerre utalva az anyagösszetételnek a korábbi elképzeléshez képest megváltozott arányaira és a szilárd mag porózus szerkezetére is. Az üstökös maggal kapcsolatos vizsgálatok a Rosetta-űrszonda megfigyeléseivel folytatódtak az elmúlt évtizedben. Ez a misszió volt az első, amelyik nem csak elhaladt egy üstökös mellett, hanem pályára állt körülötte, és az üstökössel együtt keringett a Nap körül, hosszan vizsgálva az üstökös aktivitásának változását. Elsőként bocsájtott leszállóegységet az üstökös magjára, majd küldetése végén maga is a magba „csapódott”. Az űrszonda által továbbított adatok alapján a „jeges porcsomó” modell megalapozottnak látszik. Az üstökös aktivitásánál tapasztaltak helyi, rövid ideig tartó jeteket, erős anyagkiáramlásokat, főleg mélyedésekből, repedésekből. Megfigyelték az üstökös magon a napfelkelte után a napfény által besugárzott felszíni területek aktivitását, amely sokszor szintén sugaras, szálás szerkezetűnek tűnt a változatos felszínformák következtében. A hosszan tartó megfigyelés egy meredek sziklafal leomlását és az akkor keletkező porfelhő megfigyelését is lehetővé tette. A leomlott terület alatti rész jóval világosabb volt, fényvisszaverőképessége a 40%-ot is elérte (az átlagos néhány százalékkal szemben). Magát a meglátogatott, Csurjumov-Geraszimenko-üstököst szabálytalanul (kacsiformájúnak) találták, nagy valószínűséggel két nagyobb darab test összetapadásával keletkezhetett [48].

2.3.6 A Naprendszer külső vidékei

Az üstökösökkel kapcsolatosan felmerülő kérdés volt az is, hogy honnan jönnek és hová mennek az időnként a Föld közelébe kerülő üstökösök. Ezen kérdések megválaszolása a Naprendszer külső vidékeinek feltérképezését kívánta. Az üstökösök pályáit elég pontosan ismerték már háromszáz évvel ezelőtt is, de a Naprendszer külső részeinek felfedezése, megismerése a múlt században kezdődött a Plútó felfedezésével. Az elmúlt évtizedekben, főleg űrszondák és űrtávcsövek segítségével ismertük meg a Naprendszer külső részét, az ott lévő jeges égitesteket. Az üstökösök származási helye is a Neptunuszon kívüli tartomány, a rövid (200 évnél kisebb) periodusú üstökösök pályái a Naptól 40-100 CsE távolságban lévő Kuiper-övig terjednek, a hosszú periodusúak pedig az Oort-felhőben, 1000-100000 CsE távolságban keringenek, mielőtt egy közeli csillag gravitációs hatására vagy esetleges ütközések folytán a Naprendszer belső vidékébe lökődnének. A rövid periodusú üstökösök az ekliptika síkjában, vagy attól nem nagyon eltérő síkban keringenek, a hosszú periodusúakra viszont ez nem jellemző, gyakran találkozunk az ekliptikához képest nagy pályahajlású üstökösökkel is. Kapcsolódó kutatásokat a múlt század közepén Gerard Kuiper (1905-1973), Kenneth Edgeworth (1880-1972) és Jan Oort (1900-1992) végzett.

Nem zárhatjuk ki a csillagközi térből származó üstökösök létét sem. Az elmúlt években két ilyen Naprendszeren kívülről érkező objektumot is észleltek a 1I/2017 U1 ('Oumauma) aszteroidát és a 2I/Borisov-üstököst (C/2019 Q4).

Végül meg kell említeni, hogy tőlünk távoli csillagrendszerekben is vannak üstökösök, ezeket az ún. exobolygókhöz hasonlóan exoüstökösöknek nevezhetjük [49].

2.3.7 Földközeli égitestek veszélyessége

Fontos azt is tudnunk, hogy jelentenek-e veszélyt Földünkre a Naprendszer üstökösei. A médiában gyakran találkozunk olyan hírekkel, amelyekben égitestek bolygónkba csapódásával fenyegetnek. Sikeres filmtéma ezen katasztrófák bemutatása, vagy éppen elkerülése valamilyen hősies tettel. Az emberek többsége szélsőségesen áll a témához, vagy túlságosan aggódik vagy tudomást sem vesz róla. Talán a Földet megközelítő égitestek hallatán sokan azt gondolják, hogy amilyen gyorsan jönnek, úgy el is hagyják térségünket és nem veszélyeztetik életünket, ahogyan általában ezt tapasztaljuk. Vannak olyan emberek is, akikben indokolatlan félelem

alakul ki a kozmikus katasztrófákkal kapcsolatosan és természetesen nem nyugtathatjuk meg őket azzal, hogy nem fognak égitestek a Földbe csapódni. Becsapódási krátereket bolygónkon is felfedezhetünk, a légkör nélküli égitestek, mint például a Hold felszínét pedig ezek jellemzik. Úgy gondolom, hogy a megfelelő tudás a kulcsa, hogy se félelmet ne keltsünk e témában, de azért számításba is vegyük egy ilyen esemény bekövetkezésének lehetőségét. A becsapódások időbeli gyakoriságáról kell hiteles információt adnunk az ütköző testek méretének, tömegének függvényében. (Ehhez jelenthet segítséget egy honlap¹¹, amelyen egy táblázat és egy grafikon mutatja az esetleges becsapódások gyakoriságát, az általuk okozott kár nagyságát a becsapódó test méretének függvényében, egy-egy konkrét példát is említve.)

Fontos megemlíteni, hogy több távcsővel keresik a Föld közelébe érkező, vagy közelünkben keringő égitesteket, különösen a nagyobbakat. Napjaink technikájával már a néhány száz méteres objektumok után fürkészik át az eget, a nagyobbak pályáját ismerik, változásait figyelik. Az egész földi életet veszélyeztető becsapódástól egyelőre nem kell tartanunk, viszont egy kisebb testtel való ütközés is okozhat jelentősebb helyi károkat. Nincs tíz éve annak, hogy a Cseljabinszkban élők megtapasztalták ezt. Szokás szerint a média beszámolt arról, hogy 2013. február 15-én a 2012 DA 14, körülbelül 45 méteres aszteroida 30000 km-nyire halad el a földfelszín felett. Az Origo tudományos rovata rendkívüli kisbolygó elsuhanásáról beszélt a Föld mellett, az időkép hírportál rekordközelségről számolt be és megtudhattuk, hogy 14 percen múlt az ütközés. Az index hírportál „14 percen múlik a karambol a Földdel” címmel írt az eseményről, de volt olyan is, amelyik kozmikus céltáblaként említette a Földet. A csillagászati hírportálon is olvashattunk az akkor már egy éve felfedezett kisbolygóról, amelynél még közelebb nem figyeltek meg égitestet a Földhöz képest. A Hold pályáján beljebb jövőkre vetül nagyobb figyelem, de ez az égitest még a geoszinkron műholdaknál is közelebb került bolygónkhoz így, ha szabad szemmel nem is, de távcsővel meg lehetett figyelni. Érdeemes elolvasni a csillagászati hírportál néhány nappal később megjelenő cikkét a kisbolygó megfigyeléséről, lefényképezéséről. Sárnecky Krisztián, aki maga is több kisbolygót fedezett fel (több mint 400 aszteroida felfedezésében vett részt) írta meg élménybeszámolójukat „Kisbolygóvadászat az Adria partján címmel” [50]. Mint írja érdemes volt ilyen messze utazni a megfelelő észlelési körülményekért, hiszen ilyen közel aszteroida 40 évente száguld el bolygónk mellett és 1200 évente csapódik a Földbe egy hasonló méretű. Iyen nagyságú aszteroida (vagy üstökös) robbanhatott fel 1908-ban Szibériában. Ez, a közeli folyóról Tunguz-eseménynek nevezett légköri robbanás, azóta is foglalkoztatja mind a közvéleményt, mind a

¹¹ <http://neo.ssa.esa.int/public-outreach>

tudósokat, sok elképzelés született magyarázatképpen [51], legutóbb a 2020-ban megjelent szerint egy légkörről lepattanó 50-200 méteres vas aszteroida okozhatta a robbanást, hiszen becsapódási krátert, meteoritanyag maradványokat nem találtak. Az elgondolás szerint ez az égitest azóta is Nap körüli pályán kering így egy későbbi visszatérése sem elképzelhetetlen [52].

A Tunguz-esemény évfordulója, június 30. a kisbolygókról szóló ismeretterjesztés nemzetközi világnapja, az aszteroidanap. Az egyik kezdeményező Brian May, a Queen együttes szólógitárosa és egyben az asztrofizika doktora. 2014-ben tartották meg az első aszteroida napot, amely a cseljabinszki „szuperbolida” utáni év volt. Korábban említettem a 2013-as igen közel elszárguló aszteroidát, amelyről biztosan tudták, hogy nem fog a Földre ütközni. Hazánkban is sok csillagvizsgálóban készültek előadással és tiszta égbolt esetén távcsöves megfigyeléssel erre az eseményre, majd ezt szinte rögtön elfeledtetve az összes hírcsatorna a cseljabinszki szuperbolidáról írt, videókkal, képekkel szemléltetve, amelyek közül még a NASA is választott a nap képének egyet (2.11. ábra).



2.11. ábra. A cseljabinszki meteor fénycsóvája. (Marat Ahmetvaleev¹²)

A légkörben darabjaira hulló aszteroida 17 méteres, akár 10000 tonnás is lehetett, a Tunguz-esemény óta a legerőteljesebb robbanást okozta. Nemcsak kis mérete miatt nem vették észre a csillagászok, hanem közel volt a Naphoz, és a napközeli égterületeken nehéz észrevenni halvány objektumokat. Míg a 45 méteres 2012 DA 14 elnevezésű korábban említett aszteroidát egy évvel hamarabb felfedezték, a 2020 SW, 5-10 méteres aszteroidát csak 6 nappal észlelték a földközelsége előtt (21000 km-re közelítette meg a felszínt), de még ez az idő is elég a pontos számításokhoz, és ha véletlenül nem óceánba vagy egyéb lakatlan helyre hullana, bizonyos óvintézkedéseket is elrendelhetnek.

¹² <https://apod.nasa.gov/apod/ap130223.html>

Az Európai Űrügynökség 1801-től összegyűjtötte a jelentősebb földközeli égitestekkel kapcsolatos eseményeket, felfedezéseket, űrmissziókat¹³. Átnézve a hosszú listát láthatjuk, hogy nagyon sok kutatás és megfigyelés történt biztonságunkért. A lista nem végződik a jelenlegi dátummal, hanem egészen 2880-ig felsorolja az ismert aszteroidák földközeli elhaladását. Érdekesség ebből a listából, hogy Cseljabinszkban 1941-ben is volt egy fényes, robbanással kísért tűzgömb, bolida. A magyar csillagászati hírportál egyik rovata is a kozmikus hatásokkal és kockázatokkal foglalkozik [53], innen érdemes magyar nyelven tájékozódni.

A becsapódások nagy része aszteroidáktól származik, de üstökösök is ütközhetnek más égitestbe. 1994-ben a Shoemaker-Levy 9 üstököst fogta be a Jupiter, majd a bolygó ár-apály ereje darabokra szaggatta, és végül ezek a darabok egymás után a bolygóba csapódtak, amelynek nyomai még a becsapódás után is hosszan látszódtak. (Egy rövidfilmen látható az üstökös Jupiter bolygóba való becsapódása¹⁴.)

A Föld és egy üstökös hasonló találkozásának a valószínűsége nagyon kicsi. A csillagászok szervezeten és folyamatosan figyelik a Föld környezetébe kerülő égi objektumok, aszteroidák, és az üstökösök mozgását is, és többféle elképzelésük is van is egy esetleges ütközés elkerülésére. (<https://cneos.jpl.nasa.gov/> a földközeli objektumok tanulmányozásának központi honlapja, amelyen 11 fokozatú Torinó-skála és a logaritmikus Palermó-skála alapján osztályozzák a kis égitesteket veszélyességük alapján.)

2.3.8 Üstökösökkel kapcsolatos hiedelmek, áltudományos nézetek terjedése

Még napjainkban is sok ember hisz a babonákban, horoszkópokban, és egyéb áltudományos elméletekben. Több csillagászattal kapcsolatos félelem is megmaradt, amelyek ritkán bekövetkező vagy különleges, látványos eseményekhez kötődnek elsősorban. Gondolhatunk a fogyatkozásokra, bolygóegyüttállásokra, novára, meteorzáporra, nagyobb tűzgömbre, üstökösre vagy akár egy látványos sarki fényre esetleg egyéb légköroptikai jelenségre. Ezek közül is az üstökösöket tartják még mindig a legijesztőbbnek, lángoló, kísértetiesnek látszó megjelenésük miatt. Szokatlan, ritka környezeti jelenségek, események főleg akkor okozhatnak indokolatlan félelmet, ha nem ismerjük a magyarázatukat, nem tudjuk befolyásolni, kontrolálni

¹³ <http://neo.ssa.esa.int/neo-chronology>

¹⁴ https://www.missionjuno.swri.edu/jupiter/collisions?show=hs_jupiter_collisions_story_what-if-shoemaker-levy-9-hit-our-planet

őket. Régi időkből maradt elgondolás, hogy külső erők, események hatással vannak életünkre. Sok hitrendszer felsőbbrendű lényei (istenei) az „égen laknak”, így nem megszokott égi jelenségre is könnyen adnak az emberek természetfölötti „magyarázatot”. Kötődhetnek ünnepek időpontjai is égi eseményekhez, például a húsvét időpontja a tavaszi nap-éj egyenlőség utáni első holdtöltét követő vasárnap. A különböző népcsoportok egyik jellemzője, hogy mennyire hisznek a tudományokban, a gondolkodásmód meghatározója, hogy hol keressük a magyarázatot egy-egy ismeretlen eseményre, jelenségre, a tudományos eredmények között, vagy a mitológiában, babonában, áltudományokban. Látszólag ezen utóbbiak tűnnek könnyebben megérthetőnek, a tudományos gondolatmenet sokaknak tűnik nehéznek, egyszerűbb megérzéseikre hagyatkozniuk, vagy bizonyos tekintélyként elfogadott emberek gondolatait elfogadni, követni, ismételni. Minden ember szeretné megérteni (értelmezni) a körülötte levő világot, de nagyon kevesen szánnak időt, energiát arra, hogy a másoktól hallott ismereteket összevegyék a tényekkel, tapasztalatokkal. Nem végeznek az emberek megfigyeléseket, nem kísérleteznek, hanem helyette a világhálón tájékozódnak, ahol sajnálatos módon a tudomány mellett az áltudományok is jelen vannak. A mitologikus elgondolásokat egyre inkább felváltja a földönkívüliekben, UFO-ban való hit, amely az űrkorszakkal csak erősödött. Így nem kell csodálkoznunk, hogy a századfordulón, 1997-ben a Hale-Bopp-üstökös takarásában egy űrhajót véltek vagy inkább képzeltek többen is [54]. Sajnálatos módon ez nem csak egy elterjedt hír maradt, hanem a Mennyország Kapuja amerikai szekta tagjai tömeges öngyilkosságot követtek el azt gondolva, hogy az üstökösöt követő űrhajóval utazik tovább a lelkük.

Az üstökösökkel kapcsolatosan napjainkban is terjednek a babonaságok, fantasztikumba illő elképzelések, félelmek. Egy diákomtól hallottam az üstökös projektünk közben, hogy az ISON-üstökös, egy űrhajó, és hamar találtam is ezzel kapcsolatos írásokat az interneten, persze nem tudományos oldalakon. Sok „világvége jóslathoz” is felhasználnak valamilyen (ritka) csillagászati jelenséget, égitestet, ezért fontos a természettudományos világkép kialakítása diákjainkban, hogy ne lehessen őket mindenféle hazugsággal megtéveszteni. Világvégével régebben is riogattak, de az internet nagyon felgyorsította a hírek terjedését, így manapság jóval több emberhez jutnak el, mint régebben. Csaba György „Lesz-e világvége?” című írása (Planetáriumi füzetek 6.) több csillagászzal kapcsolatos eseményről, köztük az üstökösökről is megírja a tudományos álláspontot, és egyben megjósolja a világvégék elmaradását is. Sajnálatos, hogy a tudományosan megalapozott világvégék elmaradását előre jelző „jóslatok” beteljesülése feledésbe merül a következő világvége jóslat idején. Úgy gondolom ezen a téren

is fontos a diákjainkat tájékoztatni, tanítani, szemléletmódjukat alakítani és a hiteles hírforrásokra felhívni a figyelmüket, hogy onnan tájékozódjanak. Fontos tudniuk diákjainknak, hogy a legtöbb csillagászati jelenség bekövetkeztének időpontja előre jelezhető. Ma már nem fog váratlanul feltűnni az égen egy üstökös sem, mert már egy-két évvel korábban ismerik sok jellemzőjét, mit ahogyan ezt az ISON-üstökössel kapcsolatosan is láthattuk. Természetesen van egy kis bizonytalanság a kezdeti előrejelzésekben, de lényegében az összes várható lehetőséggel tisztában vannak a tudósok és a további vizsgálatok, az égitest nyomon követése idővel egyre pontosabb előrejelzést tesz lehetővé.

2.3.9 Üstökös katalógusok, magyar felfedezések

Az üstökösök kutatásában és felfedezésében is nagy előrelépést jelentettek az űrszondás megfigyelések, például a SOHO űrtávcső 1995-ös fellövése óta több mint 4000 (napsúroló) üstököst fedezett fel. Ilyen nagy számú felfedezésnél már nincs jelentősége a pontos értéknek, de közel 7000 az eddig felfedezett üstökösök száma. Ezek jelentős részét az űrtávcsöveken kívül a földközeli égitesteket kereső távcsöveknek tulajdoníthatjuk. Az űrkorszak előtti felfedezések száma kb. ezer, de ha a periodikus visszatérőket nem számoljuk külön, akkor ez a szám is jócskán csökken. Vannak olyan üstökös katalógusok is, amelyeket az oktatás során is eredményesen használhatunk, ezek közül ajánlok néhányat a következőkben.

Egy japán csillagász, Seiichi Yoshida üstökös honlapján¹⁵, többféle szempont szerint kereshetünk a periodikus üstökösök között, megnézegetjük, hogy mikor járt napközelen, sőt azt is megtudhatjuk, hogy tudták-e az egyes visszatérésekor észlelni.

Az International Comet Quarterly honlapon¹⁶ külön felsorolták, bemutatták az utolsó két évszázad fényes üstököseit, egy gyakorlatias fényesség összehasonlítással, magnitudo skálával, valamint a kapcsolódó csillagászati fogalmak magyarázatával, igaz angolul.

A Brit Csillagászati Egyesület honlapján¹⁷ 500 periodikus üstökösre lehet rákeresni, részletes leírást olvashatunk az üstökösökről és felfedezésükről.

¹⁵ <http://www.aerith.net/index.html>

¹⁶ <http://www.icq.eps.harvard.edu/index.html>

¹⁷ <https://people.ast.cam.ac.uk/~jds/per0010.htm>

Megismerhetjük a periodikus üstökösöket a <http://cometography.com/> honlap segítségével is, és találhatunk szép képeket is róluk.

A Nemzetközi Csillagászati Unió honlapja is helyt ad üstökös-listának¹⁸ itt megtalálhatóak az üstökösök pályadatai is de ezek már inkább a hivatásos csillagászoknak, vagy távcsővel rendelkező amatőr felfedezőknek, készültek. Találunk egy felsorolást, a Földet leginkább megközelítőkről¹⁹, amelyet érdemes áttekinteni, hiszen egy üstökös látszó fényessége függ attól is, hogy milyen messze halad el bolygónk mellett.

A már felfedezett, ismert üstökösöket is érdemes tudományos szempontból megfigyelni, meghatározni a pozíciójukat és ebből az esetleges pályaváltozásokat vagy éppen spektroszkópiai vizsgálatok alapján az üstökösök alkotóelemeit feltérképezni. Hazai csillagászaink elismertek az üstökös kutatásban is, mégis mindenki álma egy üstökös felfedezése. Kulin György (1905-1989) kettő, míg Lovas Miklós (1931-2019) öt üstököst talált meg elsőként a világon [55]. Kulin György első üstökös felfedezését végül a kisbolygók közé sorolták, a második üstököse pedig C/1942 C1, Whipple-Bernasconi-Kulin-üstökös nevet kapta, és közel parabolikus pályájú. Lovas Miklós három először felfedezett üstököse (C/1974 F1, C/1976 U1 és C/1977 D1) is parabola pályájú, míg a két utolsó (93P/Lovas-1 és 184P/Lovas-2) rövid periodusú üstökös. Harmadik üstökös felfedezőnk Sárnecky Krisztián, aki sok kisbolygó felfedezése után 2022 első napjaiban új üstököst (C/2022 A1) is talált.

2.3.10 Az ISON-üstökössel kapcsolatos ismeretanyag

Az ISON-üstököst a legjobban megfigyelt üstökösként emlegették. A földi obszervatóriumok és lelkes amatőr csillagászok távcsövein túl több űrtávcső, űrszonda is nyomon követte az ISON-üstököst (2.12. ábra). Amikor a Marshoz közeledett (10,5 millió km-re közelítette meg a „Vörös bolygót”), akkor a Messenger és a Mars Express műholdak kísérték figyelemmel. Amikor a Naptól nem látszott egy ideig (2013 nyara), akkor a Hubble űrtávcső készített képeket róla. Figyelte a Chandra, a Venus Express, a Proba-2 is, a végnapjait pedig a SOHO és STEREO űrszondák segítségével örökítették meg. Bár szabad szemmel nem láthattuk, de ezekkel az eszközökkel igen szép, látványos felvételek készültek az ISON üstökösről.

¹⁸ <https://minorplanetcenter.net/iau/lists/PeriodicCodes.html>

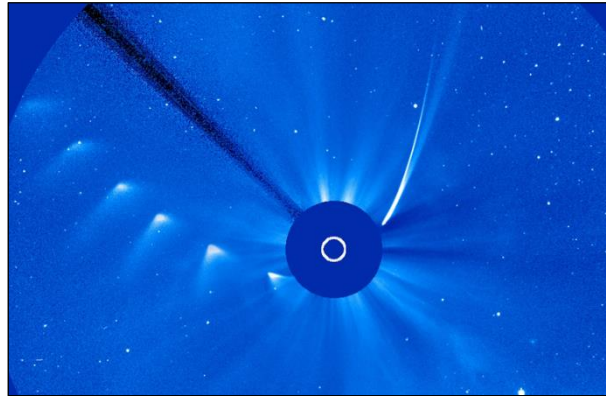
¹⁹ <https://minorplanetcenter.net/iau/lists/ClosestComets.html>



2.12. ábra. Az ISON-üstököst megfigyelő űreszközök.

Az ISON-üstököst 2012-ben fedezte fel Vitali Nevski és Artyom Novichonok az oroszországi Kislovodskban, az International Scientific Optical Network (ISON) 40 centiméteres automata tükrös távcsövével, nevét is erről az aszteroidakereső távcsőhálózatról kapta: C/2012 S1, ISON-üstökös. Már a Jupiter pályáján kívül észlelték és úgy tűnt, hogy először jár a Naprendszer belsejében. Az újonnan felfedezett üstökösökről a csillagászok a már ismert üstökösökkel összehasonlítva próbálnak meg előrejelzéseket adni. A hasonlóságot a pályaelemekben keresik és az ISON-üstökös mért pályaadatai az 1680-as (C/1680 V1 Kirch), igen látványos üstökös pályaelemeihez hasonlítottak. Az ISON is ún. „napsúroló” üstökös, az Oort-felhőben keringhetett létrejötté óta, amely a Naprendszer keletkezésének idejére tehető. Több mint egy millió évvel ezelőtt valamilyen gravitációs hatás, vagy esetleg egy ütközés következtében került arra, a közel parabola alakú pályára, amelyen a Naphoz közeledett. Az ISON-üstökös most került először napközelsébe, így várható volt, hogy sok anyagot veszít, fényes, látványos csóvája lesz. Az üstökös keletkezése óta nem szenvedett komolyabb anyagvesztést, őrizte még magjának külső jeges burkát, így sokan remélték, hogy lényeges anyagvesztéssel ugyan, de túléli a Nap közelségét. A Naphoz közel elhaladó üstökösök esetén gyakori, hogy az erős sugárzás és az ár-apály erők hatására megsemmisülnek. A csillagászok az ISON-üstökös esetében is számoltak ennek bekövetkezésével, de előre biztosan senki nem tudott mondani. Az ISON-üstökös pályájáról, azon való mozgásáról több szimuláció is készült, amelyeket érdemes diákjainknak is megmutatni, de fel kell hívni a figyelmüket arra, hogy a Napot elhagyó rész sajnos már nem valósult meg.

A 2.13. ábrán az üstökös utolsó napjának pillanatfelvételeit láthatjuk egy képre vetítve. Középen a Napot, egy úgynevezett koronagráffal takarták ki. E korong takarásába szép csóvával repült az ISON-üstökös (a kép jobb oldalán), de onnan már csak porfelhőként jött ki. Ennek a széteszló porfelhőnek is keresték a maradványait távcsövekkel, köztük űrtávcsövekkel is, de semmi nyoma sem volt az üstökösnek – teljesen megsemmisült.



2.13. ábra. Az ISON üstökös utolsó napja. Szétporladásának fázisait láthatjuk a Nap közelében. (SOHO (ESA & NASA))

Az ISON üstökös perihélium átmenetét egy kisfilmen²⁰ is nyomon követhetjük.

Az üstökösök életének végét jelenti mind egy másik égitestbe (például bolygóba) való csapódás vagy a Nap közelében való szétesés. A periodikus üstökösöknek pedig nagyságuktól és felépítésüktől függően előbb vagy utóbb elfogy az illékony anyaguk és aszteroidákhoz hasonlóak lesznek kómát, csóvát már perihélium közelében sem növesztenek. A periodikus üstökösök anyagvesztése pályájuk közelében dúsul fel, így amikor a Föld áthalad egy üstökös pályáján gyakrabban látunk hullócsillagot, meteorzáport. A Naprendszer égitestjeinek csoportosításakor mind az üstökösök mind az aszteroidák a Naprendszer kis égitestjei közé tartoznak, különbség közöttük a pályájukban és az összetevőik arányában van, de a pontos meghatározás, elkülönítés nehézsége miatt ezzel már nem foglalkoznak a csillagászok, hanem egy bővebb, nagyobb csoportba sorolják őket együtt.

Talán a Csurjumov-Geraszimenko-üstököst nem figyelte meg annyi földi és űrtávcső mint az ISON-üstököst, de a legalaposabban megvizsgált üstökös címet megkaphatja, hiszen több, mint két évig volt a Rosetta űszonda az üstökös közelében és még egy leszállóegységet is bocsájtott a felszínére. Érdeemes bemutatni egy-egy csillagászati misszió többéves (évtizedes) tervezési és megvalósítási folyamatát. Talán a legmeglepőbb, hogy bár a csúcstechnikával kezdenek hozzá

²⁰ <https://www.nasa.gov/content/goddard/fire-vs-ice-the-science-of-ison-at-perihelion/>

ezekhez a fontos, drága projektekhez, de később a megfigyelések folyamán már esetleg a diákjaink mobilján is jobb kamera van, mint az űrszondán. Egy-egy űrbeli célpont elérése nagyon sok energiát igényel, sokszor fizikai, technikai korlátokkal is találkozhatnak a mérnökök, a kevesebb energiájú pálya viszont időben jóval hosszabb. A Rosetta-misszió kapcsán tekintettük ezt végig diákjaimmal. Az űrszonda útjáról és az üstökös megfigyeléséről készült egy animáció is²¹. Érdekes azt is nyomon követni egy másik kisfilmen²², hogy milyen képeket készített az űrszonda a Csurjumov-Geraszimenko-üstököséről, hiszen egy perihélium áthaladást, az üstökös aktivitásának növekedését, majd csökkenését is láthatjuk.

Néhány honlapot ajánlok, amelyek hasznosak az üstökösökkel való foglalkozáskor.

<https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/overview/>

<https://eyes.nasa.gov/eyes-on-the-solar-system.html>

http://www.esa.int/Education/Teach_with_Rosetta/

<https://sci.esa.int/web/rosetta/home>

<https://mars.nasa.gov/comets/sidingspring/>

<https://deepimpact.astro.umd.edu/index.html>

<http://cse.ssl.berkeley.edu/SegwayEd/lessons/cometstale/com.html>

<https://www.csillagaszat.hu/category/tudastar/a-naprendszer-felepitese-kialakulasa/a-naprendszer-apro-egitestjei/>

<https://www.csillagaszat.hu/tag/rosetta/>

http://www.urvilag.hu/rosetta_ustokos_program

Találunk tanítási segédanyagot Gönczöl Zoltán, Takácsné Farkas Anikó, Ábrahám Péter: Csillagok a fizikaszertárban, tanítási példák fizikatanárok számára című kiadvány²³ hetedik fejezetében (Üstököskutatás és a NASA Stardust-NExT űrszonda küldetése) is.

²¹ <https://sci.esa.int/web/rosetta/2279-summary/>

²² <https://vimeo.com/347565673> (The Comet)

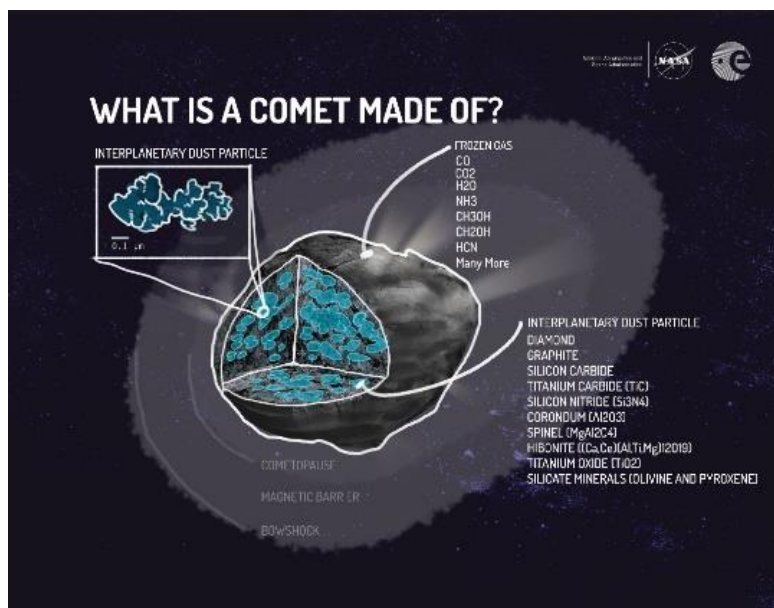
²³ <http://fiztan.phd.elte.hu/files/kiadvanyok/Csillagok.pdf>

3 Az üstökös mag és iskolai modellezése

Az üstökösök általános bemutatása után ebben a fejezetben az üstökös maggal kapcsolatos, középiskolában tanítható ismeretanyagot írom le. Bővebben tárgyalom az üstökös mag modelljének elkészítését, tanári bemutatását. Megfelelő elővigyázatossággal diákjaink is elvégezhetik ezt a kísérletet, amelynek tanulói általi megvalósítását a fejezet végén mutatom be. Ez a fejezet a második tézisem háttéranyagát fejt ki [S1].

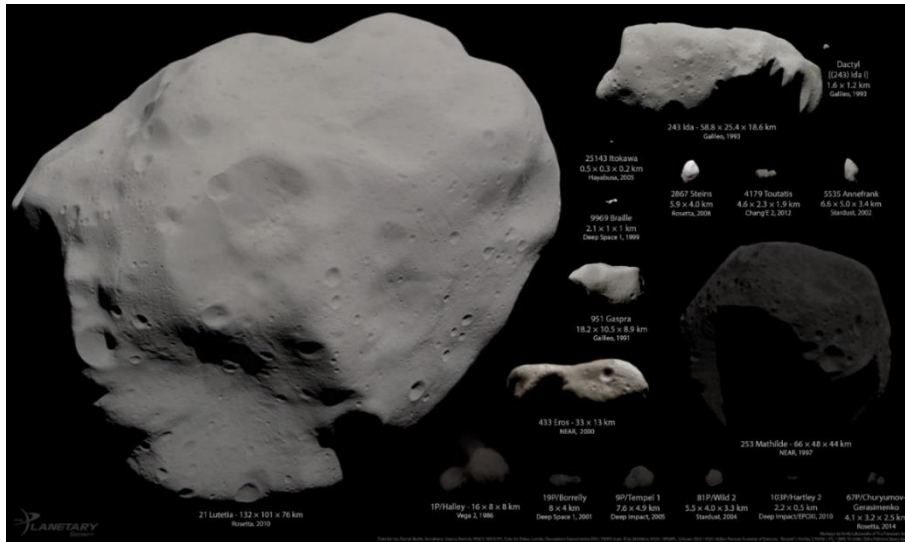
3.1 Az üstökös magok

Az üstökös magja a kómán belül helyezkedik el, mint ahogy azt a 3.1. ábrán láthatjuk:



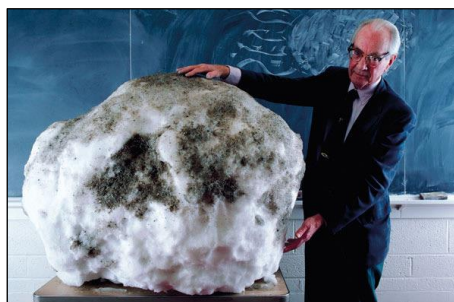
3.1. ábra. Az üstökös szerkezete és összetevői. (NASA/ESA)

Az első felmerülő kérdés, hogy milyenek is az üstökös magok, hiszen a kóma takarásában nem láthatjuk őket. A 3.2. ábrán űrszondákkal megközelített üstökös magokat (alul) és aszteroidákat láthatunk egy képen méretarányosan ábrázolva. (A képen nem szerepel a Vesta (262 km-es nagyságú) és a Ceres (470 km-es nagyságú) kisbolygó, amelyek jóval nagyobb méretűek a képen látható legnagyobb Lutetia kisbolygónál.)



3.2. ábra. Kisbolygók és üstökösragok, amelyekről közeli űrszondás képek készültek.
(Emily Lakdawalla montáza)

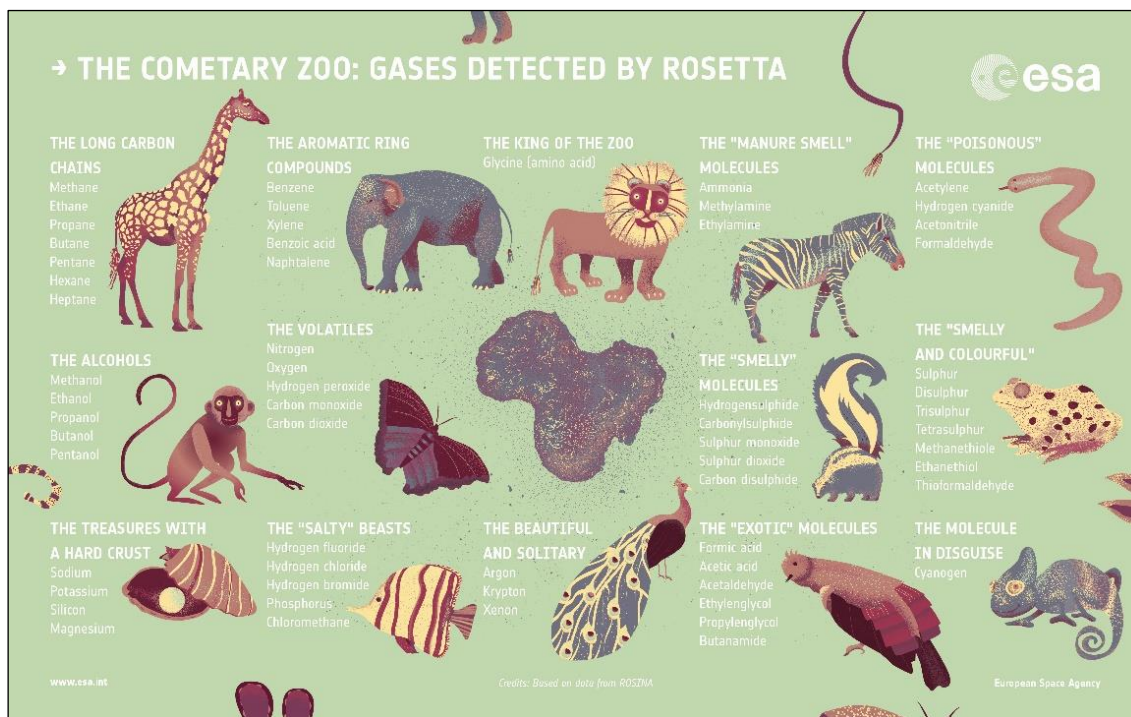
Az üstökösragok szabálytalan alakúak, mert kis tömegük nem elég a gömb alak kialakulásához. Ez a modellkészítésnél kedvező, nem kell törekedni a gömbszerűsége, gyakorlatilag bármilyen forma megfelelő. Üstökösrag modellünket az igazi kicsinyített másának szántuk ezért elég egy kisebb darabot készíteni, nem szükséges akkorát, mint amelyet a „piszkos hógolyó” modell megalkotója, Fred Whipple készített 1986-ban, egy előadásának szemléltetéséhez (3.3. ábra). Több, mint 200 kg tömegű és méteres nagyságú látványos modellje természetesen még mindig jóval kisebb az igazi üstökösragoknál, amelyek 100 méterestől akár 40-50 kilométeres nagyságúak is lehetnek. Megfigyelhetjük a modelljén a külsőleg alkalmazott fekete por (szén) szórását.



3.3. ábra. Fred Whipple és az üstökösrag modellje, a „piszkos hógolyó”.
(Jonathan Blair/CORBIS fotója)

Az üstökösök anyagi összetétele igen változatos amint azt a 3.4. ábra is mutatja. Az üstökösragot alkotó jeges anyagok közül nemcsak a vízjég, hanem a szárazjég is jelentős arányú, a kőzetek közül a szilikátokat, szulfidokat említhetjük. Ezeken kívül nagyon sokféle

elem, molekula található az üstökös-magban, köztük alkoholok (metanol, etanol), szénhidrogének (metán, etán, propán, bután, pentán), fémek (nátrium, kálium, magnézium) vagy éppen nemesgázok (argon, kripton, xenon). A sok szerves molekula közül kiemelendő a glicin aminosav, amely a fehérjék, így az élőlények fontos alkotója.



3.4. ábra. A Csurjumov-Geraszimenko-üstökös környezetében kimutatott anyagok.

3.2 Üstökös-mag-modell készítése

Az üstökösök érdeklik a diákokat, nem kell külön motiváció a témával való foglalkozáshoz, tanuláshoz. Fontos, hogy a megszerzett tudás hosszú távon meg is maradjon, amelyet az üstökösökhöz kapcsolódó élményekkel érhetünk el. Ez egyrészt egy látványos üstökös megfigyelés lehetne, amely az utóbbi évtizedekben nem volt könnyen megvalósítható és úgy tűnik, hogy igazán fényes, hosszú csóvájú üstökös nincs a látóhatáron, tehát az elkövetkező egy-két évben sincs nagy remény erre. Másrészt meg tudjuk mutatni az üstökös-sel kapcsolatos jelenségeket egy kicsinyített modellen. A diákjainknak maradandó élményt adunk az „üstökös-gyúrással” sőt elővigyázatossággal megtapogathatják a fagyott magot, láthatják a gázkilöveléseket és az ezekből előálló kisebb csóvát is. Igyekeztünk olyan anyagokból készíteni a modellünket, amelyek az üstökösöknek is alkotóelemei, bár az arányok nem mindig mutatták

a valódi arányokat. Megfelelő mennyiségű szénpor alkalmazásával az üstökösök feketeségét is sikerült megvalósítanunk. A modellünk belső szerkezete is üregebbé, porózussá vált egy idő után, a szárazjég gyors szublimációja által a valódi üstökösökéhoz hasonlóan. Fontos felhívni a figyelmet nemcsak a hasonlóságokra, hanem azokra a folyamatokra is, amelyek ugyan látványban hasonlítanak az igazira, de alapvetően más természetűek. Itt az üstökös látványosságát adó csóvát kell megemlíteni, amelyet ugyan sikerült megmutatnunk, bár nem túl nagy méretben. Az üstökösök csóvája gázokból és porokból áll, amely a napsugárzás hatására, szublimáció következtében válik ki az üstökösökből. A modellünkön látható „csóva” egyszerű köd, a hideg üstökösök körül kicsapódó apró vízcseppek alkotják. A mozdulatlanul tartott modellünkön a „csóva” lefelé mutat, hiszen a hideg nagyobb sűrűségű levegő „lefolyik” a magról, modellünk mozgatásánál a ködcsóvát a „menetszél” az üstökösök mögé tereli, hasonló látványt kapunk, mint amilyen a Nap felé tartó üstökösökönél alakul ki. Arra viszont nincs egyszerű mód, hogy a Naptól távolodó üstökös látványát mutassuk meg, amely esetben a csóva halad elől, ezért is fontos hangsúlyozni, hogy milyen értelemben hasonlít modellünk az igazira és milyenben nem.

3.2.1 Az üstökösök-modell összetevői

Az üstökösök magja (víz)jéggel összefagyott porszerű anyagokból (legnagyobb hányadban szilikátokból) és a fagyott anyag közti pórusokba bezáródott gázokból áll. Az üstökösök modellünkben természetesen nem szerepeltethettünk minden összetevőt, némelyiket nem is lett volna célszerű mérgező volta miatt. Az elkészített modellünket lényegében a szilícium-dioxidból (kb. egy pohárnyi homok), csapvízből (1-1,5 liter) és szárazjégből (1,5-2 kg) készítettük. A tudományos hűség kedvéért és érdekességképpen igyekeztünk olyan anyagokat még belekeverni a modellünkbe kis mennyiségben, amelyekhez hasonlóakat a tudományos vizsgálatok a valóságban is kimutattak. A szulfidok képviselésében kevés elporított vasszulfidot, ammóniaként 1-2 ml szalmiákszeszt kevertünk a masszába. A kimutatott szénvegyületek képviselésében vörösbort, kevés keményítőt adtunk a modellünkhöz, az erőteljesebb párolgás (csóvaképződés) reményében pedig alkoholt. Az üstökösök a Naprendszer legsötétebb égitestjei, por alakú aktív szén hozzáadásával értük el a megfelelő sötét színt. Ebből az összetevőből ajánlott többet is alkalmazni (néhány kiskanálnyit), nem csak mutatóba, mint az előzőekből, mert akkor belül is elég sötét lesz a modellünk. A Csurjumov-Geraszimenko-üstökös magjának megfigyelésénél azt tapasztalták, hogy egy „sziklaomlás”

után feltároló belső rész már nem volt olyan sötét, mint a külső réteg, ezért keverhetünk kevesebb szénport a modellünkbe, viszont az elkészült üstökösünköt célszerű megszórni szénporral.

3.2.2 Az üstökösök-modell biztonságos elkészítése

Az üstökösök-modellünk elkészítése balesetveszélyes és nagyon „piszkos” is lehet megfelelő elővigyázatosságok, előkészületek híján. Először a veszélyességével foglalkozom, amely egyrészt az alkalmazott szárazjég alacsony hőmérsékletével függ össze, könnyen fagyási sérüléseket okoz, másrészt a gyorsan szublimáló szárazjég a környező levegőben a széndioxid részarányát is megnöveli, amely szintén veszélyes lehet az egészségre. Ez utóbbi elkerülhető állandó szellőztetéssel vagy szabad ég alatti modellkészítéssel. Szellőztetés nélkül a levegőnél nagyobb sűrűségű és esetünkben még ráadásul hidegebb széndioxid feldúsulhat a terem alsó részén, főleg a modellünk közelében.

Érdekes a szárazjég szállítását a bemutatónk időpontjához igazítani, hiszen a tárolás alatt is szublimál, fogy a szárazjég. Szállításához, tárolásához mindenképpen célszerű hőszigetelő tartályt beszerezni, semmiképpen nem szabad megfelelő szigetelés nélkül szilárd köpadlóra tenni, mert az megrepedhet az extrém hideg miatt. Fontos, hogy légmentes edényben se tároljuk, hiszen a keletkező széndioxid gáz szétfeszíti a tároló edényt. Érdekes ezt be is mutatni a diákoknak, ha van lehetőségünk, időnk rá. Nem veszélyes egy lufiba tenni szárazjeget és hagyni felfújni, kipukkanni. Látványosabb és egyben veszélyesebb is egy műanyag palackba tölteni a szárazjeget majd egy dugóval vagy kupakjával lezárni. Ezt mindenképpen külső szabad területen, emberektől biztos távolságban szabad csak elvégezni, mert a dugó is rakétaszerűen repül ki, a lezárt palack pedig nagyot robbanva szakad szét darabokra. A szárazjég adagolásához, illetve a modellünk összegyűréséhez elengedhetetlen a hőszigetelő védőkesztyű, védőszemüveg viselete és célszerű a műanyag, vagy fa adagoló kanalak használata. A modellnél jelentősebb mennyiségű szárazjégre van szükség, ennek adagolására megfelelő egy nagyobb méretű műanyag (fogantyús) mérőedény is. Semmiképpen ne használjunk üvegedényeket, a törésveszélyt fokozza a szárazjég alacsony hőmérséklete. Ugyan egy fémedény nem fog eltörni, de jó hővezetőképessége miatt szintén nem célszerű alkalmazni a szárazjeges kísérletekben.

A modellünk lényegében egy fagyott sárgolyó, amely készítése, tárolása sok piszokkal járhat. Célszerű védőöltözetet felvenni ruhánk tisztán tartása érdekében és elegendő papírtörölközőt is odakészíteni az esetlegesen szükséges takarításhoz. Az asztalt, amelyen készítjük a modellünket célszerű lefedni, vagy egy nagyobb fóliával, vagy legalább csomagoló papírral, amelyeket a végén csak összegöngyölhetünk minden más szeméttel együtt és belerakhatunk egy nagyobb szemeteszsákba. Az egész műveletet egy nagyobb (legalább 5 literes) műanyag táliban végezzük el, célszerű azt is kibélelni egy szemeteszacskóval (legalább 35 literessel). Fontos, hogy ez a zacskó erős (vastag) legyen, mert ha kiszakad, akkor inkább akadályozza munkánkat ahhoz képest, mintha ott sem lenne a táliban. Egy nagyméretű szemeteszsákkal ki lehet bélelni úgy is a tálat, hogy nem nyitjuk szét, hanem kettős rétegben igazítjuk a formába. Ez a megoldás is jó, bár az üstökösmagunk egybetartásánál könnyen kifolyhat a víz, ha nem vagyunk elég ügyesek. Szükség van még egy nagyméretű fakanálra, vagy (nem hegyes) botra, amellyel összekeverjük az anyagokat.

3.2.3 Az üstökösmag-modellhez felhasznált anyagok bemutatása

Mielőtt nekikezdünk a modellünk elkészítésének mindent célszerű összekészíteni, kimérni, érdemes egy megbízható diák segítségét is igénybe venni. Fontos a modellünk előkészített alkotóelemeit bemutatni a diákoknak, utalva arra, hogy milyen üstökös összetevőket szemléltetünk velük. Ilyen módon könnyebben rögzülnek az üstökösök alkotó anyagok, mintha csak felsorolnánk őket egy tanórán. A következőkben az üstökösmag modellünkhöz felhasznált anyagokat mutatom be, utalva olyan, a háztartásokban is megtalálható anyagokra is, amelyekkel helyettesíthetjük a szertárból felhasznált vegyületeket. A modellhez felhasznált (csap)vizet külön nem mutatom be.



Az üstökösök alkotóeleme a szárazjég, ebből 1,5-2 liternyi mennyiségre lesz szükségünk. Célszerű a legkisebb méretűt (pelletet) rendelni, vagy ha erre nincs lehetőségünk, akkor erős zacskóban, ruha között kell összetörni minél kisebb darabokra.

3.5. ábra. Szárazjég pellet.



Az üstökösöket alkotó por és kőzetdarabkák jórészt szilikátokból állnak, amelyet szilícium-dioxidot tartalmazó anyaggal, homokkal reprezentáltunk. Megkérhetünk diákokat is, hogy hozzanak egy-két pohárnyit belőle, de végső soron használhatunk földet is.

3.6. ábra. Egy pohár homok.



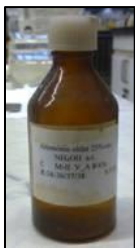
A szulfidok reprezentálására kevés vas-szulfidot (FeS) használhatunk, amelynek porítását egy mozsárban végezhetjük el vagy összemorzsolgathatjuk egy tanulóval is.

3.7. ábra. Vas-szulfid darabok.



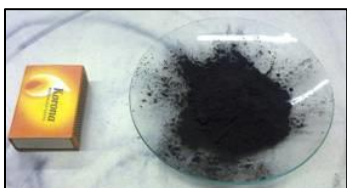
Az üstökösben sokféle szénvegyület található, mint például a szén-monoxid, szén-dioxid, metán, etán, metanol, etanol, hidrogén-cianid, formaldehid. Ezek helyettesítésére háztartási keményítőt, esetleg ecetet, szirupot használhatunk.

3.8. ábra. Étkezési keményítő.



Az ammóniát 1-2 ml ammónium-hidroxid formájában adhatjuk az üstökösünkhöz. Így használjuk a látvány és a tapintás mellett a szaglásunkat is. Ezt is helyettesíthetjük ammóniát tartalmazó üvegtisztító folyadékkal.

3.9. ábra. Ammónium-hidroxid oldat.



Az üstökösragok sötét, fekete színét aktív szénrel érhetjük el. Ebből hagyjunk egy-két kiskanálnyit az elkészült modell megszórásához.

3.10. ábra. Szénpor.

3.2.4 Az üstökösrag-modell elkészítésének lépései

Az üstökösrag modellünk készítését kezdhethetjük a víz tálba öntésével, majd a homokot és aztán a többi összetevőt is belekavarjuk, de lehet a száraz összetevőkre is önteni a folyékonyakat. A keverésnél figyelni kell arra, hogy ne szakítsuk ki a szemeteszsákunkat. Ezután már csak a

szárazjég hozzáadása marad hátra, amelyhez mindenképpen védőkesztyű és védőszemüveg felvétele után kezdjük neki. A szárazjeget a tálba öntés után gyorsan keverjük össze a folyékony sárral, amelyben a víz hamar meg fog fagyni, és ezalatt kell egybegyűrnünk, összetartanunk az üstökös magot. A széndioxid gyors szublimálása miatt a környező levegő hőmérséklete lecsökken, kicsapódik a levegő páratartalma, ami látványos „füstképződéssel” jár. A szemeteszacskó segítségével összeszorított anyagnál belül is keletkezik gáz, amelyet célszerű folyamatosan kiengedni, kiszorítani a zacskóból. Ha esetleg nem marad egyben a modellünk további kis adag vízzel segíthetjük az összefagyást. A kísérlet ezen fázisa valódi látványosság. Miközben a képlékeny anyagmasszát a víz összefagyasztja, az elpárolgó széndioxid egy része gázbuborékok formájában bezáródik az anyagba, a többi elkeveredik a környező levegővel és azt annyira lehűti, hogy a levegő páratartalma füstszerű látványt adva kicsapódik. Néhány perc alatt az üstökösünk magja elkészül, kivehetjük egy tálcára bemutatni a diákoknak. Az így elkészített fagyott sárgolyó valóság-hű modellje az üstökösök magjára vonatkozó tudományos elképzeléseknek. Ha egy kalapáccsal szétörjük az üstökösünket, láthatóvá válik a belső üreges szerkezete is, amely az igazi üstökös mag porózusságát mutatja. A diákok szeretik megtapogatni az elkészített modellmagot, vigyázni kell azonban, hogy ez csak rövid idejű hozzáérés legyen, mert nagyon hideg a mag, ezért a tanári felügyelet elengedhetetlen. Ha a megfagyott mag megtapogatása keménységének tesztelése rövid ideig tart, akkor nem jár fagyásveszéllyel. Foglalkozásunk alkalmával valamennyi diák ragaszkodott ahhoz, hogy maga is hozzáérjen, egy pillanatig megfogja, megnyomja a fagyott sárgolyót, még úgy is, hogy az anyagba kevert szén kezüket is befeketítette.

Ha magára a keveréshez használt fakanálra vagy botra nyomkodjuk rá a modellünket, akkor könnyebben kiemelhetjük, tarthatjuk a levegőben, illetve a csóvaképződést is bemutatathatjuk. Kis ügyeskedéssel modellüstökösünk látványát egészen hasonlóvá tehetjük a valódiéhoz. A Nap hatását egy erős fényű lámpával és egy mellette elhelyezett, meleg levegőt fújó hajszárítóval érjük el. A 3.11. ábrán bemutatott fotó modellüstökösünkről készült sötét háttér előtt. A képen jól látszik a fagyott üstökös-magot tartó pálca. A meleg levegőt a pálca irányából kicsit távolabbról fújtuk a fagyott magra. A megvilágító lámpát a hajszárító irányából, de kicsit ferdén irányítottuk az üstökösre, így a fény nem csak a fagyott magot, de a mögötte húzódó csóvát is jól megvilágította.



3.11. ábra. Modell üstökösünk fagyott magja és csóvája.

Modellüstökösünk csóvája csak látványában nyújt hasonlóságot az igazi üstököséhez, lényegét tekintve azonban lényeges különbségek vannak. A valódi üstökös csóvját az üstökösmagból a napsugárzás hatására szublimáló gázok és a segítségükkel kiszabaduló porszemcsék alkotják, amelyeket a napszél terel át az üstökösmag Nappal ellentétes oldalára. Modellünk esetén a „csóvát” egyszerű köd alkotja, az apró vízcseppek szórják a fényt, ezért a ködcsóva különösen oldalról megvilágítva látható jól. Ha a magot nyugalomban tartjuk a levegőben, a csóva függőlegesen lefelé irányul, ahogy a nagyobb sűrűségű hideg levegő „lefolyik” a magról. Vízszintesen mozgatva a magot a levegőben, a ködcsóvát a „menetszél” a mag mögé tereli.

A látványos kísérlet nem jelent túl nagy költséget. Alapanyagainak döntő része és a védőkesztyű a kémia szertárban megtalálható, bort, szemetesszákot vihetünk otthonról, homokot hozathatunk valamelyik gyermekkel, a legnagyobb kiadást a szárazjég jelenti. A szárazjég sem túl drága, csak nem lehet kis mennyiséget rendelni belőle, ezért célszerű tájékozódni a különböző cégek árkinálatáról és egyéb kötődő szolgáltatásairól (házhozszállítás, hőszigetelő tartály). (Lehet készíteni is szárazjeget²⁴, de nagyobb mennyiségben hosszadalmas, így mindenképpen javasolt a rendelése.)

Az üstökösmag összefagyasztása gyors határozott mozdulatokat és óvatosságot kíván, hiszen a vastag kesztyű csak korlátozottan véd a fagyástól. Épp a fagyásveszély miatt a mag összefagyasztását elsősorban tanári bemutatóként ajánlott elvégezni.

²⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=NzB0zynBCeM> Szeideman Ákos, Kísérletek szárazjéggel

3.2.5 Diákjaink biztonságos üstökösmag-modell készítése

Azok a diákok, akik látták az üstökösmag-modell készítését, szerettek volna saját maguk is gyúrni egyet. Akadnak az interneten is olyan kisfilmek, amelyekben gyerekeket is bevonnak az üstökösmag készítésébe, sőt egyedül otthon a konyhában is elkészítik ezt a fagyott sárgolyót. Néhány nyolcadikos fiú diákom is szeretett volna olyan üstökösmagot gyúrni, amelyet az üstökös projektünk klubdélutánján látott elkészíteni. Úgy gondoltam, hogy tanári felügyelet mellett biztonságosabban történhet az üstökösmag gyúrása, mint felnőtt felügyelete nélkül otthon a konyhában, ezért is gondoltam át a megvalósíthatóságát.

3.2.6 A tanulói üstökösmag modellezésének előkészületei

Mivel ott voltak a tanári bemutónál, látták a folyamat egyes lépéseit, ugyan nem a biztonsági felszerelések kötötték le a figyelmüket, de ezekre is emlékeztek. Annyira szerették volna kipróbálni az üstökösgyúrást, hogy még a felmerülő költségeket (szárazjég, szénpor, védőfelszerelések) is szívesen vállalták. Tudva, hogy a legjobban az marad meg a diákokban, amit társaik mutatnak be, ezt is egy bemutatóval összekötött üstökösgyúrásnak terveztük. Elsődlegesen osztálytársaiknak szerették volna bemutatni az üstökösmag modellezését, de még néhány érdeklődő diákot is beengedtünk a terem befogadóképességét figyelembe véve. Az ötlet felvetésétől kezdve több hét is eltelt a megfelelő időpont kiválasztásáig, a szükséges felszerelések beszerzéséig. A fiúk osztályfőnöke segített a megvalósításnál, átengedte az egyik osztályfőnöki óráját és részt vett a felügyeletben is. Ő a biztos távolságban nézelődő diákokra ügyelt, így nekem csak az üstökösgyúrást végzőkre kellett figyelnem. Ez a tanóra az utolsó volt azon a napon mind a diákoknak, mind nekünk, tanároknak, így kicsit hosszabban is tarthattuk. A szárazjégből bőven maradt még további kísérletek elvégzésére is.

A diákok által tartott bemutónál még nagyobb hangsúlyt helyeztünk a biztonságra és a tisztaságra, mint a tanári bemutónál. Visszagondolva átbeszéltük az üstökösprojektnél átélt élményeket, megnéztünk még néhány neten szereplő kisfilmet az üstököskészítésről [56], [57], levontunk tanulságokat és megterveztük lépésenként ki mikor és mit fog tenni. Felosztották a szükséges anyagok beszerzését is maguk között a fiúk. Kértem, hogy hozzanak be mindent előre, hogy elpróbálhassuk az üstökösgyúrást. Ezek az előkészületek több, órák utáni megbeszélést is jelentettek, de a fizikaórából is rászántam pár percet a bemutató pantominszerű

elpróbálására. Ezzel kellőképpen felcsigáztuk az osztálytársak érdeklődését, kíváncsiságát és a bemutatót végzők is begyakorolhatták az egyes lépéseket.

3.2.7 A modellkészítés diákok általi megvalósítása

Az üstökösgyúrás időpontjául egy tavaszi napot választottunk, amikor már a kora délutáni órában végig nyitva lehettek az ablakok. A tanterem ajtaját is kinyitottuk így oldottuk meg a biztonságos szellőztetést. Diákjaim öltözetét úgy védjük, hogy egy nagy szemeteszsáknál vágunk három nyílást, a fejnek és a kezeknek és ezt vették fel a ruhájukra a fiúk. Ugyan a karjuk így nem volt védve, de olyan ruhát választottak aznapra, hogy azt sem féltették az esetleges szennyeződésektől. Akik a szárazjéggel dolgoztak (adagoltak, gyúrtak) konyhai azbeszt kesztyűt viseltek és védőszemüvegül bújárszemüveget (ez az ő ötletük volt, hiszen otthon rendelkezésre állt ilyen szemüveg, a célnak pedig megfelelt). Már maga a megjelemésük is mulatságos volt, ahogy felálltak egymás mellé a bemutóasztal mögé. Mindenki mondott egy-két mondatot az üstökösök alkotórészeinek bemutatásánál, mielőtt a szemeteszsákkal kibélelt nagy műanyag táliba tette az anyagot. A diákok nem a szertári vegyületeket használták, hanem a háztartásokban is előforduló ártalmatlan anyagokat: a vízen és szárazjégen kívül homokot, ecetet, keményítőt, szirupot, ablaktisztító folyadékot és szénport. Egyedül alkoholt hoztunk a szertárból egy kis üveggel, mert úgy gondoltam, hogy a vörösbort, amelyik ugyan nagy derűtséget okozott a tanári bemutónál, nem célszerű diákokkal behozatni az iskolába még egy kísérlethez sem. A többször megismételt „próba” meghozta a gyümölcsét, mert nagyon fegyelmezetten, de kellő humorral végezték az üstökösgyúrást diákjaim. Számomra is meglepő volt, hogy milyen odaadással, kedvvel és felfokozott hangulatban történt az üstökös-mag-modell keverése, gyúrása. Természetesen itt is a szárazjég masszába öntése után keletkezett köd tetszett a legjobban, mind a készítőknél, mind a nézőknél. Most is azt a megoldást választottuk, hogy a keverő fakanálra nyomkodjuk rá a masszát, úgy hagyjuk megfagyni, hogy a kanállal a közepén könnyen ki lehessen emelni a táliból. Ilyen módon biztonságosan tudták tartani, körbe-körbe vinni a teremben az üstökös-mag modelljüket diákjaim. Hajszáritóval helyettesítettük a Napot, kisebb csóvát keltve, amely sajnos mozgásánál már nem nagyon látszott, főleg a diákok gyors mozgását, szinte szaladását nem tudta követni az új anyag kiáramlásának sebessége. Megpróbáltuk még azt is bemutatni, hogy napközben gyorsabban, míg naptávolban lassabban mozognak az üstökösök egy ellipszispályán. A körbe-körbe járkálásnak véget vetett az üstökös-mag-modellünk olvadása, nem akartuk a padlót beszennyezni a lecsepegő sárral. Ezután

még megvizsgáltuk az üstökösmag belsejét is, egy kisebb kalapáccsal óvatosan ketté- illetve több darabbá törve az üstökösmodellünket, látszottak a kis gázkilövelések és a helyükön maradó üregek is. Felügyeletem mellett mindenki meg is tapogathatta a jeges darabokat.

A bemutató alatt felelevenítettük az üstökösmagról tanultakat, megtapasztalhatták milyen hideg, jeges fekete egy üstökösmag, előkerült a felépítése (piszkos hógolyó modell alapján), porózussága. Láttuk a gázkilöveléseket, a „csóvát”, amelyről megállapítottuk, hogy csak látványban hasonló az igazihoz és újra felhívtam a figyelmet a csóva irányára, amelyet nem a mozgás határoz meg elsődlegesen, hanem a napszél. Azt tapasztaltam, hogy a sok érdekesség átélése közben ez is könnyebben volt elfogadható a diákok számára, mint egy szokásos tantermi magyarázatkor.

3.2.8 Néhány látványos kísérlet szárazjéggel

A megmaradt szárazjéggel még végeztünk további kísérleteket. Most már ezen az anyagon és tulajdonságain volt a hangsúly. A szárazjég vagy fagyott széndioxid igen hideg, -78°C hőmérsékletű. Normál légköri nyomáson, szobahőmérsékleten gyorsan szublimál, vagyis szilárd halmazállapotból rögtön légnemű lesz. Maga a széndioxid gáz színtelen, szagtalan, a levegőnél nagyobb sűrűségű és nagyobb koncentrációban életveszélyes. Ezen tulajdonságokat bemutatathatjuk alkalmas kísérletekkel²⁵.

Alapkísérlet a szárazjég vízbe helyezése, amelyben látványos, heves párolgása forráshoz hasonlóan látszik. Ezt a látványt fokozhatjuk, ha forró vízbe dobunk szárazjeget, de ez nagyobb odafigyelést, elővigyázatosságot is követel. Szinte showszerű, ha a vízbe egy kevés mosogatót is teszünk, mert akkor erőteljes habképződést figyelhetünk meg. A látványt fokozhatjuk, ha meg is festjük a vizet. Ügyesen egy darab hatalmas buborékot is növelhetünk a tál tetején.

Már említettem a lufis és palackos, „robbanásos” kísérleteket, amelyeket szintén érdemes elvégezni, hiszen a váratlanul bekövetkező robbanás vagy lufi kidurranás és csattanása mindig tetszik a diákoknak. Érdekes különféle alakú lufikat felfújni a szárazjéggel, de egy vékony gumikesztyű is érdekes látványt mutat felfújódva. A gumikesztyűbe ugyan könnyebben

²⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=NzB0zynBCeM> Szeideman Ákos: Kísérletek szárazjéggel

kanalasztunk szárazjeget (majd csomót kötöttünk rá), de a lufiba már egy tölcser segítségével töltöttünk a kisméretű szárazjég-pelletből.

A kísérletek után még megnéztük a lassan elolvadó üstökösrag modellünket is, tudatosítva, hogy a hiányzó anyag a levegőbe szublimált és terjedt szét. A takarításnak a már említett módját alkalmaztuk, a bemutató asztalt letakaró fóliát és a rajta levő szemetet, összegöngyölve kidobtuk. Ha marad széndioxid, amelyet nem használtunk fel, az egy nyitott edényben hamar elszublimál, elpárolog, de ügyelni kell rá, hogy ezt ne zárt térben tegye.

3.2.9 Lányokat is érdekli az üstökösök témája

Volt lehetőségem egy gimnazista lánycsoportnak is előadást tartani az üstökösökről, majd üstökösrag-modellt készíteni. A szárazjeget sokrétűen felhasználják a vendéglátóiparban, így általában élelmiszertisztaságú szárazjeget lehet vásárolni. Megfelelő higiénikus szabályok betartásával (amely középiskolás lányok között könnyen megvalósítható), még egyszerű „fagyi” készítést is beiktattunk a kísérletek után. Bár sok jobbnál jobb recepttel van tele az internet, tantermi körülmények között egy nagyon egyszerű megoldást választottunk, gyümölcsjoghurtba kevertük a szárazjeget, illetve ezt megbízható lányokra bíztuk, akik egy robotgép segítségével érték el a fagylalt állagot. Az eredmény finom volt, mindenkinek tetszett a szénsavassága is. Erre a délutáni foglalkozásra egy tanév végi meleg napon került sor, így a fagylaltunk mellett az üdítőnket is (kevés) szárazjéggel tettük hideggé. Nagyon fontos itt is a tanári felügyelet, mert egy esetleg kicsit hideg üdítőtől csak torokfájása lehet egy diáknak (ezt is igyekeztünk elkerülni), de egy esetlegesen hideg üdítővel lenyelt szárazjégdarabnak már komolyabb (akár életveszélyes) következménye is lehet. Fontosnak tartom, hogy mindig legyen felnőtt segítőnk is, mert a szárazjéggel való kísérletezés igen veszélyes is lehet. Nagyon kell arra is vigyázni, hogy a szárazjégtartályhoz se férjenek hozzá a diákok, hiszen kíváncsiságuk nem párosul kellő elővigyázatossággal.

Nagyon érdekes hasonlat is napvilágot látott már az üstökösökkel kapcsolatosan, sült fagylalthoz hasonlították őket [58]. A Nap közelében az üstökösök külső rétege, amelyből már a gázok elillantak, szinte „rásül” a belső részre, egy viszonylag kemény és egyben hőszigetelő réteget alkotva, amely akadályozhatja az üstökösrag illékony anyagainak szublimálását. Természetesen egy ilyen modell elkészítése legfeljebb vendéglátóipari középiskolában képzelhető el. Az interneten is fellelhető sült fagylalt receptek lényegében megfelelőek kis

módosítással, az üstökösök fekete színét könnyen megvalósíthatjuk, kakaó, csokoládé használatával. Az elkészült sült fagyalt modellt is megszórhatjuk ezekkel az anyagokkal, esetleg folyékony csokoládéval önthetjük le. A modell legfeljebb kinézetében, és a külső kemény, hőszigetelő rétegével hasonlít az üstökös magokra, de csóvaképződést már nem tudunk mutatni. Egy ilyen bemutató előnye, hogy a modellt meg lehet enni végül. Ismerve egy igazi üstökös összetételét az inkább mérgező és kellemetlen szagú és talán az íze is undorító lenne, semmi esetre sem ehető.

Kiseb diákok papírból is készíthetnek üstökös modellt, amely segítségével megtaníthatjuk nekik az üstökös részeit, kómáját, csóváját.

Minden olyan tevékenység, amelyet szívesen végeznek a diákok és közben valamilyen üstökösrel kapcsolatos tudásra is szert tesznek hasznos és segíti a tanultak hosszú távú megmaradását. A látványos üstökös mag modell készítését egyre több helyen alkalmazzák kísérleti bemutatókon, science centerekben, neves napok (például Kutatók éjszakája) programjainak színesítésére.

Természetesen az üstökösök témájával nemcsak önmagában érdemes foglalkozni, hanem jó alkalom a kapcsolódó ismeretek előhozására is. Gondolhatunk itt az aszteroidákra, vagy a Naprendszer, mint kozmikus környezetünk megismerésére, különös tekintettel a külső tartományaira, amelyek felfedezése napjainkban zajlik. Az üstökös egyes részeinél zajló folyamatok megismerése szintén aktuális és fontos kutatásokhoz vezet. A csóva megfigyelésével az űridőjárásról tudhatunk meg többet, amely elengedhetetlen a műholdak (és ezzel legtöbb földi informatikai eszközünk) biztonságos működtetéséhez. A csóvát alkotó plazma tulajdonságai sem teljesen ismertek még. Az űr jeges anyagaiban, mint például az üstökösök magjában, azok felületén képződő szerves anyagok keletkezésének mechanizmusát vizsgálva olyan kérdésekre keresik a választ, mint a (földi) élet eredete [59].

4 Új utak keresése a Kepler-törvények tanításánál

A bolygók mozgása hosszú időn keresztül foglalkoztatta az emberiséget. Fontos tanítanunk az ezzel kapcsolatos elképzeléseket, világképeket, és érdemes Kepler kitartó munkáját is bemutatni, ahogy törvényeihez eljutott. A Kepler-törvények tanításához kapcsolódó tévképzeteket, a témát érdekesebbé tevő ismereteket, módszereket, tevékenységeket említek meg a következőkben. Tanítási tapasztalatom, hogy Kepler törvényeit jobban megértik, megjegyzik diákjaink, ha tudománytörténeti érdekességeket és a legújabb tudományos eredményeket is felhasználjuk a tanítás során. Kepler személyéről is érdemes beszélni külön kitérve az asztrológiával való kapcsolatára. Ebben a fejezetben a bolygómozgás törvényeinek megértését segítő, illetve a téma iránti érdeklődést felkeltő lehetőségeket tárgyalom. Ez a fejezet a harmadik tézisem háttéranyagát fejt ki [S2].

4.1 Kepler személye, kapcsolata az asztrológiával, tudománytörténeti és irodalmi vonatkozások

Simonyi Károly szerint Johannes Kepler (1571-1630) „a tudománytörténet egyik legizgalmasabb egyénisége” [60]. Kepler mozgalmas, sokszor kalandos életének történeteivel színesíthetjük a kapcsolódó fizika- vagy földrajzórákat. A 4. és 5. függelékben bővebben írok a témáról, ebben a fejezetben csak megemlítés szintjén sorolom fel a fontosabb ismereteket.

Több magyar nyelvű életrajzi regény is megjelent Keplerről és a tudománytörténettel kapcsolatos művekben is megtaláljuk alakját. Száva István: Az ég törvénye című könyve [61] hiteles életrajzi regénye Keplernek, míg Arthur Koestler: Alvajárók műve is [62] részletesen foglalkozik vele, több más híres tudós mellett, hangsúlyozva az Univerzumról alkotott képünk változásában játszott jelentős szerepét. Mind Kepler személye, mind munkássága jelentős hatással volt több utána élt híres tudósra, közülük itt csak Einstein méltató szavait idézem Keplerről [63]: „Éppen a mi gondoktól terhes és mozgalmas világunkban, amelyben olyan nehéz az embereknek és az emberi dolgoknak örülni, vigaszt nyújt számunkra, ha olyan nagy és szerény emberekre gondolhatunk, mint amilyen Kepler volt. Olyan időben élt, amikor a természeti jelenségek lefolyásának törvényszerű voltát még korántsem ismerték. Milyen nagy lehetett hite ebben a törvényszerűségben, amely erőt adott neki ahhoz, hogy a bolygók mozgását

empirikusan, és e mozgások matematikai törvényszerűségeit évtizedek türelmes és fáradságos munkájával kutassa, magányosan, senki által sem támogatva, s csak kevesek által megértve.”.

Kepler élete, egyénisége mély hatást gyakorolt Madách Imrére is, Az ember tragédiája című művének egyik kulcsszereplője Kepler. A magyar irodalom tantárgyhoz is kapcsolódhatunk Madách ezen írásával, amelyet diákjaink 11. évfolyamon tanulnak. Mindenképpen érdemes Keplerrel kapcsolatosan az asztrológiáról és egyéb áltudományokról is beszélni diákjainknak. Kepler nem hitt az asztrológiában (csillagjóslásban), de anyagi helyzete rákényszerítette ennek művelésére, hiszen korábban a horoszkópkészítést megfizették, míg az udvari csillagász állásának jövedelme sokszor csak ígéretként létezett. Kepler maga így ír erről: „Az asztrológia, a csillagászat leánya, bár hóbertos leánya, és vajon nem természetes-e, hogy a leány táplálja az anyját, ha az különben éhen halna.” [64]. A téma tárgyalása fontos, hiszen napjainkban is sokan hisznek a horoszkópokban, a média és a világháló is tág teret ad az asztrológiának.

A legújabb fizika és földrajz (okos)tankönyvekben²⁶ szerepel az asztrológia (csillagjóslás) és asztronómia (csillagászat) megkülönböztetése, az asztrológia áltudományos minősítése. A nyolcadikos és kilencedikes fizika tankönyvekben, valamint a kilencedikes földrajz tankönyvben néhány mondatot írnak ezzel kapcsolatban, míg a tizenegyedik osztályos fizika tankönyv egy egész órányi tananyagban foglalkozik a tudomány, áltudomány és vallásos hit megkülönböztetésével²⁷. Itt kap hangsúlyos helyet az asztrológia tárgyalása is, az anyagrész címének is a következő kérdést választották: „Meg van írva a csillagokban?”. Igazodva az új oktatástechnikai trendekhez egy rövid, 8 perces videóban magyarázzák el a csillagjóslást és működését: „Kamuvadász sorozat: A megismerés útjai: asztrológia”. Ez a videó több más tantárgynál és tananyagnál is megtalálható például tizenkettedikes biológia okostankönyvben „A megismerő lény” anyagrésznél is. Fontosnak tartom, hogy tanárként hangsúlyozzuk, hogy az asztrológia nem a megismerésnek, hanem a jóslásnak az egyik módja. Az asztrológia kihasználja azt, hogy az emberek szeretnék ismerni sorsukat, tudni, hogy mi fog velük történni a jövőben. A csillagjósok az égitestek Földről látszó geometriai helyzetéből, illetve ennek változásából következtetnek az emberi jellemre, jövőbeli történésekre. Az asztrológia a geocentrikus világkép alapján, annak fogalomrendszerével dolgozik. A régi korokban az emberek isteneknek tekintették a Napot, Holdat, bolygókat, a csillagképek is egy-egy nép mondavilágát tükrözik. A megmagyarázhatatlan jelenségeket, történéseket természetfeletti beavatkozásoknak tekintették, az égbolt isteneinek is hatalmat tulajdonítottak például az

²⁶ <https://www.nkp.hu/okostankonyvek>

²⁷ https://www.nkp.hu/tankonyv/fizika_11/lecke_06_036

emberek életének alakulása felett, ez szolgál az asztrológia alapjául is. Ugyan az emberek már nem tartják isteneknek az égitesteket, nagyrészt elvetik a földközéppontú világméretű képét is, sajnálatos módon mégis olvassák a horoszkópokat és nem kevesen vannak, akik hisznek is bennük. Az asztrológiát „J. S. Bailly csillagász már a 18. század végén az emberi értelmet valaha is pusztító leghosszabb betegségnek minősítette” [65].

A témához kapcsolódik a világvége jóslatok egy része is, amelyekben nem egyénre szabottan, hanem a világ egészére szól a jóslat. A bolygókhoz kapcsolódóan különös jelentőséget tulajdonítanak az égbolton való közeli láthatóságuknak, az úgynevezett együttállásoknak.

Természetesen a bolygók valódi helyzetének ismerete fontos például kozmikus környezetünk, a Naprendszer felfedezése, megismerése szempontjából. Az 1970-es és 1980-as években a külső bolygók ritka, közelítően egyirányban állása tette lehetővé a Voyager űrszondák segítségével többek között az Uránusz és a Neptunusz meglátogatását, lefényképezését [66]. Azóta sem indult űrszonda ezekhez a bolygókhoz csak a Plútó törpebolygóhoz, amelyik végül kimaradt a Voyager űrszondák útvonalából.

Diákjainkat érdemes megismertetni planetáriumi programokkal, amelyek segítségével megnézhetik egy adott időpontban az égboltot, de léteznek olyan honlapok is, amelyeken a bolygók valóságos helyzetét láthatjuk. Van olyan honlap²⁸ is, amelyen változtathatjuk a dátumot, attól függően, hogy mikor szeretnénk ismerni a bolygók helyzetét.

4.2 Kepler törvényeinek helye a tantervben, tankönyvekben

A legújabb NAT [36] is fontosnak tartja, hogy diákjaink ismerjék a bolygók mozgásának jellegzetességeit, különös hangsúllyal bolygónkra, a Földre. Két tantárgynál is kilencedik évfolyamon ajánlott a bolygómozgás tárgyalása mind fizikából, mind földrajzból. Ehhez igazodva e két tantárgy kilencedikes tankönyveiben található Kepler bolygómozgást leíró három törvényét.

Az elmúlt évtizedek tankönyveit vizsgálva, szintén a kilencedikes földrajz tankönyvekben szerepelnek a bolygómozgás törvényei, hiszen ezen évfolyamon tanítják a csillagászati ismereteket az egyéb természetföldrajzi tananyagok mellett. A fizika tankönyveknél találunk

²⁸ <http://www.fourmilab.ch/cgi-bin/Solar>

példát a kilencedikes tárgyalásra [67], [68] és előfordulhat a végzős évfolyam tankönyvében is [69], [70], [71]. Ennek magyarázata, hogy lehet a bolygók mozgását az egyéb mozgásokkal együtt a mechanika témakörén belül, illetve a csillagászati ismeretek között is tanítani. Általában a világképek fejlődésével, a kopernikuszi fordulat bemutatásával, tudománytörténeti keretben történik a feldolgozás.

4.3 A bolygómozgást leíró Kepler-törvények tanítása, a diákok motiválása a témával való foglalkozásra

A következőkben a bolygómozgás törvényeinek tanítása során felmerülő nehézségeket, tévképzeteket, továbblépési lehetőségeket ismertetem saját tanítási tapasztalataim és szakirodalmi források alapján külön mindhárom törvénynél. Olyan tevékenységeket, színes, interaktív, megbízható (ingyenes) honlapokat ajánlok, amelyekkel tapasztalataim szerint motiválhatjuk diákjainkat a témával való foglalkozásra, egyes részekben való elmélyedésre.

4.3.1 Kepler törvényeinek tárgyai a bolygók

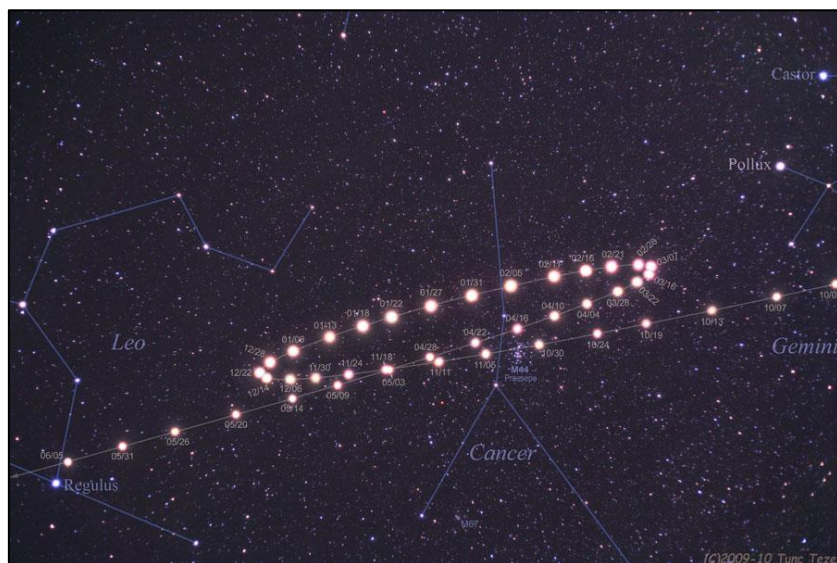
Kepler törvényeit a bolygók, főleg a Mars mozgását tanulmányozva ismerte fel. A tanítás során is elsősorban a bolygókra alkalmazva mondjuk ki Kepler három törvényét, a bolygómozgás ismertetésekor. Érdeemes tisztázni mit is értünk a bolygó szó alatt, hiszen ma már létezik definíció erre a fogalomra. A Nemzetközi Csillagászati Unió (IAU), 2006-ban osztályozta, definiálta a Naprendszer égitestjeit, köztük a bolygókat, új kategóriát is bevezettek, a törpebolygókét. A Naprendszer égitestjeit négy különböző csoportba sorolták a legújabb ismereteinknek megfelelően:

Bolygónak nevezzük azt az égitestet, amely a Nap körül kering, és elegendően nagy tömegű ahhoz, hogy kialakulhatott a hidrosztatikai egyensúlyt tükröző közel gömb alakja, valamint tisztára söpörte a pályáját övező térséget. Ezen meghatározás alapján a Naprendszerben nyolc bolygó található: a Merkúr, a Vénusz, a Föld, a Mars, a Jupiter, a Szaturnusz, az Uránusz és a Neptunusz. A Plútó és a hozzá hasonló égitestek *törpebolygók*, melyek szintén a Nap körül keringenek, elegendően nagy tömegűek ahhoz, hogy kialakulhatott a hidrosztatikai egyensúlyt tükröző közel gömb alakjuk, de nem söpörték tisztára a pályájukat övező térséget. A Nap körül

keringő összes többi objektumot a *Naprendszer kis égitestjei* közé soroljuk. A *holdak* a bolygók körül keringő égitestek [72].

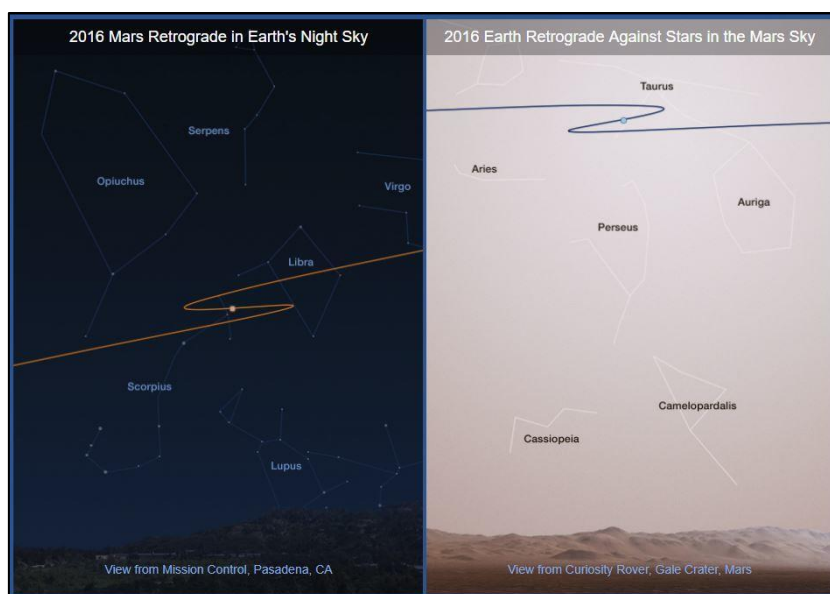
Ez a csoportosítás sem elég egyértelmű, sokan próbálnak megfelelőbb, nemcsak a Naprendszerre érvényes meghatározást adni, de egyelőre még a fent említett a hivatalos álláspont. Már az oktatásban is szerepel tananyagként a Naprendszer ezen felosztása, de még egy jó évtizede diákjaink igen nehezen tudták megfogalmazni, hogy milyen égitestet is értenek bolygó alatt. Általában csak azt említették, hogy nincs önálló fénye. Érdekes tanulóinknak bemutatni, hogyan jutottak el a csillagászok ehhez az azóta is sok vitát kiváltó osztályozáshoz, mert különben nehezen értik meg a pontos meghatározás szükségességét.

Úgy tapasztaltam, hogy diákjaink nem ismerik a bolygók égbolton látszó mozgását sem, ezért fontosnak tartom ezt is megmutatni nekik. Leghatásosabb az lenne, ha napról napra figyelnék a bolygók (például a Mars) látszó mozgását, de ez nagyfokú kitartást és kevésbé fényszennyezett helyszínt igényel ráadásul esti, éjszakai időpontban. Ha erre nincs lehetőségünk legalább képen (például az 4.1. és 4.2. ábra), vagy szimuláción kell megmutatnunk egy ilyen hátráló mozgást.



4.1. ábra. A Mars retrográd (hátráló) mozgása az égbolton. (Tunc Tezel)

Igazi érdekesség a Mars egén a Föld hátráló mozgásának bemutatása, amelyet a Curiosity marsjáró készített és az 4.2. ábrán látható.



4.2. ábra. Baloldalt a Mars retrográd mozgása (a Földről nézve). Jobboldalt a Föld retrográd mozgása a Marsról nézve.

A 6. függelékben ismertetem azt a tudománytörténeti utat, amely a bolygók definiálásához vezetett és ezzel együtt a Naprendszer megismeréséhez. A helyes világkép alapján természetesen a bolygók égbolton való mozgása is magyarázatot nyert.

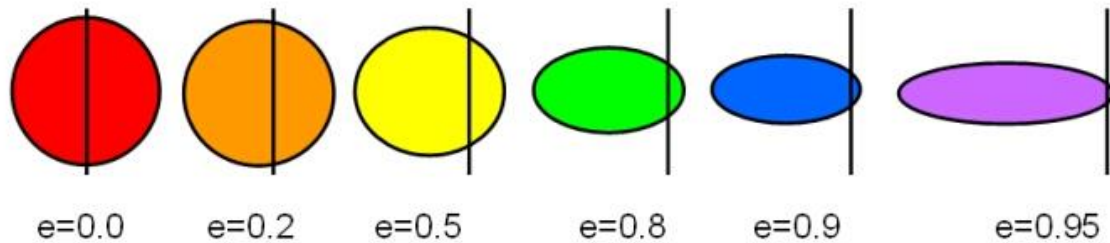
4.3.2 Az égitestek pályái

Matematikával való kapcsolódási pont: az ellipszis

Általánosan elterjedt a diákok között az a tévképzet, hogy a bolygók pályája kör, ezért nagyon fontos az ellipszisekkel való foglalkozás fizika vagy földrajz órákon [73]. Célszerű az ellipszis definíciójával is megismertetni a diákokat, mert sajnálatos módon matematikából sem kell már tanulniuk.

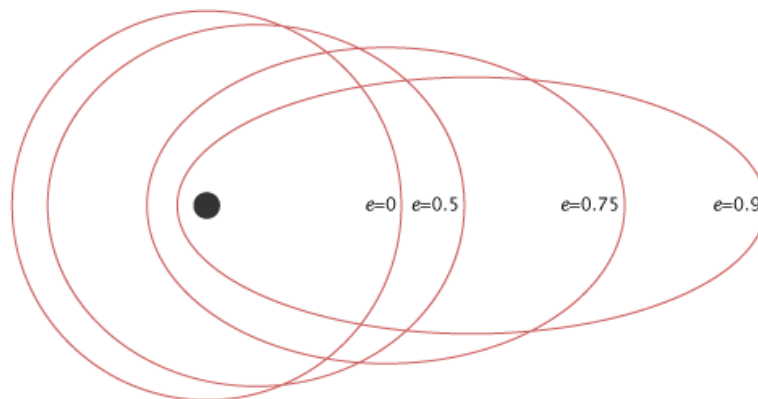
Az ellipszis egy kúpszelet, ha egy forgáskúpot olyan síkkal metszünk, amely minden alkotót metsz, de nem merőleges a forgástengelyre, akkor síkmetszetként ellipszist kapunk. Más meghatározásként az ellipszis olyan pontok halmaza egy síkban, amelyeknek két megadott ponttól (fókuszpontoktól) mért távolságuk összege állandó. Míg az első definíció lehetőséget ad az égitestek pályáinak általános tárgyalására, addig a második alapján könnyen megrajzolhatunk egy ellipszist. Tanulócsoporttól és a rendelkezésünkre álló időtől függ, hogy milyen mélységben tárgyaljuk az ellipszist és tulajdonságait. A (numerikus) excentricitást (jele: e) érdemes az ellipszis lapultsága mértékeként ismertetni és egyszerűen a fókuszpontok

távolságának, és a nagytengely hányadosaként meghatározni. Fontos példákat mutatni különböző excentricitású ellipszisekre, köztük is kiemelten olyanokra, amelyek a bolygópályákhoz hasonlóak, vagyis alig különböztethetők meg a körtől. Különböző lapultságú ellipszisek összehasonlítására látunk példát egy csillagászati enciklopédiai honlap²⁹ „Orbital Eccentricity” címszavánál (4.3. ábra):



4.3. ábra. Különböző excentricitású ellipszisek, a függőleges vonalak az egyik fókuszpont helyzetét mutatják, azon haladnak át.

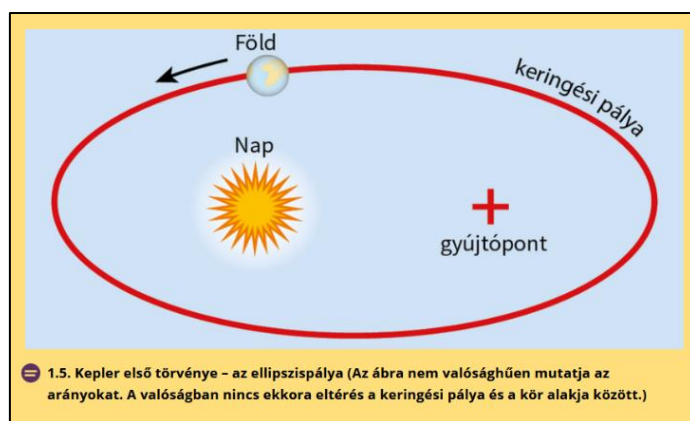
Hasznos közös fókuszú különböző excentricitású ellipsziseket is tanulmányozni (4.4. ábra), amely példa Föld körül keringő különböző excentricitású műholdpályákra is.



4.4. ábra. Azonos fókuszú, különböző excentricitású ellipszisek (műholdpályák). (NASA, Robert Simmon)

A tankönyvi ábrázolásoknál a bolygópályák ellipszisei igen nagy torzítással (0,6-0,8 excentricitással) szerepelnek, jól elkülönülnek a körpályáktól. Fontos erre felhívni a figyelmet, ahogy a kilencedikes földrajz okostankönyvben is teszik (4.5. ábra).

²⁹ <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/o/Orbital+Eccentricity>



4.5. ábra. Tankönyvi ábra (https://www.nkp.hu/tankonyv/foldrajz_9/lecke_01_001)

Sajnos ez az ábra is megtévesztő, mert a gyújtópontok rosszul vannak berajzolva, túl közel a középponthez.

A nagy lapultságú bolygópálya ábrázolások is hozzájárulnak ahhoz a tanulói tévképzethez, miszerint a bolygók pályája nagy excentricitású ellipszis. Ennek következményeként helytelenül az évszakok váltakozásának okaként is a Naptól való távolság változását feltételezi számos diákunk [74].

A bolygópályák valóságghű ábrázolását célszerű többféle módon is megmutatni, rögzíteni diákjainkban, az ábrákon kívül ma már szimulációkat is alkalmazhatunk ehhez, amelyekre a következőkben ajánlok néhány példát.

A Naprendszer bolygóinak aktuális helyzetét mutatja egy honlap³⁰, amelyen többek között a dátumon és a rálátás szögén is lehet változtatni.

Egy magyar nyelvű honlapon³¹ külön-külön tanulmányozhatjuk a bolygók, valamint a Plútó törpebolygó és a Halley-üstökös pályáit, az azon való mozgásukat (sebességük változását), amely nagyon hasznos Kepler első két törvényének szemléltetéséhez.

Célszerű bemutatni együtt is a bolygópályákat, a bolygók mozgását a Naprendszerben. Egy honlapon³² többféle fizikával kapcsolatos szimulációt találunk, köztük külön a belső és a külső bolygók keringését tanulmányozhatjuk. (Az egész Naprendszer mozgásának vizsgálatakor a belső bolygók pályái megfigyelhetetlenek lesznek ezért célszerű külön vizsgálni a belső és

³⁰ <http://fourmilab.ch/cgi-bin/Solar>

³¹ https://www.walter-fendt.de/html5/phhu/keplerlaw1_hu.htm

³² https://galileoandstein.phys.virginia.edu/more_stuff/Applets/home.html

külső bolygókat.) Az említett honlapon láthatjuk Ptolemaiosz modelljét, sőt a Mars keringésénél összehasonlíthatjuk Kopernikusz modelljével is.

Tudománytörténeti érdekességek: Hüpatia megérzése, Kepler módszere, Newton ágyús gondolatkísérlete

A bolygómozgás témája általában érdekli a fiúkat, elég a hozzá kapcsolódó űrutazásra vagy a műholdakra gondolni. A lányok érdeklődését felkelthetjük például egy női tudósról, Hüpatiáról szóló filmmel. Az ellipszis bolygópálya gondolata ugyanis megjelent már az alexandriai Hüpatia (360-415, görög-római matematikus, csillagász) munkájában is. Életéről Agora címmel film készült, amelynek egyik jelenetében Hüpatia ellipszist rajzol a homokba, miközben a bolygópályákról elmélkedik [75]. A legújabb oktatási módszerek közé tartozik filmek, filmrészletek bevonása a tanításba. A megfelelően kiválasztott film megnézése nemcsak szórakoztat, hanem élményszerűvé teszi az ismeretszerzést, tanulást. Az Agora is olyan film, amelyet felhasználhatunk például a Naprendszer modelljeinek, világképünk változásainak történeti bemutatásakor, tanításakor. Ehhez egy honlapon³³ teljes tananyag feldolgozást, segédanyag gyűjteményt találhatunk a mindenre kiterjedő módszertani tanácsok mellett.

Kepler első törvénye szerint a bolygók ellipszis pályán keringenek a Nap körül. Ennek felismerése azért volt nehéz, mert a bolygópályák alig térnek el a körtől. Az eltérés a Merkúrnál és a Marsnál jelentősebb, észlelési szempontból a Merkúrt nehezebb megfigyelni, így a Mars pályájának alakját vizsgálták. Tycho de Brahe igen pontos megfigyelési adataiból Kepler többévi kitartó munkával ismerte fel a helyes görbét, az ellipszist. Módszerét a kilencedikes fizika okostankönyv röviden ismerteti³⁴.

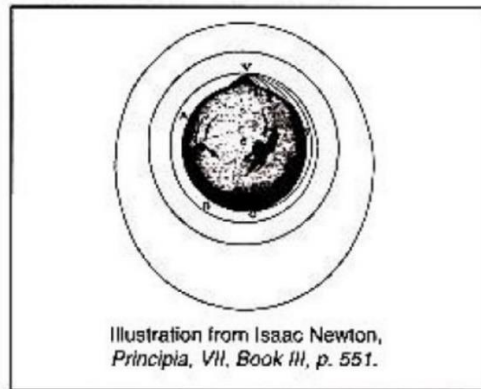
A bolygópályákhoz kapcsolódóan célszerű olyan szimuláció bemutatása is, amelynél Kepler első törvényéhez kapcsolódóan kipróbálhatjuk, hogy különböző helyeken különböző kezdősebességgel milyen pályán fog mozogni az odaképzelt bolygónk a Nap körül³⁵. Külön érdeme ennek a szimulációnak, hogy a sebességet vektorként (nyílként) kell berajzolni, így a sebesség vektorjellegének megerősítését is segíthetjük.

³³ <https://teachwithmovies.org/agora/>

³⁴ https://www.nkp.hu/tankonyv/fizika_9/lecke_04_015

³⁵ https://galileoandstein.phys.virginia.edu/more_stuff/Applets/Kepler/kepler.html

Maga Newton is fontosnak tartotta a kezdősebességtől függően létrejövő pályák bemutatását. Gondolatkísérletében egy igen magas hegyre képzelte egy ágyút, amelyből nagy sebességekkel repültek ki vízszintes irányban a lövedékek (4.6. ábra). Ilyen elrendezés mellett eltekintett a légellenállástól, illetve a Föld forgását sem vette figyelembe.



4.6. ábra. Newton ágyús gondolatkísérletének szemléltető ábrája. (Isaac Newton: Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Book III.)

Ezzel a példával nemcsak azt tárgyalta, hogy hogyan változik egy magas hegyről kilőtt ágyúlövedék pályája a kezdősebességtől függően, hanem azt is bemutatta, hogy milyen körülmények között válhat egy földi tárgy „égitestté”, mai szóhasználattal, mesterséges holddá. Ugyan Newton gondolatkísérletét megvalósítani nem tudjuk, de egy szimuláción³⁶ keresztül bemutathatjuk diákjainknak. A sebességet 2 km/s értéktől változtathatják 11 km/s értékig tanulóink ennél a szimulációnál. A beállított sebességhez kirajzolt pályák alapján játszva érthetik meg a pályák sebességfüggését és a kozmikus sebességek határszerepét.

Az égitestek pályáit alakító gravitációs erőn kívül az (érintőirányú) sebesség szerepének megértése is fontos diákjaink számára [76], ehhez segítenek például a fent említett szimulációk.

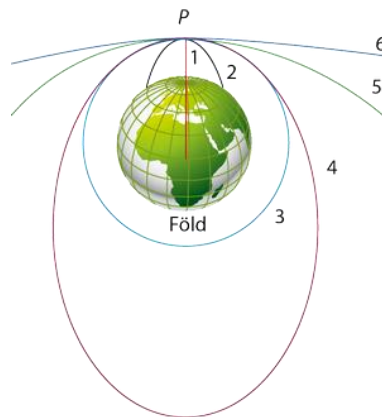
Kepler első törvényének általánosítása: a Naprendszer égitestjeinek pályái

Remélhetőleg diákjainknak feltűnik a téma tanulásakor, hogy a bolygók pályája nem függ a bolygók tömegétől. Magában a Kepler-törvényekben sincs szó tömegről. A szimulációkban általában nem szerepel változtatható mennyiségként, például a már említett Newton-féle ágyús

³⁶ http://galileoandeinstein.phys.virginia.edu/more_stuff/flashlets/NewtMtn/home.html

kísérletnél sem kerül említésre a lövedék tömege. Vannak olyan szimulációk³⁷ is, ahol a pálya tömegtől való függését is kipróbálhatjuk. Ebben a szimulációban, a Nap-Föld, Nap-Föld-Hold, Föld-műhold rendszerekben változtatható tömegek esetén láthatjuk a pályát, a sebesség- és erővektorokat. Szépen bemutatatható, hogy a keringő test tömegétől nem függ a pálya alakja, de a másik test tömegétől, amely körül kering, már igen. Ennél a szimulációnál megfelelő beállítással (például nagy „holdtömeg”, kis „földtömeg”) észrevehetjük, hogy nemcsak a keringő test mozog, hanem az is, amelyik körül kering. A gravitációt „kikapcsolva” megfigyelhető a bolygó egyenes vonalú egyenletes távolodása is. Lehet modellként és méretarányosan is működtetni ezt a szimulációt.

A kilencedikes fizika okos tankönyv is ajánlja ezt a szimulációt (a Kepler-törvényeket megelőzően szereplő) Műholdak című leckéjénél. Ennél a résznél találhatjuk a műholdak sebességtől függő pályáit is egy ábrán és a hozzá fűzött leírásként:



4.7. ábra. Vízszintesen elhajított test pályái a sebesség függvényében. (Tankönyvi ábra³⁸)

A tankönyvi ábra alatti szöveg: „Vizsgáljuk meg, milyen pályán mozognak a földfelszín felett vízszintesen elhajított testek a hajítási sebesség függvényében (4.7. ábra):

1. $v=0$, egyenes
2. $v < v_I$, ellipszis, a Föld középpontja a távolabbi fókuszpont
3. $v = v_I$, kör (speciális ellipszis)
4. $v_I < v < v_{II}$, ellipszis, a Föld középpontja a közelebbi fókuszpont
5. $v = v_{II}$, parabola
6. $v > v_{II}$, hiperbola”

³⁷ https://phet.colorado.edu/sims/html/gravity-and-orbits/latest/gravity-and-orbits_en.html

³⁸ https://www.nkp.hu/tankonyv/fizika_9/lecke_03_013

Ez a lecke tárgyalja a kozmikus sebességeket is (bár azt helytelenül állapítja meg, hogy a Földről elegendő 12 km/s sebességgel elindítani egy műholdat, hogy örökre elhagyja a Naprendszert [77]).

A tankönyvi, műholdas példához hasonlóan osztályozhatjuk a Naprendszer égitestjeinek a pályáját is kiemelve az egyes égitest csoportok jellemzőit. Az említett pályagörbék mind kúpszeletek. A bolygók körpályához közeli ellipszispályán keringenek a Nap körül, a körpályától való eltérés szemléltetéséül felsorolom az excentricitásukat a 4.1. táblázatban [78].

Bolygó neve	Merkúr	Vénusz	Föld	Mars	Jupiter	Szaturnusz	Uránusz	Neptunusz
Bolygópálya excentricitása	0,2056	0,0068	0,0167	0,0934	0,0494	0,0556	0,0472	0,0086

4.1. táblázat. A Naprendszer bolygópályáinak excentricitása

A törpebolygók ellipszispályáinak lapultsága általában nagyobb a bolygókénál [79]:

Törpebolygó neve	Ceres	Makemake	Haumea	Pluto	Eris
Pályaexcentricitás	0,0798	0,1613	0,1887	0,2488	0,4418

4.2. táblázat. Törpebolygók pályáinak excentricitása

A Naprendszer kisebb égitestjeinél még változatosabb az ellipszispályák lapultsága és több kis égitest pályája nyitott, vagy parabola, vagy hiperbola. Az üstökösöket pályáik szerint is csoportosítják: a periodikusan megjelenők pályája ellipszis ($0 \leq e < 1$), a nagyszámú nem periodikus üstökös pályája parabola ($e = 1$) vagy hiperbola ($1 < e$).

Az aszteroidák, vagy más néven a kisbolygók nagyrészt a Mars és a Jupiter között keringenek ellipszis pályákon. Közülük a legbelső csoport a Hungaria-család, amelynek első felfedezettje a Hungaria kisbolygó (1898, Max Wolf, 434 Hungaria, A898 RB) excentricitása 0,074, egy másik tagja pedig az Eger kisbolygó (1982, Lovas Miklós, 3103 Eger, 1982 BB), amelynek excentricitása 0,354, tehát vannak szinte körpályájúak és lapultabb ellipszispályájúak is [80]. A kisebb égitestek pályája egy közeli bolygó gravitációs vonzása miatt könnyen meg is változhat, nem tudjuk pontosan egy kúpszelet görbével leírni azokat.

A Rosetta űrszonda 12 éves útjának a pályáját is érdemes bemutatni egy kisfilmen³⁹ diákjainknak. Szépen látszik a különböző ellipszis ívekből álló pálya, megfigyelhető, hogy a változások bolygóval való találkozás (megközelítés) eredményei (gravitációs lendítőhatás).

Nagyon fontos figyelni, főleg a földközeli égitestek (például az említett Hungaria-család tagjainak) pályamódosulásait, hogy mielőbb felfedezzük a földi életre veszélyt jelentő, bolygónk felé száguldókat. Egyre több aszteroida kereső projekt, szervezet létezik, így azt is tudjuk, hogy az elkövetkező években nagy méretű becsapódástól nem kell tartani. Ezt fontos hangsúlyozni, mert a sok katasztrófa film, szenzációhajhász hír feleslegesen gerjeszthet félelmet az embereken, diákjainkban.

Új égitestek is felfedezhetők a már ismertek pályájának vizsgálatával, a zárt ellipszis pályáktól való kis eltérésekből. A Neptunusz létére is az Uránusz pályaháborgásaiból következtek. A Naprendszer felfedezése, egyre jobb megismerése napjainkban is folytatódik. Egyre távolabbi égitesteket fedeznek fel a Naprendszer külső régióiban és főleg a médiában jelenik meg újra és újra a kilencedik bolygó kérdése. Egy animáción⁴⁰ megmutathatjuk a Naprendszer nagyobb égitestjeinek pályáját tanulóinknak, a Naptól kifelé haladva, végül a kilencedik bolygó lehetséges pályáját is láthatjuk. Az ismeretlen bolygó keresése a WISE űrszonda adatainak segítségével mindenki számára lehetséges. Egy citizen science projekt⁴¹ részletes eljárást mutat ehhez. Ennek az önkéntes kutatási programnak nemcsak az ismeretlen bolygó megtalálása a célja, hanem a Naprendszer külső részeinek, illetve a Naprendszeren kívüli közeli tartományoknak a feltérképezése is. A kutatás eredményeként több közeli barna törpe csillagot fedeztek már fel. Érdemes diákjainknak is megmutatni ezt a kutatási lehetőséget, talán kedvet kapva hozzá ők is felfedezhetnek új égitesteket [81].

Bolygópályákkal kapcsolatos kísérletezés, a diákok bevonása, munkáltatása

Fontos a diákok érdeklődését valós kísérletezéssel is fenntartani, lehetőséget biztosítani, hogy fizikailag vizsgálhassanak meg jelenségeket. Szintén fontos alapelv a hasonlóságok alkalmazása, amelyek segítik a megértést. Erre találunk példát a bolygómozgásokkal kapcsolatban is, kifeszített gumilepedőn golyók gurításával játszva mutathatunk meg fontos

³⁹ https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/01/Chasing_a_comet

⁴⁰ https://www.nasaspaceflight.com/wp-content/uploads/2021/02/Planet_Nine_animation.gif

⁴¹ <https://www.zooniverse.org/projects/marckuchner/backyard-worlds-planet-9>

összefüggéseket. A kifeszített, sík gumilepedőn gurított, nem túl nehéz golyó jó közelítéssel egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Nagy tömegű golyó (vagy egyéb nehezek) behajlítja a gumilepedőt, görbült felületet hoz létre a környezetében. Ha csak leteszünk egy golyót a bemélyedés közelébe, akkor egyenesen a nehéz test felé fog gurulni majd beleütközik abba. A bemélyedés közelébe gurított, (érintőleges) sebességgel rendelkező kisebb golyó már eltérül egyenes pályájáról, kis ügyességgel több ellipszist is megfigyelhetünk a mozgása során, de megfelelőbb a mélyedésbe spirálozó mozgásról beszélni, mert a súrlódást nem tudjuk kiküszöbölni. Kísérletezhetünk a különböző sebességgel begurított golyók pályájának megfigyelésével, elérhetjük, hogy parabola (vagy hiperbola) pályán távozzon a golyónk a nagy tömegű test „vonzásából”. Megfigyelhető, hogy a központi testhez közelebb gyorsabban, míg messzebb lassabban keringenek a golyók. Megvalósítható a Nap-Föld-Hold rendszer egy-két keringése is, sőt nagy számú golyó „össze-vissza” begurításával egy bolygórendszer kezdeti, ütközésekkel teli állapotából a Naprendszerhez hasonló, közel körpályák kialakulását is megfigyelhetjük. Láthatjuk, hogy a stabilitás feltétele az egyirányú keringés és a közel kör alakú pályák, hogy elkerüljük a golyók ütközését.

Bemutatható a központi égitest mozgása is, ehhez egy vele összemérhető tömegű golyót kell felé gurítani. A csillagok ilyen imbolygásából következtethető ki, hogy kering körülötte egy másik test, csillag vagy bolygó.

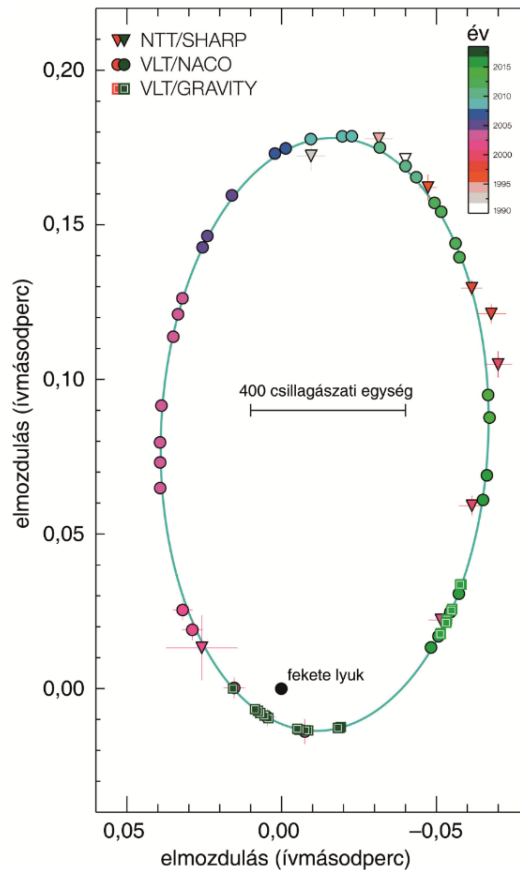
Ezen játékos kísérletezés ugyan nem tesz lehetővé méréseket, pontos összefüggések megállapítását, de látványosságával, a diákok tevékeny részvételével hozzájárul az alapvető jelenségek megértéséhez, megjegyzéséhez. Fontos eredménye ennek a tevékenységnek, hogy az általános relativitáselmélet ismert megállapítását, miszerint a tömegek meggörbítik a teret, teszi szemléletessé. Jól bemutatható, hogy nagy tömegek közelében a testek nem egyenes, hanem görbült pályán mozognak, amíg más testek vagy erők ennek megváltoztatására nem kényszerítik őket.

Természetesen csak a golyók és az égitestek mozgásának látszólagos hasonlóságáról beszélhetünk. Míg a golyók egy kényszerfelületen való súrlódásos mozgást végeznek, addig az égitestek között csak a gravitáció hat.

Ugyan nem nagy anyagigényű ez a kísérlet, de ha nincs mód a megvalósítására legalább egy néhány perces videón célszerű megmutatni tanulóinknak [82].

Egy Nobel-díjat érő ellipszispálya

Kepler első törvényének tanításakor fontos megemlíteni, hogy nemcsak a bolygókra alkalmazható, hanem nagy tömegű vonzócentrum körüli testek keringése is ellipszis pályájú lesz.



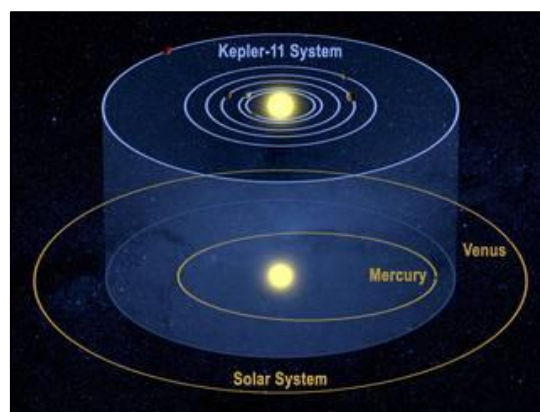
4.8. ábra. Az S2 jelű csillag pályája a Sagittarius A* fekete lyuk körül. Érdeemes felhívni a diákjaink figyelmét, hogy az ellipszispályának egy vetületét látjuk. Az ellipszis vetülete is ellipszis, de a fókuszpont már nem esik egybe a vetület ellipszis fókuszpontjával.

(ESO/MPE/GRAVITY Collaboration)

Galaxisunk közepén levő fekete lyukra is a környezetében levő csillagok mozgásából következtek (4.8. ábra), amely eredményért 2020-ban fizikai Nobel-díjat kapott Andrea Ghez és Reinhard Genzel. Az évek során gyűjtött adatok alapján a Tejútrendszer közepén levő fekete lyuk (Sgr A*) tömegét négy millió naptömegűre becsülték [83]. A galaxisunk közepén levő fekete lyuk körüli csillagok mozgásáról mutathatunk animációkat is diákjainknak, amelyen több csillag mozgását is megfigyelhetik a láthatatlan vonzócentrum körül [84].

Exobolygó pályák, változatos bolygórendszerek

Kepler első törvényének tanításakor célszerű megemlíteni az exobolygókat is, kiterjesztve ezzel Kepler törvényeinek érvényességét a Naprendszeren kívüli bolygókra is. Ugyan konkrét bizonyítékunk Naprendszeren kívüli bolygórendszerekre csak néhány évtizede van, már több ezer éve feltételezték létezésüket és szerették volna tudni, hogy ezek mennyire hasonlítanak a mi bolygórendszerünkre, a Naprendszerre. Kepler nemcsak bolygómozgást leíró törvényeivel járult hozzá a csillagászat fejlődéséhez, hanem az általa fejlesztett lencsés távcsővel is. Emlékére róla neveztek el egy űrtávcsövet is. Talán diákjainknak a Kepler névről először ez az eredményes bolygóvadász űrtávcső jut eszükbe vagy a segítségével felfedezett exobolygórendszerek, amelyek nevükben szintén az űrtávcsőre és így a híres tudósra, Keplerre utalnak. Az exobolygók elnevezésében elfogadott eljárás a felfedezést segítő távcső vagy szervezet említése, így beszélhetünk például a Kepler-11 csillag bolygórendszeréről (4.9. ábra), amely a Kepler űrtávcső első felfedezettjei közé tartozik és rögtön hat exobolygót találtak benne (nevük: Kepler-11b, Kepler-11c, Kepler-11d, Kepler-11e, Kepler-11f, Kepler-11g).



4.9. ábra. A Kepler-11 exobolygórendszer és a Naprendszer belső bolygóinak pályái összehasonlításul. (NASA/Tim Pyle)

A Naprendszerben nyolc bolygó kering, ilyen nagyszámú exobolygót tartalmazó rendszert is találtak már a Kepler-90 csillag körül, de nem ez a csúcstartó, hanem a HD10180 csillag, amely körül kilenc ismert exobolygó kering. Közben más exobolygórendszereket hasonlítunk össze a mi bolygórendszerünkkel, egyre jobban megismerjük kozmikus környezetünket, a Naprendszert, amely egyik kiemelt célja a természettudományos oktatásnak.

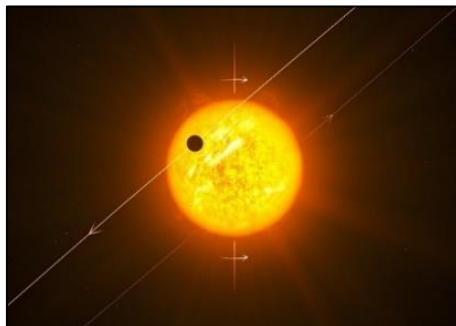
A naprendszerbeli bolygópályák alig térnek el a körtől, közel egysíkúak és egyirányban keringenek a bolygók, csillagunk forgási irányával megegyező irányban (a kezdeti összerpődület megmaradásának következményeként). Mint már korábban is említettem célszerű a

Naprendszer főbb égitestjeinek pályáját és aktuális helyzetét bemutatni diákjainknak egy szimuláció⁴² segítségével. Kinagyíthatjuk a belső Naprendszert, szétnézhetünk egy másik égitestről, űrszondáról, hogy mit és hogyan láthatnánk onnan. Összehasonlíthatjuk az egyes égitesteket, hiszen méretarányos az ábrázolás. Minden objektumról találunk egy képet és egy rövid leírást a legfontosabb adataival.

A 3D Solar System Simulator⁴³ segítségével is nyomon követhetjük a Naprendszer aktuális állapotát, egyes objektumainak mozgását. Tudunk az időn gyorsítani és régebbi időponttól is kezdhethetjük a szimulációt. Az éppen napközben járó üstökösöket is láthatjuk. Itt is találunk további információt az egyes égitestekről, űrszondákról.

Készültek szimulációk az exobolygórendszerek szemléltetésére, bemutatására is. Exobolygórendszereket például a következő interaktív honlapon tanulmányozhatunk: NASA' Eyes on Exoplanets⁴⁴. Nemcsak az exobolygót, hanem a pályáját is megmutatják, sőt összehasonlíthatjuk a Naprendszerben lévő bolygók pályáival is.

Az exobolygók pályái nagyon változatosak, vannak hasonlóak a naprendszerbeliekhez és vannak attól igen eltérőek is. Találunk köztük nagy excentricitású ($e_{\text{HD20782b}}=0,956$), az üstökösökhöz hasonló pályákat és fedeztek már fel retrográd keringésű (a csillagjuk forgási irányával ellentétesen keringő) exobolygókat is (HAT-P-6b) [85]. Vannak a csillagjuk forgássíkjához képest nagy szöget bezáró exobolygó pályák (WASP-8 b, 4.10. ábra) is, amelyek általában retrográd keringésűek is egyben.



4.10. ábra. A WASP-8 csillag és nagy inklinációjú (pályahajlású) bolygókísérője, amely retrográd keringésű. (Művészi alkotás, ESO/L. Calçada)

⁴² <https://eyes.nasa.gov/apps/orrery/#/home>

⁴³ <https://theskylive.com/3dsolarsystem>

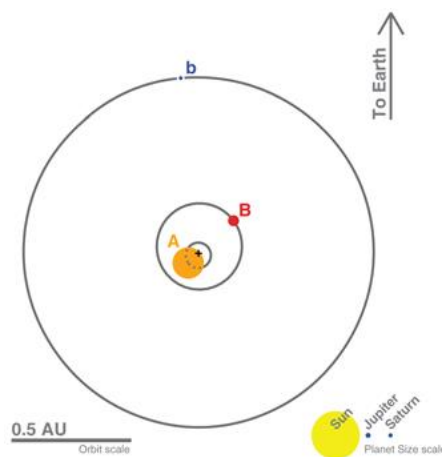
⁴⁴ <https://eyes.nasa.gov/apps/exo/#/>

Bolygórendszerünk egyközpontú, de többes csillagrendszerekben is találtak már exobolygókat. A legnépszerűbb sci-fi filmek világa válik valósággá egyes exobolygó felfedezéseknél.



4.11. ábra. Kettős naplemente a távoli Tatooine exobolygón, Luke Skywalker szülőbolygóján (Lucasfilm) és egy a NASA által ajánlott pihentető úti cél (Kepler-16b exobolygó⁴⁵), ahol még az árnyékunknak is mindig társa van.

A híres film helyszínével való hasonlóság miatt a Kepler-16b exobolygót el is nevezték Tatooine-nak (4.11. ábra), de a kettős naplementét nem élvezhetnénk a Szaturnuszhoz hasonló méretű gázóriás bolygóról, legfeljebb egy (feltételezett) holdjáról. Egy kisfilmen⁴⁶ be is mutathatjuk a Kepler-16b exobolygó keringését a kettőscsillag körül, úgy mintha egy közelben levő űrhajóról látnánk.



4.12. ábra. A Kepler-16 (AB) b exobolygó közel körpályán kering a szoros kettőscsillag mindkét tagja körül. (NASA / Science / Doyle)

⁴⁵ <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/exoplanet-travel-bureau/explore-kepler-16b/>

⁴⁶ <https://apod.nasa.gov/apod/ap110920.html>

A Kepler-16b exobolygó felfedezése igen meglepte a csillagászokat, mert nem gondolták, hogy kettőscsillag körül is keringhet stabilan bolygó (4.12. ábra). Azóta ezen a területen is egyre több a megfigyelés, a szimuláció és az elméleti számítás.

Nemcsak olyan exobolygókat találtak, amelyek a kettős mindkét tagja körül keringenek, hanem van arra is példa, amikor csak az egyik csillag körül kering az exobolygó (Kepler-13 Ab). Fedeztek fel olyan hármascsillagrendszert is, amelynek egyik tagja körül nem is egy exobolygót találtak, hanem hetet (Gliese 667 C b-h), ilyen helyeken akár hármas naplementét is láthatunk. Ahogy szaporodnak a megfigyelések, úgy találkozunk egyre különlegesebb esetekkel, négyes csillagrendszerben is találtak már exobolygót (PH-1 A(ab) b más néven Kepler-64 b), sőt csillaghalmazban is (M67 nyílt halmazban a YBP1194b).

Érdeemes bemutatni a többes csillagok mozgását⁴⁷, amely többféleképpen is megvalósulhat stabilan is. Az exobolygópályák sokféleségét látványos módon szemléltetik a The Kepler Orrery animált képek vagy kisfilmek, amelyekből már öt is készült [86], [87], [88], [89], [90]. Azonos mérték szerint láthatunk a Kepler űrtávcső felfedezettjeiből közel hétszáz bolygórendszert. A Naprendszert is szerepeltetik az összehasonlíthatóság céljából. A különböző színezéssel az exobolygók átlaghőmérsékletét szemléltetik, a csillagjuktól való távolság függvényében. Hasonlóan látványos honlapon⁴⁸ 288 exobolygó keringése látható egy (elképzelt) közös csillag körül. A bolygókat jelképező körökre kattintva kiírja az exobolygó nevét és pár jellemzőjét, megmutatja a pályájukat is (még az excentricitásukat is kiírják), így alkalmas a diákjaink interaktív ismeretszerzésére.

Bolygópályákkal kapcsolatos további érdekességek

Vannak elméleti számítások arra, hogy hány exobolygó létezhet stabilan egy csillag körül, egy honlapon⁴⁹ erre sok lehetőséget mutatnak be, köztük a több száz bolygót tartalmazó elképzelést is. A bolygópályák stabilitásának vizsgálata napjainkban is zajlik és átvezet a káoszelmélet témakörébe.

Érdekes lehet rezonanciák felfedezése is exobolygórendszerekben, amely szerint az egyes bolygók keringési periódusának aránya megadható kis egész számok hányadosaként. Erre jó példa a TOI-178 rezonáns bolygórendszer, amelynek hat felfedezett bolygójának

⁴⁷ <http://www.atlasoftheuniverse.com/orbits.html>

⁴⁸ <http://nbremer.github.io/exoplanets/>

⁴⁹ <https://planetplanet.net/the-ultimate-solar-system/>

periódusideje: 1,91 nap, 3,24 nap, 6,56 nap, 9,96 nap, 15,23 nap és 20,71 nap. Legszembetűnőbb a második, harmadik és negyedik bolygó periódusidejének 1:2:3 aránya (az első kettő aránya közel 3:5), de közelítőleg fennáll a legbelső bolygó kivételével a többire a 2:4:6:9:12 arány (Laplace-féle lánc rezonancia) [91]. Az exobolygók közötti rezonanciák a rendszer stabilitását is mutatják. Érdekessége ennek az exobolygórendszernek, hogy az első megfigyeléseknél csak három exobolygót feltételeztek a rendszerben, de abból kettőt nagyon közeli pályán keringőnek. A későbbi, több különböző távcsővel végzett vizsgálatok már módosították a közeli pályán keringő exobolygók egyikének adatait és további exobolygókat is találtak a TOI-178 rendszerben. Fontos felhívni diákjaink figyelmét a gondos keresésre a neten, hiszen egy-egy ismeret az évek során már túlhaladott lesz, hiszen további vizsgálatok módosíthatják a régebbi eredményeket és így az azokról írt tudósítások (cikkek) már nem lesznek teljesen igazak, de az interneten még ugyanúgy megtalálhatók. Erre egy jó példa a TOI-178 rendszerről fellelhető netes anyagoké [92].

Többtest-probléma szimulációkkal

A többtest-probléma messze túlhaladja a középiskolai tananyagot, főleg a diákok matematikai ismereteit, de például az említett érdekes és mégis valós rendszerek bemutatása motiváló a témával való foglalkozásra és így a fizika vagy csillagászat mélyebb tanulmányozására is. A többtest-problémával kapcsolatos szimulációkkal szívesen foglalkoznak, töltenek időt diákjaink. Kíváncsian változtatják az egyes paramétereket (tömeg, távolság) és így önkéntelenül is észrevesznek összefüggéseket, ok-okozati törvényszerűségeket. Vannak csak szórakoztató, figyelemfelkeltő szimulációk, de lehet konkrét célokat is kijelölni, mint például a Földről a Marsra küldendő űrhajó pályájának megtervezése⁵⁰. A szimuláció segítségével való próbálgatás mellett egy geometriai és algebrai ismereteket felhasználó megoldást⁵¹ is mutatnak a NASA szakemberei a Mars-utazás tervezéséhez.

Űrutazással kapcsolatos segédanyagot találunk a Science on Stage honlapon is, amelyet magyarra is lefordítottak [93], [94]. Szimulációk segítségével ismerkedhetnek meg diákjaink a szökési sebességgel (Newton magashegyi ágyús gondolatkísérlete segítségével), illetve a bolygók közti utazás legkisebb energiaigényű Hohmann-féle transzferpályájával.

⁵⁰ https://galileoandstein.phys.virginia.edu/more_stuff/Applets/ShootMars/shootmars.html

⁵¹ <https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/activity/lets-go-to-mars-calculating-launch-windows/>

A többtest-problémáról vagy bolygórendszerek szerkezetéről, benne a bolygók mozgásairól sok szimulációt találhatunk a neten, sőt egy ilyen szimuláció programjának megírásához is találhatunk programozási segítséget. Lehetnek olyan diákjaink is, akik saját maguk által megírt programok segítségével tanulmányozzák a bolygók mozgását, bolygórendszerek stabilitását. Ezeknél a szimulációknál az egyszerűség, a könnyen áttekinthetőség és az idő gyorsításának lehetősége a legfontosabb a tanulás, tanítás szempontjából. Fontos a pálya kirajzolása, esetleg csak egy-egy aktuális részletének bemutatása, hiszen a túl sok vonal nehezen átláthatóvá teheti az ábrát.

Ilyen egyszerű szimuláció a GravityKit és a Super Planet Crash, amelyekben egy csillag köré építhetünk bolygórendszert megadva az egyes bolygók helyzetét és sebességét. A Super Planet Crash lényegében egy játék, amelyben pontozzák az előállított bolygórendszerünk bonyolultságát (mennyi és milyen bolygót helyeztünk bele) valamint a stabilitását (mennyi ideig áll fenn ütközések, bolygókidobások nélkül). A kapott pontszám, illetve az alkotott rendszer el is menthető, később is bemutatatható. Ezeket a népszerű szimulációkat csillagászok és tanárok készítették oktatási célból, innovatív játékos módon való csillagászati ismeretszerzésre ezért megbízhatóak, a tanítás folyamatában bátran felhasználhatóak [95].

Miért ilyenek a bolygópályák?

Kepler bolygómozgást leíró törvényeihez, így az elsőhöz is tapasztalati úton jutott el, az eddig említettek is lényegében csak bemutatják az égitestek pályáit, magyarázatot nem adnak arra, hogy miért ilyenek. Kepler is kereste az okokat, de a Newton által megalkotott erőtvények és gravitációs törvény adott először magyarázatot az égitestek mozgására, így pályájuk alakjára is. A bolygókra ható gravitációs erő centrális erő, amelynek következménye, hogy a mozgás síkmozgás lesz. Az erőtvény alakjából (a távolság négyzetével fordítottan arányos) következik a kúpszelet alakú pálya. A centrális gravitációs erő következménye a perdület megmaradása és ebből az úgy nevezett területi törvény, amelyet Kepler második törvényeként tanítunk.

4.3.3 Hogyan mozognak az égitestek a pályájukon?

A bolygók mozgásának leírásakor nemcsak a pálya ismerete lényeges, hanem az is, hogy hogyan halad végig a bolygó ezen. Fontos tudni, hogy mikor és hol található pályáján a bolygó és ott éppen mennyi a sebessége. Kepler megválaszolta ezeket a kérdéseket, második törvénye

a bolygók pályamenti sebességével kapcsolatos és a bolygók helyzetét is egy róla elnevezett, általa felfedezett összefüggésből, a Kepler-egyenletből határozhatjuk meg.

A Kepler-egyenlet segítségével meg tudjuk mondani, hogy egy bolygó (vagy más Nap körül keringő égitest) pályájának mely pontján tartózkodik egy adott t időpontban:

$$E - e \cdot \sin E = \frac{2\pi}{T}(t - \tau) = n(t - \tau)$$

ahol E az excentrikus anomália (egy a bolygó adott helyzetéből származtatott szög), e a pálya excentricitása, T a periódusidő ($2\pi/T$ a közepes szögsebesség vagy középmozgás (n)), τ pedig a perihélium átmenet időpontja. Középiskolai szinten a bolygók helyzetének meghatározásával nem foglalkozunk, hiszen a Kepler-egyenlet transzcendens és az egyszerű alakjában található mennyiségek sem közismertek, hanem a csillagászok által bevezetett célszerű fogalmak.

Kepler a Mars pályájának megrajzolásakor a bolygó pályamenti sebességére, illetve annak változására is következtetni tudott. Észrevette, hogy a Naptól a bolygókhoz húzott vezérsugár egyenlő idők alatt egyenlő területeket sűrol ezért is beszélnek területi törvényként a második törvényéről. Amennyire forradalmi változást hozott az első törvényben az ellipszispálya megjelenése az addigi tökéletesnek tartott körpálya helyett, legalább annyira volt nehéz elfogadni a mozgás változó voltát az addig feltételezett egyenletes helyett.

Kepler második törvényének szemléltetési módjai

Az ellipszis részeinek területe magasabb szintű matematikai tudást igényel így itt is a szimulációk szerepe lesz elsődleges a szemléltetésnél, magyarázatnál.

Az első törvénynél ajánlott magyar nyelvű szimuláció⁵² az egyes bolygók, a Plútó, valamint a Halley-üstökös mozgásán keresztül szemlélteti Kepler második törvényét is. Mutatja a pillanatnyi sebességet, a maximális és minimális sebességgel együtt és a Naptól való távolság változását.

Általánosan a kéttestproblémát is vizsgálhatjuk kör, ellipszis és parabola pályákon⁵³. Bár angolul, de sokféle adat leolvasható miközben a pályamenti mozgást is figyelhetjük. Nagy előnye a szimulációnak, hogy a pillanatnyi sebességet, gyorsulást, erőt, energiát, perdületet mindkét testre vonatkozóan láthatjuk a mozgás során és szerepel a két szélsőérték is. A

⁵² https://www.walter-fendt.de/html5/phhu/keplerlaw2_hu.htm

⁵³ https://www.walter-fendt.de/html5/phen/gravity_en.htm

kezdőfeltételeknél a két test tömegét és sebességét állíthatjuk be, illetve változtathatjuk, majd az annak megfelelő pályán figyelhetjük meg a mozgást és jellemzőit.

A szimulációk tanulmányozása közben megfigyelhető legfontosabb összefüggés, hogy a bolygók napközben nagyobb, naptávolban kisebb sebességgel haladnak pályájukon. Ennek következménye, hogy az évszakok nem egyenlő hosszúak, az északi féltekén a nyarunk hosszabb hét nappal, mint a telünk. Vannak diákok, akik a Föld Naptól való távolságának változását gondolják az évszakok kialakulásának okaként. Érdeemes kihangsúlyozni, hogy az északi féltekén éppen télen van a Föld napközben és nyáron naptávolban. Természetesen nagyon elnyúlt, nagy excentricitású ellipszis pályájú égitestnél már jelentősebb a különbség a besugárzásban perihélium és aphélium helyzeteknél.

Kepler második törvényéhez kapcsolódó látványos bemutatót⁵⁴ láthatunk az ESA honlapján. Egy ellipsziskeretben azonos számú üveggolyó segítségével mutatják be az egyenlő területű ellipsziscikkeket. Ehhez a kis ügyességet is megkívánó bemutatóhoz érdemes a lányok segítségét igénybe venni, akik szívesen dolgoznak a sok színes golyóval. Az egyenlő idők alatti egyenlő területű ellipszis cikkek íveinek hosszúságából következtethetünk az ottani sebességre. Célszerű lenne minél kisebb (keskenyebb) részek területét vizsgálni, de ekkor a golyók általi területfedés nem feltétlenül lesz egyenletes (keskeny csúcsokál például). Hasznos lehet kisebb golyók, vagy nagyobb méretű ellipszis használata.

A területi törvény és perdület megmaradása, a bolygók pillanatnyi sebessége

Kepler második törvénye a perdület megmaradásának következménye. A perdület már nem tananyag középszinten és a definiálásához szükséges vektoriális szorzat sem. Emelt szinten egyszerű példákban (például a Naprendszer esetében) várható el, hogy felismerjék a tanulók a perdületmegmaradás törvényének érvényesülését.

A bolygó perihélium és aphélium helyzetében merőleges a sugárra a sebesség, így a két helyzetben a perdület egyenlőségéből a következő egyszerű összefüggés kapható:

$$r_p \cdot m \cdot v_p = r_a \cdot m \cdot v_a$$

⁵⁴ http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/07/Marble-ous_ellipses_-_classroom_demonstration_video_VP02

ahol r_p a perihélium távolság (bolygó-Nap távolsága napközelen), v_p a bolygó sebessége napközelen, r_a az aphélium távolság és v_a a bolygó sebessége naptávolban. Egyszerűsítve:

$$r_p \cdot v_p = r_a \cdot v_a$$

Érdemes megemlíteni, hogy v_p egyben a bolygó pályamenti sebességének maximális értéke, míg v_a a bolygó pályamenti sebességének minimális értéke. Ennek az összefüggésnek az órán való megemlítésénél fontos hangsúlyozni, hogy csak a két „szélső” helyzetre igaz, más helyzetekben nem.

Az egyik reál érdeklődésű diákoknak írt tankönyv [68] közli a pillanatnyi sebesség

kiszámításának képletét is:
$$v = \sqrt{f \cdot M \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

Ennek levezetéséhez, magyarázatához ismerni kell a keringő test összenergiájának képletét:

$$E_{\text{össz}} = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{f M m}{r}$$

A 7. függelékben a területi törvény és a pillanatnyi sebesség képletének levezetését is bemutatom. Ezek a levezetések szerepelhetnek fakultációs csoportban, így mutatva rá Kepler második törvényének mélyebb értelmére a perdület (zárt rendszerben való) megmaradására. Fontos tudatosítani diákjainkban, hogy a perdület fogalma még nem volt ismert Kepler számára ezért fogalmazta meg másképpen a törvényét. A pillanatnyi sebesség levezetését fakultációs, emelt szintű érettségire készülő csoporton kívül versenyre felkészítő foglalkozásokon is hasznos lehet tárgyalni.

4.3.4 Égi harmóniából tömegmeghatározás (Kepler harmadik törvénye)

Kepler és az égi harmónia keresése

Kepler fiatal korától kereste a világ harmóniáját. Már tanulmányai alatt megismerkedett Kopernikusz tanaival, a napközéppontú világgéppel, amelyet helyesnek vélt, hitt benne, ebben a modellben gondolkodott a későbbiekben is. Matematikusként képzett volt geometriából, ismerte a kúpszeleteket és tulajdonságaikat. Csillagászként arra volt kíváncsi, hogy miért éppen 6 a bolygók száma és miért éppen úgy helyezkednek el és mozognak, ahogyan azt az adatok mutatják. Kereste az égi rendet, a harmóniát a Földön kívüli világban. Talán meglepő, hogy a bolygók számaként hatot említ, de akkoriban a szabad szemmel látható, égbolton bolyongó

„csillagokat” tekintették bolygónak, amelyek száma ötről növekedett Kopernikusz után a Földdel együtt hatra, így Kepler a Merkúr, Vénusz, Föld, Mars, Jupiter és Szaturnusz mozgására keresett összefüggést. Tetszetős ötletnek tűnt számára, hogy a bolygók száma összefüggésben van a tökéletes testekkel, amelyekből öt féle létezik. Úgy gondolta Kepler, hogy a hat bolygó pályasugarának megfelelő méretű gömbhéjak közé éppen befér az öt szabályos test. A Merkúr és a Vénusz közé oktaédert, a Vénusz és a Föld közé ikozaédert, a Föld és a Mars közé dodekaédert, a Mars és a Jupiter közé tetraédert, a Jupiter és a Szaturnusz közé pedig kockát illesztett. Az ilyen módon kiszámolt pályasugarak azonban nem egyeztek a valósággal, amely Kepler számára fontos volt, így az ötletét elvetette és a kutatást tovább folytatta, szinte egész életét áthatotta az égi harmónia megismerésének vágya. Végül a bolygók Naptól való távolsága és keringési ideje között talált összefüggést. Minél messzebb van a bolygó a Naptól, annál hosszabb a keringési ideje, ha a távolságot Csillagászati Egységben (átlagos Nap-Föld távolság) az időt években, (a tömeget pedig naptömegben mérjük), akkor a bolygók közepes naptávolságának harmadik hatványából négyzetgyököt vonva, megkaphatjuk az égitest keringési idejét. Ez a Kepler harmadik törvényeként ismert összefüggés ugyan megadja a kapcsolatot az egyes bolygópályák között, de arra a kérdésre a mai napig sincs válasz, hogy miért éppen hat (ma már nyolc, de volt kilenc is) bolygó van a Naprendszerben. Erre egyelőre a Naprendszer keletkezésével kapcsolatos kutatások sem adnak egyértelmű választ. Természetesen Kepler próbált magyarázatot találni a bolygók mozgásának okára is, gyanította, hogy olyan a Nappal kapcsolatos (mágneses?) erő tartja pályán a bolygókat, amelyik a távolsággal csökken. A bolygók mozgását magyarázó gravitációs törvényre Newtonig kellett várni.

Kepler harmadik törvénye és a gravitációs törvény kapcsolata körpálya esetén

A gravitációs törvényből levezethetőek a Kepler-törvények és ez igaz fordítva is. A középiskolai fizikaoktatásban már kevés levezetés szerepel, de körpályát feltételezve még középszinten is tanítható a gravitációs törvényből Kepler harmadik törvényének levezetése, illetve Kepler harmadik törvényéből az erőnek a távolság négyzetével való fordított arányossága is, amelyeket a következőkben röviden ismertetek.

A bolygót a gravitáció tartja körpályán, tehát a centripetális erő megegyezik a Nap által kifejtett gravitációs erővel. (Ebben a számításban a bolygók egymásra gyakorolt gravitációs hatása a Naphoz viszonyított kis tömegük miatt elhanyagolható.)

$$F_e = m \cdot a = F_g$$

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = f \frac{m \cdot M_{Nap}}{r^2}$$

$$v^2 \cdot r = f \cdot M_{Nap} = \text{állandó (Naprendszerben)}$$

$$v^2 \cdot r = \left(\frac{2\pi \cdot r}{T}\right)^2 \cdot r = \frac{4\pi^2 \cdot r^2}{T^2} \cdot r = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{T^2} = \text{állandó}$$

Ebből pedig az r^3/T^2 hányados állandó volta következik, amely Kepler harmadik törvénye.

Az állandót is meghatározhatjuk:

$$v^2 \cdot r = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{T^2} = f \cdot M_{Nap}$$

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{f \cdot M_{Nap}}{4\pi^2}$$

Ez az összefüggés alkalmas a Nap tömegének meghatározására is.

Kepler harmadik törvényéből levezethető a gravitációs erőtvény távolságfüggése, amelyet szintén körpályát feltételezve mutathatunk be diákjainknak. A körpályán mozgó testre ható erők eredője a Nap által a bolygóra ható gravitációs erő, ha eltekintünk a többi égitest befolyásoló hatásától, amelyet jó közelítéssel megtehetünk.

$$F_{cp} = \frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{m \cdot \left(\frac{2\pi \cdot r}{T}\right)^2}{r} = \frac{4\pi^2 \cdot r}{T^2}$$

Két különböző bolygóra ható erő összehasonlítása, felhasználva Kepler harmadik törvényét:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1 \cdot \frac{4\pi^2 \cdot r_1}{T_1^2}}{m_2 \cdot \frac{4\pi^2 \cdot r_2}{T_2^2}} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{r_2^3}{r_1^3} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{m_1}{r_1^2} \cdot \frac{r_2^2}{r_2^2} = \frac{m_1}{r_1^2} \cdot \frac{m_2}{m_2} = \frac{m_1}{r_1^2} : \frac{m_2}{r_2^2}$$

Tehát az erőhatás a távolság négyzetének reciprokával változik:

$$F_1 : F_2 : F_3 : \dots = \frac{m_1}{r_1^2} : \frac{m_2}{r_2^2} : \frac{m_3}{r_3^2} : \dots$$

A Nap-Föld távolság meghatározása, naprendszerbeli távolságok

Szükséges, hogy legalább a körülöttünk levő világ nagyságrendi viszonyaival tisztában legyenek a tanulóink ezért fontos a valós adatok megismertetése velük. Azt tapasztaltam, hogy csak a távolságok vagy tömegek értékének közlése nem elegendő, legalább össze kell hasonlítani őket, illetve egy mindennapi, ismert tárgyhoz, távolsághoz is viszonyítani nagyságukat, bár így is nehéz felfogni a csillagászati léptéket. A diákok kíváncsiak arra is, hogy hogyan „mérték meg”, honnan tudjuk, hogy éppen ennyi az adott érték. Tanulóim számára a legmeglepőbb az égitestek tömegének ismerete volt, el sem tudták képzelni, hogy van arra lehetőségünk, hogy meghatározzuk egy tőlünk igen messze levő égitest tömegét. Még meglepőbbnek találták, hogy távolság és periódusidő mérésének segítségével történik a tömegmeghatározás Kepler harmadik törvényének segítségével, legalábbis kísérővel rendelkező égitesteknél.

Ugyan diákjaink számára nem tűnik nagy problémának a távolságok meghatározása, de például a Nap-Föld távolság helyes értékének megismeréséhez hosszú út vezetett, amelyet röviden a 8. függelékben tekintek át.

A Nap-Föld távolság ismeretében Kepler harmadik törvényének alkalmazásával már meg tudjuk határozni, hogy milyen nagy a Naprendszer és benne milyen távol vannak az egyes égitestek.

A Nap és más égitestek tömegének meghatározása

Kepler harmadik törvényének általánosabb alakjából meghatározható a Nap tömege:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{f \cdot M_{Nap}}{4\pi^2}$$
$$M_{Nap} = \frac{4\pi^2 \cdot a^3}{f \cdot T^2} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

Holddal rendelkező bolygó tömegének meghatározása is lehetséges hasonló módon:

$$\frac{a_h^3}{T_h^2} = \frac{f \cdot M_b}{4\pi^2}$$
$$M_b = \frac{4\pi^2 \cdot a_h^3}{f \cdot T_h^2}$$

Kepler még nem ismerhette a bolygók, vagy a Nap tömegét és Newton is csak a holddal rendelkező bolygók tömegének a Nap tömegéhez való arányát tudta meghatározni:

(Feltételezzük, hogy a bolygó a Naphoz képest, a Hold a bolygóhoz képest elhanyagolható tömegű.) Kepler harmadik törvénye a hold-bolygó, illetve a bolygó-Nap rendszerekben:

$$\frac{a_h^3}{T_h^2} = \frac{f \cdot M_b}{4\pi^2}$$

$$\frac{a_b^3}{T_b^2} = \frac{f \cdot M_{Nap}}{4\pi^2}$$

A két egyenletet elosztva egymással kapjuk:

$$\frac{\frac{a_h^3}{T_h^2}}{\frac{a_b^3}{T_b^2}} = \frac{a_h^3}{T_h^2} \cdot \frac{T_b^2}{a_b^3} = \left(\frac{a_h}{a_b}\right)^3 \cdot \left(\frac{T_b}{T_h}\right)^2 = \frac{\frac{f \cdot M_b}{4\pi^2}}{\frac{f \cdot M_{Nap}}{4\pi^2}} = \frac{M_b}{M_{Nap}}$$

$$M_b = \left(\frac{a_h}{a_b}\right)^3 \cdot \left(\frac{T_b}{T_h}\right)^2 \cdot M_{Nap}$$

Kepler harmadik törvényéből a gravitációs állandó is kifejezhető, illetve például a Föld adataival [78] meghatározható az értéke:

$$\frac{a_b^3}{T_b^2} = \frac{f \cdot M_{Nap}}{4\pi^2}$$

$$f = \frac{4\pi^2 \cdot a_b^3}{M_{Nap} \cdot T_b^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (1,49596 \cdot 10^{11}m)^3}{1,9885 \cdot 10^{30}kg \cdot (3,1558 \cdot 10^7s)^2} = \frac{132,166 \cdot 10^{33}m^3}{1,9885 \cdot 10^{30}kg \cdot 9,959 \cdot 10^{14}s^2}$$

$$= 6,675 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$$

A gravitációs állandó egy 2000-es minden addiginál pontosabb mérés szerint

$f = (6,674215 \pm 0,000092) \cdot 10^{-11}m^3kg^{-1}s^{-2}$, tehát az egyezés középiskolában megfelelő, de nem ilyen módon fogják pontosítani az értékét [96].

Kepler harmadik törvényének általánosabb, az égi mechanikában használt alakja, amelyet pontosabb számításoknál használnak:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{k^2}{4\pi^2}(m_1 + m_2)$$

ahol a a pályae ellipszis félnagy tengelye, T a keringési idő, és m_1 és m_2 a két tömeg k a Gauss-féle gravitációs állandó, amelynek értéke $k \approx 0,0172 M^{-1/2} A^{3/2} T^{-1}$, (M a Nap tömege, A a csillagászati egység, T a középnap) [97].

A bolygók tömege elenyésző a Napéhoz képest (a legnagyobb bolygó a Jupiteré is csak ezrede a Napénak) ezért a számításban a bolygótömeg elhanyagolható, és az összefüggés jobb oldala minden bolygóra (közel) ugyanaz. Hasonlóan egyszerűsödik az összefüggés egy olyan bolygóhold rendszer esetén, amelynél a bolygó tömegéhez képest elhanyagolható a holdak tömege (például a Jupiter és holdjai), de természetesen az állandó értéke változik, a Nap tömege helyett a Jupiter tömegével kell számolnunk.

Tehát Kepler harmadik törvényének segítségével ki lehet számítani egy olyan égitest tömegét, amelynek holdja van, vagy műhold kering körülötte. Így határozták meg pl. az (243) Ida kisbolygó tömegét a körülötte keringő kicsiny hold, a Dactyl pályadataiból, amelyről részletesebben a 9. függelékben írok.

Elképzelhető olyan eset is, amikor nem látjuk a központi égitestet csak a körülötte keringőt. Galaxisunk közepén levő fekete lyuknak (Sgr A*) nemcsak a létezését bizonyították a 2020-as Nobel-díjat kapó tudósok, hanem például a tömegét is meghatározták. A fekete lyuk körül keringő S2 jelű csillagnak a keringési idejét körülbelül 16 évnek, míg félnagy tengelyét 1000 CsE-nek határozták meg [98], [99], így a fekete lyuk tömege égi mechanikai mértékegységeket (csillagászati egység, középnap, Naptömeg) használva:

$$M = \frac{4\pi^2 \cdot a_{S2}^3}{k^2 \cdot T_{S2}^2} = \frac{4\pi^2 \cdot 10^9}{0,0172^2 \cdot (16 \cdot 365,256)^2} \approx \frac{39,48 \cdot 10^9}{10106} \approx 4 \cdot 10^6 m_{Nap}$$

A pályamenti sebesség távolságfüggése és kapcsolata a sötét anyaggal

A kilencedikes fizika okostankönyv 15. Kepler törvényei című leckéjének harmadik összetett kérdése, feladata a következő:

„3. Kepler harmadik törvénye alapján bizonyítsd be, hogy a Naptól távolabbi bolygók pályamenti sebessége kisebb, mint a Naphoz közelebbi bolygóké!”

Kepler harmadik törvényének e tankönyvben is szereplő alakja:

$$\frac{R_1^3}{R_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2}$$

Ugyan az okostankönyv nem tér ki rá, de ennél a levezetésnél is körpályát feltételezünk, amelyre az R betű is utalhat, sugárként kezelve a félnagy tengelyt:

$$v = \frac{2\pi \cdot R}{T}$$

$$T = \frac{2\pi \cdot R}{v}$$

$$\frac{R_1^3}{R_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{\left(\frac{2\pi \cdot R_1}{v_1}\right)^2}{\left(\frac{2\pi \cdot R_2}{v_2}\right)^2} = \frac{\frac{4\pi^2 \cdot R_1^2}{v_1^2}}{\frac{4\pi^2 \cdot R_2^2}{v_2^2}} = \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot \frac{v_2^2}{v_1^2}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Tehát fordítottan arányos a bolygó Naptól való távolsága és a sebességének négyzete, így a távolabb keringő bolygók pályamenti sebessége kisebb lesz, mint a közelebb keringőké.

A pályamenti sebesség távolságfüggése, körpályát feltételezve, felhasználva Kepler harmadik törvényének $T = c \cdot R^{3/2}$ alakját, amelyben c egy állandó:

$$v = \frac{2\pi \cdot R}{T} = \frac{2\pi \cdot R}{c \cdot R^{3/2}} = \frac{2\pi}{c} \cdot R^{-1/2} = konstans \cdot \frac{1}{\sqrt{R}}$$

Tehát a pályamenti sebesség a távolság négyzetgyökével fordítottan arányos. Érdekes felhívni a figyelmet most is arra, hogy a pályamenti sebesség független a keringő test tömegétől.

Ez az összefüggés nemcsak a Naprendszer bolygóira igaz, hanem lényegében bármely közös gravitációs vonzócentrum körül keringő testek rendszerére is. Például egy spirálgalaxisban azt várjuk, hogy a galaxis közepétől messzebb keringő csillagok lassabban mozognak, mint amelyek közelebb vannak. Már közel száz évvel ezelőtt is voltak olyan sebességmérések (1932-ben Jan Oort, 1933-ban Fritz Zwicky majd Vera Rubin 1970-ben), amelyek szerint a galaxis szélén mozgó csillagok sebessége ugyanakkora volt, mint a galaxis közepéhez közelebb keringőké. Sőt találtak olyan nagy sebességű csillagot is, amelyiknek el kellett volna hagynia a galaxisát. Zwicky a Coma-galaxishalmazban találta túl gyorsan mozognak az egyes galaxisokat ahhoz, hogy együtt maradjanak. Legalábbis a látható anyag gravitációs ereje kevés ehhez az említett esetekben. A hiányzó tömeget csillagászati módszerekkel való megfigyelhetetlensége miatt sötét anyagnak nevezték el [100], [101]. Nem célom a sötét anyag bővebb tárgyalása, de lényegesnek tartom, hogy diákjainkat megismertessük azzal, hogy Kepler harmadik

törvényének is jelentős szerepe van a sötét anyaggal kapcsolatos kutatásokban, létezésének bizonyításában. Ezek a napjainkban is folyó kutatások a csillagászatot a részecskefizikával kötik össze miközben nemcsak a Világegyetem felépítésével kapcsolatos kérdésekre keresik a választ, hanem az Univerzum keletkezésével, fejlődésével kapcsolatosakra is.

4.4 Kepler törvényeinek jelentősége

„Ha messzire láttam, az csak az engem vállukon tartó óriásoknak volt köszönhető” - mondta Newton, és egyik óriásként Keplerre gondolt. Kepler törvényeinek segítségével alkotta meg Newton az általános tömegvonzás törvényét. Newton matematikai segédlettel Kepler törvényeiből megállapította, hogy a bolygók gyorsulása mindig a Nap felé irányul, és a Naptól mért távolság négyzetével fordítottan arányos, így az ezt a gyorsulást létrehozó erő is ilyen. Feltételezte, hogy a Nap és a bolygó között kölcsönös a vonzás, és ez az oka a Földön a szabadesésnek is. Ezek után azt is feltette, hogy ez a gravitációs vonzás minden testre (akár égi, akár földi), általánosságban jellemző. Ezzel a gondolattal az égi és a földi fizikát sikerült egyesítenie.

Kepler törvényei tapasztalati törvények, módszere a (tudatos) próbálgatás majd ellenőrzés volt. Kepler törvényeinek igazságát a bolygók észlelési adatai bizonyították. A törvényei segítségével készített bolygótáblázatok (Rudolf-féle táblázatok, 1628) pontosságukban felülmúlták az addigiakat és a távcsöves megfigyelések kezdetén is elég pontosnak bizonyultak. Az évek múltával bizonyosodtak meg egyre inkább pontosságukról, amely a törvények elfogadását is segítette. Newton a gravitációs erőtvénnyből és a mozgástörvényeiből le tudta vezetni Kepler mindhárom törvényét, amely szintén igazolása a törvények helyességének, de már matematikai módon. Tehát általános érvényű törvényekként tekinthetünk rájuk, nem úgy, mint például a Titius-Bode szabályra, amely szintén a megfigyelési adatokból került felismerésre, de a később felfedezett bolygók közül a Neptunuszra már nem illett az összefüggés.

A fizikatanítás szempontjából is van jelentősége Kepler törvényeinek. Györgyi Géza (1930-1973) szerint „Mindazonáltal az is komoly didaktikai lehetőségeket rejt magában, ha ezt az utat fordítva járjuk végéig, választ keresve a kérdésre: Milyen következtetések adódnak Kepler törvényeiből az égitestek mozgását kormányzó egységes alaptörvényt illetően?” [102]. „Valóban, a Newton-axiómák, a gravitációs törvény és a Kepler-probléma fontosságát a fizika

fejlődésében és felépítésében aligha lehet eléggé hangsúlyozni.” [103]. „A Kepler-probléma pedig prototípusa az egyszerű folyamatnak, melyből deduktíve új igazságokhoz juthatunk, mindenekelőtt Newton gravitációs és dinamikai törvényeihez; de ezeken túl hosszú a sora azoknak a fontos fizikai tényeknek és törvényeknek, amelyeknek felismerése a Kepler-problémához kapcsolódik. Jogosnak tetszik tehát lehetőségek után kutatni, melyek a Kepler-mozgást s vele összefüggésben Newton dinamikai törvényeit közelebb hozhatják a tanulóhoz s számára élményszerűbbé tehetik.” [103].

Györgyi Géza ötven éve írt sorai ma is megállják helyüket, az előző fejezetekben leírtakkal ugyanez volt a célom, élményszerű, diákokhoz közelebb álló segédanyagokat, módszereket, alkalmazásokat mutatni. Az általam leírtak tanórai, vagy projekt feladatoknál, otthoni feladatként, foglalkozásként megvalósíthatók, de lehet sokkal mélyebben is foglalkozni a témával. Kepler törvényeivel kapcsolatos feladatok gyakran szerepelnek fizika és csillagász versenyeken, diákolimpiákon is [103], [104]. Ismert fizikusok (Maxwell, Feynman) is foglalkoztak Kepler törvényeivel, ötletes levezetéseket nyújtva rájuk [105], [106].

Vannak elgondolások Kepler törvényeinek ellipszispályára történő igazolásának középiskolás szinten való tárgyalására is, de ezek csak matematikában az átlagosnál képzetesebb és érdeklődőbb tanulócsoporthoz valósíthatók meg [103], [107].

Kepler munkássága kapcsán csak a bolygók mozgását leíró törvényeivel foglalkoztam. Jelentősek voltak optikai kutatásai is, és lencsés távcsöve. Matematikusként foglalkozott sík és térkitöltésekkel, amelyek szintén új kutatási területek. Kepler sejtése szerint a teret gömbökkel legjobban (legtömörebben) a hexagonális és a lapközepes kockarácscsal tölthetjük ki. Ezt bizonyítani csak 2005-ben sikerült Thomas Hales-nek jelentős számítógépes segítséggel.

Érdeemes említést tenni Kepler kéziratban ránk maradt regényére, az Álomra is. Mikola Sándor szerint „Kepler művei tele vannak költészettel. Formai tekintetben is nagyon szép költői munkája a *Holdalom (Somnium, vei Astronomia lunaris)*. Némelyek misztikus műnek tekintik, mások azt mondják, hogy korának szatírja.” [108]. Carl Sagan és Isaac Asimov szerint egyike az első tudományos fantasztikus írásoknak.

„Kepler nagy költői érzékkel a Hold és a Föld árnyékából építi a hidat a végtelenségbe, és ezen megy fel a Holdba, ahonnét megmutatja nekünk az égi jelenségeket, ahogy azoknak Kopernikusz rendszere szerint látszaniok kell. Külön kiemeli azt a helyet, ahol a Föld vonzása megszűnik (illetőleg pontosabban, egyenlő lesz a Hold vonzásával), Keplernek a vonzási erőről már egész határozott képze volt, bár csak Newton fogalmazta azt meg később.” [108].

Kepler úgy tartotta, hogy az út, a módszerek, ahogyan eljutunk az égitestek megismeréséhez, legalább annyira csodálatos, mint maguk az égitestek.

„Utakat, lehetőségeket keresni és kipróbálni: csupán ennyi volt a cél. A 400 éve született Johannes Kepler műve minden bizonnyal egy nemzedékhez sem állott olyan közel, mint a miénkhez, mely tanúja lehetett az Űrkorszak eljövételének. Akarjuk azt és következményeit a természetleírás sajátos nyelvén: a matematikáén is gyermekeinknek minél pontosabban és élményszerűbben megmagyarázni!” [103]. Györgyi Gézával egyetértve úgy gondolom, hogy az Űrkorszak eljövetele utáni nemzedékekhez is nagyon közel áll Kepler műve, hiszen tanulóink számára lassan elérhetővé válik Kepler álma, a holdutazás vagy akár a Mars is célpont lehet. Kepler törvényeinek ismerete segít a Naprendszer megismerésében, illetve napjaink felkapott témájára, az űrutazás kihívásaira tudományos válaszokat adni.

5 Exobolygók sokszínű világának bemutatása a fizika tanításában

Az exobolygók egyike azon kevés témáknak, amelyeknél nem kell a diákok motiválásáról beszélni, maguk az exobolygók és a hozzájuk kapcsolódó földönkívüli világ szinte mindenkit érdekel. Ugyan tanulóink érdeklődnek az exobolygók iránt, sok mindent tudnak, vagy pontosabban hallanak a médiában a témáról, de sokuknál ez nem párosul megfelelő (biztos) tudással, nem illeszkedik egy természettudományos szemléletbe, világképbe. Ebben a fejezetben a diákok exobolygókkal kapcsolatos felületes tudásának bemutatása után a témával kapcsolatos, középiskolában tárgyalható tudásanyagot tárgyalom, segítséget adva a hiteles forrásokból való tájékozódáshoz. Az exobolygókkal sokféleképpen lehet foglalkozni, kedvenc téma pályázatoknál, versenyeknél is. A tanórákról már-már kivesző feladatmegoldást is segítik az újszerű exobolygós feladatok, amelyek jelentős részét képezik egy modern csillagászati példatárunknak, amelyet bemutatok ebben a fejezetben. Az exobolygók témája szerves része az asztrobiológiának, hiszen az egyik célja az exobolygókutatásnak lakható helyek keresése az Univerzumban. Asztrobiológiai ismeretek tanításához kapcsolódóan egy szakköri tematikát, illetve diákjaim versenymunkáit mutatom be ebben a fejezetben. Ez a fejezet a negyedik, ötödik és hatodik tézis háttéranyagát fejt ki bővebben [S2], [S3], [S4], [S5], [S6], [S7], [S8], [S9].

5.1 Diákjaink exobolygós ismeretei

5.1.1 Mit tudnak diákjaink az exobolygókról?

Az exobolygókkal kapcsolatos hírek érdeklik a diákjainkat, ez a téma alkalmas még a természettudományokat, a fizikát nem szerető tanulók érdeklődésének felkeltésére is.

Felmértem egy kérdőív segítségével (amelyet 140-en töltöttek ki), illetve irányított beszélgetések során, hogy mit tudnak az exobolygókról tanulóink. Bár érdekesnek találják a témát, de többségüknek kevés konkrét ismerete van. A kérdéseim (amelyek a 10. függelékben szerepelnek) a földönkívüli élet lehetőségére, keresésére, illetve ezekhez kapcsolódóan az exobolygókra vonatkoztak. A kérdéssor végén lehetőséget adtam, hogy saját kérdéseiket is feltehessék, illetve a témával kapcsolatos gondolataikat is leírassák a diákok. A

következőkben felsorolok néhány tipikus tanulói véleményt, illetve kérdéseket, amelyekre exobolygókkal kapcsolatosan szeretnék választ kapni diákjaink:

„Mik az exobolygók? Mekkora az exobolygó? Hol található az exobolygók? Kik, milyen módszerekkel kutatják az exobolygókat? Milyen messze van a legközelebbi exobolygó? Milyen a felszínük? Van-e rajtuk élet? Hogyan jönnek létre ilyen bolygók? Miért ez az elnevezése?”

„Engem is érdekel. Olyan kérdésekre szeretnék választ kapni, hogy: Milyen messze vannak a Földtől ezek a bolygók? Van-e idegen életforma a bolygón? Ember számára élhető-e?”, „Hogyan tudnánk elutazni az exobolygóra?”, „Szerintem az exobolygókkal kapcsolatban a két legfontosabb kérdés az, hogy létezik-e olyan, amin az emberi élet számára alkalmas körülmények vannak, valamint hogy vannak-e más életformák a világegyetemben. Ezekhez a kérdésekhez kapcsolódóan számtalan más kérdéskör is felvetődik, amelyek az egész emberiséget foglalkoztatják.”

„Az érdekelne, hogy milyen a légkörük, képes-e ott életforma megmaradni. Ha igen: akkor milyen az az életforma.”, „Mit csinálnának az emberek, ha találnának életet egy ilyen bolygón?”, „Fontos a téma mert kíváncsi vagyok a felszínükre a körülöttük levő légkörre, ha van. És hogy lehet-e rajtuk élet.”, „Mennyi van elérhető közelben, lakják-e élőlények, ha igen hasonlítanak-e hozzánk, mennyire fejlettek” „Lehetséges-e, hogy egyszer egy ember élhessen egy ilyen exobolygón?”

„Van-e rajtuk élet? Van-e hasonló a Földhöz?”, „Van-e rajtuk élet? Milyen messze van? Hogy néznek ki? Honnan kapták elnevezésüket? Hányat ismerünk? Milyen nagyok? Mivel vizsgáljuk?”, „Léteznek-e? Merre vannak? Hasznosak-e a számunkra? El tudunk-e jutni oda? Mennyi lehet belőle?”, „Van-e? Hol van? Lakott-e? Milyen az idő? Ki fedezte fel? Mikor? Mivel? El lehet jutni oda?”

„Szerintem fontos ez a téma, hiszen ha a Föld már nem lesz élhető, akkor új lakhelyet kell keresni. Szeretném megtudni, hogy léteznek-e ilyen bolygók és milyen messze tőlünk.”, „Szerintem nagyon érdekes téma, mivel akarva-akaratlanul elpusztítjuk a Földet és szerintem fontos, hogy legyen egy B tervünk, esetleg át tudjunk valahova költözni, már ha megvannak a szükséges technikai fejlődések.”, „El tudna-e jutni az emberiség és a Föld képére formálni az adott exobolygót? Ha igen, megtudná-e tartani az adott bolygó állapotát?”

„Szeretném tudni, hogy hány ilyen exobolygó van, hogy milyen tulajdonságai vannak a bolygónak, hogy találtak-e életet más bolygókon, érdekel, hogy mivel és hogyan kutatják ezeket a bolygókat és érdekel, ha találnak minek fogják elnevezni.”

„Nekem volna pár kérdésem. Milyen módszerekkel keresik az exobolygókat, és hogy állapítják meg az exobolygók tömegét, keringési periódusát? Lehetséges, hogy eljutunk egy exobolygóra?”

„Érdekesnek találom a témát és mindent tudni szeretnék a világegyetemről.”

„Végülis érdekel, mert egy elég érdekes téma, bármilyen választ bármilyen kérdésre meghallgatnék.”, „Fontosnak tartom a témát, igazából konkrét kérdésem nincs, minden érdekel a témában.”, „Érdekel, de kérdéseim nincsenek, csak szívesen olvasok a felfedezésekről.”

„Engem is érdekelne és olyan kérdéseim vannak, amik itt fel voltak sorolva.” „Engem érdekel a téma, az egész űrkutatás nagyon érdekes az egész. Kb. az összes olyan kérdésre szeretnék választ kapni, amik itt le vannak írva.”

A kérdéseim sok diák érdeklődésével megegyeztek, mint azt az utolsó válaszok mutatják. Ezek a kérdések és a diákok által felvetettek általában is érdeklik az embereket, a NASA exobolygókat bemutató honlapján is megtalálhatóak a „nagy kérdések” között [109].

Az egyik ilyen fontos kérdés, amely a kérdőívben is szerepelt: „Szerinted létezik a Föld „ikertestvére” valahol a Világegyetemben?”. Erre a kérdésemre 140 (gimnazista) diákból 78-an válaszoltak igennel, 42-en nemmel, 15 tanuló elég kis esélyt adott erre, öten nem válaszoltak. Egy indoklást is tartalmazó tanulói válasz: „Mivel a világegyetem végtelen, az univerzum végtelen és ha van már egy Föld az univerzumban, akkor biztos, hogy vannak még Föld típusú bolygók.”

Rákérdeztem, hogy mit gondolnak arról, hogy eljut-e valaha ember egy távoli exobolygóra. 108-an tartották ezt lehetségesnek, 12-en bizonytalan, „talán” választ adtak, míg 16 tanuló nemmel válaszolt, négyen pedig nem válaszoltak erre a kérdésre.

Megkérdeztem azt is, hogy hallottak-e már exobolygó-kereső módszerekről, ha igen, akkor kértem, hogy írják le.

Sokan sajnálták, hogy nem hallottak eddig róla („Sajnos nem.”, „Nem – de a tanárnő mesélhetne róla”). 140 (gimnazista) diákból 119 nem hallott, 6 nem válaszolt, 3 rosszra gondolt, nem értette a kérdést, 9 válaszában volt valami értékelhető például távcsöveket említettek meg,

1 diák válaszolt röviden igennel, míg 2 tanuló említést tett a fotometriai módszerről („a csillagok fényének változását figyelik”, „Kepler teleszkóp a csillagok fényerejének periodikus változását méri”).

Összességében a kérdésekre általában egyszerű választ adtak, konkrét ismeretet egy-két diák válaszában lehetett csak felfedezni. Viszont kérdései, elképzelései szinte minden válaszolónak voltak.

Az exobolygók témája már alapvetően motiváló, felkelti az érdeklődést, figyelmet, így lehetőségünk van a sok érdekes tény mellett komoly tudományos ismereteket is elmondani, tanítani a témával való foglalkozás során. Ilyenek például az exobolygó felfedezési módszerek, amelyeket látványos animációk segítségével érdemes elsőként ismertetni, majd további érdeklődés esetén előkerülhetnek a fizikai törvényszerűségek, a matematikai leírás, feladatok.

5.1.2 Hol kerülnek kapcsolatba diákjaink az exobolygókkal?

Az exobolygókkal kapcsolatos friss kutatási eredmények hamar megjelennek a médiában, hiszen sokakat érdekelnek, így ez az egyik forrása tanulóink exobolygókkal kapcsolatos ismereteinek. Számítógépes, internetes játékaik helyszínének is gyakran választanak távoli, különleges helyszíneket, exobolygókat. Népszerű filmek, filmsorozatok is sokszor az Univerzum messzi tájain, számunkra meglepő kinézetű bolygókon vagy azok holdjain játszódnak.

Már a kezdeti exobolygó felfedezések is meglepték a csillagászokat, hiszen a Naprendszerben nem tapasztalt viszonyokat mutattak (például a csillagjukhoz közel keringő forró-Jupitereket). Ahogy szaporodott a felfedezések száma úgy vált nyilvánvalóvá, hogy milyen sokszínű az exobolygók világa. Az 4.3.2 fejezetben már utaltam az exobolygópályák változatosságára, de természetesen az exobolygók felépítése, szerkezete, felszíni, illetve légköri viszonyai is sokfélék, köztük a Naprendszerben megismertekhez hasonlóak és attól eltérőek is vannak. Fontos megmutatnunk diákjainknak, hogy a valóság legalább olyan sokszínű, érdekes, különlegességekkel teli, mint amit az emberi képzelet alkotott ismeretlenül is a távoli bolygókról a filmbeli vagy játékbeli helyszíneknek.

5.1.3 Ismeretszerzési lehetőségek az exobolygók témájában

Elengedhetetlen megismertetni diákjainkat az exobolygókkal kapcsolatos hiteles forrásokkal, hogy onnan tájékozódjanak és így meg tudják különböztetni a valós tényeket a fantázia világtól, vagy éppen az álhírektől. Az exobolygókkal kapcsolatos tudásanyag folyamatosan gazdagodik, az ezekben való eligazodást több honlap is segíti. A következőkben felsorolt források elsősorban a (fizika)tanárok tájékozódását segíthetik a témában, majd a diákcsoporthoz ismertetve ajánlhatják ezeket tanulóiknak is. Hiszen más az exobolygókkal kapcsolatos ismeretigénye egy humán osztályba járó diáknak és más egy kiselőadás tartására vagy éppen csillagászati versenyre készülőknek.

Az exobolygókkal kapcsolatos hiteles információkat online katalógusokban gyűjtik össze, amelyekből több, többféle is létezik.

Ezek közül a *The Extrasolar Planets Encyclopaedia*⁵⁵ az egyik leginkább naprakész, hitelességét tudományos cikkekkel támasztja alá. Ezen a honlapon az ismert exobolygókat különböző (általunk kiválasztható) jellemzőinek függvényében is ábrázolhatjuk⁵⁶, akár a felfedezés éve szerint is megvizsgálhatjuk az egyes tulajdonságokat. Például jól megfigyelhető (a tömeg-felfedezés éve diagramon), hogy eleinte nagyobb tömegű exobolygókat fedeztek fel, ez alól csak az elsőként felfedezett pulzár-bolygók kivételek. Tanulóinknak is ajánlható, érdekes interaktív keresést biztosít az a diagram, amelyen a Földtől való távolság függvényében szerepelnek az exobolygók (logaritmikus skálán, polár koordináta-rendszerben). Az exobolygókat mutató korongok az égitestek méretével arányosak és egy színskálával további (általunk beállítható) tulajdonság szerint láthatjuk az exobolygókat. Lehetőség van csak az egyes exobolygó típusokat (például Földhöz hasonló kőzetbolygókat) külön is megjeleníteni⁵⁷.

Hasonlóan hiteles és tudományos a NASA Exoplanet Archive⁵⁸ (Service of NASA Exoplanet Science Institute). Ezen a honlapon az exobolygó jelöltek adatai is szerepelnek. Az előző „Exobolygó enciklopédiához” hasonlóan interaktív keresést is biztosít, és a legújabb exobolygókkal kapcsolatos eredményekre is felhívja a figyelmet. Az Open Exoplanet Catalogue⁵⁹ művészi ábrázolásokat is mutat az exobolygókról. Láthatjuk a központi csillag(ok) lakhatósági zónáját és hogy ehhez képest, hol keringenek az exobolygók. Egy a Naprendszer

⁵⁵ <http://exoplanet.eu/>

⁵⁶ <http://exoplanet.eu/diagrams/>

⁵⁷ http://exoplanet.eu/polar_plot/

⁵⁸ <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

⁵⁹ <http://www.openexoplanetcatalogue.com/>

bolygóival való nagyság szerinti összehasonlító ábra is segíti az adott exobolygók elképzelését, megismerését.

A Puerto Rico Egyetem (Planetary Habability Laboratory) hozta létre a lakható exobolygók katalógusát (PHL Mapping the Habitable Universe⁶⁰). Különbözőképpen rangsorolják a lakhatósági zónában keringő exobolygókat, például a Földhöz való hasonlóság szerint, vagy éppen, hogy milyen távol vannak tőlünk. Az asztrobiológiai híreket is követhetjük ezen a webhelyen. Egy kisfilmjük (Wanderers⁶¹) pedig egy jövőbeli naprendszerbeli űrturizmus reklámfilmje is lehetne.

A sikeres exobolygókereső távcsőnek, a Keplernek is van egy gazdag (megújult) honlapja⁶². Olvashatunk magáról a projektről, sőt névadójáról, Johannes Keplerről és törvényeiről is. A felfedezett exobolygók részletes tulajdonságait tartalmazó táblázaton kívül vannak exobolygókkal és kutatásukkal kapcsolatos videók, animációk is ezen a honlapon. Interaktív módon mutatják be a tranzit módszer lényegét és magának a kutatásnak a menetét. Külön foglalkoznak az oktatás segítségével, az ajánlott foglalkozásterveket korcsoport szerinti bontásban is megadták.

A NASA Eyes on Exoplanet interaktív oldalán⁶³ a felfedezett exobolygók és csillagjaik adatain kívül, láthatjuk az exobolygókat keringeni csillagjuk körül. Beállíthatjuk, hogy a program a lakhatósági zónát is mutassa és van lehetőség a Naprendszerrel való összehasonlításra is. Külön rákereshetünk a különböző távcsövek, missziók által felfedezett exobolygókra. A gyakori kérdések között olyanokra találunk választ, amelyeket diákjaim is megemlítettek. Például: miből állnak az exobolygók, van-e olyan, mint a Föld közöttük, létezik-e olyan exobolygó-rendszer, amelyik hasonlít a miénkre, a Naprendszerre. Hogyan nevezik el őket, hány exobolygó van, hol vannak, melyik a legközelebbi, hogyan találjuk meg őket, hány távcsővel keresnek exobolygókat. Van-e víz, van-e élet rajtuk, eljut-e ember valaha is egy exobolygóhoz. Ezen a honlapon rövid választ adnak ezekre a gyakran felmerülő kérdésekre, de az EXOPLANET EXPLORATION Planets Beyond Our Solar System⁶⁴ oldalukon részletes áttekintést találunk az exobolygókról. Ez a figyelemfelhívó címeccel, képekkel teli, videókat és más interaktív elemeket is tartalmazó honlap állandóan megújul tartalmában, aktualizálják az adatokat, felhívják a figyelmet az új felfedezésekre, érdekességekre. A felfedezett

⁶⁰ <http://phl.upr.edu/home>

⁶¹ <https://www.youtube.com/watch?v=YH3c1QZZRK4>, Wanderers – a short film by Erik Wernquist

⁶² <https://www.nasa.gov/kepler/education>

⁶³ letölthető: <https://eyes.nasa.gov/eyes-on-exoplanets.html>

⁶⁴ <https://exoplanets.nasa.gov>

exobolygók kereshető katalógusát, a felfedezésekhez hozzásegítő (NASA érdekelt) űrtávcsöveket is megismerhetjük. Az exobolygó felfedező módszereket pedig látványos szimulációkból érthetjük meg. Szórakoztató formában szerezhethetünk széleskörű ismereteket erről a honlapról. Egy általános bevezető után megismerkedhetünk az exobolygók főbb típusaival és jellemzőikkel. Olyan különleges exobolygókat is mutatnak (Strange New Worlds), amelyekhez hasonlókat a Naprendszerben nem találunk. Néhány ilyen exobolygóra való (képzelt) utazáshoz készítettek plakátokat is (Exoplanet Travel Bureau). Egyiken, a Tatooine-nak elnevezett exobolygóra invitálnak, ahol az árnyékunknak mindig van társa, hiszen a Kepler-16b exobolygó egy kettős csillag körül kering, mint a Star Wars film Tatooine bolygója. A TRAPPIST-1 exobolygói pedig olyan közel vannak egymáshoz, hogy könnyen „átugorhatunk” egyikről a másikra. Említésre méltó még a PSO J318.5-22 exobolygó, amelyet úgy hirdetnek, hogy ott az éjszakai élet soha nem ér véget. Ez az exobolygó szabadon vándorol a csillagok közötti térben, így egyik fénye sem elég erős a nappali világossághoz. Az exobolygókutatás jelentős állomásait a Historic Timeline, illetve a Kepler Timeline mutatja. A honlapon található sok kisfilm, animáció, poszter, táblázat, rajz, kép mind eredményesen felhasználható az oktatás során. A fiatalabb korosztálynak letölthető kifestőt készítettek és módszert mutatnak könnyen elkészíthető exobolygó modellekre (festett kövek). Felhívják a gyerekek figyelmét a Space Place (Explore Earth and Space!) exoplanet⁶⁵ címszavánál leírtakra, amelyek a kisiskolások szintjén foglalják össze a számukra is megérthető ismereteket.

Bár van asztrobiológiával kapcsolatos honlapja⁶⁶ is a NASA-nak az exobolygókkal kapcsolatos oldal egyik alcíme az élet keresése, hiszen a legtöbb diáknál felmerülő kérdés is erre utal.

Ezen ajánlott webhelyek megbízhatóak, már évek óta biztosítják a naprakész exobolygókkal kapcsolatos híreket, ismereteket. Ugyan többször is változtattak a formájukon, szerkezetükön, de ez mindig a könnyebb áttekinthetőséget, az egyes információk gyors megtalálását szolgálta és a megjelenésük is egyre tetszetősebb, interaktív elemekkel, megértést segítő szimulációkkal gazdagodik.

A szinte minden diáknál megtalálható okos telefonokra, tabletekre is készültek színvonalas, naprakész exobolygós alkalmazások, egy ilyen például a Hanno Rein által készített és folyamatosan frissített, ingyenes Exoplanet iTunes program. Ezen is megtaláljuk az exobolygók és csillagjaik adatait, látunk animációt a keringésükről, összehasonlítva a Naprendszerben

⁶⁵ <https://spaceplace.nasa.gov/all-about-exoplanets/en/>

⁶⁶ <https://astrobiology.nasa.gov>

ismert bolygópályákkal. Az egyes tulajdonságaik alapján sorba is rendezhetjük a felfedezett exobolygókat.

Kifejezetten tanárokat segítő gyűjteményekben is vannak exobolygók tanítását segítő anyagok, mint például az igazán jelentős hírekhez, eseményekhez, felfedezésekhez kapcsolódó NASA Teachable Moments⁶⁷, amelyben néhány éve háttérinformációkat, tanácsokat, internetes forrásokat gyűjtenek össze, amelyek felhasználásával hitelesen beszélhetünk diákjainknak ezekről a témákról. Exobolygókkal kapcsolatosan (2015-ben) a leginkább Földre hasonlító Kepler-452b felfedezésekor adtak ki egy ilyen anyagot, majd a Merkúr-átvonulás (2016, 2019) kapcsán is utaltak az exobolygókra és azok tranzitjára.

Léteznek ingyenes tanártovábbképzések is a neten például webinar formában, amelyeken hozzáértő, sokszor tanítási tapasztalattal is rendelkező kutatók segítenek egy-egy téma tanításában. Gyakran tartanak az exobolygókkal kapcsolatban is ilyen előadást⁶⁸, egyiken többek között arra bátorítottak, hogy a Kepler űrszonda valós anyagait felhasználva ismertessük meg diákjainkkal az exobolygókat és felfedezési módszereiket. Ezen alkalmakon is ajánlanak tanítást segítő anyagokat és fontos az is, hogy naprakész információkkal ismertetik meg a hallgatóságot, akik bármely országból részt vehetnek, kérdezhetnek, véleményt nyilváníthatnak ezeken a webinarokon. Egyre inkább tapasztalható ezen előadások archiválása, utólagos megnézésének lehetősége. Ez egy nagyon jó gyakorlat, hiszen sokszor a NASA webinarokat (időzónánk szerint) hétköznapi éjjel tartják, így kevésbé megoldható az élőben követése. Természetesen utólagosan több évre visszamenően is találhatunk ilyen előadásokat, amelyeknél már sokszor az általuk javasolt honlap megszűnt, vagy jobb esetben jelentősen átalakult. Nagyon fontos az anyag keletkezése időpontjának figyelembevétele⁶⁹, tudva mely ismeretek időtállóak és melyek esetleg már idejét múltak.

Ezek az ajánlott lehetőségek ugyan angol nyelvűek, de diákjainknak ez kevesebb akadályt jelent, mint gondolnánk, és a tanárok többsége is rendelkezik már megfelelő nyelvtudással. Ezen érdekes anyagok tanulmányozásakor így diákjaink idegennyelvi kompetenciája is fejlődik. Léteznek élvezetes magyar nyelvű könyvek, összefoglaló írások, és az exobolygókkal kapcsolatos új hírekről is beszámolnak hiteles folyóiratok, webhelyek is. Könyvek közül Almár Iván: Kozmikus társkereső (Kossuth Kiadó 2011), Keresztúri Ákos: Asztrobiológia (MCSE Budapest, 2011) könyve ajánlható. Tudományosan helytálló, ismeretterjesztő stílusúak, de

⁶⁷ <https://www.jpl.nasa.gov/edu/teachable-moments/>

⁶⁸ <https://www.jpl.nasa.gov/edu/teaching-space/>, NASAJPL Edu, Teaching Space With NASA Live Stream-

⁶⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=WLSQ2a-aG5s> The Search for Exoplanets, 2021.05.05.

figyelembe kell itt is venni, hogy a legújabb felfedezéseket nem tartalmazzák, hiszen tíz éve íródtak. Az Élet és Tudomány és a Természet Világa folyóiratokban rendszeresen közölnek exobolygókkal kapcsolatos híreket, írásokat. A www.csillagaszat.hu és a www.urvilag.hu, több éve rendszeresen hírt adó weboldalakon pedig van lehetőség az új híreken kívül a régebbiek között is keresgélni például az exobolygók témájában is. A szegedi egyetem exobolygós webes összefoglalóját⁷⁰ is ajánlhatjuk diákjainknak.

Az említetteken kívül sok olyan exobolygókkal kapcsolatos, hiteles, de mégis érdekes, sokszor interaktív elemekkel gazdagított honlap létezik, amely tanórákon is felhasználható, hasznos a diákok motiválása szempontjából is. Ezeket általában csillagvizsgálók, egyetemek, múzeumok munkatársai vagy egy-egy lelkes szakcsillagász készíti. Különösen figyelni kell a szerzőre és a naprakész voltára egy-egy ilyen webes lehetőségnek, mert találhatunk áltudományos oldalakat szép számmal az exobolygókkal kapcsolatos ismeretek után kutatva is.

A fentiek alapján is megállapíthatjuk, hogy a megfelelő ismeretekhez való hozzáférés biztosított, sőt talán már túl gazdag is a kínálat ezért tartom fontosnak az előzőekben ajánlott honlapok ismeretét és gyakori felkeresését exobolygók témában a tanárok számára.

5.2 Az exobolygók témájának aktualitása

Az elmúlt évtizedben csillagászzal kapcsolatosan több fizikai Nobel-díjat is adtak, köztük 2019-ben exobolygó felfedezésért. A jelentős eredmények nem csak az Univerzum felépítését, működését segítik megérteni, hanem az emberiség helyét is a Világegyetemben [110].

Általában a legújabb tudományos eredményeket nehéz megismertetni tanulóinkkal, de ez alól kivételt jelentenek az exobolygókkal kapcsolatosak. Már nemcsak azt tudjuk, hogy vannak Napunkon kívül más csillagok körül is bolygókísérők, exobolygók, hanem ötezer exobolygónak ismerjük sok tulajdonságát⁷¹ (például: keringési idejét, tömegét, méretét, sűrűségét, hőmérsékletét). Így azt is látjuk, hogy léteznek a mi Naprendszerünkhöz hasonló és attól különböző bolygórendszerek is. Ezen ismeretek nem csak a Világegyetem sokszínűségét mutatják, hanem a különböző korú rendszerek vizsgálata segít a Naprendszer keletkezésének, fejlődésének megértésében is.

⁷⁰ <http://astro.u-szeged.hu/ismeret/exo/extrasol.html>

⁷¹ <http://exoplanet.eu/>

5.2.1 Több ezer éves emberi kíváncsiság

Az emberek mindig is szerették a saját helyzetüket, körülményeiket másokéval összehasonlítani, megismerni, hogy más emberek hol, milyen körülmények között élnek. Ennek most már egy magasabb szintjéhez érkeztünk, a bolygónkat szeretnénk minél pontosabban elhelyezni a többi bolygó, exobolygó között. Természetesen itt is a lakhatósággal kapcsolatos jellemzők az elsődlegesek. Már ismerünk több olyan exobolygót, amelyiken akár le is telepedhetnénk, ha nem lennének (elérhetetlenül) messze. Általában felmerülő kérdés az is, hogy vannak-e rajtunk kívül is értelmes lények az Univerzumban. Egyelőre tudományosan megalapozott elképzelés sem létezik a földtől eltérő életformákra, így azt is nehéz meghatározni, hogy milyen jeleit keressük az idegen életformáknak. Az asztrobiológiai témájú kutatások kiemelt fontosságúak és többek között az exobolygókkal is kapcsolatosak, azok egyre jobb megismerésére, leírására törekednek.

Hosszú út vezetett az exobolygók megismeréséhez. Az ókorban még filozófiai vagy vallási, misztikus elképzelések voltak csak más világokról, vagy azok hiányáról. Bár Giordano Bruno az 1500-as évek végén meggyőződéssel szólt a több, Naprendszerhez hasonló bolygórendszerekből álló világról, ez a nézete sem megfigyelések tényein alapult, legfeljebb Kopernikusz bolygómodelljére támaszkodhatott. Galilei és kortársai távcsöves csillagászati megfigyeléseik során még csak egy bolygórendszer, a Naprendszer egyes égitesteit tudták megfigyelni, és így volt ez még sokáig, csak feltételezték, hogy más csillagok körül is keringenek bolygók. Newton után már ismerték két égitest egymásra hatásának következményeit, amelyet először a kettőscsillagoknál figyelhetek meg. Ezen ismeretek alkalmazhatóak a csillag-bolygó rendszerre is, bár a hatások kisebbek, nehezebben mérhetőek, ezért is kellett várni a technika fejlődésére az exobolygók felfedezéséhez.

5.2.2 Fizikai Nobel-díj exobolygó felfedezésért

A jelenleg belátható Világegyetemet százmilliárdnyi galaxis népesíti be, és többségükben, mint a mi Tejútrendszerünkben is, néhány százmilliárdnyi csillag található. Ismereteink szerint a legtöbb csillagnak vannak bolygó kísérői, így csak a mi galaxisunkban több száz milliárd bolygó vár a felfedezésre. A halványabb vagy messzi csillagok megtalálása is igen nehéz, a körülöttük levő bolygók észlelése pedig reménytelennek tűnhet. A mai távcsövek és egyéb megfigyelési eszközök (pl. spektroszkópok) igen pontos méréseket, észleléseket tesznek lehetővé, a digitális

fényképezés pedig elősegítette a jó minőségű felvételek készítését. A számítástechnika ugrásszerű fejlődése az adatok (képek) tárolását és feldolgozását könnyítette meg nagymértékben, így vált lehetővé az exobolygók megtalálása és jellemzőik megismerése.

Az első, fősorozatbeli csillag körüli exobolygó felfedezése 1995-ben történt. Michael Mayor és Didier Queloz az 51Pegasi, egy tőlünk 50 fényévnnyire levő Napunkhoz hasonló csillag körül talált egy fél Jupiter tömegű exobolygót [111]. A Bellerophonnak elkeresztelt égitest mindössze 4 nap alatt kerüli meg csillagát. Ezt a sokakat meglepő felfedezést értékelte a tudományos közösség 2019-ben fizikai Nobel-díjjal. Az elismerés lényegében az exobolygók témájának fontosságát is mutatja, hiszen napjaink egyik kiemelt kutatási területe ez [112].

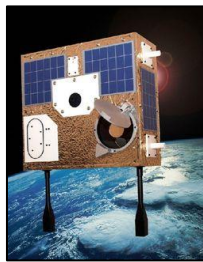
5.2.3 Az exobolygó kutatás vezető csillagászati és űrkutatási téma

A múlt században az égimechanika jelentősen fejlődött. A számítógépek segítségével egyre pontosabb számításokat tudtak végezni, így eljött az ideje az ember által készített űrszondák, űrhajók, űrtávcsövek és egyéb mesterséges égitestek felbocsátásának, megfelelő pályára állításának.

Ahogy a távcsövek alkalmazása ugrásszerű fejlődést eredményezett a csillagászatban, úgy ma az űrtávcsövek mérései jelentenek hasonló előrelépést. Számos űrteleszkóppal végeznek exobolygó kutatást is, hiszen a légköri hatások kiküszöbölése további előny a kellően pontos észlelési és mérési technikák mellett. A földi légkör az elektromágneses sugárzásnak csak egy kis töredékét engedi át, főleg az optikai és rádiótartományokban. Űreszközökkel viszont lehet megfigyeléseket végezni más hullámhosszokon is. További előnye az űrtávcsöves méréseknek, hogy folyamatosan végezhető, és a földi távcsöveknél fellépő zavaró légköri hatások sem okoznak problémát. Természetesen az űrszondák fellövése, megfelelő pályára állítása, pontos irányba fordításuk majd ott tartásuk, energiaellátásuk, a kapcsolattartás velük nem egyszerű mérnöki feladat. Esetleges javításuk is nehezen megoldható, így általában a mérések a műszerek fizikai élettartamáig tartanak. A megfigyelések aztán folytathatók a Földről is vagy egy újabb űrtávcső segítségével. A kisebb tömegű, Földhöz hasonló exobolygók észleléséhez űrtávcsövek szükségesek.

Exobolygókat vizsgáló űrtávcsövek:

A MOST (Microvariability and Oscillations of STars) kanadai űrtávcsövet 2003-ban lőtték fel azzal a céllal, hogy csillagok fényességét, illetve ennek változásait mérje elsőként az űrből. A nem túl nagy költségű űreszköz egy nagyobb bőröndhöz hasonló méretű volt, 15 cm átmérőjű távcsővel (5.1. ábra). A csillagok fényességének (periodikus) változását egy előttük áthaladó bolygókísérőjük is okozhatja, így ez a kisméretű űreszköz az exobolygó kutatásban is használható volt. Ugyan nem fűződik hozzá exobolygó felfedezése, de vizsgálta már ismert exobolygók csillagát is. Az 55 Cancri e exobolygó megerősítésében is részt vett.



5.1. ábra. A MOST űrtávcső. (művészi ábrázolás, Canadian Space Agency)

Tízéves működése után ugyan hibásodtak meg műszerei, de 2019-ig hasznosíthatták még méréseit, amikor is energiaellátási problémák miatt leállították. Kis műholdként is megmutatta az űrbéli fotometriai mérések előnyeit, előkészítve az utat nagyobb társainak [113].

A CoRoT (Convection Rotation Transits) űrtávcsövet 2006-ban lőtték fel. Nyolc éven keresztül 850 km-es magasságban, poláris pályán mérte a csillagok által kibocsátott fény erősségét, illetve ennek változását 27 cm átmérőjű távcsővel (5.2. ábra). Félpercenként készített felvételeket egy féléven keresztül az égbolt ugyanazon területéről, majd a következő félévben ellenkező irányba fordult az űreszköz, hogy a Nap mindig hátulról érje, a napelemeknél.



5.2. ábra. A CoRoT űrtávcső (fantáziarajz, CNs/D. Ducros, ESA).

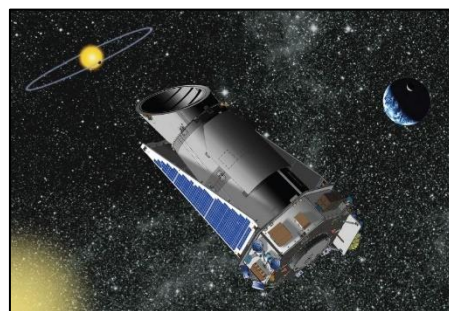
A fénygörbékből nemcsak exobolygó tranzitokat figyeltek meg, hanem a csillag forgását, belső energiaterjedését is, és asztroszeizmológiai vizsgálatokat is végeztek, hogy a csillag jellemzőit (tömeg, kor, kémiai összetétel) meghatározhassák. A megfigyelési program francia vezetéssel, több európai ország és Brazília együttműködésével kereste az exobolygókat. Hazai kutatók is részt vettek a programban, főleg az asztroszeizmológiai kutatásokban.



5.3. ábra. A CoRoT-7b, az első kőzet exobolygó. (fantáziarajz, ESO/L. Calçada)

A CoRoT űrtávcső mérései alapján már 2007-ben találtak egy gázóriás exobolygót (CoRoT-1 b). 2009-ben jelentették be az első kőzet exobolygó felfedezését (CoRoT-7 b), amely egy öt földtömegnyi égitest és Napunkhoz hasonló csillag körül kering igen közel. Egy (földi) napnál is kevesebb idő alatt kerüli meg egyszer a központi csillagát úgy nevezett kötött keringéssel, mindig ugyanazt az oldalát fordítva a csillaga felé. A felszínén, legalábbis csillaga felől, pokoli hőségben láva óceánokról beszélhetünk (5.3. ábra). A CoRoT űrtávcsőhöz 34 exobolygó-felfedezés köthető és közel 600 exobolygójelölt várja a megerősítését. Az űrmisszió 2014-ben ért véget [114].

2009-ben egy még eredményesebb távcső került az űrbe, a nagy csillagászról, Johannes Keplerről elnevezett űrtávcső (5.4. ábra). Egyik célja a földszerű exobolygók felfedezése és gyakoriságuk meghatározása volt.



5.4. ábra. A Kepler űrtávcső megfigyel egy csillagot, amely előtt egy bolygója éppen átvonul. (fantáziarajz, Wendy Stenzel/NASA)

A fotometriai mérés ötlete már 1971-ben megjelent F. Rosenblatt cikkében, amelyben arról írt, hogyan lehet az exobolygók méretét és keringési periódusát meghatározni a tranzit módszer segítségével [115]. 1984-ben W. J. Borucki és A. L. Summers is foglalkozott ezzel a témával, és megállapították, hogy a földfelszínről történő megfigyeléssel csak nagyobb, Jupiter-méretű égitestek fedezhetők fel fotometriai módszerrel a kisebb, Föld-méretű planéták észleléséhez az űrbe kell telepíteni a távcsövet [116]. Borucki szorgalmazta a megvalósítást is, amely végül 2001-ben kezdődhetett el, miután fotometriai módszerrel is fedeztek már fel exobolygót földi távcsövekkel. Ő lett a NASA Kepler-missziójának a vezetője. A hosszú előkészítés meghozta a gyümölcsét, a Kepler-űrszonda ontotta az új felfedezéseket, köztük, ahogy várták, kisebb, Földhöz hasonló méretű exobolygókat is talált.

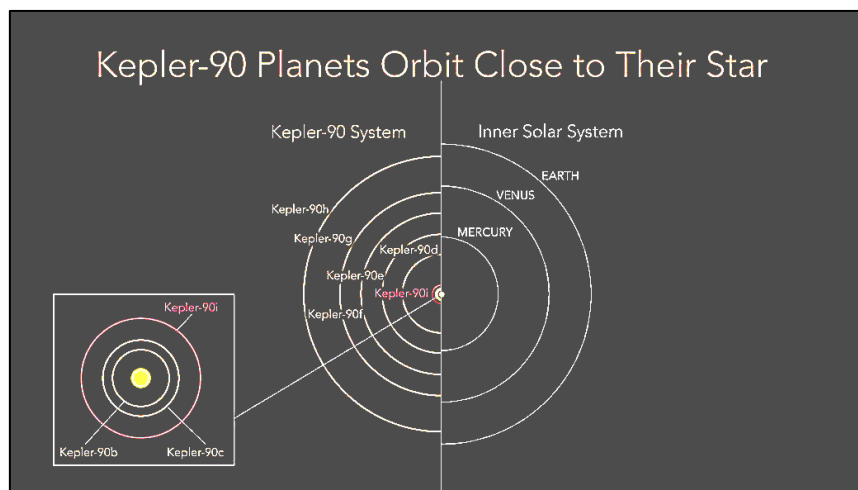
A Kepler űrtávcső Nap körüli pályán kering, 372,5 napos periódusidővel. A folyamatos megfigyeléshez fontos, hogy a távcső látómezője távol legyen az ekliptikától, így sem a Hold, sem a Nap nem takarja el a megfigyelt égterületet. A Hattyú és Lant csillagképek határán lévő, nagy csillagsűrűségű területre esett végül a választás, az ott lévő csillagokból 150000, főleg 9 és 16 magnitúdós csillag fényességét mérte 0,00001 magnitúdós pontossággal 1,4 m tükörátmérőjű távcsövével. Az adatok kiértékelésében, elemzésében, a megerősítő észlelésekben magyar csillagászok is eredményesen vettek, vesznek részt.

Az űrtávcső működését 3-4 évre tervezték, de reménykedtek az űrtávcső további használatában is. Ez az űrmisszió nagyon jó példa arra is, hogy milyen leleményesek a csillagászok, hogyan tudnak az adott körülményeknek megfelelően átalakítani egy űrmissziót. Ugyanis miután két (a stabil iránytartáshoz szükséges) lendkereke is meghibásodott a négyből, az eredeti feladatát már nem tudta ellátni a Kepler-űrtávcső. Viszont az új, úgynevezett K2 küldetés során, 2014-től újabb exobolygókkal is gazdagodtunk méréseiből más egyéb csillagászati megfigyelések, eredmények mellett. A Kepler űrteleszkóp több mint kilenc évig gyűjtötte az adatokat [117]. Ezek feldolgozása még sok évig ad munkát a kutatóknak, sőt megnyíltak a nagyközönség előtt is úgy nevezett citizen science projekteknél (Planet Hunters). Egy tudományos összefoglaló és gyakorlati kipróbálás után már bárki keresheti az exobolygó által okozott fényességcsökkenéseket a csillagok fénygörbéjében. A felfedezés pontosításában már csillagászok segítenek az önkéntes keresőknek és sikeres felfedezés után a közölt cikknek egyik szerzője az önkéntes kutató [118]. A Kepler-űrtávcső segítségével közel 3000 (megerősített) exobolygó-felfedezés történt, és több mint háromezer exobolygójelölt várja, hogy megerősítsék. Más kutatócsoportok általi mérések fontosak, ugyanis a fényességcsökkenés nemcsak

exobolygó csillag előtti áthaladásakor léphet fel, hanem például a napfoltokhoz hasonlóan a csillagfoltoknál is.

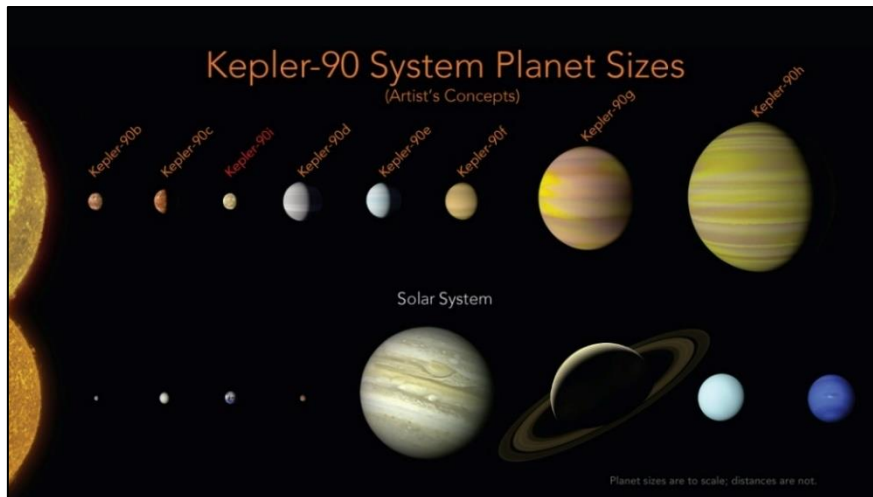
A Kepler-űrtávcső egyik korai (2010-es) felfedezése a Kepler-11 csillag exobolygórendszere, amely egy a Naphoz hasonló csillagból és körülötte hat exobolygóból áll. Mind a hat exobolygó nagyobb a Földnél és közelebb kering csillagához, mint a Vénusz a Naphoz. Készült egy rövid animáció⁷² az exobolygórendszerről, amely a NASA Video Collection egyik fél perces videója.

A Kepler űrmisszió eredményeként tudjuk, hogy az exobolygók száma felülmúlja a csillagokét, így több száz milliárd exobolygóról beszélhetünk csak a Tejútrendszerben [119]. Kezdetben főleg forró-Jupitereket fedeztek fel, mert azokat könnyebb, mind a radiális sebesség módszerrel, mind a tranzit módszerrel megtalálni, hiszen a csillagjukra jelentősebb hatást fejtenek ki, mint egy kisebb vagy távolabb keringő exobolygó. A Kepler űrtávcső méréseinek alapján tudjuk, hogy gyakoriak a kisebb exobolygók, sőt a csillagok 20-50%-nak lehet közet exobolygója a lakhatósági zónájában. Tehát az elméletileg lakható exobolygók száma sem kevés. Földhöz hasonló exobolygókat (például a Kepler-452b) is találtak. Tudjuk azt is, hogy az exobolygók igen változatosak, sőt a leggyakoribb bolygótípusok, a szuperföldek, vagy mini-Neptunuszok nem is fordulnak elő a Naprendszerben. Maguk az exobolygórendszerek is sokfélék, sok exobolygó kering igen közel a csillagához. A Kepler-90 nyolc exobolygója mind közelebb kering csillagához, mind a Föld a Naphoz (5.5 ábra és 5.6. ábra).



5.5. ábra. Kepler-90 exobolygói és a Naprendszer belső bolygói. (NASA/Ames Research Center/Wendy Stenzel)

⁷² <https://www.youtube.com/watch?v=rx4XCaTO6Sk>



5.6. ábra. Kepler-90 exobolygói és Naprendszerünk bolygói. (NASA/Ames Research Center/Wendy Stenzel)

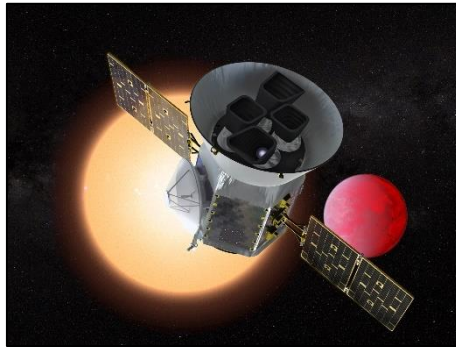
A szokatlanul tömör bolygórendszerek kérdéseket vetnek fel a bolygók keletkezésével, illetve vándorlásukkal kapcsolatban is.

A Fizikai Szemle folyóirat több cikke is foglalkozik mind a Kepler, mind a CoRoT űrszondákkal és az exobolygó kutatás eredményeivel [120], [121], [122], [123], [124], [125], [126], [127], [128].

Az előzőekben ismertetett űrtávcsövek közül a CoRoT és a Kepler egyik legfontosabb feladata az exobolygók felfedezése volt. A MOST kis űrtávcső lényegében az űrbéli fotometriai vizsgálatok létjogosultságát igazolta. Az ebben az időszakban működő egyéb űrtávcsövek közül is voltak, amelyek hozzájárultak az exobolygó kutatás eredményeihez. A Hubble-űrtávcső exobolygók légköri alkotóelemeit mutatta ki (2001-ben HD209458b Na, H, C, O, 2008-ban HD189733b szerves molekula), de a Fomalhaut b exobolygóról is készített képet (2008-ban). Az infravörös tartományban működő Spitzer-űrtávcső elsőként detektált exobolygóról (HD209458b) jövő (infravörös) fényt (2005-ben), majd vizsgózt mutatott ki a HD189733b spektrumában (2007-ben).

Folytatódott az exobolygókat kutató űrtávcsövek tervezése, fellövése is. 2018-ban kezdte meg működését a TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite, 5.7. ábra). Az űrtávcső Föld körüli pályájának érdekessége, hogy 2:1-es rezonanciában áll a Hold keringésével. A közeli fényes csillagokat vizsgálja az egész égbolton többek között exobolygók okozta tranzitot keresve, elsősorban lakható kőzetbolygók után kutatva. A közeli exobolygók földi távcsöves követő

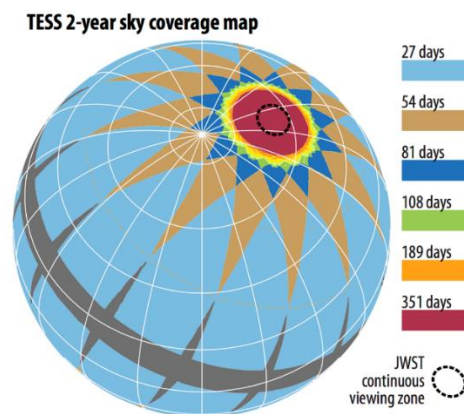
vizsgálatai is könnyebben megvalósíthatók, mint a távolabbiaké, amely előnye a TESS-űrtávcső által felfedezett exobolygóknak.



5.7. ábra. A TESS-űrtávcső művészi képe. (NASA TESS Images)

Az űrmissziót két évre tervezték, de remélhetőleg egy évtizedig is működhet. Elfogadott exobolygófelfedezése még nincs sok (200), de ötezer jelölt várja a megerősítést [129].

A TESS négy 10 cm-es távcsővel vizsgálódik egyszerre. Érdekes megmutatni diákjainknak egy animáción⁷³, hogyan változik 27 naponta a megfigyelt égterület. Az űrtávcsövek munkájának egymást segítségét mutatja, hogy a James Webb űrteleszkóp által folyamatosan megfigyelt égterület a TESS űrtávcső által leghosszabban megvizsgált részre esik (5.8. ábra).



5.8. ábra. A TESS-űrtávcső által megfigyelt égbolt területek. (TESS Science Operations Center)

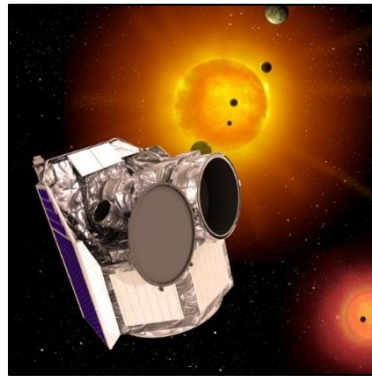
Az űrtávcső exobolygófelfedezései mellett megemlítendő egy hatos csillagrendszer felfedezése is, amelyben három kettőscsillag kering egy rendszerben. A TESS-űrtávcső a csillagok közötti fedéseket figyelte meg, ebből következtek a rendszerre [130].

⁷³ <https://svs.gsfc.nasa.gov/12887> <https://svs.gsfc.nasa.gov/12885>.

A TESS fénygörbéi is szabadon tanulmányozhatók, a citizen science Planet Hunters programjában a Kepler után már a TESS által megfigyelt fénygörbéket láthatjuk [131].

A TESS misszióval kapcsolatosan is készültek oktatást segítő anyagok, ezek közül az például az exobolygós ábécénél⁷⁴ minden egyes (angol) betűhöz készítettek egy látványos képet, posztert, amelyeken az exobolygók témájával kapcsolatos kifejezéseket magyaráznak meg.

Az ESA CHEOPS (CHAracterising ExOPlanet Satellite, 5.9. ábra) űrteleszkópja 2019 végén került fellövésre. Föld körüli pályán kering a nappalt az éjszakától elválasztó terminátor vonal felett 700 km-re.



5.9. ábra. A CHEOPS űrtávcső művészi képe. (ESA-C. Carreau)

Az űrtávcső egyik feladata közeli fényes csillagok ismert exobolygóinak megfigyelése, méretük pontosabb meghatározása. Előfordult, hogy miközben egy csillag körül két ismert exobolygót vizsgált, egy harmadikat (Nu2 Lupi d) is felfedezett. A már említett (4.3.2.) TOI-178 exobolygórendszerben a Laplace-féle lánc rezonancia, illetve egyik exobolygója felfedezéséhez is hozzájárult ez az űrtávcső. A CHEOPS űrtávcsőnek is van honlapja⁷⁵, de ezen kívül két színes, a tanításban is felhasználható kiadványban foglalták össze magával az űrtávcsővel és az exobolygókkal kapcsolatos tudnivalókat [132], [133].

Egy űrmisszió, egy űrtávcső tervezése, elkészítése évekig, vagy akár több, mint egy évtizedig tart a fellövésig. Vannak jelenleg is folyamatban exobolygó kutatással kapcsolatos űrtávcső tervek. A már (2021 végén) sikeresen fellőtt James Webb űrtávcső többek között exobolygó légköröket fog vizsgálni. Előrehaladott állapotban vannak a PLATO (PLANetary Transits and Oscillations), a Nancy Grace-Roman (korábban WFIRST Wide Field Infrared Survey Telescope) és az ARIEL (Atmospheric Remote-Sensing Infrared Exoplanet Large-survey)

⁷⁴ <https://explorers.gsfc.nasa.gov/abcs/index.html> ABCs of Exoplanets

⁷⁵ <https://cheops.unibe.ch>

űrtávcsövekkel kapcsolatos munkálatok is. Terveznek, építenek nagy földi teleszkópokat is és nem feledkezhetünk el a kisebb projektekről sem. Tehát az exobolygó kutatás még éveken át az egyik vezető terület lesz a csillagászatban, főleg a lakhatóság, illetve a földönkívüli élet keresése szempontjából. Kiss László akadémikus sokszor felhívja a fiatalok, diákjaink figyelmét arra, hogy ilyen területen biztos a munkalehetőség.

5.3 Miért érdemes exobolygókkal kapcsolatos ismereteket tanítani?

Külön megvizsgálva a fizika különböző területeivel való kapcsolatát, láthatjuk, hogy szinte minden témakörhöz találunk kapcsolódási pontot [134]. Az exobolygókkal kapcsolatos ismeretek tanítása jó alkalom lehet a komplex szemlélet fejlesztésére is, mert azon kívül, hogy csillagászati ismeretekkel gazdagíthatjuk diákjainkat, beszélhetünk planetológiai, geológiai, meteorológiai, fizikai, kémiai, biológiai vonatkozásairól is. Kapcsolatot teremt a téma az irodalommal és művészetekkel is.

5.3.1 A bolygófogalom megszilárdítása

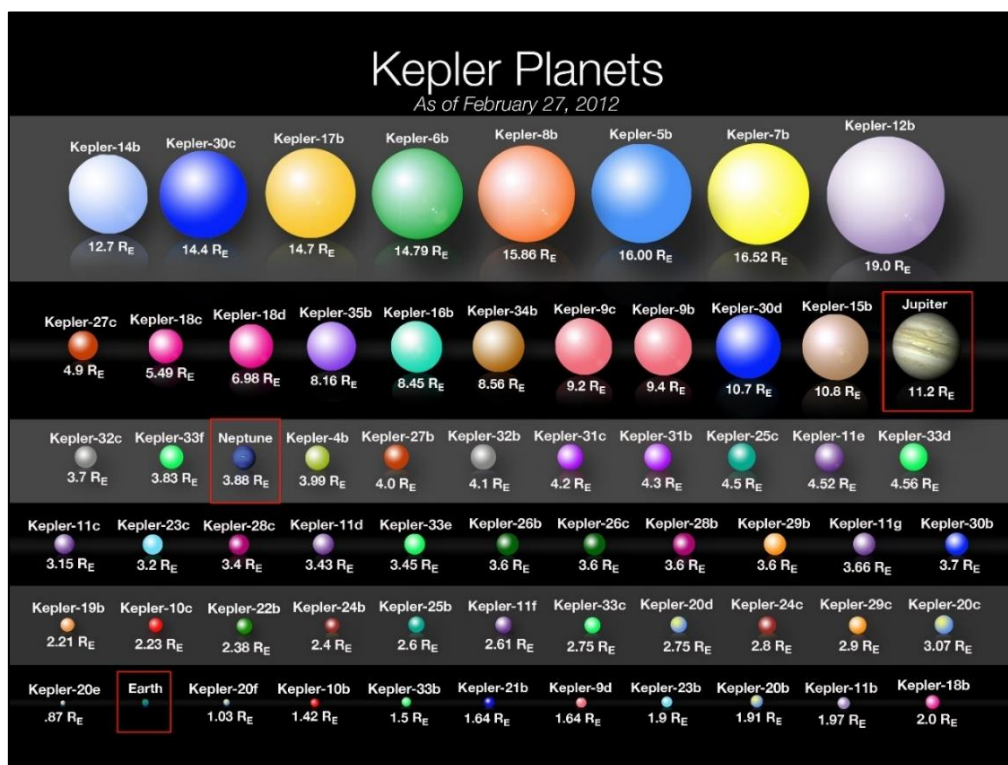
Az exobolygók mélyebb megismerése segít a helyes bolygófogalom megszilárdításában, illetve az égitestek csoportosításában. Míg a naprendszerbeli kutatásoknál, az új égitestek felfedezésével a bolygók alsó tömeghatára, addig az exobolygó kutatásnál a felső tömeghatár került előtérbe, amely a barna törpéktől különíti el a bolygókat. Fontos bemutatnunk diákjainknak, hogy az új felfedezések szaporodásával elengedhetlenné válnak csillagászati fogalmaink (például: csillag, bolygó) pontosítása, definiálása.

A Naprendszeren kívül eleinte nagy tömegű exobolygókat fedeztek fel, így köztük és a barna törpék között kellett határvonalat húzni. Erre már 2003-ban született ajánlás az IAU részéről. Eszerint exobolygók azok az égitestek, amelyek csillagok, vagy csillagmaradványok körül keringenek, és tömegük alatta marad annak a határértéknek, amelynél a deutérium termonukleáris fúziója beindulna (körülbelül 13 Jupiter-tömeg). Ha egy égitest tömege ennél nagyobb, akkor barna törpének nevezzük. Lényegében a barna törpék felfedezése (1995 szeptemberben történt az első, Teide 1, [135]) egy időben, párhuzamosan zajlott az exobolygókéval. Az ismert barna törpék száma is már ezres nagyságrendű, így további

csoportosításuk is megtörtént (M, L, T és Y típusokról beszélhetünk), számukat csak a Tejútrendszerben több száz milliárdnyira becsülik, a csillagok számához hasonlóan. A legkisebb tömegű csillagok, a vörös törpecsillagok, amelyekben már a hidrogén fúziója is beindul, legalább 80 (75-90) Jupiter-tömegűek, így ez a barnatörpék tömegének felső határa.

Egyelőre az exobolygók alsó tömeghatárával kapcsolatban még nincs probléma, mert a Földhöz hasonló tömegű vagy annál kisebb exobolygó-felfedezésekből nincs sok. A csillagközi térben felfedezett szabadon, magányosan vándorló égitestek besorolása szintén kérdéseket vet fel. A (13 Jupiter-tömegnél) kisebb tömegű égitestek (kőbor bolygók, nomád bolygók) esetén nem ismert, hogyan keletkeztek, hiszen elképzelhető, hogy csillag körül formálódtak, majd valamilyen (más bolygók, vagy közeli csillag okozta) gravitációs hatás folytán kidobódtak a rendszerükből. Az is elképzelhető, hogy kisebb anyagfelhő összezsugorodása folytán keletkeztek, de kis tömegük miatt nem indult be bennük a fúziós energiatermelés, így nem tekinthetők csillagnak. Ezek az objektumok nagyon nehezen figyelhetők meg, de körükben is szaporodnak a felfedezések és ezek alapján a kutatók úgy gondolják, hogy számuk csak a Tejútrendszerben milliárdnyi is lehet.

Az exobolygók változatos világa újabb kérdéseket vet fel a bolygótípusokkal kapcsolatban is.



5.10. ábra. Különböző méretű (Kepler-űrtávcső által felfedezett) exobolygók, valamint a Föld, a Neptunusz és a Jupiter, összehasonlítási alapul. (NASA/Kepler Mission/Wendy Stenzel)

Amennyire elkülönül a Naprendszerben a belső, kőzetbolygók csoportja a külső, óriás gázbolygóktól, az exobolygók között minden mérettartomány megtalálható, folytonos az átmenet a kis kőzetbolygóktól a gázóriásokig (5.10. ábra). Egy 10 földtömeg körüli exobolygó lehet kőzet szuperföld, vagy gáz mini-Neptunusz, a határ megállapítása még előttünk álló feladat, ha egyáltalán meghatározható. Nemcsak a besorolás nehéz, de a helyük sem olyan egyértelmű, mint a Naprendszerben, több óriás gáz exobolygó (forró-Jupiter) közelebb kering csillagához, mint a legbelső bolygónk, a Merkúr a Naphoz.

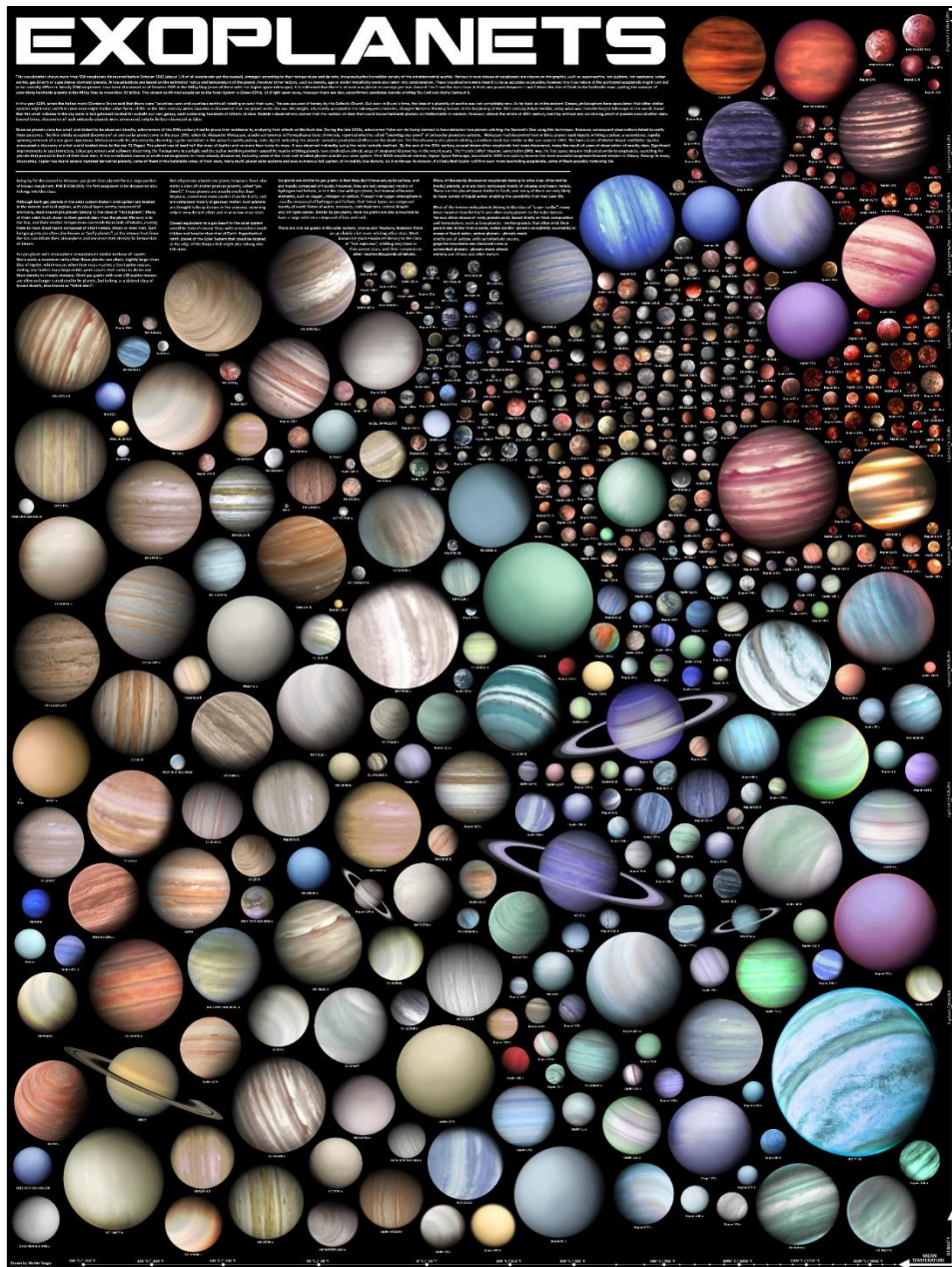
Kedvenc téma az infografikáknál az exobolygók ábrázolása, egy szlovák művész (Martin Vargic) több, mint ötszáz ismert exobolygó egy képen való szerepeltetésével mutatta be az exobolygók sokféleségét (5.11. ábra). Akár így is láthatnánk messziről ezeket a bolygókat, de fontos felhívni tanulóink figyelmét arra, hogy ezek művészi rajzok, képek, nem valóságos fényképek. Az ismeretterjesztéssel is foglalkozók szívesen alkalmaznak művészeket az exobolygók ábrázolására, akik ismerve az adott égitest tulajdonságait (tömegét, méretét, sűrűségét, összetételét, felépítését, csillagától való távolságát, hőmérsékletét, légkörének alkotóelemeit stb.) próbálják minél inkább az adatoknak megfelelően megjeleníteni az exobolygókat.

A sok színes gömböt ábrázoló kép felkeltheti olyan tanulók érdeklődését is, akiket a természettudományok nem nagyon érdekelnek. A képről további információk is nyerhetők az ábrázolt exobolygókkal kapcsolatosan, ugyanis egy hőmérséklet-sűrűség diagramban helyezkednek el az egyes exobolygók. A kép elérhető nagy felbontásban is, amelyen már jól olvashatóak az egyes égitestek nevei, így könnyen találunk például kis sűrűségű forró gáz exobolygót (HAT-P-7b) vagy nagy sűrűségű forró lávabolygót (Kepler-10b).

Léteznek interaktív infografikák⁷⁶ is exobolygókkal kapcsolatosan, ezeken keresgélve szórakoztató módon ismerhetjük meg az exobolygókat. Összehasonlításként a Naprendszer bolygóit is ábrázolják. Találunk olyat⁷⁷ is, amelyen nemcsak nagyság szerint ábrázolják, hanem a felfedezés módja szerint színezik is az exobolygókat.

⁷⁶ <http://codementum.org/exoplanets/>

⁷⁷ <https://cosmos-book.github.io/exoplanets/index.html>

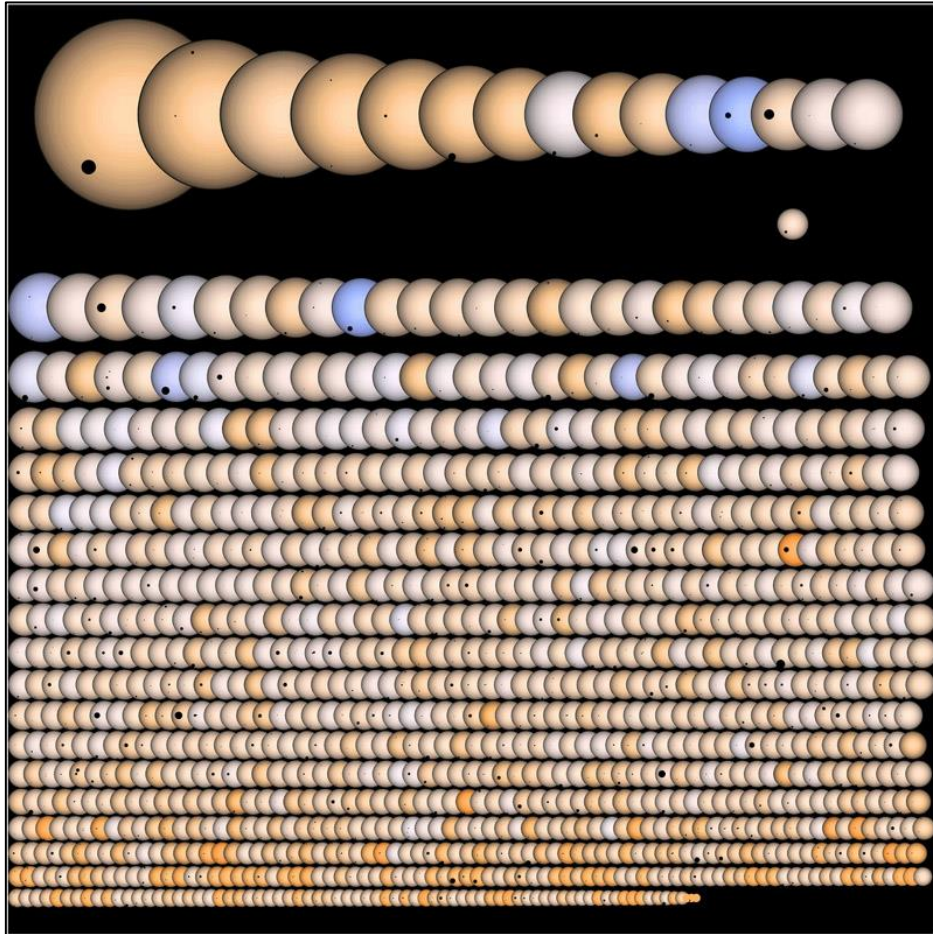


5.11. ábra. Infografika mutatja az exobolygók sokféleségét. (Martin Vargic)

Az exobolygókat vizsgálhatjuk csillagaik szerint is. A 5.12. ábrán szereplő kép a nap csillagászati képe⁷⁸ is volt 2011-ben. Az addigi felfedezések is mutatják, hogy mindenféle csillag körül találtak már exobolygót, sőt az is megfigyelhető, hogy nagy méretű csillagoknak is lehetnek kis méretű bolygókísérői, illetve nagy exobolygó is keringhet kisebb vörös törpecsillagok körül, teljes a változatosság. Látunk példát több exobolygós csillagra is a képen. Az exobolygókutatás nem mellékes célja, hogy saját bolygónkat, bolygórendszerünket is minél

⁷⁸ <https://apod.nasa.gov/apod/ap110329.html>

jobban megismerjük. Ezen a képen is feltüntették külön a Napot (az első sor alatti különálló csillag) illetve két bolygóját, a Jupitert és a (kis mérete miatt szinte megfigyelhetetlen) Földet. Láthatjuk, hogy a Nap egy átlagos méretű csillag és szembetűnő, hogy a legtöbb exobolygó eltörpül csillagához viszonyítva, amely magyarázza, hogy miért kellett olyan sokáig várni főleg a kisméretű kőzetbolygók felfedezésére.



5.12. ábra. A Kepler-űrtávcső által felfedezett exobolygók és csillagaik. (Jason Rowe)

5.3.2 A tudomány működésének bemutatása az exobolygók felfedezésének segítségével

Felmerül az a kérdés is, hogy van-e olyan csillag, amelynek nincs bolygókísérője. Valami hiányának a bizonyítása nehéz, azért mert egy csillagnak még nem fedeztük fel bolygókísérőjét nem állíthatjuk, hogy nincs is neki. Előfordulhat, hogy túl kis méretű, túl távol van csillagától, vagy éppen túlságosan is közel, amely körülmények igen megnehezítik az észlelését. A probléma nehézségét talán a Barnard-csillag esetével világíthatjuk meg a legjobban. Felfedezése (1916, Edward Emerson Barnard) óta sokan vizsgálták ezt a vörös törpecsillagot,

hiszen az egyik közeli, egyben legnagyobb sajátmozgású csillagszomszédunk (6 fényévre a Naptól). Az égbolton való mozgásának vizsgálatokor Peter van de Kamp hullámzást, imbolygást vett észre, amelyet bolygókísérő(k)nek tulajdonított. Az 1960-as években be is jelentett először egy a Barnard-csillag körüli gázóriást, majd ezt módosította két gázbolygóra [136]. Peter van de Kamp tovább vizsgálta a Barnard-csillagot és már négy évtizedes (1938-1981) adatai alapján pontosította a két általa feltételezett exobolygó adatait [137].

A Barnard-csillagot mások is vizsgálták és szerették volna észlelni a bolygókísérőit, de ez a többi csillagásznak nem sikerült [138]. Peter van de Kamp egyik munkatársa (John L. Hershey, Sproul Observatory, Pennsylvania, USA) a Barnard-csillagot tartalmazó fotólemezekon megvizsgálta a többi csillag mozgását is és meglepetésére mindegyiknél hasonló hullámzó mozgás volt megfigyelhető, mint a Barnard-csillagnál. Bár elképzelhető lett volna, hogy ez az exobolygófeldedezések berobbanását okozza, minden csillagnál bolygókísérőt találva, de sajnos ez egy műszerhiba szisztematikus megjelenése volt a fotólemez minden csillagánál. Peter van de Kamp a kritikák ellenére haláláig (1995) hitte, hogy (elsőként) exobolygókat fedezett fel a Barnard-csillag körül [139].

A történetnek ezzel nincs vége, a Barnard-csillag továbbra is kedvenc észlelési, megfigyelési célpont volt, még a Hubble űrteleszkóppal is megfigyelték, de sajnos nem találtak bizonyítékot bolygókísérők létezésére.

A Red Dots kampányban több csillagvizsgáló adatai alapján keresnek bolygókísérőket közeli csillagok körül. 2016-ban sikeresen bejelentették a legközelebbi csillag, a Proxima Centauri exobolygóját [140], [141]. A Proxima Centauri b exobolygó létezését már megerősítették, sőt a további vizsgálódások során két újabb exobolygót (2019, Proxima Centauri c, 2022, Proxima Centauri d) is felfedeztek a rendszerben.

A Red Dots kampány következő közeli csillagcélpontja a Barnard-csillag volt. 2018-ban húszévnnyi radiálissebesség-adat vizsgálata alapján egy bolygókísérő jelenlétére következtettek [142]. A Barnard-csillag újabb exobolygójelöltjénél sajnos nem a megerősítő adatok, hanem újra cáfolat jelentkezett egy későbbi, mások vizsgálódásai után írt cikkben [143].

A Barnard-csillag exobolygójának keresése megmutatja milyen nehéz is kimutatni egy exobolygót. Láthatjuk a tudomány működésének fontos lépéseit is. Főleg a csillagászatban általános a hosszantartó megfigyelés, kutatómunka, többévnnyi adatsokaság feldolgozása, értelmezése. A kutatások eredményét a tudományos közösséggel meg kell ismertetni, amely általában egy cikk írását jelenti konferencia előadások mellett. Láthatjuk, hogy fontos mások

eredményének ellenőrzése, az első cikkekben exobolygójelöltreől beszélnek várva a megerősítő publikációkat. Cáfolat esetén fontos az adatok felülvizsgálata, más kutatók adataival való összehasonlítás, újabb vizsgálatok elvégzése. A tudományos együttműködés fontosságára is példa ez, hiszen több neves csillagvizsgáló munkáját, adatait fogta össze a Red Dots kampány. A tudományos vitákat csak további, újabb adatok gyűjtése után lehet eldönteni, amelyeknél fontos az egyre nagyobb pontosság, megbízhatóság. Egyetértés csak olyan esetben lesz, ha a kutatási eredmény, egy bárki által megvizsgálható, igazolható állítás és természetesen mindig ugyanarra az eredményre vezet. Így a Barnard-csillag esetében is további vizsgálatokra, nagyobb pontosságú adatokra van szükség ahhoz, hogy a bejelentett bolygójelöltjét elfogadják (megerősítsék). Peter van de Kamp-nak a Barnard-csillag körüli exobolygó felfedezéséhez haláláig való ragaszkodása példa lehet arra, hogy egy-egy nagyon várt eredmény (jelen esetben az első exobolygó felfedezése) annyira „elvakíthatja” a tudóst, hogy nem látja be mások munkájának helyességét, ha az az ő eredményének létét kérdőjelezi meg.

Az internetes hírcsatornák és más webhelyek naprakészségét, illetve hitelességét is mutatja, hogy mennyire követik a hírek utóéletét. A már ajánlott magyaryelvű csillagászati hírportál (<https://www.csillagaszat.hu>) mind a Barnard-csillag bolygójelöltjéről (Szuperföld kering a Barnard-csillag körül, 2018. november 14.) mind az ennek létét kétségbe vonó hírről (Fellángolt a csillagászok vitája a Barnard-csillag szuperföldjéről, 2021. május 29.) beszámolt részletesen és közérthető stílusban. Egy korábbi írásukban a Barnard-csillagot is részletesebben bemutatták. (A leggyorsabb csillag, 2016. szeptember 18.)

Az exobolygófelfedezések története számos érdekességet rejt. A kezdeti felfedezések igen meglepték a csillagászokat. Többször olyan helyen és olyan módszerrel történt a felfedezés, amelyre nem számítottak. Az elméleti számítások, elképzelések már rendelkezésre álltak, korábban megjelentek cikkekben, csak a megfelelő pontosságú észlelési technikák hiányoztak [144]. Interaktív idővonalak (PlanetQuest Timeline⁷⁹, Kepler Timeline⁸⁰, Historic Timeline⁸¹) segítségével mutathatjuk be diákjainknak az exobolygókkal kapcsolatos felfedezések legfontosabb állomásait, az ókori elképzelésektől 2019-ig. A következőkben néhány fontosabb mozzanatot ismertetek időrendi sorrendben, amelyet érdemes tanulóinknak is megemlíteni. Egy felfedezés elsősége mindig fontos, a második, sokadik exobolygó felfedezés már önmagában nem olyan nagy hír, legfeljebb, ha valami különlegesség, elsőség is jellemzi a felfedezést. Az

⁷⁹ <https://exoplanets.nasa.gov/resources/1048/planetquest-timeline/>

⁸⁰ <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/kepler-timeline/#roadmap-for-planet-hunting>

⁸¹ <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/historic-timeline/#first-planetary-disk-observed>

első exobolygó felfedezésnél (1992) is vannak, akik korábbi mérésekről tesznek említést, de fontos hangsúlyozni, hogy a felfedezésnek széleskörűen elfogadottnak, megerősítettnek kell lennie.

Az 1991-es év a pulzár-bolygókról szólt. Két csoport is végzett megfigyeléseket ilyen téren. Matthew Bailes és Andrew Lyne be is jelentette, hogy találtak (a PSR 1829-10) pulzár körül bolygókísérőt. Ez az akkor elsőnek tekinthető felfedezés nagy visszhangot kapott a hírekben is, mert az elsőségén kívül egy csillagmaradvány körül találták az exobolygót, olyan helyen, ahol talán legvégső esetben keresték volna. 1992 elején egy konferencián (AAS 1992) készültek bejelenteni a tudományos közösség előtt eredményüket. Saját modelljüket vizsgálva felfedeztek egy hibát benne (a Föld keringését nem megfelelően vették figyelembe). A konferencián becsületesen bejelentették, hogy sajnos hibáztak, és a korrekció után már nem találták meg az exobolygó okozta eltérést a pulzárjelekben. A többi csillagász ezt a bátor, őszinte bevallást hangos tetszésnyilvánítással köszönte meg. Nem kell megszégyenítéstől, megszégyenüléstől tartani, azoknak, akik hibáznak, ha nyíltan beismerik tévedésüket. A hibázás, illetve az azokból való okulás hozzátartozik a tudomány működéséhez. A bejelentés után újra ismert exobolygó nélkül maradt a világ, de nem sokáig, mert következő felszólalóként a másik pulzárakat vizsgáló csapat jelentett be exobolygókat és ők helyesen vették figyelembe a Föld keringését. Így az első exobolygókat, amelyeket 1991 novemberében Alekszander Wolszczan és Dale Frail figyelte meg a PSRB1257+12 jelű pulzár körül, 1992-ben jelentették be. Mivel a pulzárak igen gyorsan forgó neutroncsillagok, a csillagok egyik végállapotai, így ez a felfedezés azt is jelentheti, hogy az exobolygók túlélhetik csillagjukat. Ez csak az exobolygóra, mint égitestre vonatkozik a rajta esetlegesen létező életformákra nem, mert a pulzárak közeli bolygókísérőiket igen erős röntgensugárzásukkal lakhatatlanná teszik, legalábbis a földihez hasonló élet számára. Másik lehetőség, hogy az exobolygók egy szupernóva robbanást követően keletkeztek a visszamaradt pulzár körül.

Az első Naphoz hasonló csillag körüli felfedezés 1995-ben történt, az 51 Pegasi fősozozatbeli csillag körül egy olyan, fél Jupiter-tömegű exobolygót találtak, amely csillagát mindössze 4 nap alatt kerüli meg. Ez a később Nobel-díjat érő felfedezés is különlegesnek számított, hiszen a Naprendszerben a gázbolygók a Naptól jóval messzebb keringenek, ilyen úgynevezett forró-Jupiter típusú bolygóval ekkor találkoztak először a csillagászok.

Az exobolygó felfedezések közül érdemes megemlíteni, hogy kettős csillagrendszer egyik tagja (55 Cancri A) körül fedeztek fel exobolygókat 1996-ban. Az 55 Cancri AB rendszerben jelenleg már öt exobolygót ismerünk. Az ezredfordulón már ismertek több bolygót tartalmazó rendszert

is (Üpszilon Andromedae). A tranzit módszerrel is fedeztek fel exobolygót (HD209458b), így az ezen módszert alkalmazó űrtávcsövek terveinek megvalósítása is elkezdődhetett. 2001-ben a Hubble-űrtávcsővel vizsgálták a HD209458b exobolygó légkörét és hidrogénen kívül nátriumot is találtak benne. Azóta további 20 összetevőt, köztük vizet mutattak ki az exobolygó (forró-Jupiter) légkörében.

2004-ben készült az első (infravörös) kép exobolygóról (2M1207b). 2005-ben fedeztek fel először exobolygót gravitációs mikrolencse módszerrel (OGLE-2005-BLG-390Lb).

A 2009-ben felfedezett CoRoT-7b kőzetbolygó a Föld méretének kétszerese, majd 2011-ben a Kepler-10b a Föld méretének másfélszerese, úgynevezett szuperföldek. 2014-ben felfedezik az első Föld-méretű, lakhatósági zónában keringő kőzetbolygót (Kepler-186 f). A 2015-ben felfedezett Kepler-452 b Naphoz hasonló csillag körül kering 385 napos periódussal. Bár kicsit nagyobb a Földnél, de akár kőzetbolygó is lehet ez a szuperföld. 2016-ban a legközelebbi csillag, a Proxima Centauri körül fedeztek fel exobolygót, ráadásul a lakhatósági zónájában. 2017-ben a TRAPPIST-1 exobolygórendszerben hét Földhöz hasonló méretű exobolygót fedeztek fel, amelyekből több a csillag lakhatósági zónájában kering. Ugyancsak 2017-ben a Kepler-90 csillag körül nyolc exobolygó ismert, a Naprendszerrel megegyező számban, de mind közelebb kering csillagához, mint a Föld a Naphoz képest. Ezen felsorolásban a fontosabb eredményekre helyeztem a hangsúlyt, az eredmények elérésében fontos üresközökről már a 5.2.3. fejezetben tettem említést szintén időrendi sorrendben. Ezt a listát lehet bővíteni, hisz mindenkinek más jelent igazi különlegességet.

5.3.3 Magyar vonatkozások

Számos magyar kutató is bekapcsolódik a nemzetközi kutatásokba, a Kepler-programba és a többi űrtávcsővel kapcsolatos munkába is.

Létezik magyar exobolygókutató csoport is a HATNet⁸² (Hungarian-made Automated Telescope Network). Bakos Gáspár vezetésével tervezték a 11 cm átmérőjű automatizált távcsöveket (5.13. ábra). Az elkészítésben Sári Pál gépészmérnök, Papp István elektromérnök és Lázár János szoftvermérnök segített. 2001-ben készült el az első robottávcső, és azóta már több helyszínre telepítettek belőlük. Az északi égboltot Arizonából és Hawaii-ból figyelik

⁸² <https://hatnet.org/>

(néhány évig Izraelben is volt távcső), míg a déli égboltot (HATSouth⁸³) 2009-től Chiléből, Namíbiából és Ausztráliából.



5.13. ábra. A hawaii-i és az arizonai HATNet robottávcsövek (Bakos Gáspár fotói).

2006 augusztusában került sor a magyar HATNet csoport első exobolygó felfedezésére (HAT-P-1b). Egy 453 fényévre levő kettőscsillag halványabb tagja körül, igen közel kering a fél Jupitertömegű HAT-P-1b elnevezésű exobolygó 4,5 napos periódussal. 2009-ben találtak egy retrográd keringésű exobolygót is (HAT-P-7b), vagyis csillagának forgási irányával ellentétesen keringőt. Az American Astronomical Society fiatal kutatóknak adható rangos elismerését, a Newton Lacy Pierce díjat, 2011-ben Bakos Gáspárnak, az egyik legeredményesebb exobolygóvadásznak ítélték. 2013-ban pedig Magyar Örökség-díjas lett Bakos Gáspár és a HATNet program [145], [146]. A csoport már közel 150 exobolygó felfedezésével büszkélkedhet és egy majdnem az egész égboltot látó 64 lencsés robottávcsöves program (HATPI⁸⁴) beindításán dolgozik.

5.3.4 Az exobolygók sokféleségének ismerete gazdagítja világszemléletünket

Már 5000 Naprendszeren kívüli bolygót ismerünk, az első 30 évvel ezelőtti felfedezése óta. Milyenek ezek az exobolygók? Sokfélék. A legegyszerűbb foglalkozás a témával, ha bemutatjuk diákjainknak a körülöttük levő Világegyetem változatosságát. Tanulóink közül akad olyan is, aki szívesen utánanéző az exobolygókkal kapcsolatos ismereteknek, legújabb felfedezéseknek és saját szempontjai szerint rendszerezi azokat, készít egy „kiselőadást” a témában. Társaiknak készült bemutató nagyobb hatással van a hallgatókra, mint például a tanár

⁸³ <https://hatsouth.org/>

⁸⁴ <https://hatpi.org/>

által elmondottak. Iskolánkban úgynevezett Diákkadémián volt lehetősége a tanulóknak, hogy társaiknak bemutassák az őket érdeklő témát. Segítségemmel is készültek diákok ilyen előadás tartására. Voltak, akik bolygósomszédunkat, a Marsot mutatták be, volt előadás az exobolygókról és a Naprendszerrel való összehasonlítások alapján közvetlen kozmikus környezetünk is bemutatásra került. Asztrobiológiai témában a Drake-egyenlet alapján hangzott el előadás. Külön kiemelendő, hogy a diákok párban (vagy kis csoportban) készültek fel, majd az előadást is közösen tartották meg. Ez nagyfokú együttműködést, munkamegosztást, tervezést igényelt, így ezen képességeikben is fejlődhettek a konkrét új ismereteken kívül. Más fizikai témájú (például sporttal kapcsolatos vagy tudósokat bemutató) előadásokkal együtt egy teljes délelőttöt kitöltöttek a különféle bemutatóink. Az előadások végén társaik (főleg évfolyamtársaik) kérdéseket is feltehettek a témában, amelyeket az előadást tartó tanulók általában meg tudtak válaszolni, ezzel is mutatva az előadott témákban való jártasságukat. A diákok által tartott előadásoknál nem várható el, hogy tanárunk minden elhangzó adatot ismerjen, de az elengedhetetlen, hogy az előadást készítő diák feltüntesse a hírforrásait, hivatkozzon azokra az anyagokra, webhelyekre, ahonnan tájékozódott. Ezeket célszerű előzetesen áttekinteni, ha szükséges megbízhatóbb forrásokat ajánlani, így a többi tanulónak bemutatott anyag is nagy valószínűséggel megbízható lesz.

Az exobolygókkal kapcsolatos előadások összeállításában főleg a diákok érdeklődésére érdemes építeni. Természetesen cél a már (fizikából, földrajzból) tanult ismeretek megerősítése, illetve gazdagítása is. A témát a hallgatóságot ismerve többféleképpen lehet tárgyalni, például időrendben, megismerési eszközök szerint (a médiából ismert űrtávcsövekre koncentrálni), vagy éppen magyar vonatkozások alapján. Érdemes konkrét példákat is említeni, bár nem ezek pontos ismerete, megjegyzése a fontos, hanem ezáltal lesznek igazoltak az elmondottak. Nagyon látványossá tehető a bemutató az exobolygókról készített művészi képekkel, szimulációkkal, de ezek felhasználásakor mindig fel kell hívni a figyelmet arra, hogy bár ilyenek is lehetnének, ilyenek is láthatnánk az exobolygókat, de ezek egyelőre még feltételezések akkor is, ha észlelési adatokon alapulnak.

Ha „csak” a bolygórendszerek sokféleségét szeretnénk bemutatni, akkor érdemes elmondani, már a kezdeti felfedezésekből látszott, hogy nem tudunk az exobolygók vagy rendszereik tulajdonságaira a saját bolygórendszerünk alapján következtetni. A Naprendszerben a bolygók közel egy síkban és egy irányban, körtől alig eltérő pályákon keringenek. Az exobolygók között találhatunk nagy pályahajlásút (XO-3b), nagy excentricitását (Kepler-37b), a csillagjának forgásával ellenkező irányban keringő, retrográd mozgását (HAT-P-7b). Létezik igen nagy

sűrűségű, például a Kepler-10b, amelynek az átlagos sűrűsége $8,8 \text{ g/cm}^3$. Ez az exobolygó igen közel (0,017 CsE) található a (Naphoz hasonló) csillagához, ezért „lávabolygóként” is emlegetik (mint a Csillagok háborúja film Mustafar bolygóját). Az egyik legkisebb sűrűségű exobolygó a HAT-P-1b, melynek $0,3 \text{ g/cm}^3$ -es sűrűsége a Jupiter sűrűségének kevesebb, mint negyede. Az 55 Cancri e exobolygó gazdag szénben, és olyan közel kering csillagához, hogy a csillagászok „gyémántbolygónak” nevezik. Ismerünk nagyon fiatal (Coku Tau 4), és igen öreg (HIP 11952 b, c) exobolygókat. Mégis az volt eleinte a legmeglepőbb, hogy csillagrendszerekben is találtak exobolygókat. Létezik olyan csillagkettős, amelynek egyik tagja körül kering a bolygókísérő (55 Cancri rendszer), és van olyan is, ahol a csillagpár mindkét tagját megkerüli (Kepler-47 rendszer). Vannak hármas csillagrendszerhez tartozó exobolygók is, például a Gliese-667 Cc, amely ráadásul az egyik csillag lakhatósági zónájában kering. Lehet tovább sorolni az érdekes példákat. Egy négyes csillagrendszer egyik csillagpárja körül is fedeztek fel exobolygót (PH1), sőt csillaghalmazban is találtak már ilyeneket. A Pr0201 és a Pr0211 két olyan csillag a Méhkas (M44) csillaghalmazban, amelyek körül bolygókísérőt fedeztek fel. A nomád exobolygók, amelyek szabadon vándorolnak a csillagközi térben, nem tartoznak egy csillaghoz sem. Ilyen exobolygóra példa az OGLE-2016-BLG-1928, amely Földhöz hasonló vagy annál kisebb méretű kőzetbolygó lehet [147].

A távoli bolygók, bolygórendszerek vizsgálata segít saját planétánk és Naprendszerünk megismerésében. A csillagászati és geológiai folyamatok nem emberi léptékűek, tanulmányozásuk ezért igen nehéz. Az égbolton viszont különböző korú rendszereket figyelhetünk meg, így képet alkothatunk a bolygók keletkezéséről, a bolygórendszerek fejlődéséről, jövőjéről. Az ősi kérdésre, hogy egyedül vagyunk-e a Világegyetemben vagy sem, még nem tudunk válaszolni, de már tudunk olyan helyekről, ahol a feltételek kedvezőek lehetnek az élet kialakulásához, legalábbis a földihez hasonlóhoz. Mai ismereteink alapján úgy gondoljuk, hogy élet a csillagok körül az úgynevezett lakhatósági zónán belül keringő exobolygókon vagy holdjaikon lehetséges, ezért is fontos ezek keresése, tulajdonságaik vizsgálata, ami csak fizikai, asztrofizikai kutatásokkal lehetséges. Az exobolygók felfedezési módszereinek ismertetése túlmutat a tananyagban, az új tudáson kívül diákjaink problémamegoldó és logikus gondolkodását is fejleszthetjük általuk.

5.3.5 Az exobolygók felfedezési módszerei és hasznosságuk a fizika tanításában

A Naprendszeren kívüli bolygók, exobolygók felfedezése az utóbbi néhány évtizedben vált csak valósággá, bár régóta kutattak utánuk. A kettőscsillagok vizsgálata lényegében a keresési módszereket már megadta. Nagy különbség van azonban egy csillag és egy bolygó között, nemcsak nagyságuk, tömegük tér el nagyságrendekkel, de amíg a csillagok saját fénnel rendelkeznek, addig a bolygók csak csillagjuk fényét verik vissza. Lefényképezésük nehézsége ellenére már tudtak néhány exobolygóról felvételt készíteni, főleg infravörösben. A csillagászati mérés technika nagymértékű fejlődése és a számítógépes adatfeldolgozás segítette a kutatókat ahhoz, hogy ma már ötezer exobolygó adatait ismerjük és több ezer exobolygójelölt várja, hogy létezését, jellemzőit hitelesítsék újabb mérésekkel. Kezdetben a legtöbb exobolygót a radiális sebességmérés módszerével fedezték fel, majd az átvonulási fotometria módszer lett a legeredményesebb főleg az úrtávesövek alkalmazásával. A kutatók sok leleményes módot találtak már az exobolygók felfedezésére, de csak néhány vált igen hatékonyá a gyakorlatban eddig. Ezeket foglalom röviden össze a következőkben.

Ha egy csillagnak van egy számottevő tömegű kísérője, amely lehet csillag vagy bolygó is, akkor a két égitest a közös tömegközéppont körül kering. Emiatt a csillag sebessége egy megfigyelőhöz viszonyítva periodikusan változik. Vizsgálhatjuk a csillag sebességének a látóirányunkba eső komponensét (radiális sebességmérés), illetve az erre merőleges, égboltra vetülő komponensét is (asztrometriai módszer).

Spektroszkópiai módszer (Radiális sebességmérés):

Abban az esetben, ha a csillag pályasíkja nem a látóirányunkra merőleges, mozgása során egyszer közeledik, másszor távolodik tőlünk, vagyis látóirányú (radiális) sebessége változik. Ez a sebesség ingadozás a csillag spektrumában levő vonalak kék eltolódását (felénk való közeledéskor) és vörös eltolódását (tőlünk való távolodáskor) okozza (Doppler-effektus). A hulláhhosszeltolódás méréseiből a radiális sebesség meghatározható: $v_r = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, ahol c a fénysebesség és λ a vizsgált színeképvonal hullámhossza. A színeképvonalak eltolódásának periódusa az exobolygó keringési idejét adja meg. Minél nagyobb tömegű a kísérő égitest és minél közelebb kering a csillagához, annál nagyobb mértékű a csillag látóirányú sebességének ingadozása. A Jupiter hatására a Nap radiális sebességének változása 12,4 m/s, míg a Föld hatása még 0,1 m/s sincs [148].

Természetesen ez az érték a pályahajlás mértékétől is függ. Ha a pályasík szöget zár be a látóirányunkkal, akkor csak a sebesség látóirányunkba eső komponensét tudjuk mérni, ezért a kísérő égitest tömegére csak alsó becslés adható ezzel a módszerrel.

Asztrometriai módszer:

A csillag mozoghat látóirányunkra merőlegesen is, ezen esetben a radiális sebességmérés módszernél nem mérünk sebességváltozást, így exobolygóra sem következtethetünk a mérésekből.

Az asztrometriai módszernél is azt használják ki, hogy az exobolygó gravitációs hatása ide-oda rángatja a csillagot a közös tömegközéppont körül, így a látszó mozgás egyenletlenségéből a láthatatlan kísérő tömegére és helyzetére lehet következtetni. Különbség az előző módszerhez képest, hogy ennél nem a látóirányú, hanem az erre merőleges, az égboltra vetülő komponenst mérik, a legnagyobb távcsövekkel, űrtávcsövekkel (például a Gaia űrtávcsövel). A csillag a bolygó gravitációs hatására $10^{-4} - 10^{-7}$ ívmásodperc nagyságrendű elmozdulásokat végezhet az égbolton a háttércsillagokhoz képest, ami megfelelő érzékenységű műszerekkel kimutatható [149]. 2010-ben fedeztek fel ezzel a módszerrel először exobolygót (HD 176051 b).

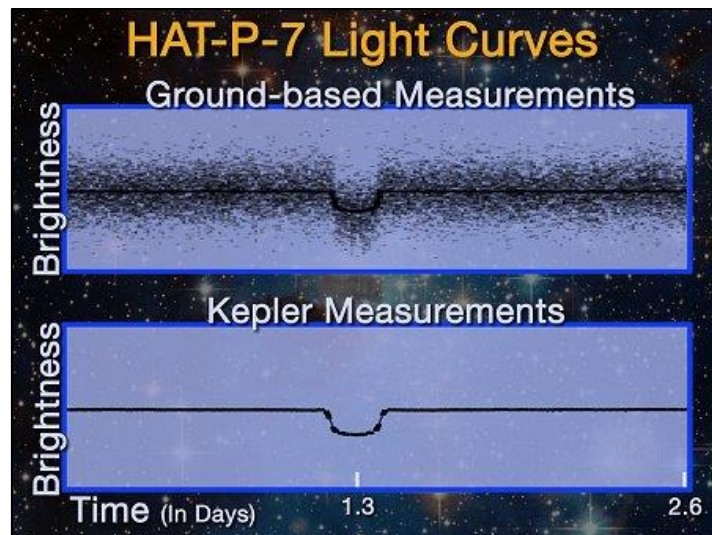
Fotometriai módszer (tranzit módszer, átvonulási vagy fedési módszer):

Fotometriai módszerrel fedezik fel, figyelik meg a legtöbb exobolygót, mivel az űrtávcsövek (CoRoT, Kepler, CHEOPS, TESS) ilyen elven keresték, keresik a csillagok bolygókísérőit. A szabályosan ismétlődő fényességcsökkenéseket egy a csillag körül keringő másik égitest is okozhatja. Ha a keringési sík körülbelül a látóirányunkba esik, akkor a kísérő minden egyes keringése során kitakar a csillagából egy kis területet, amit fényességcsökkenésként észlelünk. A Naprendszerben is jól megfigyelhetők fedési jelenségek, amikor keringése során egyik égitest a másik elé, majd mögé kerül. Gondolhatunk a nap- és holdfogyatkozásokra vagy a belső bolygók (Merkúr, Vénusz) napkorona előtti átvonulásaira, és a Jupiter korongja előtt is megfigyelhetők a nagyobb holdjai. A fedési változó csillagok esetében már találtak a csillagászok az időleges fényességcsökkenés jelenségével. Ha egy kísérő csillag áthalad a másik csillag korongja előtt, akkor annak egyébként állandó fénye rövid időre lecsökken. A fénygörbe alakjából, a fényességcsökkenések időpontjából, időtartamából a (láthatatlan) kísérő méretét, pályáját határozhatjuk meg. A csillagok összetételére is következtethetünk a rendszer színképéből, ugyanis a halvány csillag el is tűnik a fényesebb mögött (mellékminimum), ekkor csak a fényesebb csillagot jellemzi a megfigyelt színkép majd az újbóli megjelenésénél, láthatóságánál a halványabb kísérő fénye is eljut hozzánk. Az exobolygók tranzitja csak

mértékében különbözik a kettőscsillagoknál megfigyeltektől, jóval kisebb az általuk okozott fényességcsökkenés. Az infravörös tartományban egy másodlagos fedés is megfigyelhető, hiszen amikor a bolygó a csillaga mögé kerül, szintén csökken a rendszer összfényessége. Az eltakarás periódusából az exobolygó keringési ideje, majd Kepler harmadik törvényének segítségével az exobolygó csillagától mért átlagos távolsága (pályájának fél-nagy tengelye) is kiszámítható. A fényességcsökkenés mértéke pedig arányos az eltakart csillagfelülettel, így az exobolygó (csillagához viszonyított) mérete is meghatározható. Összehasonlításképpen, ha egy messzi csillagról figyelünk a Jupiter Nap előtti átvonulását az 1%-nyi fényességcsökkenést okozna, míg a Föld fedése csak 0.01%-nyit.

Minél messzebb van egy bolygó a csillagjától, annál kisebb a valószínűsége, hogy észleljük átvonulását a csillag előtt, esetleg némelyik csak súrolja a csillagkorongot (ez még kisebb fényességcsökkenéssel jár). A fénygörbe mélysége a bolygó és csillaga méretarányától függ, ezért földszerű bolygók keresése a kisebb vörös törpecsillagok körül a legeredményesebb. Figyelembe kell venni, hogy a csillag korongja sem egyenletes fényű, akár foltok is lehetnek rajta (hasonlóan a napfoltokhoz). A fotometriai eljárás segítségével az exobolygó légkörök is elemezhetők. A bolygó csillaga előtti áthaladásakor a csillag fénye átvilágít a bolygó esetleges légkörén, és ez nyomot hagy a csillag színekében. A fénygörbe kis ingadozásából újabb exobolygókra vagy esetleg exoholdak létezésére is következtethetünk.

Hosszabb keringési idejű bolygóknál türelmesen meg kell várni az újabb átvonulások idejét. Legalább három fedést kell megfigyelni ahhoz, hogy egy bolygójelölből elismert exobolygó legyen, ami több évig is eltarthat. Általában még spektroszkópiai vizsgálattal is megerősítik az exobolygó létét, tulajdonságait. Hatékonyá tehető a fotometriai eljárással való bolygókeresés, ha egyszerre nagyon sok csillag fényességváltozását figyelik folyamatosan, hosszabb ideig (évekig). Más módszerrel felfedezett exobolygóknál is érdemes fénygörbét megfigyelni (ha lehetséges), mert így újabb adatokat ismerhetünk meg róluk. Például a radiális sebesség méréséből tömeget, a fotometriából méretet lehet meghatározni, így már az égitest sűrűségét is megismerhetjük és ez alapján az összetételére, felépítésére is következtethetünk. A HAT-P-7 csillag fénygörbéje mutatja az 5.14. ábrán, hogy az űrtávcsövekkel mennyivel pontosabb mérések végezhetők, mint egy földi távcsővel.



5.14. ábra. A HAT-P-7 b exobolygó fénygörbéje földi és űrtávcsővel. (NASA Ames Research Center)

Gravitációs mikrolencse hatáson alapuló módszer:

Az általános relativitáselmélet szerint a nagy tömegek mellett elhaladó fénysugár elhajlik, ezért két, egy vonalba eső égitest közül a közelebbi égitest (általában csillag) gyűjtőlencseként működik egy mögötte levő fényforrás (galaxis, csillag) számára. Azokban az esetekben, amikor egy közelebbi csillag nagy sajátmozgása következtében éppen egy távolabbi, látszólag fix helyzetű csillag előtt halad át (vagyis tőlünk nézve éppen elfedi a távolabbi csillagot), akkor a lencsehatás következtében a nagyítólencseként működő csillag időszakosan felerősíti a háttércsillag fényét. Ez a jelenség távcsővel és a fényerősségét mérő eszközzel (fotométerrel) megfigyelhető.

Ha az előtércsillag körül kering egy bolygó, ennek gravitációs hatása hozzájárulhat a csillagéhoz, ami a háttércsillag fényességváltozásában jellegzetes másodlagos maximumként jelentkezik vagy a felszálló vagy a leszálló ágon. Tehát ha egy ilyen másodlagos púpot találunk, akkor az jelzi egy exobolygó létét a közelebbi csillag körül. A másodlagos púp amplitúdója az exobolygó tömegétől függ, míg helyzete a fénygörbén megmutatja az exobolygó pillanatnyi szögtávolságát a csillagjától (ha ismerjük a csillag tőlünk mért távolságát, akkor ebből a csillag és a bolygó valódi távolsága is meghatározható). Probléma, hogy a jelenség ritka, előre nem jelezhető, és nem is ismétlődik. A kutatók megfigyeléseikkel célszerűen az égbolt olyan területére koncentrálnak, ahol a csillagsűrűség nagy (például a Tejútrendszer középpontjának környéke), és igyekeznek sok millió csillag fényváltozásait egyidejűleg követni annak érdekében, hogy a felfedezés valószínűsége nagyobb legyen. Ez a gravitációs mikrolencse

módszer különösen alkalmas a csillagjuktól nagy távolságra keringő, vagy a csillagközi térben szabadon (középponti csillag nélkül) haladó exobolygók felfedezésére.

Pulzárjelek vizsgálata:

Az exobolygók meghatározása alapján a csillagmaradványok körül keringő objektumokat is az exobolygók közé soroljuk. A pulzárak gyorsan forgó, erős mágneses térrel rendelkező neutroncsillagok. A pulzárak irányából nagyon pontos periodicitással rádióimpulzusokat észlelünk. A PSRB1257+12 pulzárról például 0,00622 s-ként érkeznek rádióhullámok felénk. Amennyiben a pulzárnak van kísérője, akkor a közös tömegpont körüli mozgásból adódóan hol közeledik, hol távolodik felénk, amit az észlelt impulzusok közötti időtartamok periodikus változásaként észlelünk. A rádióimpulzusok frekvenciájának ezt a szabályos váltakozását is a Doppler-effektussal magyarázhatjuk. A pulzárról jövő rádiójelek vizsgálatából kis tömegű bolygókísérők kimutatása is lehetséges, amelyre példa az említett PSRB1257+12 pulzár körül felfedezett három exobolygó.

Közvetlen képalkotás:

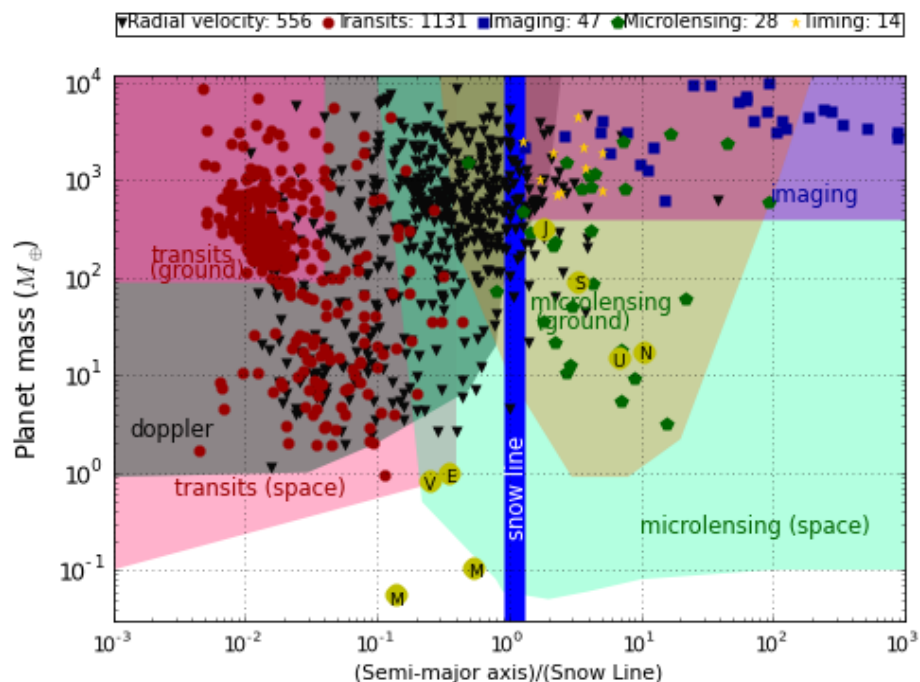
A legmeggyőzőbb felfedezési módszer az exobolygók lefényképezése (5.15. ábra). A bolygó fénye gyenge, a csillag túlragyogja, de nagyméretű, csillagtól távoli bolygó lefényképezhető, főleg infravörös tartományban, és ha eltakarjuk a csillagot (koronográffal). A csillag és a bolygó fényessége között akár milliárdszoros eltérés is lehet a látható tartományban, az infravörös tartományban viszont ez az arány már „csak” milliószoros (mint például a Nap és a Föld esetében).



5.15. ábra. A HR8799 csillag exobolygói infravörös felvételen (Gemini Observatory/NRC/AURA/Christian Marois), és a b jelű exobolygó fantáziaképe (NASA, ESA, G. Bacon).

Egy csillag körüli anyagkorong deformációjából is következtethetünk bolygó léteire. Egy már ismert exobolygó pályájának zavarait is okozhatja másik (vagy esetleg több) exobolygó a rendszerben. Vizsgálhatjuk a látható és az infravörös kép eltérését is. Kereshetjük a jellegzetes színekű sarki fény nyomait. Nem feledkezhethetünk meg az antropogén, vagy civilizációs hatások esetleges kimutatásáról sem [150]. Már az emberiség is küldött irányított, kódolt rádióüzenetet néhány csillaghalmaz felé, és a rádió- és tévéműsorok által okozott „elektromágneses zaj” is kiszóródik a világűrbe. Esetleg egy-egy érdekes exobolygó felfedezése kapcsán érdemes megemlíteni az előbbieken bővebben kifejtettektől eltérő felfedezési módot is.

Érdeklődő diákoknak érdemes összehasonlítani, hogy melyik felfedezési módszerrel milyen exobolygókat fedezhetünk fel [151]. Az 5.16. ábrán az exobolygók tömeg-fél nagytengely diagramja felfedezési módszer szerint mutatja, hogy milyen típusú exobolygókra érzékenyek, hol eredményesek az egyes módszerek. A Naprendszer bolygóit is tartalmazza a diagram összehasonlítás céljából. A „hóhatár” kb. 2,7 CsE, Naphoz hasonló csillagra vonatkoztatva [152].



5.16. ábra. Exobolygók tömeg–félnagytengely diagramja felfedezési módszer szerinti jelöléssel. (Yiannis Tsapras)

Az oktatásra, ismeretterjesztésre készített segédanyagok bemutatása előtt, egy érdekes feldolgozást ajánlom a témának. Zenekedvelő diákjaink biztos meglepődnek az

acapellascience youtube csatorna exobolygókról szóló összeállításán, amelyben a felfedező módszereken kívül néhány nevezetesebb exobolygóról is énekelnek [153]. Ez egy könnyed, nem szokványos módja az ismeretterjesztésnek, bátoríthatjuk tanulóinkat is hasonló feldolgozási formákra.

Az eredményes felfedezési módokhoz sok megértést segítő anyag, kép és szimuláció készült. A téma feldolgozásánál először egy kisfilmet érdemes megmutatni, amelyen egy animáció (Exoplanet Detection Methods Visualized⁸⁵, PHL) segítségével, azt mutatják meg, hogy milyennek látnánk egy exobolygóval rendelkező csillagot az égbolton, természetesen erősen eltúlozva a változásokat a megfigyelhetőség érdekében. Összehasonlítóképpen bemutatják a csillagok légkör okozta pislogását, szcintillációját is, amely egy földi megfigyelőnél ráakódik a bolygókísérő által okozott hatásokra.

Miután látják diákjaink az exobolygók felfedezésének nehézségét, milyen kis eltérésekből kell az exobolygókra következtetni, érdemes külön tárgyalni az egyes felfedezési módszereket látványos animációk alapján, amelyekből nagy a választék az interneten. Közülük a két nagy úrszervezet által készítetteket^{86 87} ajánlom. Ezek az animációk mutatják az exobolygó keringését és ahhoz kapcsolódóan a csillagra gyakorolt hatásait (felnagyítva), mint például a radiális sebesség változását, a spektrum vonalainak eltolódását vagy éppen a fényesség csökkenését. A rövid animációk többször megnézhetők, így felhívhatjuk egyes részleteire is a figyelmet.

Részletesebben a tranzit módszert érdekesebb tárgyalni, mert egyrészt ez a leghatékonyabb exobolygó felfedező módszer, másrészt kevés előismeretet feltételez. Érdemes olyan animációkat is mutatni, amelyeken azonos méretű csillagnál figyelhetjük meg különböző méretű exobolygók fedését. Látványos a több exobolygót tartalmazó rendszerrel kapott fénygörbe⁸⁸ is. Érdeklődőbb diákoknál mutathatunk olyan szimulációkat⁸⁹ is, ahol már a csillag és az exobolygó néhány tulajdonságát (például a méretüket, távolságukat) változtathatjuk és megfigyelhetjük, hogy ez milyen változást eredményez a fénygörbében.

Egy honlapon⁹⁰ három szimulációt is találunk: magának a keringésnek a bemutatását, a tranzit és a radiális sebességgörbe kirajzolását. Változtathatjuk a csillag és a bolygó méretét, tömegét, a köztük levő távolságot és a pálya látószögét. Megfigyelhető együtt a fénygörbe és a radiális

⁸⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=JYCiFrrpuPs>

⁸⁶ <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/ways-to-find-a-planet/>

⁸⁷ <https://sci.esa.int/web/exoplanets/-/60655-detection-methods>

⁸⁸ <https://svs.gsfc.nasa.gov/13022>

⁸⁹ <https://ccnmtl.github.io/astro-simulations/exoplanet-transit-simulator/>

⁹⁰ <http://www.bu.edu/astronomy/visualisations/AlienWorlds/>

sebesség változását kirajzoló görbe is egy szimulációnál⁹¹, sőt még a csillag spektrumának változását is megfigyelhetjük. A The European Exoplanet-A project keretében ezt egyfajta játékként fogják fel, amelyben próbálgatás útján szerezhethünk tapasztalatokat a két legeredményesebb exobolygó felfedezési módszerről. Választhatunk közet- illetve gázbolygót, beállíthatjuk a méretüket, a csillag-bolygó távolságot, a bolygópálya excentricitását és szögét a látóirányunkhoz képest. Érdeemes felhívni a figyelmet arra, hogy nagy pályahajlásnál nem működik a tranzit módszer (nincs fényességcsökkenés, a bolygó nem halad el csillaga előtt), és a radiális sebesség megváltozása is alig figyelhető meg, viszont a csillag imbolygása (kis ellipszisen való mozgása) már jól látszik főleg nagy méretű bolygókísérőnél (asztronomiai módszer). A szimuláció⁹² mutatja többek között a bolygó pillanatnyi sebességét is, így nagyobb excentricitásnál megfigyelhető, hogy a csillag közelében (periasztron) nagyobb sebességgel mozog a bolygó, mint távolabb Kepler második törvényének megfelelően.

A fotometriai módszer osztálytermi modellezése is lehetséges és a mérő-szemléltető bolygórendszer-modell által kirajzoltathatóak a fénygörbék, amelyek segítik a tranzit jelenség megértését [154], [155]. Fontos felhívni a figyelmet arra a tévképzetre, amelyet a modellek, szimulációk sugallnak, miszerint a bolygókorong átvonulása megfigyelhető lenne a csillagkorongon. Valójában, egy távcsőben sem látszanak az exobolygók, és a csillagjaik sem korongként, mert olyan messze vannak, hogy képüket nem tudjuk felbontani, pontszerűek.

Az exobolygók témája igen alkalmas az olyan versenyekre is, amelyeken egy diák által kiválasztott témában kell elmélyülni, kutatni. Ilyen nemzetközi verseny például az *Első lépés a Nobel-díj felé*⁹³. 2011-ben Galgóczi Gábor, „*Inferring the Physical Parameters of Extrasolar Planets with the Transit Method*” című munkájával nyert első díjat ezen a versenyen. Munkájához exobolygó kutatásokban járatos csillagászoktól kapott segítséget, illetve lehetősége nyílt többek között a piszkés-tetői csillagvizsgálóban méréseket végezni. Ez is mutatja, hogy lehet valós csillagászati megfigyeléseket is végezni az exobolygókkal kapcsolatosan. Ahogyan távcsővel rendelkező lelkes amatőrök besegítenek a változó csillagok fényességének mérésébe (AAVSO), úgy várják most az ismert exobolygók csillagainak észlelését, utókövetését a NASA Exoplanet Watch projektjében [156]. Hasonló projektje az ESA-nak is van:[157], az ExoClock projekt az évtized végére tervezett ARIEL űrmisszióhoz kapcsolódik, azt segíti előzetes észleléseivel.

⁹¹ <https://www.explore-exoplanets.eu/game/exoplanets-detection-methods/>

⁹² A szimulációs játék közvetlen elérhetősége: <http://akabazo.fr/aLAM/exoP2019/exoPindir-en.html>

⁹³ <http://www.ifpan.edu.pl/firststep/>

Amatőr csillagászok exobolygó észleléséhez segítség például az *Exoplanet Observing for Amateurs*⁹⁴ könyv. Bár manapság már nem elérhetetlen egy kisebb távcső diákjaink számára, azért még kevés tanuló (és iskola) rendelkezik ezzel a megfigyelő eszközzel. Enélkül is részt vehetünk az exobolygók felfedezésében, hiszen a csillagok fénygörbéi szabadon elérhetőek, tanulmányozhatóak [158]. Így valódi mérési adatokból kereshetünk exobolygókat. A Planet Hunters⁹⁵ projekt keretében először a Kepler űrtávcső, majd újabban a TESS űrtávcső méréseiből készült fénygörbéken kereshetjük, jelölhetjük be a fényességcsökkenési helyeket, amelyeket akár exobolygók is okozhatnak. Az emberek jó mintázat felismerő képessége teszi eredményessé a keresést. Az első, e projektben felfedezett exobolygó, a PH-1b (Kepler-64b) igen különleges volt, hiszen egy négy csillagból álló rendszer egyik csillagpárja körül keringő gázóriás. Az „exobolygó vadász” programhoz a NASA-val együttműködve készítettek egy 9 leckéből álló tanítást segítő anyagot (Planet Hunters Guide⁹⁶). Ebben az anyagban a Naprendszerből kiindulva jutunk el az exobolygóig. Felfedezési módszereikkel, tulajdonságaikkal, lakhatóságukkal ismertetnek meg az egyes tananyagleírások. A projekt jellegéből adódóan különös figyelmet szentelnek a tranzit módszernek, és az egész anyagot átszövi a Földön kívüli élet keresése.

5.4 Exobolygós feladatok a fizika oktatásban

Az eddig említett tevékenységek során főleg egyszerű, jobbra csak nagyságbeli megállapítások tehetők, mint például ugyanazon csillag nagyobb méretű bolygójának tranzitja mélyebb fénygörbét eredményez. Ennél pontosabb törvényszerűségeket is ismerünk, amelyeket feladatok segítségével tudunk bemutatni diákjainknak.

Sajnos a fizikatanítás során egyre kevesebb feladat kerül elő a tanórákon, sőt „képletekkel” is egyre kevesebbszer találkozunk. Egy-egy törvényt leíró matematikai összefüggést feladatok megoldása során tudunk a legjobban megtanulni, rögzíteni a memóriánkban. Itt nem arra kell gondolni, hogy csak különböző értékeket adunk a képletben szereplő mennyiségeknek, hanem valós problémák megoldására. Az exobolygók változatossága lehetőséget ad ugyanannak a problémának a különböző égitesteken való tárgyalására, így nem csak megérthetjük,

⁹⁴ http://brucegary.net/book_EOA/x.htm

⁹⁵ <https://exoplanets.nasa.gov/citizen-science/>

⁹⁶ <https://www.planethunters.org/#/education>

megjegyezhetjük a kapcsolódó törvényeket, hanem a Világegyetem különböző helyeit, körülményeit is megismerhetjük. Nagyon fontos a kapott végeredmény vizsgálata, mennyire valószínű, elképzelhető-e az eredményünk. Helye lehet az elképzelt világokkal kapcsolatos számításoknak is majd a végeredmény hihetőségének (így az eredeti elképzeléseinknek) az átgondolásának is.

Csillagászati feladatokkal sok helyen találkozhatunk, de egy új csillagászati feladatgyűjteménynek egyre égetőbb szükségét érezhették mind a tanárok, mind a diákok. A legújabb tudományos eredmények, így az exobolygókkal kapcsolatosak sem jelentek meg más (például fizikai) feladatgyűjteményekben. Viszont a kétszintű érettségi feladatokban már találkozhattak a diákjaink ilyenekkel. Például 2011-ben a májusi fizika középszintű érettségi egyik választható feladata (3/A) a Naprendszeren kívüli bolygókkal, exobolygókkal volt kapcsolatos [159]. Tankönyveinkben ekkor még nem szerepeltek ezzel kapcsolatos ismeretek, így a feladat szövegéből tudhatták meg diákjaink, hogy mik is az exobolygók, és az egyik felfedezési módszerüket a tranzit-módszert is röviden bemutatták. Ezek után fénygörbékből kellett információkat leolvasni. Rákérdeztek a csillag és bolygójának méretarányára (átmérők arányára). Kaptak olyan bonyolultabb fénygörbét is a tanulók, amelyen két eltérő mélységű fényintenzitás-minimum ismétlődött periodikusan. A feladat megoldásánál elvárták, hogy a diákok értelmezzék ezt, vagyis jöjjenek rá, hogy ez a fénygörbe egy olyan rendszert jellemez, amelyben két különböző méretű exobolygó kering [S4]. A feladat szövege és a javítási-értékelési útmutató feladathoz tartozó része a 11. függelékben található.

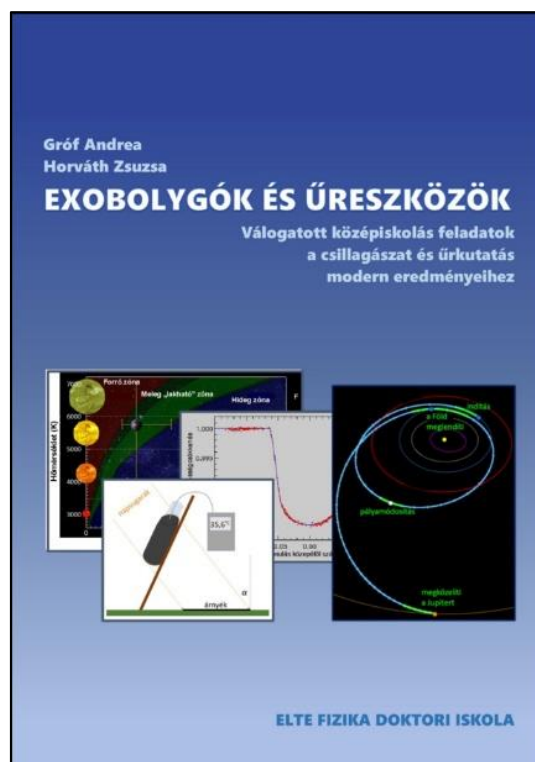
Ez a példa is jól mutatja a feladatok kiírásában, megfogalmazásban bekövetkező változásokat. Nem idegenkednek az esetleg tankönyvekben nem is szereplő témáktól, hanem röviden bemutatják a feladat szövegében, új ismeretekkel gazdagítva a megoldót. Ilyen feladatokkal a diákok szövegértését is fejlesztjük, megtaníthatjuk, hogy önállóan válasszák ki a megoldáshoz szükséges adatokat a feladat szövegéből. Előfordulhat, hogy egy szükséges adatot a megoldónak kell táblázatokból, adatbázisokból kikeresni, amelynek elsajátítása szintén fontos.

Ilyen típusú feladatoknak helye van matematika órákon is, bár ott nem annyira az összefüggésekben szereplő mennyiségek, hanem a köztük levő kapcsolat jellege a fontos. A csillagászati adatok használata elősegíti a hatványozás, a normál alakban számolás gyakorlását is. A NASA-nak van egy csillagászati feladatokból álló gyűjteménye (Space Math⁹⁷). A 2000-es évektől a jelentős felfedezések, űrmissziók vagy éppen aktuális csillagászati jelenségekhez

⁹⁷ <https://spacemath.gsfc.nasa.gov/SpaceMath.html>

kapcsolódóan készítettek feladatokat. Eleinte évente adtak ki egy kötetet, majd téma szerinti összeállítások jelentek meg, mint például a Transit Math (2010) vagy Astrobiology Math (2011). Most viszont már ezeken kívül más szempontok szerint is kereshetünk a feladatbankban, például csillagászati témák szerint (Föld, Hold, Nap, bolygók, csillagok, Világegyetem, űrutazás, asztrobiológia, fekete lyukak), a NASA missziói szerint (például a Kepler), mérnöki témák szerint (például távcsövek, pályák, adatok feldolgozása). Minden egyes problémánál egy-két mondatos összefoglaló alapján dönthetünk, arról, hogy felhasználjuk-e. Kereshetünk korcsoportok szerint már kisiskolás (alsó tagozatos) szinttől egészen a középiskolásig. Lehet matematikai téma szerint is válogatni például a geometrián belül szögekkel, háromszögekkel, területtel, térfogattal kapcsolatosan. Maguk a feladatok megfogalmazásai új ismeretet is adnak és általában egy szép képpel (amely lehet valós fénykép, vagy művészi ábrázolás is) keltik fel az érdeklődést. Ilyen típusú feladatokkal a diákok (tudományos) szövegértését is fejleszthetjük és nagy értékük még ezeknek a feladatoknak a valós adatok felhasználása. A témakör szerinti kötetekben az ismeretek összefoglalása külön is szerepel egyfajta bevezetésként, áttekintésként, majd a feladatoknál részletesebben.

Ezek a feladatok angol nyelvűek, szükség volt magyar nyelvű válogatásra is.



5.17. ábra. Az Exobolygók és űreszközök című kiadvány.

Egyik forrásunk az említett NASA Math feladatbank volt. Feladataink a középiskolás korosztálynak készültek, egyszerű tanórai szintűektől akár versenyen, vagy versenyre való felkészítésnél használhatóig. A modern csillagászati feladatgyűjtemények elérhetőek az ELTE Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása Program Közkincs helyén a Kiadványaink⁹⁸ almenüben, amely a tanárok számára biztosít segédanyagokat. (A kiadványok elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgypedagógiai Kutatási Programja támogatta.) A diákok számára az Athletica Galactica (Kárpát-medencei Középiskolai Csillagászati és Asztrofizikai Verseny) honlapján a Felkészülés, segédanyagok⁹⁹ menüben érhetőek el a feladatgyűjtemények.

Az exobolygók témájához kapcsolódóan bővebben az Exobolygók és űreszközök (Válogatott középiskolás feladatok a csillagászat és űrkutatás modern eredményeihez) című összeállításról írok (5.17. ábra). Az exobolygókat általánosan 12 feladattal mutatjuk be, majd a felfedezési módszerekkel kapcsolatos 11 feladat következik. Az űrkutatás és eszközeiről szól a harmadik fejezet 17 problémája, végül néhány feladatban a tanulókat önálló tevékenységre, mérésre ösztönözzük.

A feladatok általában összetettek, több részkérdés is szerepel bennük, hasonlóan az érettségi számításos feladataihoz. A legtöbb problémánál valós adatokat ismerhetünk meg égitestekről, űrszondákról, űrmissziókról. A megoldás során szükség van táblázatok használatára, szemléletes grafikonok értelmezésére. Az egyes fejezetek végén megadjuk a feladatok megoldását, ahol szükséges megjegyzéseket fűzünk például az eredmények értelmezéséhez.

Exobolygókkal kapcsolatosan találunk feladatot a méreteikkel, felépítésükkel kapcsolatosan. A feladatok alapján megismerhetjük, milyen messze vannak, mennyire elérhetetlenek napjaink technikai szintjén. Erre fontos felhívni diákjaink figyelmét, hiszen a sok fantasztikus film mind azt sugallja, hogy eljuthatunk az exobolygókra. Találunk feladatot híres filmbeli helyszínnel kapcsolatosan (Tatuin, Csillagok háborúja), de valós égitest adataival (Kepler-16 b). A diákok érdeklődéséhez kötődően a csillagok körüli lakhatósági zónával kapcsolatos feladataink is vannak. Az iskolai tananyaghoz kapcsolódóan Kepler harmadik törvényére és a gravitációs törvény alkalmazására is találunk problémát. Külön kiemelendő egy exobolygón (a Kepler-10 b-n) a gravitációs gyorsulás meghatározása (1.12), majd egy ember súlyának összehasonlítása ezen az exobolygón és a Földön. Fontosak az olyan problémák, amelyek megerősítik a testek tömegének helytől való függetlenségét miközben rámutatnak a test súlyának helytől való

⁹⁸ <http://fiztan.phd.elte.hu/kozkinccs/kiadvanyok/index.html>

⁹⁹ <https://athleticagalactica.hu/felkeszules-segedanyagok>

függésére, mert sok diáknak okoz ez nehézséget. Egy problémánál megismerhetjük a (pályákkal kapcsolatos) rezonancia fogalmát és utalunk a Jupiter holdjainál tapasztalható (1:2:4) rezonanciára. Ahol lehet összehasonlítani a távoli világokat a Naprendszerben tapasztaltakkal, hogy ezzel is segítsük kozmikus környezetünk megismerését. Feladat keretében mutatunk rá a különlegességekre, amelyekhez hasonlókkal a Naprendszerben nem találkozunk, ilyenek például a forró-Jupiterek, amelyek olyan közel is keringhetnek csillagjukhoz, hogy a felső légkörüket üstökösökhöz hasonlóan fújja le a csillagszél. Megdöbbentő lehet, hogy a nagy mértékű anyagvesztés ellenére a Világegyetem koránál is tovább tart az egész légkör elvesztése (1.9 feladat).

A magasabb szintű fizika tanításánál (például fakultáción, érettségire készüléskor) az exobolygó felfedező módszereknek is hangsúlyos szerep jut, példatárunkban egy külön fejezet tartalmaz ilyen témájú feladatokat. Az exobolygó-felfedezési módszerek közül a leghatékonyabbakkal, illetve a középiskolai szinten tárgyalhatókkal kapcsolatos feladatok szerepelnek a második fejezetben. A tranzitmódszert egy a Merkúr-átvonulással kapcsolatos feladattal vezetjük be, amely megértését egy valós fénykép is segíti erről a jelenségről. Ugyanebben a feladatban arra is felhívjuk a figyelmet, hogy egy távoli bolygórendszerrel már a Napot sem látnánk korongnak, csak pontszerűnek, de a fényességének csökkenése mérhető lenne, ha egy bolygója elhalad előtte. Lényegében a Föld és a Jupiter távoli exobolygórendszerből való felfedezhetőségére kérdez rá a feladat, amikor az általuk okozott fényességcsökkenést kell kiszámolni. Valós fénygörbék értelmezését, adatok leolvasását is kérjük, megmutatva az űrtávcsövek sokkal pontosabb fényességmérését, a földi távcsövekéhez képest. A Doppler-módszert bemutató feladatoknál szintén valós radiális sebesség görbéket kell értelmezni. Megvizsgáljuk a legnagyobb bolygótestvérünk, a Jupiter ilyen módszerrel való felfedezhetőségét távoli exobolygórendszerből (2.5 feladat). Az első Naphoz hasonló csillag körüli exobolygó felfedezéséhez kapcsolódóan valós mért értékekből kell az exobolygó periódusára, pályájának fél nagytengelyére következtetni, a tömegére becslést adni (2.8 feladat). Ez a feladat lényegében a mért adatok feldolgozását kéri, a kutatók munkájába ad betekintést. A feladatnál nem szerepel, de mindenképpen meg kell említeni, hogy ez egy Nobel-díjas felfedezéshez (2019) kapcsolódó feladat. Asztrometriai módszerrel ugyan még alig fedeztek fel exobolygót, de ez a felfedezési módszer is tárgyalható középiskolában. Ilyen jellegű feladatok segítenek megerősíteni, hogy a csillag-bolygó kettős mindkét tagja kering a közös tömegközéppontjuk körül. A nagyságrendi viszonyok miatt ez a tömegközéppont általában a csillagon belül található, így annak jobbára csak imbolygása figyelhető meg, ezért is terjedt el az az egyszerűsítő kijelentés, hogy a bolygók

keringenek a csillagjaik körül. Szerepel feladat a Gaia űrtávcsővel kapcsolatban is, amelytől sok új exobolygófelfedezés várható a jövőben. Ugyan nem exobolygóval kapcsolatos, de az asztrometriai módszer egy alkalmazása a Saggiarius A körül, egy csillag pályájából a fekete lyuk tömegének meghatározása, amely szintén Nobel-díjjal (2020) kapcsolatos probléma. A fizikai Nobel-díjjal kapcsolatos feladatok mutatják, hogy a diákok a legújabb kutatási eredményeket is megismerhetik, köztük is a legfontosabbnak értékeltet miközben az ismertetett feladatokkal foglalkoznak. Ezeket a szempontokat általában nehéz teljesíteni, de az exobolygók témája alkalmas volt ilyen feladatgyűjtemény összeállítására.

Az általános relativitáselmélet nehezen érthető, tanítható középiskolában, viszont az exobolygókeresés egyik módszere a gravitációs mikrolencse hatás bemutatása középiskolás szinten is megérthető bizonyítékát adja az elméletnek. Ezzel kapcsolatos feladat meghaladná a középiskolás szintet, ezért nem szerepel a feladatgyűjteményünkben, de tapasztalataim alapján ezt a módszert (a már ajánlott) látványos animációk által megértik, könnyen megjegyzik tanulóink. Ezzel a módszerrel is egyre több exobolygót fedeznek fel, a csillagközi térben szabadon mozgó nomádbolygók felfedezése is ilyen módon várható ezért fontos a megismertetése diákjainkkal.

A Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia követelményrendszerében is megtalálhatóak az exobolygók és felfedezési módszereik, gyakran adnak fel ilyen témájú feladatokat a versenyen. Ezért a modern feladatgyűjtemény jól hasznosítható versenyfelkészítésnél is. A magyar csillagászati diákolimpiai felkészítésnél a példatár több feladata került kipróbálásra és bizonyult hasznosnak a diákolimpikonok tudásának bővítésében.

A matematika tanítása során is törekednek valós problémafelvetésekre, az aktuális eseményekkel, felfedezésekkel kapcsolatos problémákra, érdekességekre, így ezek a csillagászati feladatok színesíthetik a matematika órákat is.

Elkészült a feladatgyűjtemény angol fordítása is [S7], amely elsősorban a nemzetközi versenyekre készülőknek segít a csillagászati kifejezések angol megfelelőjének ismeretében. Hasznos az angol nyelven érettségizőknek, vizsgát tevőknek is. Felhasználható az (angol) kéttannyelvű fizika, földrajz vagy természetismeret oktatás során akár a tanórákon, akár otthoni feldolgozás keretében is.

5.5 Asztrobiológiai ismeretek tanítása

5.5.1 Diákjaink érdeklődése az asztrobiológiai témák iránt

Az emberiség ősi kérdése, hogy egyedül vagyunk-e az Univerzumban, vagy vannak-e a Földön kívül is (értelmes) élőlények. Ehhez a kérdéshez szorosan kapcsolódik az, hogy a Földünk különleges, egyedülálló bolygó-e, vagy vannak máshol is hozzá hasonló égitestek, amelyeken kialakulhat az élet, vagy legalább lakható viszonyok csábítanak az odautazásra. Nagyon sok könyv, film, számítógépes játék adható el ebben a témában. Diákjaink is érdeklődnek a földönkívüli élet iránt, sőt a többségük meg van győződve létezéséről és inkább az lepi meg őket, hogy tudományosan csak néhány évtizede vannak konkrét asztrobiológiai eredmények, amelyek még legfeljebb lakható égitestekről szólnak nem pedig bolygónkon kívüli életformákról, idegen civilizációkról. Arra a kérdésre (10. függelék), hogy mit gondolnak arról, hogy egyedül vagyunk-e az Univerzumban, vagy vannak-e máshol is értelmes lények a Világegyetemben, 140 gimnazista diák közül 115 válaszolta, hogy vannak. 14 tanuló szerint nincsenek, 6 diák úgy gondolta értelmes lények nincsenek, de primitív élőlények igen és öten nem válaszoltak a kérdésre.

Az utóbbi évtizedek csillagászati felfedezései alapján ma már tudjuk, hogy Arisztotelésszel szemben Epikurosznak volt igaza, aki úgy gondolta, határtalanul nagy számban létezhetnek más világok, köztük a miénkhez hasonlóak és attól eltérőek is. Már ötezer Naprendszeren kívüli exobolygót ismerünk, közöttük a Földhöz hasonlókat, csillagjuk lakhatósági zónájában keringőket is, bár a Föld ikertestvérének keresése még továbbra is tart.

Ma még csak a földi életet ismerjük, de sok más exobolygón lehetnek megfelelő körülmények az élet kialakulásához, fennmaradásához, amely tény azt sugallja nekünk, hogy nem vagyunk egyedül a Világegyetemben. A Földön mindenféle szélsőséges helyen találtak már életformákat. Kérdés mennyire elterjedt az élet a Naprendszerben, a Tejútrendszerben vagy akár az Univerzumban. Ezzel kapcsolatosan sok kérdés vár megválaszolásra: Mi a helyünk a Világegyetemben? Hogy kerültünk ide? Egyedül vagyunk-e? Hol vannak a többiek? (Enrico Fermi) Találhatunk intelligens életformát? (SETI) Mi az élet, hogyan definiálhatnánk? Van élet a Földön kívül, ha igen hogyan fedezhetnénk fel? Hogyan fejlődött az élet a Földön? Mi tesz egy helyet (égitestet) lakhatóvá? Élhetnénk-e máshol is az Univerzumban? A csillagok hány százalékának vannak bolygókísérői? Milyen gyakran kering Föld méretű exobolygó csillaga lakhatósági zónájában? Közele csillagoknak van-e Föld méretű bolygója? És folytathatnánk a

kérdések sorát. Néhány évtizeddel ezelőtt még nem volt egyik kérdésre sem tudományosan megalapozott válaszunk, de mára már képesek vagyunk néhányra válaszolni főleg az utóbbiak közül.

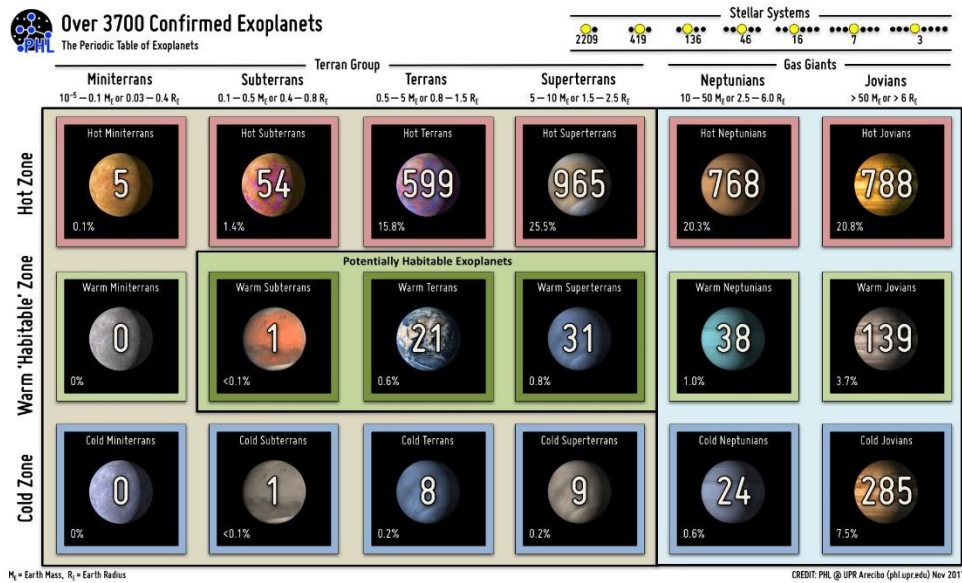
Diákjaink többségének mielőtt az iskolában hallana a témáról, már van elképzelése, ismerete a távoli exobolygókról, a földönkívüli életről. Jobb esetben ismeretterjesztő műsorban tudnak meg róluk érdekességeket, de sokakban a számítógépes játékok, filmek, sorozatok helyszíneiként jelennek meg a Naprendszeren (vagy éppen Galaxisunkon) kívüli exobolygók, illetve a rajtuk élő földönkívüliek. Ha hozzásegítjük tanulóinkat a nemzedékek alatt felgyülemlett bölcsességekhez, és a legújabb ismeretanyag, tudás megismeréséhez, színes képzeletvilágukból ki tudják választani a kutatható részeket, helyes (természettudományos) szemléletmód alakul ki, erősödik meg bennük.

Az említett kérdésekről (többek között) fizika órákon is beszélhetünk, összekötve az exobolygók témáját a Földön kívüli (értelmes) élet keresésével. Logikus ez a kapcsolódás, hiszen először a megfelelő helyeket kell megtalálni, ahol majd esetleg életjeleket is felfedezhetünk további vizsgálatokkal. Mivel még nem ismerünk más életformákat, mint a földieket, ezért vizet keresünk az Univerzumban, mert erre minden földi élőlénynek szüksége van. Tehát olyan exobolygók után kutatunk, amelyek csillagjuk lakhatósági zónájában keringenek, amelyeknek felszínén tartósan jelen lehet a víz. Ilyen exobolygók további vizsgálata főleg esetleges légkörük alkotóelemeire irányul (például a James Webb űrtávcsővel), amelyek között életre utaló összetevőket, úgynevezett biomarkereket keresünk.

A legújabb fizika (és földrajz) tankönyvek is foglalkoznak már az exobolygókkal és a földönkívüli élet lehetőségével. Például a Nemzeti Köznevelési Portálon található 11-es fizika okostankönyvben a *Van-e élet a Földön kívül?* című leckében, az exobolygók legeredményesebb felfedezési módszerét, a tranzit módszert is bemutatják. Egy következő, *Ha majd a Nap kihűl...* című leckében újra előkerül az exobolygók témája, mint egy esetleges kitelepítési helyszín az emberiség számára. Miután a legközelebbi csillag, a Proxima Centauri körül is fedeztek már fel exobolygókat (Proxima Cen b, c, d), amelyek közül ráadásul csillagának lakhatósági zónájában is kering egy, biztosan felgyorsulnak az űrutazással kapcsolatos kutatások is.

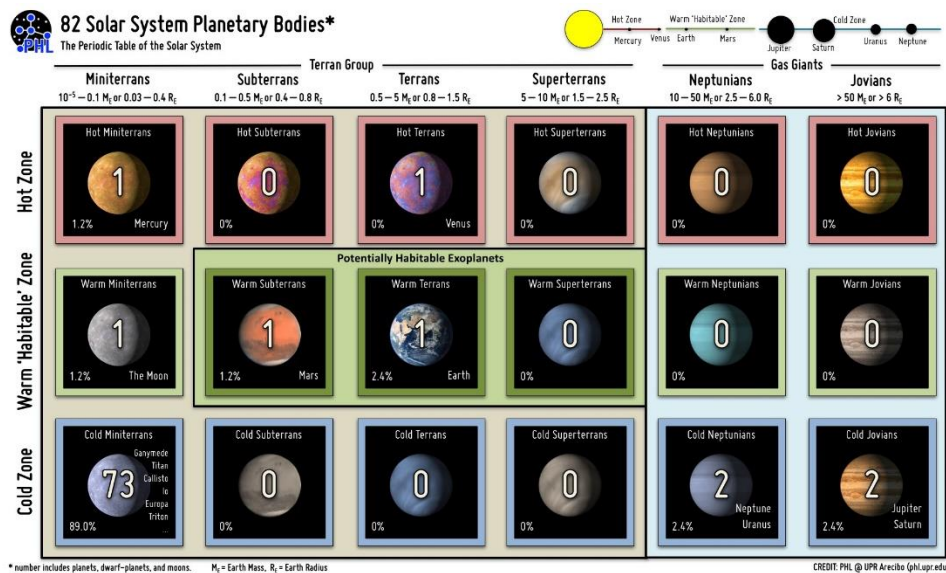
Az exobolygók között új, lakhatósággal kapcsolatos csoportosítást vezettek be a kutatók, amelyhez a bolygók tömegén kívül a hőmérsékletüket (vagy csillagjukhoz képesti keringésüket,

pályájukat) is figyelembe vették. Egyfajta periódusos rendszerhez hasonló táblázatát láthatjuk a felfedezett exobolygóknak az 5.18. ábrán.



5.18. ábra. Ismert exobolygók csoportosítása lakhatósági szempontból.

Összehasonlításképpen a Naprendszer égitesteit is hasonló táblázatba rendezték, amelyet az 5.19. ábra mutat be. A Naprendszer lakható égitestjei közé csak két bolygót soroltak, a Földet és a Marst, ez is indokolja a Mars-kutatás fontosságát azon kívül, hogy az egyik bolygószomszédunk is.



5. 19. ábra. A Naprendszer égitestjeinek csoportosítása lakhatósági szempontból.

5.5.2 Asztrobiológia szakkör

Napjaink fontos témájával, a fenntartható fejlődéssel kapcsolatosan célszerű tudatosítani tanulóinkban, hogy egyelőre nincs lehetőségünk más bolygóra, holdra, mesterséges úrállomásra tömegesen áttelepülni, tehát a Földön kell tudatosan vigyáznunk a lakhatóságot biztosító körülményekre. Asztrobiológiai ismeretek által megismerhetik diákjaink helyünket és lehetőségeinket a Világegyetemben.

A téma feldolgozására kidolgoztam egy szakköri tematikát. Az egyes alkalmakon megvizsgáltuk az élet (fizikai) feltételeit, megismertük a szélsőséges körülmények között élő extremofil életformákat. Megbeszéltük a Naprendszer égitestjeinek jellemzőit, és lakhatóságukat, külön figyelmet kapott a Mars, a Jupiter Europa holdja, valamint a Szaturnusz Enceladus és Titán nevű holdjai. A Naprendszeren kívül az exobolygókat tanulmányoztuk a lakhatóság szempontjából. Foglalkoztunk a híres problémákkal is, mint a Drake-egyenlet és a Fermi paradoxon, illetve a SETI kutatás. Érdekes átgondolni azt is, hogy mit jelentene, ha biztosan tudnánk, hogy nem vagyunk egyedül a Világegyetemben, ha találkozoznánk földönkívüli élőlényekkel (egyáltalán felismernénk-e őket, tudnánk-e kommunikálni velük).

A szakköri tematika a 12. függelékben található. A szakkör jellegéből adódóan a tervezetthez képest azokkal a témákkal foglalkoztunk részletesebben, amelyek a diákok (aktuális) érdeklődésével megegyeztek. Egyik ilyen téma Földhöz hasonló bolygók, égitestek keresése a Naprendszerben, amely tárgyalásánál a Naprendszert alkotó égitestekről elevenítettünk fel fontos ismereteket, különösen a Marssal kapcsolatban. A nagyobb égitestekre koncentráltunk, csillagunkra, a Napra, a bolygókra, a törpebolygókra, a nagyobb holdakra. Nyolc bolygó van a Naprendszerben, mindegyik egyedi, a maga nemében különleges. Tudjuk, hogy legalább egyen közülük, a Földön van élet. Ugyan ember még csak a Holdon járt a Földön kívül, de a legtöbb bolygóról és nagyobb holdjaikról néhány törpebolygóról, aszteroidáról és üstökösről is rendelkezünk részletes képekkel, információkkal. Ezeket űrszondák, leszállóegységek vagy űrteleszkópok továbbították a Földre. A két bolygósomszédunk hasonlít legjobban a Földre a Naprendszerben. Ugyan a Vénusz nagyságban alig különbözik bolygónktól és régebben gazdag élővilágot képzeltek el rajta, de az űrszondák által megismert felszíni körülményei miatt az érdeklődés egyértelműen a Mars felé fordult. Míg a Vénusz felszínét sűrű felhőzet takarja el a szemünk elől, a Marsnak ritka, vékony légköre van.

A tudósok évszázadok óta kíváncsiak voltak arra, hogy van-e élet a Marson. Az egyre jobb távcsövekkel már részleteket is látni véltek rajta. Christiaan Huygens (1629-1695) felfedezte a

sarki fehér foltot, William Herschel (1738-1822) pedig a távcsőben látott sötét foltokat tengereknek, míg a világosabbakat szárazföldeknek gondolta. Mindketten értelmes életről is beszéltek, írtak a Marssal kapcsolatosan (is). (Christian Huygens: Cosmotheros, 1698)

1877-ben Giovanni Schiaparelli (1835-1910, itáliai csillagász) csíkokat, sávokat is látott a távcsövében, amikor a Marst vizsgálta, amelyeket Percival Lowell (1855-1916, amerikai csillagász) már egyenesen fejlett marslakók által épített csatornáknak gondolt. Három könyvet is írt a Marsról és a marslakókról. Voltak olyan csillagász kortársai is, akik kételkedtek a marsi csatornák létezésében, nem látták ezeket a távcsövükben, de mégis Lowell elgondolásai mentek át a köztudatba. 1938-ban Orson Welles rádióra alkalmazta H. G. Wells Világok harca (War of the Worlds) című regényét, amelynek adásakor szabályos pánik tört ki az amerikai rádióhallgatók egy része között, mert valóságosnak gondolták a hallottakat, a marslakók földi invázióját. Azóta többször is megfilmesítették ezt a rádiójátékot. Ha nem is jut minden évre egy marslakókról szóló film, de ez mindig is egy eladható téma lesz a mozivásznakon. A tudósok úgy gondolják, hogy ha találnak is életet a Marson az inkább bakteriális lesz, mint emberszerű, amelyeket több Marsról szóló fantasztikus filmben látunk.

Készült olyan Marssal kapcsolatos film is (Mentőexpedíció), amelyből hiányoznak a helyi marslakók, de ez is igen sikeres lett. A szakkör keretében közösen megnéztük ezt a filmet, sőt egyik diákunk ajánlotta a film alapjául szolgáló könyvet is, amelyet többen elolvastunk. Nyilván ez a könyv és film is ma még fikció, de tudományos alapossággal készült, nagyrészt akár igaz is lehetne. Fontos ismeretterjesztési szerepe van az ilyen típusú filmeknek. Oktatási szempontból kedvező, hogy egyre több tudományosan megalapozott film, sorozat készül addig is a Marsról, Mars-utazásról, amíg emberek léphetnek a felszínére.

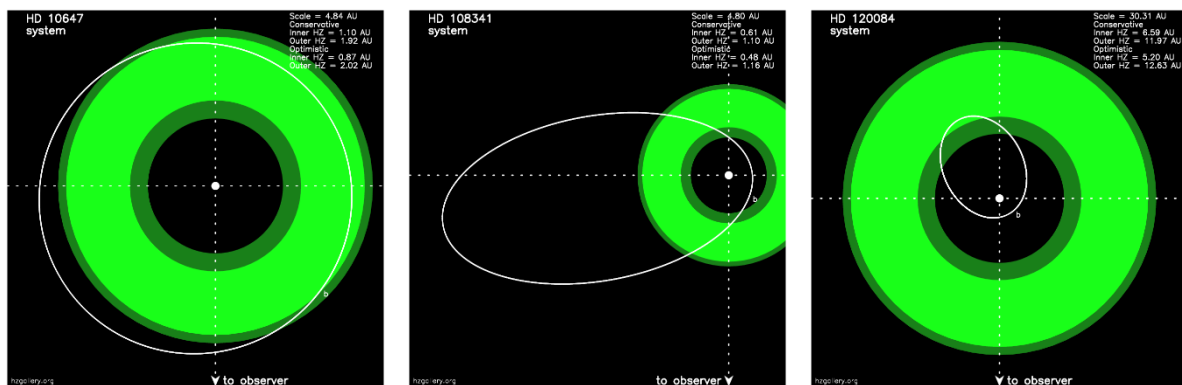
Az eddigi tudományos eredményeket követve, az űrszondák, leszálló egységek képeiből, mérési adataiból legfeljebb mikroszkopikus élőlények felfedezését várják a Marson, vagy egy már nagyon régen kihalt ökoszisztéma nyomainak megtalálását remélik. Mindenkit érdeklő téma a marsi víz létezése is, hiszen az élőlényeknek (legalábbis a földi életformákhoz hasonlóaknak) elengedhetetlenül fontos alkotóeleme a víz. A Marson található vízjégen kívül, már időszakos víz, vagy inkább sárfolyásokat is észleltek, amelyek további vizsgálatára is készülnek. A Mars azért marad a földönkívüli élet keresésének előterében, mert könnyen megközelíthető és a múltban akár lehetett is rajta valamilyen életforma.

A földönkívüli élet keresésénél elsősorban olyan égitesteket keresünk, amelyeken (folyékony) víz található. Ebből a szempontból egyre több naprendszerbeli hold (Europa, Ganymedes

Callisto, Enceladus), is szóba kerül. Filmtémaként (Avatar) is előkerült már a holdakon való élet lehetősége.

5.5.3 Lakható exobolygók

A Naprendszeren kívüli élet keresésének első lépése lakható exobolygó keresése. Az exobolygó-kutatás egyik fontos célja Földön kívüli élet felfedezése. Beszélhetünk a csillagok körüli lakhatósági zónáról, ahol azt vizsgáljuk, hogy egy adott környezet biztosítja-e a földihez hasonló élet kialakulásának és fennmaradásának a lehetőségét. Gyakorlatilag a folyékony víz stabil jelenlétének lehetőségét vizsgálják elsőként. A lakhatósági zóna elsősorban a csillag jellemzőitől függ, de legalább ennyire számít a csillag körül keringő bolygó helyzete, anyagi összetétele, légkörének alkotóelemei, belső szerkezete, hőforrásai, magnetoszférája. Ha a bolygópálya elnyúlt, akkor előfordulhat, hogy az exobolygó keringése során periodikusan kikerül a lakhatósági zónából. A Habitable Zone Gallery honlapján¹⁰⁰ az ismert exobolygók pályáját tanulmányozhatjuk lakhatóság szempontjából. Néhány ilyen szempontból érdekes exobolygópálya látható az 5.20. ábrán.

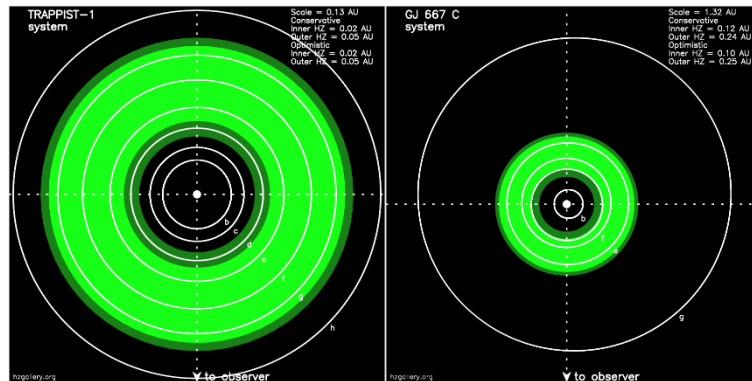


5.20. ábra. Exobolygópályák és a lakhatósági zónák különböző helyzetei. (A fehér vonal a bolygópályát mutatja, míg a zöld tartományok a lakhatósági sávot.)

Érdemes felhívni diákjaink figyelmét arra, hogy Kepler második törvénye szerint az exobolygók csillagjuk közelében gyorsabban mozognak, mint attól távolabb. Természetesen csillaghoz közel kerülni még rövid ideig sem kellemes az élőlények számára, és a hosszantartó jeges periódusok is nagy alkalmazkodóképességet kívánnak az élőlényektől. Az említett honlap szerint közel 150 exobolygó kering teljesen csillagának lakhatósági zónájában. Érdemes két

¹⁰⁰ <http://www.hzgallery.org/index.html>

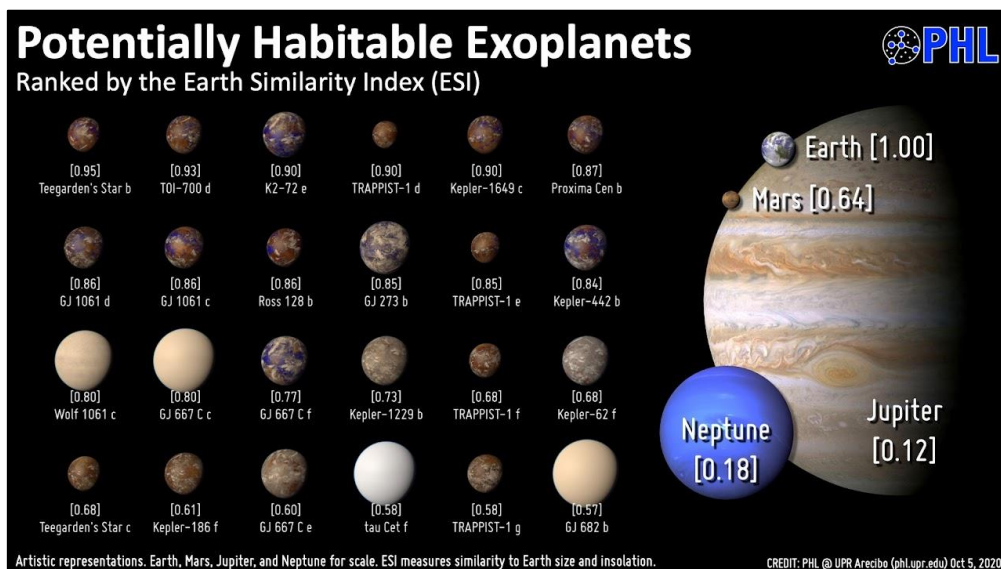
nevezetes rendszer lakhatósági viszonyait is megemlíteni (5.21. ábra), amelyekben több exobolygó is kering a lakhatósági zónában.



5.21. ábra. A TRAPPIST-1 és a GJ 667 C csillag megerősített exobolygói.

A bolygósomszédok helyzete is befolyásolja a lakhatóságot. Óriásbolygó közelében ritka a stabil pálya. Egy nagy hold jelenléte a bolygó körül viszont kedvező lehet, hiszen a bolygó tengelyferdeségének ingadozását lecsökkentheti, és így stabil éghajlat alakulhat ki a bolygón. Természetesen az is elképzelhető, hogy nem egy bolygón, hanem annak egy holdján alakul ki az élet számára megfelelő környezet, így fontos tanulmányozni a lakhatósági zónában keringő óriás gázbolygókat is.

Az exobolygókutatás egyik fő célja Földhöz hasonló, csillagának lakhatósági zónájában keringő exobolygó felfedezése, amelyekből egyre többet fedeznek fel, az 5.22. ábrán láthatjuk a Földhöz leginkább hasonlókat.

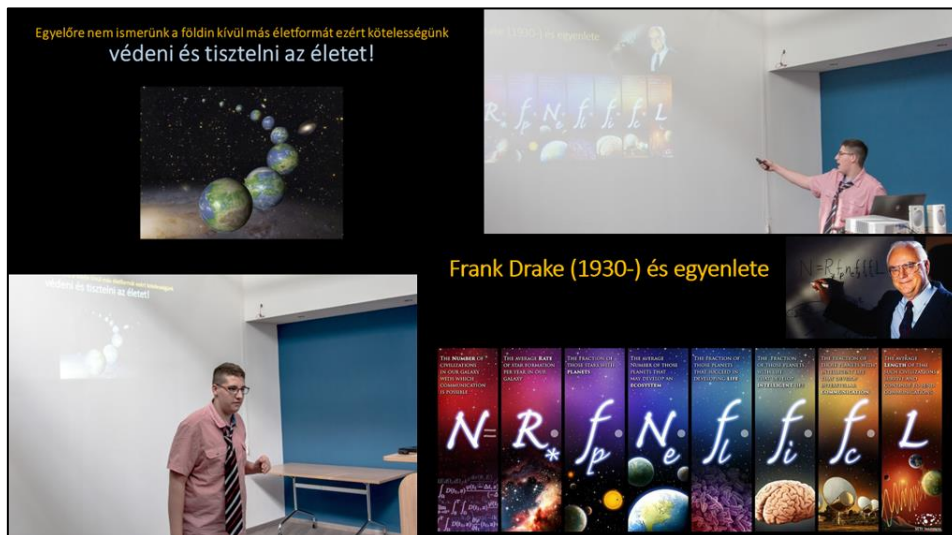


5.22. ábra. Földhöz hasonló lakható exobolygók.

5.5.4 Asztrobiológiai témák versenyeken

Vannak olyan versenyek is, ahol a tudományosság mellett az érdekesítő feldolgozásmód, az előadásmód is fontos szerepet játszik. Ezekre hosszan készülnek diákjaink, így a megszerzett tudás is tartósan rögzül bennük. Általában több oldalról is megvizsgálják a kiszemelt problémát, és sokszor van szükség tantárgyközi együttműködésre is. Két ilyen versenyt említek meg, egy hazait és egy nemzetközit, amelyen sikeresen szerepeltek tanulóim¹⁰¹.

A Fizika mindenkinek és Matematika mindenkinek versenyeken két kategóriában vehetnek részt diákjaink: 9-10. és 11-13. évfolyamos tanulók alkotnak külön csoportot. Erre az ingyenes versenyre internetes jelentkezés során egy 15 diás előadás beküldésével lehet jelentkezni, majd a döntőre kiválasztott tanulók 10 percben mutathatják be előadásukat. Kilencedikes tanulóim a Matematika mindenkinek versenyen a Drake-egyenlet feldolgozásával szerepeltek sikeresen.



5.23. ábra. Képek a Drake-egyenlettel kapcsolatos előadásról.

A Drake-egyenletnek nevezett képlet segítségével megbecsülhetjük, hogy hány értelmes civilizációval kerülhet kapcsolatba az emberiség (5.23. ábra). A formula egyes összetevőit felbecsültették iskolánk diákjaival. A kiértékelés nem volt egyszerű, mert sokan nem számszerűsítették becsléseiket, de az kiderült, hogy nagyon kevésbé járatosak a témában. Az elkészített előadást nemcsak a versenyen mondták el tanulóim, hanem diáktársaiknak is, hogy ők is megismerhessék a tudomány mai állása szerinti eredményeket és összehasonlíthassák az általuk becsült (tippelt) értékekkel.

¹⁰¹ <https://kosztolanyigimnazium.hu/programok-palyazatok-projektek/asztrobiologia-palyazat/>

Az Odysseus nemzetközi csillagászati verseny másodszorra került megrendezésre a 2015-2016-os tanévben [160]. Megadtak több témakört és azokon belül is néhány lehetőséget, de lényegében bármilyen csillagászati témával jelentkezhettek három korcsoportban a versenyzők. A felsőtagozatos korosztálytól rajzot vártak, a 14-18 évesek, illetve az egyetemisták pedig többféle módon feldolgozhattak egy általuk választott csillagászati témát. Volt, aki kísérletezett, mért, volt, aki filmet, animációt készített, voltak esszészerű kidolgozások, tanulóim pedig egy sci-fi képregénnyel készültek. Négy nagy témakör szerepelt a versenyen: A Naprendszer és űrtudományok, Európa az űrben, Emberek a Marson és Asztrobiológia-az élet keresése az Univerzumban. Két kilencedikes diákom ez utóbbi témakörön belül választotta az Írj egy sci-fit egy olyan űrutazásról, amelyben a fénysebesség 90%-val repülhetünk egy exobolygóhoz témát, és ehhez kapcsolódóan csapatnévnek a Vándorokat választották. A verseny első, országos fordulójában a diákok anyanyelvükön dolgozhattak, de a területi majd az európai döntőre kijutott csapatoknak már angolul is tudniuk kellett előadni. Ajánlották, hogy egy projekt munkalapot is töltsünk ki, amelynek megírása folyamán többféleképpen is átgondoltuk a választott témát, megbeszéltük melyek a valós elemek, és melyek a fantasztikusak a képregényben. Foglalkoztunk a fenntarthatóság témakörével és a Földön kívüli élet kérdéskörének társadalmi vonatkozásaival is. A Grazban tartott területi döntőre készülve nemcsak angolra kellett lefordítani mindkét anyagunkat, hanem új ötletre volt szükség az előadáshoz, hiszen nem vetíthettük ki diánként a képregényt. Diákjaim az igazi mozifilmekhez hasonlóan, figyelemfelkeltő rövid filmelőzetest készítettek a képregény képeiből. Három helyszínen (Föld, űrhajó, Gliese 667 Cc) időrendben egy idővonal segítségével mutatták be a jelentősebb történéseket. Majd az exobolygókkal kapcsolatos fontosabb ismeretek következtek (5.24. ábra).



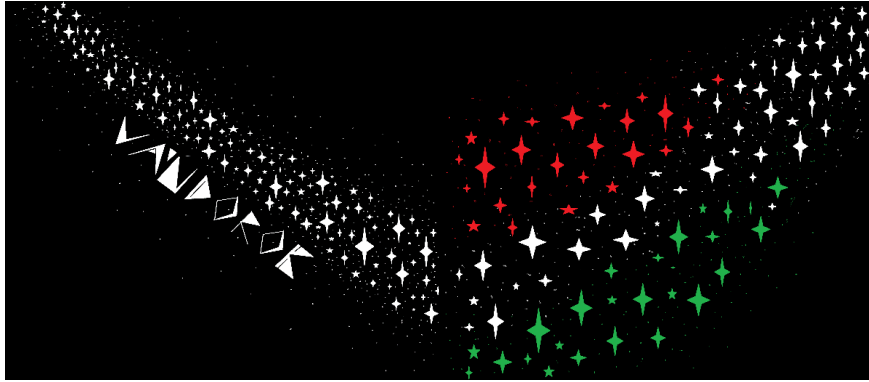
5.24. ábra. Pillanatképek az előadásról.

Többek között beszéltek az exobolygók változatosságáról, sokféleségéről. Készítettek a lakható exobolygókról egy szöveghőt, külön kiemelve a választott Gliese 667 Cc exobolygót. Röviden ismertették a legeredményesebb exobolygókereső módszereket, és a legtöbb felfedezést adó Kepler űrtávcsövet. Elmondták az előnyeit és hátrányait az űrből és a Földről történő távcsöves megfigyeléseknek. Megemléstettek jövőbeli exobolygó kereséssel foglalkozó űrmissziókat is. Ezek után beszéltek a lakhatósági zónáról. Megmutatták, hogyan függ ennek a területnek az elhelyezkedése a csillag típusától, hőmérsékletétől. Ismertették a Földhöz leginkább hasonló exobolygókat, rögtön az akkori lista elején, a választott úti céllal, a Gliese 667 Cc-vel, amelynek bolygórendszerét az 5.25. ábrán láthatóként festették le.



5.25. ábra. A Gliese 667 C csillag körüli lakhatósági zóna. (Malatinszky Adél festménye a képregényből)

Bemutatták, hogy ez az exobolygó a csillagának lakhatósági zónájában kering, majd a földi és az ezen az exobolygón látható naplementéket összehasonlító képet is mutattak érdekességképpen. Különlegessége ennek az exobolygónak, hogy hármass csillagrendszerben kering így az egén akár 3 nap is ragyoghat egyszerre. Végül hiteles forrásaikat, segítő tanáraikat, diáktársaikat is megemléstettek. Előadásmódjukat színesítette, hogy egy általuk tervezett, csillagokkal díszített pólót viselték mindketten, amelynek mintája az 5.26. ábrán látható.



5.26. ábra. A póló eleje és hátulja. (Tervezte: Blum Norbert és Malatinszky Adél)

Munkájukat nemcsak a területi döntőn adták elő, hanem diáktársaiknak, tanáraiknak is, felébresztve bennük is a téma iránti érdeklődést. Említésre méltó, hogy egyikük gyakorlásként az angol nyelvtanfolyamán is elmondhatta az előadást, amely nagyon tetszett az ott nyelvet tanulóknak és a nyelvtanárnak is.

Az asztrobiológiai témák azért lehetnek sikeres versenytémák, mert maga tudományág is sikeres. Ennek fontos következménye, hogy ezzel az érdekes témával lehet munkaként is foglalkozni, szükség van asztrobiológusokra, köztük exobolygókat kutatókra. A földönkívüli élet kutatása érdekli a lánytanulóinkat is, megismertethetjük őket ezen a területen tevékenykedő női tudósokkal is. Közülük érdemes megemlíteni Sara Seagert, akinek önéletrajzi írása megjelent magyarul is, *A Világegyetem legapróbb fényei, életem a Földön kívül és a Földön* (HVG Könyvek, Budapest, 2020) címmel és sok utalással a munkájára, az exobolygók kutatására.

Nagyon sikeres pályát tudhat maga mögött Natalie Batalha is, aki már a Kepler űrtávcső projektjében is meghatározó szerepet játszott. Legalább ilyen fontos „eredménye”, hogy lánya Natasha E. Batalha is asztrofizikusként dolgozik a NASA-nál, és az exobolygók légkörét tanulmányozza majd a James Webb űrtávcső segítségével. Éveken át látva édesanyja munkáját szerette meg ezt a kutatási területet, amelyből arra is következtethetünk, hogy ez érdekes elfoglaltság is.

Az exobolygó kutatás eredményei közül érdemes megemlíteni, hogy másik galaxisban is figyeltek már meg exobolygót (M51-ULS-1b), bár ezt a felfedezést nem igazolták még más kutatók. Már vannak exohold (Kepler-1625b, Kepler-1708b) jelöltjeink is, amelyek a megerősítésükre várnak. Fiatal csillagásznőnk, Dobos Vera exoholdakról írta doktori értekezését, amely mutatja, hogy a magyar kutatók, kutatónők is végeznek élvonalbeli kutatásokat.

6 Csillagászati tehetséggondozás

A csillagászattal kapcsolatos tehetséggondozás elsődleges célja, hogy a diákok minél jobban megismerjék az őket körülvevő világot, elsősorban kozmikus környezetünket, a Naprendszert. Az egyre bővülő tudásanyag megszerzése során nemcsak egy helyes (természettudományos) világnézet alakul ki tanulóinkban, hanem a tudás megszerzésének útjait, a tudományos kutatás módszertanának elemeit is megismerhetik, kipróbálhatják.

A kritikus és logikus gondolkodásmód fejlesztése mellett lehetőségük van kreatív ötleteiket, művészi alkotásaikat megvalósítani. Csoportos projekteknél a hatékony együttműködést is gyakorolják diákjaink. Csillagászmentoraiuk kapcsán a csillagászok munkáját is megismerhetik, segítve őket ilyen vagy hasonló irányú pályaválasztáshoz.

Ez a fejezet a hetedik tézisem háttéranyagát fejt ki [S10].

6.1 Csillagászattal kapcsolatos tehetséggondozás formái

A csillagászat nem önálló tantárgy Magyarországon, kevés csillagászati ismeret elszórtan lelhető fel néhány tantárgyban, így a csillagászati tehetséggondozás általában tanórán kívül, iskolai kereteken kívül valósul meg.

A tehetséggondozás helyei általában a szakkörök. Napjainkban már nem az iskolák az egyedüli helyek, ahol szakkörökön, délutáni, hétvégi alkalmakon mélyülhetnek el a diákjaink egy-egy témában. Sorra nyílnak meg a „science centerek”, „Agórák” és más intézmények (például egyetemek, Magyar Tudományos Akadémia és intézményei, múzeumok, nemzeti parkok) is szerveznek vagy szakköröket, vagy programokat, ahol lehetőség nyílik élményszerű ismeretszerzésre többek között csillagászatból is.

Hazánkban nagy hagyománya van az amatőr csillagász mozgalomnak. Jelenleg a Magyar Csillagászati Egyesület fogja össze országszerte a kisebb szervezeteket. A helyi csoportok sok helyen indítanak szakkört diákoknak, és ezek általában nyitottak bárki számára, aki többet szeretne megtudni a csillagos égboltról. A jelentősebb (és a médiában hangzatos címekkel beharangozott) csillagászati eseményekre általában előadásokkal, bemutatókkal készülnek, sokszor forgalmas helyekre települnek ki („járdacsillagászat”), hogy minél több embert

elérjenek. Az amatőr csillagászok életéről, mozgalmáról film is készült Csillagnézők¹⁰² címmel, amelynek bemutatója a Magyar Tudományos Akadémia Székházában volt (2018. február 19.). A film bemutatóján, amelyen lánytanulókkal voltam, sok iskolás csoport vett részt, ismerkedhetett meg az amatőr csillagászzal. A filmben nemcsak a szabadidő hasznos eltöltésére láthatunk egy kiváló lehetőséget, hanem ez a tehetséggondozás egyik formája is egyben, amelyet a számos amatőr csillagászból lett kutató csillagász (például Kiss László akadémikus) is bizonyít. Sokakat a csillagászat az égbolt látványán keresztül fog meg, ezért jelentős az amatőr csillagászok szerepe. Türelmesen oktatják az új tagokat és a körükben jelenlevő jó hangulat is hozzájárul az élményszerű ismeretszerzéshez. Nemcsak gyönyörködnek a csillagos égboltban, ismerik az égen látható objektumokat, hanem szeretnék minél többet megtudni róluk, így rendszeresen szerveznek ismeretterjesztő előadásokat, tanfolyamokat. Természetesen az „utánpótlás” neveléséről is gondoskodnak a diákoknak szervezett szakkörökkel.

Jelentős csillagászati ismeretek szerezhetőek a planetáriumi programokon is. Sajnos a budapesti planetárium évek óta zárva van, az épületet kellene felújítani. Nagyon hiányzik az iskolásoknak is, hiszen sok osztály vett részt programjain, előadásain. Jelenleg kisebb mobilplanetáriumokban mutatják be az égbolt csodáit a gyerekeknek, sokszor az iskolájuk tornatermében felállítva, egymás után több csoportnak is lehetőséget adva a planetáriumi élmény átélésére. Vannak kisebb planetáriumok is, amelyek előzetes bejelentkezéssel fogadják a csoportokat, ilyen például az ELTE TTK Csillagászati Tanszékén levő planetárium.

A tehetséggondozás fontos része a megmérettetés is, amely általában versenyeken, pályázatokon valósul meg. A csillagászathoz kapcsolódóan sokféle versenyt említhetünk, akár rajz, fotó vagy más pályaműre is gondolhatunk, vagy műszaki alkotások (robotok, kis műholdak), készítésére, működtetésére, lehet diákpályázaton dolgozni, majd benyújtani akár a Természet Világa, akár a MANT éves diákpályázataira, vannak versenyek, ahol egy-egy természettudománnyal kapcsolatos témáról kell érdekes előadást, bemutatót tartani és természetesen a régről megszokott „feladatmegoldó” versenyek is megmaradtak. Több tantárgyi versenynél találunk csillagászzal kapcsolatos feladatokat, és vannak csak csillagászati versenyek is, amelyek közül az egyik legrangosabb a Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia (IOAA International Olympiad on Astronomy and Astrophysics). Ehhez kapcsolódóan országos válogató versenyt is tartanak immár évente hazánkban.

¹⁰² <https://www.youtube.com/watch?v=JQnFTvw7Qtg>

6.2 Csillagászati témák versenyeken

A természettudományi versenyek között vannak évente megrendezésre kerülő, jól bejáratott, nagy múltúak és vannak alkalmanként meghirdetettek is. Léteznek széleskörben elérhetőek (országosak, területi szervezésűek) illetve egy meghatározott közösség tagjai számára szervezettek is, mint például az iskolai háziversenyek. A következőkben nem célom az összes csillagászati témát is tartalmazó verseny felsorolása, inkább egy-egy példával a sokszínűséget szeretném bemutatni, elsősorban a minden diák számára elérhető versenyek körében.

Az általános iskolás korosztály számára szervezett versenyek, vetélkedők közül kiemelkedően magas a csillagászáttal kapcsolatos feladatok aránya a Varázstorony Vetélkedőben. Az egri Eszterházy Károly Katolikus Egyetem Varázstorony egysége¹⁰³ (Természettudományi, Pályaorientációs és Módszertani Központ) szervezi évente a hetedik osztályos diákoknak ezt a háromfordulós versenyt (teszt feladatsorok, majd az országos döntő a Varázstoronyban), amelynek témaköre a csillagászati és fizikai érdekessegekhez kapcsolódik. A versenyzők többek között a Varázstoronyban található Planetáriummal és Csillagászati Múzeummal kapcsolatos kérdéseket is kapnak, amelyhez a honlapon találnak segítséget, illetve egy Varázstorony látogatás során.

A harmadiktól nyolcadik osztályos tanulók számára szervezett Jedlik Ányos matematika és fizikaversenyen nem jellemzőek a csillagászáttal kapcsolatos problémák.

Az általános iskolás korosztálynak készült Abacus újság¹⁰⁴ és levelezős verseny fő profilja a matematika, de van például fizika rovata és előfordulnak benne csillagászati írások is.

A Teleki Pál Kárpát-medencei Földrajz-Földtan Verseny hetedikes és nyolcadikos tanulók részére szervezett többfordulós verseny¹⁰⁵. Első iskolai vagy kerületi fordulójának ismeretanyagában hetedikeseknek szerepel a Naprendszer és a Föld, nyolcadikosoknál pedig a Föld és a Világegyetem.

A Less Nándor Földrajzverseny¹⁰⁶ több kategóriában hetedik osztályos tanulóktól középiskolás korosztályig nyújt versenyzési lehetőséget. A természetföldrajzi feladatok között szerepelnek

¹⁰³ <https://varazstorony.hu>

¹⁰⁴ <http://www.mategye.hu/?pid=abacus>

¹⁰⁵ <http://mtte.hu/?q=content/teleki-p%C3%A1l-verseny-202122>

¹⁰⁶ <http://less.foldrajzverseny.hu>

csillagászzal kapcsolatosak is (például (2019-ben) földrajzi helymeghatározás, meteor, meteorit, meteoroid, Hold, a Föld Nap körüli keringése) főleg a kilencedikes évfolyamon.

A Lóczy Lajos Országos Földrajzversenyt¹⁰⁷ kilencedik és tizedik évfolyamon hirdetik meg lényegében a középiskolás tananyagra alapozva. A kilencedikes természetföldrajzi témák között szerepel a kozmikus környezetünk, a Naprendszer és a Föld, mint bolygó is. A 2018/2019-es verseny egyik kiemelt témája volt kilencedik évfolyamon az Űrkutatás, holdak, 2013/2014-es versenynél a Nap és a Naprendszer kisebb égitestjei, hatásaik a Földre, 2009/2010-ben pedig csillagászati földrajz, kiemelten a Naprendszer, de ezeken kívül is sok csillagászati kérdést kapnak az első fordulóban a kilencedikes versenyzők.

Az Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny földrajz feladatlapjaiban is találunk csillagászzal kapcsolatos kérdéseket, feladatokat (2019/2020-asnál például a III. Képzeltbeli űrbolyongás feladatánál kértek számon sok bolygókkal kapcsolatos ismeretet [162]).

A HunGeoContest¹⁰⁸ (HungarianGeographical Contest) angol nyelvű földrajzi tanulmányi verseny egyik célja a Nemzetközi Földrajzi Olimpián résztvevő magyar csapat tagjainak kiválasztása. Ismeretanyaga a középiskolai tananyagra alapul, így szerepelhetnek benne csillagászzal kapcsolatosak is, általában a Földre, mint égitestre vonatkozóak (például az ár-apály jelenségköre). A Nemzetközi Földrajzi Olimpián¹⁰⁹ is inkább planetológiai feladatokat találunk, mint Földön kívüli csillagászatiakat.

A középiskolásoknak szervezett fizikaversenyek közül a Mikola Sándor Országos Tehetségkutató Fizikaversenyen, a tananyaghoz igazodóan (9-10. osztály) főleg bolygómozgáshoz, Kepler törvények alkalmazásához kapcsolódóan szerepelnek csillagászati feladatok.

Az Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny fizika feladatai között is vannak csillagászzal kapcsolatosak, általában a bolygók, holdak, műholdak keringésével, kozmikus sebességekkel, súlytalansággal kapcsolatosak, de volt már a Vénusz légköréről és az exobolygók okozta Doppler jelenségre vonatkozó is (2020/2021 II. kat. 2. ford.) [163].

Levelezős versenyek közül kiemelendő a nagymúltú KÖMAL újság¹¹⁰ fizika pontversenye, ahol találunk csillagászati témájú feladatokat is.

¹⁰⁷ <http://loczyverseny.hu>

¹⁰⁸ <https://hungeocontest.org>

¹⁰⁹ <http://www.geoolympiad.org>

¹¹⁰ <https://www.komal.hu>

A Fizika mindenkinek¹¹¹ és a Matematika mindenkinek¹¹² (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai Kara által rendezett) csapatversenyeken olyan témák feldolgozását, majd bemutatását várják a középiskolás diákoktól, amelyekben a fizika vagy a matematika jelenlétét mutatják be a műszaki életben a különböző tudományokban, művészeti ágakban, illetve a mindennapi életben. A nyertes pályaművek között is találhatóak csillagászati témájúak. (Az amatőr csillagászok szerepe a modern fizikában (2017), Egy marsi kolónia biofizikája (2017, II. kat.)).

Az Ifjú Kutatók Nemzetközi Konferenciája¹¹³ (ICYS, elnöke Dr. Rajkovits Zsuzsanna (ELTE), magyar elődöntő szervezője az ELTE Anyagfizikai Tanszék), olyan egyéni verseny, ahol a tanulók pályamunkát készítenek, azt 10-15 perces (angol) nyelvű előadás keretében ismertetik. Önálló, lehetőleg kísérleti munkát, vagy egy téma saját ötleten alapuló feldolgozását várják el a diákoktól. Ezen a versenyen is szerepeltek eredményesen csillagászati témájú pályázattal magyar résztvevők: Vingelmann Péter: „Stars far away” (I. díj 2004. Hollandia), Galgóczi Gábor: „Inferring the physical parameters of extrasolar planets” (III. díj, 2012. Hollandia).

Léteznek másféle próbálkozások is, hogy a tanulókat a tanórán kívül is buzdítsák különféle ismeretek megszerzésére, alkalmazására, ezeknél is jelentős a csillagászat szerepe.

Az ELTE TTK Természettudományi Kommunikáció Központ „A világ érdekes” címmel online természettudományos versenyt hirdetett 2018-ban középiskolás diákok részére. Egyénileg, vagy kis csoportban dolgozhattak egy pályaművön (elektronikusan beküldött poszteren), amelyet ismeretterjesztő céllal saját iskolatársaiknak készítettek. Bár szabadon választhattak témát, de ajánlottak is a szervezők minden tantárgyból többet is, köztük a fizika, csillagászaton belül például: „A forró Univerzum utolsó szelfije”, vagy „Többcsatornás csillagászat”.

Az ELTE négy fordulós, „Az atomoktól a csillagokig” előadássorozatra épülő online fizikaversenyt is hirdetett a 2017-2018. tanévben. Elsődleges cél volt a fizika, mint ma is élő fejlődő tudomány bemutatása, amelynek számos fontos gyakorlati alkalmazása van. Korábbi előadások megtekintése után kellett feladatlapot kitölteni, majd beküldeni. A három választható modul egyike a csillagászat, asztrofizika volt.

¹¹¹ http://verseny.eit.bme.hu/fizika_mindenkinek/

¹¹² http://verseny.eit.bme.hu/matematika_mindenkinek/

¹¹³ metal.elte.hu/~icys/magyar/konfrol.html

Háziversenyként a székesfehérvári Teleki Blanka Gimnázium és Általános Iskola a gimnáziumi tanulók számára írt fizikaversenyt¹¹⁴ említem meg, amelynek egyik kategóriája egy pályamunka elkészítése volt, amelyhez csillagászati témákat is javasoltak (2019-ben).

6.3 Hazai csillagászati versenyek

A Kulin Györgyről elnevezett csillagászati vetélkedő két kategóriájából a középiskolások számára rendezett vált a diákolimpikonok válogató versenyévé. Az általános iskolás kategóriában két évente rendeznek vetélkedőt¹¹⁵, amelynek három internetes fordulója alapján kerülnek kiválasztásra az országos döntő (három fős) csapatai. A fiatalabb korosztály vetélkedője játékos jellegű, tesztfeladatokkal, keresztrejtvénnyel, képkirakókkal, elképzelt megadott célú úrutazás bemutatásával, eljárásával. Főleg a csillagászat és űrkutatás eredményeire, történetére, a csillagászathoz kapcsolódó kulturális ismeretekre kérdeznek rá az alapvető (elsősorban a Naprendszerre vonatkozó) csillagászattal kapcsolatosakon kívül.

A Kulin vetélkedő második kategóriája a 2010/11-es tanévtől már országos középiskolai versenyként a kiemelkedő tehetségek felkutatását tartotta legfőbb céljának, hogy a diákolimpián megfelelő színvonalon képviselhessék hazánkat. Több egyetem, kutatóintézet és a Magyar Csillagászati Egyesület (helyi csoportjaival) segítette és azóta is segíti a versenyek lebonyolítását, majd az olimpikonok felkészülését, felkészítését a diákolimpiára.

Kezdetben a középiskolás kategóriában is változatos feladatokkal találkoztak a versenyzők. A Kulin verseny második kategóriájú feladatai között szerepeltek teszt jellegű kérdések, egyszerűbb megfigyelési feladatok, csillagászattal kapcsolatos tudománytörténeti és kultúrtörténeti érdekességekre vonatkozó kérdések. Előfordultak hosszabb kifejtős, esetleg esszé jellegű feladatok is. Később a három internetes forduló számolási, adatfeldolgozási feladatokat, mérési, megfigyelési problémákat tartalmazott. A fordulók során fokozatosan nehezedtek a feladatok, közelítve a diákolimpiai szinthez, így próbálva csökkenteni a fordulók közötti lemorzsolódást. Az internetes fordulók eredményei alapján hívtak be az országos döntőre 10-20 főt.

¹¹⁴ https://www.telekiblanka.hu/fiz_versenypalyazat

¹¹⁵ <http://www.bajaobs.hu/kulin/>

Ahogy a középiskolásoknak szervezett Kulin György csillagászati vetélkedő a diákolimpiára való válogató versennyé vált úgy alakult át a szervezése (elnevezése), lebonyolítása, feladattípusai. Célszerű, ha a válogatóverseny feladatai a diákolimpián szereplőkhöz hasonlítanak, de mivel kevés csillagászati ismeretanyaggal találkoznak diákjaink a tanóráikon, így nagy a különbség a diákolimpiai feladatok szintje és a diákok olyan csillagászati ismeretanyaga között, amely a tantervi előírásokon alapul. Néhány csillagászati szakkörre is járó diákon kívül esélytelen volt az eredményes részvétel a többieknek. Problémát jelentett, hogy maga a verseny sem volt olyan széles körben ismert, mint más tantárgyi versenyek, itt is megnyilvánul annak a hátránya, hogy a csillagászat nem önálló tantárgy. A verseny internetes, egyéni fordulói felvetették annak a problémáját is, hogy ki oldja meg a feladatokat, többször került az országos döntőre olyan diák, aki ott szinte alig tudott valami értékelhetőt teljesíteni. Ezt megelőzendő a diákok az első két fordulót iskolájukban írták meg tanári felügyelet mellett. Ugyan a tanárok számára ez többletmunkát jelentett, jelentkezteni kellett a diákokat és szervezni, felügyelni az egyes fordulokat. Ez lényegében más tanulmányi versenyekhez hasonlóan zajlott, viszont más versenyektől eltérően a feladatlapokat nem kellett kijavítaniuk a tanároknak, ezt átvállalták a szervezők. A tanárok munkáját könyvekkel, csillagtérképekkel, planetáriumi belépőkkel, kedvezményes csillagvizsgáló látogatási lehetőséggel honorálták, köszönték meg. Eleinte csak két forduló zajlott az iskolákban, a harmadik adatfeldolgozós részt otthon készíthették el a versenyző diákok. Később ezt a fordulót is az iskolájuk számítógéptermeiben dolgozhatták ki a tanulók.

Az országos válogatóverseny feladatai is nagy változáson mentek keresztül, eleinte a diákolimpiai szinthez hasonlítottak inkább a feladatok, amelyeket kevesen tudtak megoldani, később egyszerűbb főleg a középiskolai anyagot lefedő (választottunk régebbi érettségi feladatok közül is), nagyobb eséllyel megoldható feladatok szerepeltek. Jelenleg elég részletes előzetes témakiírás történik minden forduló előtt és egy egyre bővülő segédanyagbázis is elérhető. Az előző versenyek feladatai és megoldásuk is nyilvános, fel lehet mérni segítségükkel, hogy mire számíthatnak a versenyen résztvevők. Mindezek segítik a felkészítő munkát is, akár szakkörökben, akár iskolai keretek között történik. Ugyan elsődlegesen a versenyen való eredményes szereplés érdekében készültek a segédanyagok, de a csillagászati témák tanórai feldolgozását is színesíthetik, a csillagászati diákolimpiai mozgalomnak az ott munkálkodóknak nemcsak a diákolimpiai eredményes szereplés a céljuk, hanem a magyar csillagászzal kapcsolatos oktatómunka segítése, beleértve a csillagászati tehetséggondozást is. Ez az egyre bővülő magyar nyelvű gyűjtemény igazán hiánypótló, és egyben szakmailag

megbízható is, hiszen csillagászok lektorálják, középiskolai tanárok és volt olimpikonok figyelnek a közérthetőségére. A feladatok mellett elméleti összefoglalókat, vagy azok elérhetőségét is tartalmazza ez a gyűjtemény¹¹⁶.

Az országos döntőn már semmilyen segédeszközt sem használhatnak a tanulók, de ahogyan az igazi diákolimpián, itt is kapnak egyforma számológépet és egy csillagászati állandókat tartalmazó táblázatot. Nemcsak elméleti feladatok, hanem észlelésiek (megfelelő égboltnál, távcsöves, illetve planetárium) is szerepelnek az döntőn. Pénzügyi támogatással (EMMI) sikerült az eredetileg egy napos döntőt két napossá bővíteni. Helyszíne is évről évre változik, Szeged, Szombathely, Debrecen, Pécs, Székesfehérvár, Jászberény is helyszíne volt a végső megmérettetésnek a budapesti Újpesti Könyves Kálmán Gimnáziumon kívül. Változtatás a korábbi gyakorlattal szemben az is, hogy az országos döntőn nem válik véglegessé a diákolimpiai csapat, hanem az olimpiai felkészítés legvégén kerül sor már szűkebb körben egy végső megmérettetésre, amely hasonlít az igazi diákolimpiára.

Mind a csillagászat verseny széleskörű megismertetésében, mind a szervezésben, felkészítésben részt vevők számának növekedésében jelentős szerepet játszott a hazai megrendezésű diákolimpia 2019-ben. Egykori diákolimpikonok már a szervezésben, felkészítésben és a lebonyolításban is jelentős szerepet vállaltak, lassan átvéve a munka nagy részét. Az országos versenynek is új nevet találtak: *Athletica Galactica*¹¹⁷, amely számára saját honlapot is készítettek. A versenyzőkhöz korban sokkal közelebb állnak így a honlap formája, tartalma és szolgáltatásai is a versenyzői korosztályhoz igazodik. Természetesen a diákok által használt más közösségi portálokon is megjelennek a versennyel kapcsolatos információk. Talán nem túlzás kijelenteni, hogy minden tanuló számára minden segítség adott az eredményes versenyzéshez. Maga a versenyzés is része az olimpiai felkészülésnek, ezért nagyon fontos, magának a versenyen való eredményes szereplésnek is a segítése minden téren.

6.4 Nemzetközi csillagászati versenyek

Nemzetközi szinten is különböző versenyeken vehetnek részt diákjaink csillagászzal kapcsolatosan. Ritka ezek között az évente megrendezett, inkább jellemzőek az egy-egy

¹¹⁶ <http://www.bajaobs.hu/ioaa/>, <https://athleticagalactica.hu/felkeszules-segedanyagok>

¹¹⁷ <https://athleticagalactica.hu/>

csillagászati jelenséghez, misszióhoz, projekthez kapcsolódó egyszeri esetleg néhányszor megrendezésre kerülök. Az ezeken való részvétel feltétele általában az angol nyelv megfelelő ismerete, fontosabb csillagászati fogalmakat is beleértve. Csak a művészi alkotásokat váró pályázatok, versenyek kivételek ez alól.

A „Ragadj meg egy csillagot” (Catch a star¹¹⁸, ESO, EAAE szervezésében) évente kerül kiírásra. Egy csillagászattal kapcsolatos pályaművet (esszét, összefoglaló művet) kell beküldeniük a csapatoknak, amely elkészítéséhez önállóan tanulmányoznak egy csillagászattal kapcsolatos témát. A pályaművet angol nyelven kell elkészíteni, így ez vagy fordítói segítséget, vagy jó nyelvtudást igényel. Lehetett korábban (2008 előtt) rajzzal vagy festménnyel is részt venni ezen a versenyen egy művészeti kategóriában. Space Art Contest¹¹⁹ (2016-ban majd 2021-ben) három kategóriában, 6-tól 16 éves korig várta a diákok csillagászattal kapcsolatos témájú rajzait vagy egyéb művészi alkotásait. Az AstroArt Competition¹²⁰ (OhioState University, Center for Cosmology and AstroParticle Physics) négy korosztályban, 5 évestől bárki számára nyitott verseny, hiszen a negyedik kategória 18 éven felülieké. Bármilyen csillagászati művészi alkotást elfogadnak, amely a világgal kapcsolatos. Várnak többek között verseket, festményeket, rajzokat, szobrokat.

Mint ez a példa is mutatja, léteznek olyan versenyek, pályázatok, amelyeken az egész világról részt vehetnek, de jellemzőbbek a területi, nemzeti kiírású versenyek, mint például a megegyező nevű, de csak a Dél-Afrikai diákok számára kiírt AstroArt Competition¹²¹. Hasonló néven NASA szervezésű verseny is volt 2017-ben: AstroArt Contest¹²².

Az Odysseus¹²³ (European Youth Space Contest) verseny háromszor is megrendezésre került az elmúlt évtizedben, három korosztályi kategóriában, többféle témakörben lehetett dolgozni egy-egy pályaművön. Országos majd területi elődöntők után került sor az európai döntőre, amelyeken a diákoknak be is kellett mutatniuk munkájukat. A verseny honlapján sok tanácsot nyújtottak a felkészüléshez, és minden témához segédanyagokat is adtak. A másodiknak szervezett versenyen diákjaim asztrobiológiai témában adtak be pályaművet, amelynek része volt egy képregény elkészítése. A grazi területi döntőről ugyan nem jutottak tovább, de a zsűri művészeti különdíjjal értékelte munkájukat.

¹¹⁸ <https://eaae-astronomy.org/catch-a-star>

¹¹⁹ <https://eaae-astronomy.org/space-art>

¹²⁰ <https://astronomy.osu.edu/events/astroart-contest>

¹²¹ <https://www.sao.ac.za/2021/02/23/astroart-competition>

¹²² https://nightsky.jpl.nasa.gov/event-view.cfm?Event_ID=82289

¹²³ <http://www.odysseus-contests.eu/>

6.4.1 Nemzetközi természettudományos diákolimpiák

Többféle természettudományos diákolimpián is összemérhetik tudásukat diákjaink. Elsőként a Nemzetközi Matematikai Diákolimpiát (IMO) rendezték meg (1959-ben), majd egy évtizeden belül elindult a Nemzetközi Fizikai Diákolimpia (IPhO, 1967-től) és a Nemzetközi Kémiai Diákolimpia (IChO, 1968-tól) is. A 6.1. táblázatban a természettudományos diákolimpiákat mutatom be külön kitérve a magyar részvétel kezdetére és a magyar rendezésű versenyekre.

Diákolimpia neve és honlapja	Első megrendezése	Első magyar részvétel	Magyar rendezés
Nemzetközi Matematikai Diákolimpia IMO http://www.imo-official.org/	1959	1959	1961, 1970, 1982
Nemzetközi Fizikai Diákolimpia IPhO http://ipho.phy.ntnu.edu.tw/	1967	1967	1968, 1976
Nemzetközi Kémiai Diákolimpia IChO https://www.icho.sk/	1968	1968	1970, 1975, 1987, 2008
Mengyelejev Olimpia (szovjet kémiaversenyek utódja) http://www.chem.msu.ru/rus/olimp/welcome.html	1966	2012	
Nemzetközi Informatikai Diákolimpia IOI http://www.ioinformatics.org/index.shtml	1989	1989	1996
Nemzetközi Biológiai Diákolimpia IBO http://www.ibo-info.org/	1990	2010	2019
Nemzetközi Földrajzi Diákolimpia iGeo http://www.geolympiad.org/	1996	2005	
Nemzetközi Csillagászati Diákolimpia IAO http://www.issp.ac.ru/iao/	1996		
Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia IOAA https://www.ioaastrophysics.org/	2007	2011	2019
Európai Unió Természettudományos Diákolimpia (legfeljebb 16 éveseknek) EUSO http://www.euso.ie/	2003	2009	
Nemzetközi Természettudományos Diákolimpia (legfeljebb 16 éveseknek) IJSO http://www.ijsoweb.org	2004	2004	
Nemzetközi Földtudományi Diákolimpia IESO http://www.ieso-info.org	2007		

6.1. táblázat. A természettudományos diákolimpiák

A matematika- és természettudományos tárgyak oktatásának színvonalához hozzájárult a kezdetektől fogva folyamatos részvétel a matematikai, fizikai, kémiai, informatikai és természettudományos diákolimpiákon. Magyarország többször is sikeresen volt e nemzetközi versenyek házigazdája. Kialakultak a felkészítést segítő olimpiai szakkörök, és több évtized versenyének feladatai segítik ma már diákjainkat a felkészülésben és az eredményes részvételben. A Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia (IOAA) versenyébe alapítása után négy évvel kapcsolódhattak be a magyar csillagászatot szerető és értő diákok, majd 2019-ben már hazánk rendezte a versenyt.

6.4.2 Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia (IOAA)

Általában sem a fizika, sem a földrajz tantárgyak tanításánál nem jutunk el mélyebb asztronómiai ismeretekig, azért hozták létre ezt a világversenyt, hogy ezzel is segítsék a csillagászati ismeretek oktatását, tanulását. Ezzel mind a földrajz- mind a fizikaoktatás csak nyer, hiszen a csillagászat (és a belőle kiváló társtudományok, pl. az űrfizika vagy asztrobiológia) nemcsak egyike a leggyorsabban fejlődő tudományágaknak, hanem szinte mindenkit érdekel, diákjainkat is, tulajdonképpen kicsit látványosabb, izgalmasabb köntösbe csomagolva segít a többi természettudományos tantárgy elfogadását, tanítását is.

Csillagászati diákolimpiák

Hasonlóan a kémiához (IChO, Mengyelejev), csillagászatból is kétféle diákolimpia van: az IAO (International Astronomy Olympiad) és az IOAA (International Olympiad on Astronomy and Astrophysics). Az elsőben főleg a szovjet utódállamok vesznek részt, és az Eurázsiai Csillagászati Egyesület (EAAS, Euro-Asian Astronomical Society) felügyelete alatt áll. A 2006-os Nemzetközi Fizikai Diákolimpián vetődött fel egy kissé más szemléletű csillagászati olimpia szervezésének ötlete. A 2007-ben alapított IOAA a Nemzetközi Csillagászati Unió (IAU, International Astronomical Union) elvi támogatásával működik. Az évek múltával ez fejlődött inkább, de sok nemzet mindkét versenyen indítja diákjait. Természetesen ez leginkább pénzkérdés. Magyar diákok 2011 óta vesznek részt az IOAA versenyein, de az IAO diákolimpiára eddig még nem volt módunk csapatot küldeni.

Ugyan nem diákolimpia, de a 2019 óta szervezett IAAC (International Astronomy and Astrophysics Competition¹²⁴) is minden középiskolai és egyetemista diáknak lehetőséget ad versenyzésre két kategóriában. A verseny három fordulós online szervezésű, így nem kell létszámkorlátokban gondolkodniuk. A korábbi versenyfeladatokat és megoldásaikat közzéteszik a honlapjukon. Ez a verseny még a COVID-járvány kitörése előtt indult, de szervezésében lényegében nem hozott változásokat a következő két év járványos időszaka, míg a többi diákolimpia nagyrészt szintén online formában került ezen időszakban megrendezésre.

Történeti áttekintés

Az első IOAA diákolimpiát Thaiföldön tartották 2007-ben. Ezen 21 ország tanulói versenyeztek, köztük lengyel, román, görög, szlovák és ukrán diákok is. Ezután Indonéziában, Iránban, Kínában rendezték egyre bővülő körben az IOAA versenyeit.

Az IOAA-n való részvételre új országokat meghívásos alapon választanak be. Magyarországot szlovák csillagászok ajánlották 2009-ben, amelynek Hegedűs Tibor lett a vezetője és egyben lelkes szervezője. A következő olimpián (amelyhez Kínába kellett volna utazni) még elsősorban idő és támogatás hiányában nem volt jelen magyar delegáció, de 2011-re már összeállt egy kiutazó csapat. A romániai olimpiáig (2014) minden csapattagnak és kísérőnek saját pénzéből kellett fizetnie a kiutazás költségeit, majd a helyszínen már biztosította a fogadó ország a versenyzők szállását, étkezését és utazását. Természetesen korlátozzák az országonként résztvevők számát (5 versenyző és 2 kísérő). Mőd van megfigyelők, esetleg más diákok részvételére is, de a létszám limitált, és az ő költségeiket saját maguknak kell fizetniük. A 2014-es romániai diákolimpián megfigyelőként vettem részt, hogy saját tapasztalatot is szerezzek erről a megmérettetésről. A rendező ország mindig két csapattal vehet részt a versenyen, és ezt még egy-két alapító országnak is megengedik minden évben.

Az ötödik olimpiára (2011) tehát már magyar csapat is utazott Lengyelországba. Ez volt az első európai helyszín, így ide már horvát, bolgár és portugál diákok is érkeztek. Nem volt még tapasztalatunk a diákolimpia szintjével kapcsolatban, a felkészítés során az akkori hazai szakköri tudásszint kevésnek bizonyult a versenyen, de egyik olimpikonunk így is dicséretet kapott. A hatodik olimpián, Brazíliában már a magyar diákok és felkészítőik is tisztában voltak a verseny színvonalával, így olimpikonjaink eredményesen szerepeltek. A hetedik, görög olimpia is eredményes volt számunkra. Az IOAA 2014 évi versenyén (Romániában) az előzőeknél nehezebb feladatokat adtak, azok a diákok voltak előnyben, akik fizikából is magas

¹²⁴ <https://iaac.space/en/>

szintű tudással rendelkeztek. Diákjaink a középmezőnyben teljesítettek. A következő diákolimpián, amelyet immár másodszor is Indonéziában rendeztek, olimpikonjaink egzotikus környezetben mérhették össze tudásukat a világ minden részéről érkező diákokkal. Amilyen vonzó első hallásra annyira veszélyes is lehet a diákok számára különleges környezet, ezen az olimpián sok (főleg európai) diák kapott gyomorrontást, amely természetesen kihatott teljesítményükre is. 2016-ban Indiában tartották a diákolimpiát egy évvégi, decemberi időpontban az ottani időjárásra tekintettel. Ilyen esetben előfordul, hogy a résztvevő diákok már egyetemi tanulmányaikat folytatják, így nekik az egyetemi elfoglaltságaikat is össze kell egyeztetniük a diákolimpiai részvétellel. Az ázsiai rendező országok általában őszi időpontot választanak a versenyzésre a nyár közepi megszokott helyett, de az indiai volt a legkésőbbi közülük. A magyar egyetemeken tanuló diákolimpikonok általában meg tudják oldani a részvételt, de a külföldi egyetemekre bejutott tanulóknál ez már nagyobb nehézséget okoz, van olyan egyetem is, ahol egyértelműen nem támogatják a részvételt, illetve az azzal járó hiányzást. A következő megmérettetésre ismét Thaiföldön került sor, bár helyileg nem pontosan az első diákolimpia helyszínére szervezték a versenyt. Az itt résztvevő diákok átélhették mit jelent egy királyság, milyen tisztelet jár az uralkodó család tagjainak. 2018-ban újra Kínában került sor a versenyre, egy visszalépő ország helyett vállalták a gyors szervezést. Bár minden olimpia egy kicsit más, de amely ország már egyszer lebonyolított egy ilyen versenyt, annak a második szervezése könnyebben megy. Románia ugyan nem vállalt még egy szervezést, de a 2014-es helyszínekre, a diákolimpia mintájára egy olyan nemzetközi versenyt¹²⁵ hirdetett meg 2020-ban, amelyik a fiatalabb (15 év alatti) korosztály számára nyújt hasonló versenyzési lehetőséget, mint az IOAA. Sajnos a járványhelyzet miatt nem sikerült beindítani a fiatalabb korosztály csillagászati diákolimpiáját a tervezett időpontban, amelyet 2022-re módosítottak.

2019-ben Magyarország is belépett a szervező országok sorába és a járványos időszak előtti szokásos, jelenléti módon utolsó alkalommal bonyolította le a diákolimpiát. Erre már a kezdeti 21 ország helyett 46 országból jöttek versenyzők [164].

2020-ban egy nemzetközi online versennyel helyettesítették a diákolimpiát, sok más diákolimpiához hasonlóan, mert a rendező ország nem tudta lebonyolítani a szokásos formában a versenyt. Értékelve a diákok felkészülési munkáját nem akarták, hogy megmérettetés nélkül maradjanak, ezért az utazást és összegyülekezést kizáró internetes lehetőség mellett döntött a diákolimpia nemzetközi irányító testülete (International Board, IB). Az online megmérettetés

¹²⁵ <https://www.isj.sv.edu.ro/ioaa-2020/index.php>

(GeCAA Global e-Competition on Astronomy and Astrophysics¹²⁶) szervezését Észtország vállalta, de saját egyetemi, csillagvizsgálói segítségük mellé minden országból kértek feladatjavaslatokat, majd ezekből állították össze a végső feladatsort. Az egyes országok koordinátoraira is nagyobb teher, több munka hárult, hiszen nekik kellett a diákok versenyzési körülményeiről is gondoskodni, felügyelőket biztosítani az egyes fordulók lebonyolításánál, amely egyébként a rendező ország feladata. Még nagyobb kihívást az informatikai háttér, illetve annak folyamatos működtetése jelentette, hiszen az élő kamerás felvételeket a szervezők is figyelték, ellenőrizték. A magyar helyszín a Könyves Kálmán Gimnáziumban volt, Udvardi Imre, egyik IOAA koordinátorunk és lelkes felkészítőnk iskolájában, amely már többször tartott országos selejtező versenyt és az olimpiai felkészítő szakkör egyik helyszíne is a Kulin Csillagda, így a diákok számára sem volt ismeretlen. A magyar csapat szép eredménnyel zárta a versengést.

Az aktuális szervező ország (Kolumbia) 2021-ben hibrid, nagyrészt online módon bonyolította le a versenyt.

Az IOAA követelményrendszere és feladat típusai

A Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia részletes követelménye megtalálható angolul az IOAA hivatalos honlapján¹²⁷ és magyarul a hazai válogatóverseny honlapján¹²⁸.

Az IOAA diákolimpián széles körű csillagászati alapismereteket várnak el mind az elméleti, mind a gyakorlati feladatoknál. A feladatok középiskolai matematikai és fizikai ismeretekkel megoldhatóak, nem szükséges a differenciál- és integrálszámítás vagy a komplex számok ismerete. Ha csillagászati szoftvereket, programcsomagokat szeretnének használni akár a gyakorlati, akár a megfigyelési résznél, azoknak ingyeneseknek vagy alacsony árúnak kell lenniük, és legalább három hónappal az olimpia előtt ezt a szoftverhasználati szándékot be kell jelenteniük a szervezőknek. Ez érvényes a bonyolultabb gyakorlati felszerelésre is, amit esetleg használni szeretnének a verseny során. Lehetnek a megadott ismeretanyagon kívüli fogalmak és jelenségek is a feladatokban, de akkor elegendő információt kell biztosítani a versenyzőknek, hogy azok se kerüljenek hátrányba, akik előzőleg nem hallottak ezekről a témákról. A feladat kiíróinak az SI mértékegységeket kell használniuk, a diákoktól pedig elvárható, hogy megfelelő

¹²⁶ <https://gecaa.ee>

¹²⁷ <https://www.ioaastrophysics.org/syllabus/>

¹²⁸ <https://athleticagalactica.hu/az-ioaa-rol>

mértékegységekben adják meg a megoldásukat annak hibájával, értékes számjegyeivel együtt. Természetesen a gyakran használt csillagászatban meghonosodott mértékegységek ismerete is fontos (például csillagászati egység, fényév, parsec, magnitúdó).

Olimpiai témakörök

Elméleti rész

Asztrofizikai alapok: *égi mechanika* (Newton gravitációs törvénye, Kepler törvényei kör- és nem körpályákra, Roche-határ, tömegközéppont, kéttest-probléma, Lagrange-pontok); *elektrodinamika és kvantummechanika* (elektromágneses színekép, sugárzási törvények, feketetest sugárzás); *termodinamika* (termodinamikai egyensúly, ideális gázok, energiaátadás); *spektroszkópia és atomfizika* (abszorpció, emisszió, szórás, égitestek színeképe, Doppler-effektus, vonalas és folytonos színekép, színeképvonalak felhasadása és kiszélesedése, polarizáció); *magfizika* (alapfogalmak és az atom szerkezete, tömeghiány és kötési energia, radioaktivitás, neutrínók).

Koordináták és idők: *éggömb* (szferikus csillagászat, égi koordináták és alkalmazásaik, napéjegyenlőség és napfordulók, cirkumpoláris csillagok, csillagképek, Állatöv); *az idő fogalma* (középszoláris idő, csillagidő, Julián dátum, időzónák, világidő, helyi középideő, az év különböző definíciói, időegyenlet).

Naprendszer: *Nap* (szerkezete, felszíni aktivitása, tengelyforgása, sugárzása, napállandó, napneutrínók, Nap–Föld viszony, a mágneses tér szerepe, napszél és a sugárnyomás, helioszféra, magnetoszféra); *Naprendszer* (Föld–Hold rendszer, precesszió, nutáció, libráció, a Naprendszer keletkezése és fejlődése, szerkezete és alkotó égitestjei, naprendszerbeli égitestek szerkezete és pályái, sziderikus és szinodikus periódus, retrográd mozgás, a Naprendszer külső részei); *a világűr felfedezése* (műholdak pályái és pályamódosításai, a Naprendszer emberes felfedezése, bolygómissziók, gravitációs lendítés, műholdakon levő műszerek, megfigyelőeszközök); *jelenségek* (árapály, évszakok, fogyatkozások, sarki fény, meteorzáporok).

Csillagok: *a csillagok tulajdonságai* (távolságmeghatározási módszerek, sugárzás, energiakibocsátás (luminozitás, teljesítmény) és fényesség (magnitúdó), színindex és a hőmérséklet, csillagok sugarának és tömegének meghatározása, csillagok sajátmozgása,

szabályos és szabálytalan változócsillagok osztályozása és tulajdonságaik, cefeidák és a periódus-fényesség reláció, a pulzáció fizikája); *csillagbelső* és *csillaglégkörök* (csillagok belső egyensúlya, energiatermelésük (nukleoszintézis), energiatranszport, határfeltételek, csillaglégkörök és színképük); *csillagfejlődés* (csillagkeletkezés, Hertzsprung–Russell-diagram, fősorozat előtti állapot, fősorozati csillagok, fősorozat utáni állapot, szupernóvák, planetáris ködök, csillagok végállapotai).

Csillagrendszerek: *kettőscsillagok* (különböző típusú kettőscsillagok, tömegmeghatározás kettőscsillagoknál, fénygörbék és radiálissebesség-görbék fedési kettőscsillagoknál, Doppler-eltolódás kettőscsillagoknál, kölcsönható kettősök, különleges kettőscsillagok); *exobolygók* (exobolygók felfedezési módszerei); *csillaghalmazok* (osztályozásuk, szerkezetük, tömeg, energiakibocsátás, kor, távolság meghatározása); *Tejútrendszer* (szerkezete és összetevői, Galaxisunk forgása, a Tejútrendszer kísérőgalaxisai); *csillagközi anyag* (gáz, por, HII-régiók, 21 cm-es színképvonal, ködök, csillagközi elnyelés és diszperzió mérése, Faraday-rotáció); *galaxisok* (osztályozásuk szerkezetük, összetevőik és aktivitásuk szerint, tömeg, energiakibocsátás és távolság meghatározása, tengelyforgási görbék alakja); *kialakulási folyamatok* (alapelméletek (gömbi és korongnövekedés), Eddington-féle kritikus fényesség); **Kozmológia:** *elemi kozmológia* (táguló univerzum és Hubble törvénye, galaxishalmazok, sötét anyag, sötét energia, gravitációs lencsehatás, kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás, ősrobbanás-elmélet, az Univerzum különböző modelljei, a Világegyetem nagy léptékű szerkezete, kozmológiai skálájú távolságmeghatározás, kozmológiai vöröseltolódás).

Műszerek és űrtechnológia: *csillagászati megfigyelések különböző hullámhosszakon* (csillagászati megfigyelések rádió-, mikrohullámú, infravörös, látható (fény), ultraibolya, röntgen- és gamma hullámhosszakon, a földi légkör hatásai); *műszerek* (távcsövek és detektorok (CCD, fotométer, spektrográf), nagyítás, fókusztávolság, fókuszarány, a távcsövek felbontó- és fénygyűjtő képessége, kételemű interferométer geometriai modellje, kompozitkép, adaptív optika, fotometria, asztrometria).

Az előzőekben felsorolt témák szinte mindegyike szerepel az emelt szintű érettségi követelményekben (fizika, földrajz, természettudomány), és sok fellelhető belőlük a középszintű érettségi követelményrendszerében, így a különböző kerettantervekben is. Természetesen a diákolimpián sem minden megemlített fogalomnak várják el a részletes ismeretét, vannak olyanok, amelyeknek csak kvalitatív értelmezést kívánják.

Gyakorlati rész

Ez két részből áll: a *megfigyelésből* és az *adatfeldolgozásból*. Az elméleti résznél megadott témakörök szolgáltatják a gyakorlati problémák alapját is.

Az **észlelésnél** a következő területeken való jártasságot mérik: szabadszemes megfigyelés, csillagtérképek és katalógusok használata, égi koordináta-rendszerek alkalmazása, fényesség becslése (magnitúdómeghatározás), szögtávolságbecslés, távcsövek és különböző detektorok használata. A megfigyelt objektumok lehetnek valódiak és vetítettek is. Számítógépes szimulációk is használhatóak, ha erről a versenyzőket kielégítően tájékoztatták előzőleg.

Az **adatelemzési** részben konkrét csillagászati adatokat kell vizsgálni, meghatározni, kiszámolni újabbakat belőlük. A versenyzőkkel szembeni elvárások: A hibaforrások azonosítása, hibaszámítás, és annak becslése, hogy ez hogyan hat a végeredményre. Tudniuk kell használni a logaritmikus beosztású vagy polárkoordinátás papírt. Az adatok megfelelő átalakítását lineáris illesztéshez és a legjobb illesztést is meg kell adniuk közelítőleg. Elvárják a mért adatok elemi statisztikai vizsgálatának ismeretét is. Az elméleti részben szereplő fizikai mennyiségek legismertebb mérési eljárásaival is tisztában kell lenniük a versenyzőknek.

A gyakorlati részhez szükséges készségek elsajátításához már kell, hogy amatőr vagy hivatásos csillagászok segítsék diákjainkat. Erre szinte az egész országban adódik lehetőség (iskolai csillagászati szakkörön, helyi amatőrök vagy csillagvizsgáló által szervezett szakkörökön).

Feladattípusok a diákolimpián:

A diákolimpián a követelmények felosztásával megegyezően vannak elméleti és gyakorlati feladattípusok.

Az elméleti fordulóra általában 15 rövidebb és 3 hosszabb feladatot terveznek a szervezők, amelyet az egyes országok koordinátorai megvitatnak az olimpia elején és előfordul, hogy egy-egy feladatot kihúznak, módosítanak, esetleg a tartalék feladatokból helyettesítenek egy másikkal. Végül 5 rövid 7-8 közepes és 2-3 hosszú feladat kerül a diákok elé. Megoldásukra öt óra áll a versenyzők rendelkezésére.

A gyakorlati résznél négyféle feladattípus fordulhat elő, adatelemzési (számítógépes) feladat, megfigyelési, planetáriumi vagy írásbeli gyakorlati feladat (például csillagtérképen való eligazodás). Az összes gyakorlati feladat elvégzésére együttesen szintén öt óra időtartam tervezhető. A megfigyelési forduló időjárásfüggő, bár terveznek észlelési pótnapokat is,

mégsem sikerül minden olimpián megtartani ezt a fordulót. Volt már arra is példa, hogy nappali megfigyelést, esetleg nagyobb teremben történő megfigyelési feladatokat kaptak a diákok. Természetesen mindenki a szabad ég alatti észlelésre vár, távoli helyszínek égboltképére csodálkozhatnak rá a versenyzők, még akkor is, ha számítógépes, vagy planetáriumi programokon felkészülnek a szervező ország feletti égboltra is. A magyar rendezésű olimpián sikerült megrendezni az éjszakai megfigyelési fordulót, amelynek a diákok és persze a szervezők is nagyon örültek.

A planetáriumi fordulót lehet igazi planetáriumban megrendezni vagy megfelelő helyen felállított mobilplanetáriumban is.

Az adatelemzési fordulónál minden diáknak ugyanolyan számítógépet kell biztosítani, mint ahogy az elméleti fordulónál is egyforma számológépet adnak a szervezők. Általában papíralapú adatelemzési forduló kerül megvalósításra, hiszen nemcsak az egyforma számítógépek beszerzése költséges, de a technikai hiba lehetősége is nagyobb, nem is beszélve az eltérő földrészek más és más szoftverhasználatára.

Készítenek egy táblázatot a legfontosabb állandókról és adatokról, amelyet szintén megkapnak a versenyzők, de a fontosabb összefüggéseket, képleteket már fejből kell tudniuk.

Az egyes feladatokat igyekeznek minél érdekesebben megfogalmazni, utalhatnak népszerű filmekre, aktuális jelenségekre, felfedezésekre, a rendező ország kulturális (csillagászáttal kapcsolatos) hagyományaira. Általában valós adatok szerepelnek a feladatokban, de vannak elképzelt esetekre, lehetőségekre kérdezők is. Sokszínűség, sokféleség jellemző az egész versenyre.

Nemcsak az elméleti és a gyakorlati rész megoldására szánt idő azonos, hanem a két résznél megszerezhető pontszámok is egyenlőek. Az elméleti feladatoknál az összpontszám 50%-a szerezhető meg, az adatelemzésnél 25%-a és a megfigyelésnél is 25%-a.

A diákolimpia egyéni verseny, de általában rendeznek csapatversenyt is, amelynek megvalósítása változik a legjobban évről évre. Eleinte az egyes országok csapatai versenyeztek egymás ellen, majd különböző országok diákjaiból alkottak csapatokat (sorsolással), és ez a módszer válik lassan hagyománnyá. Nagyon szép együttműködési példákat láthatunk az egyébként egymás ellen versenyző diákok között, amely sokszor maradandó barátsággá alakul. Általában egy projekten kell dolgozniuk, például a „Földet kell megmenteniük” valamilyen kozmikus csapás ellen. Bár itt is hirdetnek győztest és egyéb helyezéseket, ez a része az

olimpiának már inkább felhőtlen és szórakoztató, másrészt igazi kihívást jelentő tevékenységek is. Nincsenek olyan szigorú szabályok, körülmények, mint az egyéni feladatoknál, nincs jó és rossz megoldás, csak jobb és még jobb. Talán ez a csapatverseny egyfajta feszültségvezető, oldó tevékenységnek is tekinthető, a diákok nagyon szeretik, bár kifáradnak az egyéni versenyben mégis lelkesen, teljes erőbedobással állnak neki az új kihívásnak. Az online rendezésű 2020-as versenyen is volt csapatverseny, amelyen a különböző országok tanulóiból álló csoportok online módokon tartották egymással a kapcsolatot és az együttműködés is így valósult meg [S10].

Az IOAA versenyek lebonyolítása, díjazása és a magyar eredmények

A diákolimpiák nagyon hasonlóan zajlanak le, de a rendező ország is alakíthatja egy kicsit a programokat minden évben. Nemzetközi versenyhez méltóan már egy évvel a verseny előtt megismerhetik a résztvevők az olimpia helyszíneit, majd egyre több információval látják el a leendő olimpikonokat és kísérőiket a diákolimbia hivatalos honlapján. Általában tíz napig tartanak a programok, amelyekből egy napot az esetleges időeltolódás, klímaváltozás, vagy egyszerűen csak az utazás fáradalmainak kipihenésére szánnak. A verseny egyes fordulói között is van mód a pihenésre. A helyi szervezők angolul jól beszélő fiatalokat biztosítanak minden ország versenyzői mellé. Erre azért is szükség van, mert a megnyitó után már nem találkoznak a csapatvezetők a diákokkal, még a szálláshelyeik is másik településen vannak. A diákok kommunikációs eszközeit is elveszik, lényegében el vannak zárva a külvilágtól. Az elkülönítés oka, hogy az olimpiai feladatok végső változatát az egyes országok koordinátorai fogadják el sokszor hosszas vita után, majd le is lefordítják a diákjaik anyanyelvére, hogy segítsék azokat az olimpikonokat, akik nem tudnak jól angolul (az IOAA hivatalos nyelvén). A diákok angolul és anyanyelvükön is megkapják a feladatokat.

A verseny értékelése, díjazása amennyire lehetséges igazságosan zajlik, ugyanis a 100%-os teljesítménynek a három legtöbb pontot szerző versenyző pontszámainak átlagát vették. Egy esetlegesen nehézre sikerült feladatsor esetén is van lehetőség díjak odaítélésére. Aranyérmet kaptak a 90% felett teljesítők, ezüstérmet a 78%-ot elérők, a bronzérmeshez pedig legalább 65%-ot kellett teljesíteni. Dicsérő oklevelet kaptak az 50%-nál többet elérők, és mindenki kap oklevelet a diákolimpián való részvételért. Kihirdetik az abszolút győztest (legmagasabb pontszámot elérő versenyző), és különdíjak kiadására is sor kerül. A diákok elért pontszámait (név nélkül) ismerve a csapatvezetőknek van egy kis mérlegelési, változtatási lehetőségük a

díjak odaítélésében, ahogyan a feladatok kitűzése is az ő egyetértésük után válik véglegessé [S10]. Az utóbbi években a díjazásban is történetek kisebb változtatások.

Magyar csillagász diákolimpikonok és eredményeik:

A következőkben a diákolimpián a magyar diákok által elért eredményt sorolom fel. A listát tanulmányozva látszik, hogy jelentős mértékben vannak jelen vidéki tanulók, sőt határon túliakra is van példa. Néhány év után már minden évben volt lányolimpikonunk is, sőt 2017-ben már két lány is képviselte hazánkat az ötfős csapatban. Többen vannak olyan diákok is, akik több diákolimpián is részt vettek, általában egyre javuló eredménnyel. A versenyzők sokszor olyan városok iskoláiból jönnek, ahol olimpiai felkészítő szakkör is működik.

2011. Lengyelország

Dálya Gergely: dicséret	(ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Budapest)
Galgóczi Gábor	(ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Budapest)
Hanyecz Ottó	(Szilágyi Erzsébet Gimnázium, Budapest)
Hegyesi Béla	(Radnóti Miklós Gimnázium, Dunakeszi)
Jager Zoltán	(III. Béla Gimnázium, Baja)

2012 Brazília

Bécsy Bence: bronzérem	(Vörösmarty Mihály Gimnázium, Érd)
Bókon András	(Szent Orsolya Római Katolikus Gimnázium, Sopron)
Dálya Gergely: bronzérem	(ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Budapest)
Galgóczi Gábor: dicséret	(ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Budapest)
Granát Roland	(Könyves Kálmán Gimnázium, Budapest)

2013 Görögország

Bécsi Bence: ezüstérem	(Vörösmarty Mihály Gimnázium, Érd)
Granát Roland: bronzérem	(Könyves Kálmán Gimnázium, Budapest)
Kopári Ádám: bronzérem	(PTE Babits Mihály Gyakorló Gimnázium, Pécs)
Kunsági Máté: dicséret	(Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnázium és Kollégium, Pécs)
Ványi András	(ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Budapest)

2014 Románia

- Hegedűs Bálint** (III. Béla Gimnázium, Baja)
Horváth János: dicséret (Fazekas Mihály Gyakorló Ált. Iskola és Gimnázium, Budapest)
Kalup Csilla (Lehel Vezér Gimnázium, Jászberény)
Kopári Ádám: bronzérem (PTE Babits Mihály Gyakorló Gimnázium, Pécs)
Ványi András: dicséret (ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Budapest)

2015 Indonézia

- Csörnyei Géza** (Sashegyi János Általános Iskola és Gimnázium, Budapest)
Hegedűs Bálint (III. Béla Gimnázium, Baja)
Kalup Csilla (Lehel Vezér Gimnázium, Jászberény)
Tószegi Balázs (Könyves Kálmán Gimnázium, Budapest)
Vigh Benjámín (Lehel Vezér Gimnázium, Jászberény)

2016 India

- Gémes Antal: bronzérem** (Bethlen Gábor Gimnázium, Hódmezővásárhely)
Lőrincz Szabolcs (Márton Áron Főgimnázium, Csíkszereda)
Tószegi Balázs (Könyves Kálmán Gimnázium, Budapest)
Vigh Benjamin: dicséret (Lehel Vezér Gimnázium, Jászberény)
Világos Blanka: dicséret (Szent István Gimnázium, Budapest)

2017 Thaiföld

- Goto Tomoi: dicséret** (Szent István Gimnázium, Budapest)
Gyűrűs Boldizsár: dicséret (ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Budapest)
Knoch Júlia: dicséret (Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziuma, Pécs)
Puskás Dávid: dicséret (Bolyai Farkas Elméleti Líceum, Marosvásárhely)
Világos Blanka (Szent István Gimnázium, Budapest)

2018 Kína

- Gyűrűs Boldizsár: bronzérem** (ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Bp.)
Puskás Dávid: dicséret (Bolyai Farkas Elméleti Líceum, Marosvásárhely)
Szendefi Dániel: dicséret (Érdi Vörösmarty Mihály Gimnázium)

Tófalusi Ádám: dicséret (Debreceni Református Kollégium Dóczy Gimnáziuma)

Világos Blanka: bronzérem (Szent István Gimnázium, Budapest)

2019 Magyarország

Bacsó Zétény: dicséret (Eötvös József Gimnázium, Budapest)

Bánhidi Dominik: dicséret (Szent László ÁMK, Baja)

Császár Kornél: dicséret (Zalaegerszegi Zrínyi Miklós Gimnázium)

Kozák András: bronzérem (ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Budapest)

Mendei Barna: bronzérem (Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium)

Rajmon Imola: dicséret (Berzsenyi Dániel Gimnázium, Budapest)

Soós Benjámin: bronzérem (Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Ált. Iskola és Gimnázium)

Tófalusi Ádám: dicséret (Debreceni Református Kollégium Dóczy Gimnáziuma)

Tordai Tegze: dicséret (Bethlen Gábor Református Gimnázium, Hódmezővásárhely)

Varga Vázsony: bronzérem (Budapesti Fazekas Mihály Gyak. Ált. I. és Gimnázium)

2020 GeCAA (Global e-Competition on Astronomy and Astrophysics)

Kertész Balázs: dicséret (Debreceni Református Kollégium Dóczy Gimnáziuma)

Kozák András: bronzérem (ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Budapest)

Ludányi Levente: ezüstérem (SZTE Gyakorló Gimnázium és Általános Iskola, Szeged)

Mátéfy Ádám: ezüstérem (Balassi Bálint Nyolcévfolyamos Gimnázium, Budapest)

Mendei Barna: bronzérem (Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium)

Simon Tamás: bronzérem (Budapesti Német Általános Iskola és Gimnázium)

Takács Dóra: bronzérem (Budapesti Fazekas Mihály Gyak. Ált. Iskola és Gimnázium)

Tordai Tegze: ezüstérem (Bethlen Gábor Református Gimnázium, Hódmezővásárhely)

Varga Vázsony: ezüstérem (Budapesti Fazekas Mihály Gyak. Ált. Iskola és Gimnázium)

2021 Kolumbia (online)

Farkas Gergely András: bronzérem (ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Bp.)

Jirkovszky-Bari László: dicséret (ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Bp.)

Karsai Endre Zsombor: dicséret (Bethlen Gábor Ref. Gimnázium, Hódmezővásárhely)

Kertész Balázs: dicséret (Debreceni Református Kollégium Dóczy Gimnáziuma)

Kinyó András (Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium)

Mátéfy Ádám: ezüstérem (Balassi Bálint Nyolcévfolyamos Gimnázium, Budapest)

Novák Zalán: bronzérem	(Babits Mihály Gimnázium, Budapest)
Sajósi Benedek: dicséret	(ELTE Apáczai Csere János Gyakorlógimnázium, Bp.)
Takács Dóra: bronzérem	(Budapesti Fazekas Mihály Gyak. Ált. I. és Gimnázium)
Varga Vázsony: aranyérem	(Budapesti Fazekas Mihály Gyak. Ált. I. és Gimnázium)

Magyar rendezésű IOAA 2019-ben

Az Európán kívüli sok versenyhelyszín után az európai országok közül először Magyarország vállalta az IOAA megrendezését, amelyet 2019-ben a résztvevők teljes megalégedésére sikerült is lebonyolítani. Nagy kihívás, sok ember segítő munkáját igénylő feladat volt ez, megmozgatta a hazai szak- és amatőr csillagászokat. Ez egyben lehetőség volt a hazai csillagászati szakma és országunk, kultúránk bemutatására a világ minden tájáról jövő diákoknak és kísérőiknek. A rendező ország mindig két csapattal (10 fővel) vehet részt a diákolimpián, így most több magyar diáknak is esélye volt részt venni a versenyen. A második csapat koordinátorai egykori diákolimpikonok voltak: Kalup Csilla és Dálya Gergely. Ugyan 2019-ben biológiából is Magyarország rendezte a diákolimpiát, de ez nem csökkentette a médiafigyelmet. Külön honlapot¹²⁹ is készítettek ennek a diákolimpiának, ahogyan ez addig is szokás volt a rendező országok részéről. Ez a honlap két nyelven (magyarul és angolul) ad tájékoztatást a diákolimpiáról általánosan és a magyar rendezésről. Megismerhetjük a szálláshelyeket (a diákok és kísérőik külön településen kaptak szállást, a versenyzés ideje alatt nem találkozhattak), a diákolimpia programjait, időbeosztását. Közzétették az olimpia feladatait és a részletes végeredményt. Ezen az olimpián minden magyar résztvevő olimpikon díjazott lett. Az eseményről és a feladatairól is részletes beszámolót olvashatunk a Fizikai Szemle 2020/2 számában Szalai Tamás cikkében [165].

Azon országok diákjai, ahol rendeztek már diákolimpiát általában jobban teljesítenek azoknál, akik még nem vállalkoztak a szervezésre. Természetesen egy diákolimpia rendezése nagyon sok embert megmozgat, nagyobb média visszhangja van, mint csak egy más országbeli részvételnek. A diákolimpia közismertsége megjelenik az iskolákban, a tanárok körében is így végső soron a válogatóversenyek nagyobb résztvevői létszámmal zajlanak, több diákból lehet kiválasztani későbbiekben az olimpiai keretet. A szakcsillagászok bevonása az olimpikonok felkészítését segítő munkát teszi még színvonalasabbá. Végeredményben az egész ország természettudományos oktatása nyer egy-egy ilyen hazai rendezésű nemzetközi versennyel.

¹²⁹ <https://ioaa2019.hu>

6.5 Felkészítés az IOAA-ra

A Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpiának ugyan még csak bő évtizedes múltja van, a régebbi alapítású diákolimpiák tapasztalatait át tudja venni, főleg a diákok felkészítésében. Az országos tanulmányi versenyeken jól szereplő diákoknak további felkészítő alkalmakat (olimpiai felkészítő szakkör, nyári tábor) nyújtanak, immár szűkebb körben, tapasztalt, a diákolimpiát jól ismerő tanárok, tudósok. Építenek a diákok önálló tanulására is célzottan adandó segédanyagokkal, feladatokkal. Lényegében ezt kellett minél hamarabb megvalósítani a csillagászati diákolimpiai felkészítésénél is.

6.5.1 A válogatóverseny és a diákolimpiai felkészítés megismertetése

A csillagászat sok diákot érdekel, a több tudásra is vágyó tanulók számára csillagász szakkörök, amatőr csillagászcsoporthoz kínálnak ismeretszerzési lehetőséget. A fizika- és földrajztanárok közül is sokan „csillagászokdtak” diákéveikben, sőt olyanok is vannak, akik csillagász diplomát is szereztek. Az ő körükben volt ismert a Kulin verseny, és ahogyan a csillagász érettségire is felfigyeltek ezekben a körökben, úgy a csillagász diákolimpiai lehetőségre is. A cél ennek a körnek a kiszélesítése volt főleg a tanárokat szerettük volna megismertetni ezzel a lehetőséggel, hiszen ők ajánlják elsősorban a diákjaiknak a versenyzési lehetőségeket.

Országos csillagászati válogatóversenyként a Kulin verseny középiskolás kategóriáját rendezték meg évente. 2010-ben internetes forduló után került sor a Polaris Csillagvizsgálóban egy szóbeli döntőre, amelyen a 2011-es lengyel rendezésű diákolimpiai csapat tagjainak kiválasztása zajlott. Egyhetes intenzív bajai felkészítő táborban is részt vettek az olimpikonok (egy tartalék taggal). A versennyel kapcsolatos ismeretek, előzetes tapasztalatok hiányában nehéz volt a felkészítés szintjét meghatározni, mint a diákolimpián kiderült a feladatok nehézsége meglepte, mind a diákokat, mind a kísérőiket (Hegedűs Tibort és Szakáts Róbertet).

A bajai obszervatórium meghatározó szerepet játszik kezdetektől a csillagászati diákolimpiai mozgalomban. Igazgatója, Hegedűs Tibor 2011 októberében már összehívott egy kerekasztal megbeszélést a Polaris Csillagvizsgálóba, hogy csillagászokkal, (fizika)tanárokkal együtt átgondolja az első magyar csillagászati diákolimpiai részvétel (2011) tanulságait, a jövőbeli terveket a minél eredményesebb magyar szereplésért a következő diákolimpiákon [166]. Erre többek között középiskolai tanárokat és szakkörvezetőket vártak, de nem volt nagy az érdeklődés, bár volt olyan fizikatanár is, aki vidékről utazott fel a megbeszélésre. Itt

ismerkedtem meg a diákolimpiával, majd kapcsolódtam be a felkészítő munkába. Felvetődött, hogy egy honlapon kapjanak tájékoztatást mind a versenyről, mind az olimpiával kapcsolatosan az érdeklődők. A Kulin György Csillagászati Vetélkedő is a SZTE Bajai Observatóriumának honlapján jelent meg addig is, így ez a honlap vált a továbbiakban is a hírek, tudnivalók elsődleges forrásává. Néhány éven belül már közvetlenül elérhető honlap¹³⁰ ismertette a diákolimpiával kapcsolatos híreket, sőt a válogató verseny részletes kiírásán kívül segédanyagokat is találhattak ott a leendő versenyzők és felkészítőik. A válogató verseny szervezéssel kapcsolatos változásairól már írtam a 6.3. Hazai csillagászati versenyek fejezetben.

Bár fontos a gondos előkészítése egy versenynek, de a színvonalában a résztvevők száma és felkészültsége is meghatározó. Elsődleges cél volt a válogató verseny tanárok közötti ismertségének növelése. Felvetődött a csillagászati tanártovábbképzés lehetősége, de főképp anyagi források hiányában erre azóta sem került sor. A fizikatanároknak egy lelkes tanárnő szervezésével létezik egy levelező listája, amelyen az aktuális hírekről, színvonalas programokról, segédanyagokról szerezhetnek tudomást a feliratkozók. Ezen a fórumon is megjelentek évről-évre az olimpiával, a válogatóversennyel kapcsolatos aktuális hírek. Szintén a fizikatanárok éves összejövetelére is készültünk egy műhelyfoglalkozással, szórólappal. Miután részt vettem egy egész éven át a kapcsolódó eseményeken (válogatóverseny, felkészítés, diákolimpia) 2015-ben tartottam az IOAA-ról és az odavezető útról műhelyfoglalkozást a Fizikatanári Ankét és Eszközbemutatón. Másodjára Udvardi Imre tartott 2018-ban műhelyfoglalkozást az akkori ankéton. Hegedűs Tibor mellett ő volt a legtöbbször kísérője a magyar diákolimpiai csapatnak és sok felkészítő alkalomra is az iskolájában került sor. A témáról cikket is írtunk a Fizikai Szemlébe, hogy elérjük azokat az érdeklődő kollégákat is, akik nem vettek részt az ankéton, vagy éppen nem ezt a műhelyfoglalkozást választották [S10].

Az ELFT honlapján a versenyek felsorolásánál is megtalálható az országos csillagászati válogató verseny, így ez is egy újabb lehetőség, hogy elérjünk olyan tanárokat, akik tehetséges diákjaiknak keresnek számukra tetsző témájú megmérettetést. Azok az iskolák, amelyek egyszer már lebonyolították az iskolai fordulót általában a további években is neveznek diákokat a versenyre. Elengedhetetlenül szükséges a tanár kollégák segítségével a tehetséges tanulók kiválasztásában, majd fontos, hogy az érdeklődő, tehetséges diákokat megismertessék ezzel a versenyzési lehetőséggel.

¹³⁰ <http://www.bajaobs.hu/ioaa/>

Igazi áttörést, széleskörű ismertséget a magyar rendezésű IOAA hozott 2019-ben, amikor a média is odafigyelt az eseményre, a mögötte húzódó mozgalomra és nem utolsósorban a versenyzők által elért szép eredményre.

6.5.2 Olimpiai felkészítő szakkörök

A fizikához hasonlóan olimpiai felkészítő szakköröket csillagászatból is szerveznek országszerte. Mára már a volt diákolimpikonok is besegítenek a felkészítésbe, amely nemcsak azért hatékony, mert életkorban közel állnak a versenyzőkhöz, hanem mert ők azok, akik már végig járták diákként is a felkészítést, saját személyes tapasztalataikra is építhetnek.

Eleinte a Könyves Kálmán Gimnáziumba, Budapestre gyűltek össze az érdeklődő diákok, majd 2015 óta regionális olimpiai szakkörök is segítik a felkészítést: Baján, Debrecenben Szegeden és Szombathelyen. A diákolimpiai válogató verseny honlapján is sok segédanyag szerepel, amely alapján bárhol szervezhető felkészítő szakkör, de fontos hangsúlyozni, hogy a felkészítést nem várják a tanároktól, azt lelkes csillagászok, egyetemi oktatók, csillagász doktoranduszok, néhány fizika tanár, illetve a volt olimpikonok vállalják.

A járványhelyzet adta új lehetőség, hogy nem személyesen találkoznak a felkészítők és a diákok, hanem egy internetes platform segítségével online közvetítéssel vehetnek részt a felkészítő alkalmakon. Célszerű a továbbiakban is alkalmazni ezt a módot is, hiszen így elérjük azokat a diákokat is, akik nem tudnának egy jelenléti foglalkozásra eljutni. További előny, hogy ezeket később többször is meg lehetne nézni. Egy-egy ilyen archivált előadás gyűjtemény elsősorban a motivált, tanulni szerető diákok számára előnyös, de az egyénre szabott foglalkozásra kevésbé alkalmas.

6.5.3 A diákok kiválasztásának és felkészítésének változása az évek során

A végső olimpiai keret kiválasztásának és felkészítésének folyamata is változott az évek során. A cél a diákolimpián legjobban teljesíteni tudó tanulók kiválasztása, majd minél hatékonyabb felkészítésük volt, minden változtatás ezt szolgálta.

A tanórákon, mind fizikából, mind földrajzból kevés csillagászati ismerethez jutnak diákjaink, azok is általában leíró jellegűek, ezért lényegében a felkészítés alatt kell sok mindent

megtanítani az olimpikonoknak. A legtöbb csillagászati diákolimpia nyáron kerül megrendezésre, így az országos döntőt célszerű minél hamarabb megtartani (március eleje), hogy utána elindulhasson a felkészítés. A diákok közül ritka az olyan, aki mind az elméletben, mind az égboltismeretben, távcsőhasználatban járatos. Az a tapasztalat, hogy akár egy év alatt is el lehet sajátítani az alapvető égboltismeretet, de mindenképpen előny az amatőr csillagász egyesületekhez tartozás, vagy éppen egy csillagász szakkörbe járás.

A diákolimpián középiskolás diákok versenyezhetnek, vagy ha őszi időszakra esik a diákolimpia megrendezése, akkor az abban az évben végzettek, de esetleg már egyetemisták is részt vehetnek a megmérettetésen (20 év a felső korhatár). Előfordul, hogy egy fiatalabb diáknak több évben is lehetősége van részt venni a diákolimpián. A tapasztalat azt mutatja, hogy általában egyre jobb eredményt tudnak elérni a másodjára esetleg harmadjára részt vevő olimpikonok. Egyrészt saját tapasztalatuk van az olimpiai feladatokról, nehézségükről, a többi résztvevő tudásáról, másrészt a hazai felkészítésen is többször vesznek részt, több mindent fognak alaposan, biztosan tudni. Az első néhány évben ezért, aki korban még egyszer versenyezhetett az automatikusan a következő évi olimpiai csapatnak is tagja maradt, sőt a tartalék versenyző is lehetőséget kapott a részvételre, hiszen ő is részt vett a felkészítésen bár nem jutott ki az olimpiára. Így csak az olimpiai keret fennmaradó helyeire válogattak új diákokat az országos válogatóversenyen. Természetesen versenyen kívül a biztos tagok is részt vettek a verseny minden fordulóján, eredményeik felülmúlták az újonnan versenyzők teljesítményét, így ez az eljárás jogosnak, igazságosnak tűnt. Egyrészt levette a versenyzéssel járó stresszt, izgulást a régi kerettagok válláról, másrészt az országos versenyen új tanulók is nyerhettek. Az első néhány évben a felkészítést az öt kerettag és a tartalék diák számára tartották, de egyre inkább lehetővé vált más tanulók részvétele is, hiszen a többszöri felkészítőn való részvétel egyértelműen növelte a diákok eredményes szereplésének az esélyét. Az első négy évben állami támogatás hiányában minden költséget a versenyzők álltak, így csak a helyszínek befogadóképessége vont felső határt a részt vevők számában, főleg a táboroknál. Előfordult, hogy a tartalék tag teljesítménye alig maradt el a helyezést elérőktől, esetleg az intenzív felkészítésen jobban be tudta hozni a lemaradását, így már a negyedik évi felkészítésnél a végső (bajai) tábor utolsó napján megírt, olimpiai nehézségű feladatsor döntötte el, hogy ki utazik az olimpiára. Talán ez egy kis bizonytalanságot, stresszt okozott a diákoknak, de egyben az egész tábor alatti odafigyelésre, megfeszített munkára is sarkallta a résztvevőket. Maga a tábor nagyon megfeszített tempóban zajlik, hiszen az éjszakákat (ha az időjárás engedi) jobbára a szabad ég alatt észlelési gyakorlatokkal töltik,

majd pár óra alvás után az elméleti oktatással telik a napjuk. Sokaknak hiányzik a biztos égboltismeret, így azért maradnak fent sokáig, akik viszont jól ismerik az égboltot (mert például (amatőr) csillagász szakkörbe jártak), nagyon szívesen segítenek a többieknek: „Ugyan technikailag egymás ellenfelei voltunk, végig segítettük egymást, és örültünk, ha ezzel a másik ember több lett, és jobb eredményt ért el általa.” [167].

A végső tábori bentlakásos intenzív tanulást megelőzték a hétvégi felkészítő alkalmak, amelyeket az Újpesti Könyves Kálmán Gimnáziumban és Kulin csillagdájában, amíg nyitva volt a Planetárium és a pizskéztetői csillagvizsgálóban tartottak az első években. A helyszínek az évek során bővültek az ELTE planetáriumával, és a Svábhegyi Csillagvizsgálóval (ELKH Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet). Színesedett a táborok helyszíne is, tartottak már Szálkán (2017), Bakonybélen, Vértesbogláron, többször a Magyar Csillagászati Egyesület észlelőtáborába csatlakoztak be az olimpiakonok. 2016 óta személyiségfejlesztő foglalkozások is színesítik a tábori programokat, és részben ennek köszönhetően az egy hét végére az egész táborozó közösség igazán jó csapatá érik össze.

A felkészítés folyamatába illeszkednek az úgynevezett miniolimpiák is, amelyeket néhány szomszédos ország részvételével az olimpia mintájára rendeznek, hogy az igazi olimpiai szituációkat is megismerhessék, átélhessék a versenyzők. Ez a verseny is beleszámít a kerettagok kiválasztásába, így akik nem jutnak ki a regionális döntőre itthon felügyelet mellett oldják meg a feladatokat, majd a hazai felkészítők javítják ki és így összehasonlítható a miniolimpián résztvevők eredményével.

Ez a minél többféle megmérettetés még kiegészül otthoni feladatmegoldással, bár itt inkább azt nézzük, hogy mennyire rendszeresen foglalkoznak a diákok a felkészüléssel, hiszen a megoldásokhoz bármilyen segítséget igénybe vehetnek, míg a többen lényegében semmit. Bár az országos döntő időpontját minél korábbira választjuk, hogy legyen idő az olimpiára való felkészülésre, de a legtöbb versenyző végzős diák, így az érettségi időszaka és vizsgái mellett kell készülniük az olimpiára is. Felmérve, hogy mely hétvégeken érnek rá a legtöbben, akkor felkészítő alkalmakon vehetnek részt a diákok, de bizony előfordul, hogy több hét is eltelik ezek között. Tudva, hogy a folyamatos munka a legeredményesebb, heti rendszerességgel kapnak 4-5 feladatot az olimpiára készülő, amelyet el kell küldeniük a (hétről-hétre változó) feladatsort kitűző felkészítőnek. Egy hétre ez nem túl sok feladat és közben megtanulják szépen logikusan leírni a megoldásmenetet is. A beküldött feladatokat kijavítva minden diáknak személyre szóló értékelést, tanácsokat is adunk a megoldásával kapcsolatban a pontszámán

kívül. Ezt az erősségekre és hibákra is rámutató értékelést hasznosnak találják a diákok. A 13. függelékben egy általam összeállított heti feladatsort mutatok be.

Mind a válogatóversenyt, mind a felkészítést egyre bővülő körű megbeszéléseken vitatjuk meg. Évről évre változott az egyes versenyek által elért eredmények részaránya a végső kerettag kijelölésnél (amely szintén egy megbeszélés keretében minél több szempont figyelembevételével dől el). Az országos verseny részaránya az évek során csökkent, hiszen a többi megmérettetés már időben közelebb van az olimpiához és a felkészítés során esetleg többet tanuló diák meg is előzheti tudásban az országos versenyen előtte végzőt. Nyilván kis súllyal esik számításba az otthoni heti feladatmegoldásra kapott pontszám, bár mutatja a kitartást, a rendezett feladatmegoldást, a beküldési időpont megtartását többek között. Legnagyobb súllyal a miniolimpia és a végső felkészítő tábor versenye számít (amelyek akár egybe is eshetnek).

Nagy előnye a több hónapos felkészítésnek, hogy sokféleképpen meg tudjuk figyelni a diákok munkáját, felkészülését. Lényegében egy többlépcsős folyamat keretében, több teljesíteny összegzésével alakul ki a végső sorrend, amelyet a felkészítők együttes megbeszélésén véglegesítenek. A diákolimpiai keret tagjainak kiválasztásának minél későbbi időpontjával nem fordulhat elő, hogy valaki kerettagsága tudatában hanyagolja a felkészülést.

Az ötödik magyarországi felkészítő munkához biztosítottak először központi állami támogatást. Az olimpikonok kísérői (egyben az IOAA hazai koordinátorai) dr. Hegedüs Tibor, az SZTE Bajai Observatóriumának vezetője és Udvardi Imre, az Újpesti Könyves Kálmán Gimnázium matematika-fizika szakos tanára. A versenyzők kiválasztásában, felkészítésében természetesen sokan segítenek, köztük az SZTE és az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatóriumának csillagásza, a Magyar Csillagászati Egyesület és a korábbi csillagász diákolimpikonok is egyre nagyobb számban. Biztató, hogy a volt olimpikonok közül sokan segítik a felkészítést, bennük még friss az élmény, korban közel állnak az új versenyzőkhöz, igen hatékony a segítségük és ez egyben biztosítéka is a felkészítő munka folyamatosságának.

6.5.4 Magyar diákolimpiai mozgalom kialakulása

2016/17-es kiírásnál már mozgalomról beszélnek, hiszen ekkora már sok tanár kolléga is bevonódott a versenybe. Egyre több volt diákolimpikon is besegít a felkészítésbe a válogató verseny szervezésébe, lebonyolításába, amely nemcsak azért hatékony, mert életkorban közel

állnak a versenyzőkhöz, hanem mert ők azok, akik már végigjárták diákként is a versenyzést, felkészítést, saját személyes tapasztalataikra is építhetnek. Bekapcsolódtak az olimpiai szakköri munkába, segédanyagokat, feladatsorokat készítenek, amelyeket a bajai obszervatórium honlapján¹³¹ közzé is tettek, hogy ezzel is segítsenek beindítani felkészítő szakköröket bárhol az országban.

2021-től a hazai csillagászati diákolimpia szervezésében jelentős szerepet játszó fiatal csapat veszi át az egész mozgalom szervező munkáját, elsőként a verseny honlapját¹³² is megújították. Ugyan a szakmai tartalom, a színvonal megmarad továbbra is az eddigi magas szinten az önálló versenyhonlap megújult formában, naprakész információkkal és egyéb szolgáltatásokkal segíti a középiskolás korosztály csillagászati témájú tehetséggondozását, versenyre való készülését. Lehetőség van a felmerülő kérdésekre választ kapni szakemberektől. A fiatalok körében használt médiafelületeken is megjelenik a csillagászati verseny és a hozzá kapcsolódó hírek, történések. Ha valaki a régi megszokott honlapon¹³³ szeretne mégis keresni, a régebbi anyagokat megtalálja ugyanott.

¹³¹ <http://www.bajaobs.hu/ioaa/>

¹³² <https://athleticagalactica.hu>

¹³³ <http://www.bajaobs.hu/ioaa/>

7 Összefoglalás

Munkám során a csillagászat olyan területeivel (például üstökösökkel, exobolygókkal) foglalkoztam, amelyek az oktatásban eddig alig kaptak teret, annak ellenére, hogy napjaink kiemelt kutatási területei, és a hírekben is gyakran szerepelnek, hiszen felkeltik a gyerekek, fiatalok érdeklődését. A csillagászat érdekli tanulóinkat, így szívesen foglalkoznak vele mind tanórán, mind tanórán kívül.

Az első fejezetben általánosságban áttekintettem a csillagászat tanításának főbb kérdéseit. Csillagászati kapcsolódási pontokat sok tantárgyhoz mutattam. Megemlítettem csillagászokat, köztük ma élő magyar csillagászokat is, segítve a csillagász szakma ismeretét, választását. A csillagászati ismeretek gyakorlati hasznosságán kívül a csillagászat tanulása hozzájárul a természettudományos műveltséghez, szemléletmódhoz, a logikus és kritikus gondolkodáshoz így segít az áltudományos tartalmak felismerésében, elkerülésében is. A csillagászat lehetőséget ad a megfigyelésnek, mint megismerési módszernek az élményszerű alkalmazására. Diákjainknak nagyon hiányosak a csillagászati ismereteik, számos tévképzet is felismerhető bennük. A TOAST csillagászati alaptudást mérő teszt felhasználásával kimutattam, hogy a diákjaim tudása, tévképzetei hasonlóak a szakirodalomban leírtakhoz.

A második fejezetben bemutattam egy üstökös projektet, amelynek programjai során széleskörű csillagászati ismeretekre tettek szert diákjaink. Előzetes tudásfelmérés során több tévképzetet tártam fel. Az üstökösökkel kapcsolatos középiskolában tanítható ismereteket tudománytörténeti kontextusban ismerttettem. Üstökösökkel kapcsolatos hiedelmek, félelmek ellen a helyes tudással küzdhetünk. A harmadik fejezetben részletesen bemutattam egy üstökös-mag-modell tanári készítését, és ennek tanulók általi biztonságos megvalósítását is.

A negyedik fejezetben Kepler törvényeinek tanításakor szerzett tapasztalataimat ismerttettem, amely szerint a tudománytörténeti vonatkozások, érdekességek mellett a legújabb felfedezések, például az exobolygók pályáira utalás is elősegíti a megértést. Foglalkoztam a törvények kiterjesztésével, például a holdakra, az exobolygókra de a Galaxisunk közepén levő fekete lyuk vagy a sötét anyag is szorosan kapcsolódik a Kepler-törvényekhez.

Az ötödik fejezetben bemutattam, hogy az exobolygók színes világának ismerete nemcsak a világképünket gazdagítja, hanem segít a bolygók fogalmának megszilárdításában, a Naprendszer megismerésében. A tudományos kutatási módszer bemutatására is kiváló

lehetőség az exobolygók felfedezése. Exobolygókkal kapcsolatos újszerű feladatokat tartalmazó feladatgyűjtemény összeállításában vettem részt, amelyet bemutatok az értekezésben. A földönkívüli élet keresése is szervesen kapcsolódik az exobolygókhoz. Diákjaim eredményes asztrobiológiai témájú versenymunkákat, előadásokat készítettek segítsémmel.

A hatodik fejezetben a csillagászati tehetséggondozás formáihoz kapcsolódóan a hazai és nemzetközi csillagászati versenyeket tárgyaltam. Részletesen a Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpiát (IOAA) mutattam be a válogató versenyekkel és a diákolimpikonok felkészítésével együtt.

A csillagászat tanításának fontos szereplői a tanárok, akiknek egyre több színvonalas anyag áll rendelkezésére. Ezekből mutattam többet is a tárgyalt témákhoz kapcsolódóan, amelyeket eredményesnek találtam az oktatásban.

8 Summary

In my work, I focused on areas of astronomy teaching that have barely got highlighted, like exoplanets or comets. It is so despite these are in the focus of our scientific research and so they present frequently in the news thus grabbing the interests of also young adults and children. Students show interest in astronomy; therefore, they study it with pleasure in class or even in mentor classes.

In the first chapter, I provided a general overview of the main issues within teaching astronomy. I have shown astronomical connection points to many other curricular subjects. I mentioned astronomers, including Hungarian astronomers living today, helping to understand and choose the profession of astronomer. In addition to the practical usefulness of astronomical knowledge, the study of astronomy contributes to scientific literacy, attitudes, and logical and critical thinking, thus also helping to recognize and avoid fake science or pseudo-scientific content. Astronomy provides an opportunity for the application of observation method in an enjoyable way. The knowledge of our student regarding astronomy is very poor, many misconceptions can be recognized. Using the TOAST basic astronomy test, I have shown that the knowledge and misconceptions of my students are similar to those described in the literature.

In the second chapter, I presented a project on comets during which our students could broaden very effectively their competences in astronomy. With a preliminary knowledge survey, I found several misconceptions. I presented the academic content on the topic of comets within a historical context. We can fight against beliefs and fears about comets with the right scientific knowledge. In the third chapter, I detailed the making of a comet-core model as a demonstrative activity by the teacher and its safe reproduction by students.

In the fourth chapter, I described my experience in teaching Kepler's laws, according to which, in addition to the historical aspects and curiosities of science, the latest discoveries, such as the reference to the orbits of exoplanets, also facilitate understanding. I have dealt with extending the laws to, for example, the moons, the exoplanets, but the black hole in the middle of our Galaxy or dark matter are also closely related to Kepler's laws.

In the fifth chapter, I showed that knowledge of the colorful world of exoplanets not only enriches our worldview, but also helps to consolidate the concept of planets, and to learn about the Solar System. The discovery of exoplanets is also an excellent opportunity to demonstrate

the method of scientific research. I participated in the compilation of a collection of tasks containing novel tasks related to exoplanets, which I present in the dissertation. The search for extraterrestrial life is also connected to exoplanets. My students created successful competition works and lectures on astrobiology.

In the sixth chapter, I discussed national and international astronomical contests in their relation to mentoring didactics. I presented the International Olympiad on Astronomy and Astrophysics (IOAA) in detail along with the selection competitions and preparation of the student for the Olympics.

Teachers, who have more and more high-quality material at their disposal, are important factors in the teaching of astronomy. I have shown more of these in relation to the topics discussed, which I have found very useful in science education.

9 Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Dr. Érdi Bálintnak, témavezetőmnek, a folyamatos segítséget, amelyet tőle kaptam éveken át. Különösen a cikkeim, előadásaim és a disszertációm átnézését, mindenre kiterjedő hasznos tanácsait. Köszönöm, hogy részt vehettem egyetemi előadásain, amelyeken nemcsak az égi mechanika rejtelseibe vezetett be, de előadásmódjával, tanítási stílusával is példaként szolgált.

Köszönöm Dr. Tél Tamásnak, hogy a doktori iskola vezetőjeként mindvégig követte munkámat, folyamatos biztatása, bátorítása nagyban segítette az értekezésem elkészültét. Köszönöm, hogy részt vehettem az általa szervezett akadémiai módszertani kutatási programokban: Szakmódszertani kutatóhálózat a fizikaoktatás fejlesztésére (MTA Szakmódszertani Pályázat 2014) és a Nemzetközi szintű szakmódszertani kutatóhálózat a hazai fizikaoktatás fejlesztésére (MTA Szakmódszertani Pályázat 2016-2020). Köszönöm a program résztvevőinek a közös munka során nyújtott segítségüket.

Köszönöm Dr. Juhász Andrásnak többek között a fizika (és így a csillagászat) eredményes tanításához nyújtott szakmai útmutatásait.

Köszönöm a csillagászati diákolimpiai konzorciumnak, különösen Dr. Hegedűs Tibornak és Udvardi Imrének, hogy lehetővé tették, hogy megismerjem a diákolimpiát (IOAA), részt vehessek a vele kapcsolatos munkában és segíthessem a válogató versenyeket majd az azt követő felkészítést.

Köszönettel tartozom Gócz Évának, Gróf Andreának és Fülöp Csillának a közös munkáért, és azok közös cikkeinkben történő megírásáért.

Köszönöm kollégáimnak, hogy a doktori programban való részvételemet támogatták, külön köszönöm Dr. Marosi Lajosnének és Horváthné Győri Évának (mindketten a Kosztolányi Dezső Gimnázium tanárai) az együttes munkát, segítséget.

Köszönöm kedves tanítványaimnak, hogy érdeklődésükkel, nem lankadó lelkesedésükkel segítették a közös munkát.

Köszönöm családomnak, barátaimnak, hogy szeretettel és türelmesen támogatták tanulásomat, kutatásomat, cikkeim és értekezésem írását, megértően elfogadták, ha közben rájuk kevesebb időm jutott.

10 Hivatkozások

[S1] Gócz Éva, Horváth Zsuzsa: Üstökös projekt két budapesti gimnáziumban, Fizikai Szemle 2015/2, pp. 55-60.

[S2] Horváth Zsuzsa, Érdi Bálint: Kepler és törvényeinek tanítása, Természettudomány tanítása korszerűen és vonzóan, Főszerkesztő: Tasnádi Péter, ELTE TTK, Bp. 2011, 424-429.

[S3] Horváth Zsuzsa, Bérczi Szaniszló: Az exobolygók sokszínű világa, A fizika, matematika és művészet találkozása az oktatásban, kutatásban, Konf. kötet, ELTE Bp. 2013, 215-222.

[S4] Horváth Zsuzsa, Érdi Bálint: Exobolygók a fizika érettségén I.-II., Fizikai Szemle 2013/1, pp. 14.-18. Fizikai Szemle 2013/2, pp. 60-62.

[S5] Horváth Zsuzsa: Exobolygók minden szinten, Fizikai Szemle 2017/3, pp. 93-99.

[S6] Gróf Andrea, Horváth Zsuzsa: Exobolygók és űreszközök (Válogatott középiskolás feladatok a csillagászat és űrkutatás modern eredményeihez),
<http://fiztan.phd.elte.hu/kozkins/kiadvanyok/index.html>

[S7] A. Gróf, Zs. Horváth: Exoplanets and Spacecraft. Exercises in Astronomy and Space Exploration for High School Students,
http://fiztan.phd.elte.hu/kutcsop/munkacsoportok/kornyezet/astromy_ex.pdf

[S8] Zsuzsa Horváth: Earth's Twins? Searching for exo-earths, Teaching Physics Innovately, Konferenciakötet, (TPI-15) 2015, pp. 175-180.

[S9] Cs. Fülöp, Zs. Horváth: Discover a black hole in the classroom: the „Pear-Star” Project, in: G. T. Orosz (ed.), (AIS 2016), Óbudai Egyetem, Budapest, 2016, 45-49.

[S10] Hegedűs Tibor, Horváth Zsuzsa, Udvardi Imre: Csillagászati Diákolimpia Magyarországon, Fizikai Szemle 2015/9, pp. 319-325.

[1] IAU100 Themes <https://www.iau-100.org/iau100-themes>

[2] Dr. Kulin György: Amit a csillagokról tudni kell! Csillagászat középiskolásoknak (Szakköri füzet) Tankönyvkiadó, Budapest 1972, 5. oldal

[3] Hargitai Henrik: Csillagászat és űrkutatás és oktatása Magyarországon

<https://hargitaihenrik.wordpress.com/2020/01/17/report-of-the-sgac-working-group-space-generation-advisory-council-on-comprehensive-space-education-curricula-hungary-csillagaszat-es-urkutatas-es-oktatasa-magyarorszagon/>

[4] Szatmáry Károly: Csillagászati oktatás és ismeretterjesztés –körkép, Természet Világa Feltárul a Világegyetem (különszám), 2009.

[5] Szijártó Sándor: A csillagászat, mint új középiskolai tantárgy és érettségi vizsgatárgy Szakdolgozat, Szegedi Tudományegyetem, 2006.

[6] Egyedileg akkreditált érettségi vizsgatárgyak (2013.)

https://www.oktatas.hu/koznevelas/erettsegi/akkreditalt_vizsgatargyak

[7] Az érettségi vizsgatárgyak 2023. október-novemberi vizsgaidőszakig érvényes vizsgakövetelményei

https://www.oktatas.hu/koznevelas/erettsegi/erettsegi_vizsgatargyak#1

[8] *Galileo Webcast* (Tudományos tartalomsugárzás az interneten)

<http://www.galileowebcast.hu/live.html> <http://archive.galileowebcast.hu/>

[9] Magyar Csillagászati Egyesület honlapja és videótára: <https://www.mcse.hu/>, <https://www.youtube.com/user/Csillagaszat>

[10] Mobilalkalmazások amatőr csillagászoknak, Magyar Csillagászati Egyesület ajánlása

<https://www.mcse.hu/egyesulet/mobilalkalmazasok-amatorcsillagaszoknak/>

[11] Magyar Csillagászati Egyesület hírportálja (csillagászati hírportál)

<https://www.csillagaszat.hu/>

[12] Magyar Asztronautikai Társaság honlapja: <https://www.mant.hu/>

[13] Űrvilág, Űrkutatási hírportált: <http://www.urvilag.hu/>

[14] Nemzeti Pályaorientációs portál: <http://eletpalya.munka.hu/foglalkozasok>

[15] Nemzeti Pályaorientációs Portál középiskolásoknak:

<https://palyaorientacio.munka.hu/kozepiskola>

[16] <http://www.space-awareness.org/en/careers/>

- [17] http://eduline.hu/felsooktatas/20090130_csillagaszati_kilatasok
- [18] Marissa Rosenberg, Pedro Russo, Gorgia Bladon, Lars Linberg Christensen: Astronomy in Everyday Life, CAPjournal No. 14, January 2014.
- [19] NASA Spinoff Brochures: <https://spinoff.nasa.gov/spinoff/brochures>
- [20] NASA Spinoff (NASA Technology Transfer Program) honlapja: <https://spinoff.nasa.gov/>
- [21] Döményné Ságodi I.: A légkörfizika és a csillagászat elemeinek felhasználása a fizika középszintű oktatásában, Doktori értekezés, ELTE TTK 2015.
- [22] Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia (IOAA) témakörei: <https://ioaa2019.hu/ioaa-syllabus/>
- [23] Szűcs-Csillik Iharka, Szűcs István: Csillagászat tanítása kisgyermekeknek. Első lépések... avagy nem lehet elég korán kezdeni, 2010. (Saját kiadás)
- [24] Kerényi Lilla: Csillagmesék (2014); Csillagvarázs (2015); Csillagjegyek (2016); Csillagszemek (2018), (Nyerges Gyula lektorálásával), <http://www.csillagmesek.hu/home>
- [25] Hargitai Henrik: Csillagászati ismeretek és téveszmék óvodáskortól időskorig, Új pedagógiai Szemle, 2008/6-7
- [26] Schlachter Gabriella: Csak hiszed! – Hibás tanulói elképzelések a csillagászati földrajzban, GeoMetodika Földrajz Szakmódszertani folyóirat, 2019. 3. szám
- [27] S. Slater, [The Development And Validation Of The Test Of Astronomy STandards \(TOAST\)](#), J. Astro. Earth. Sci. Educ. **1** (1), 22 (2014).
- [28] Slater, S. J., Price Schleigh, S., & Stork, D. J. (2015). Analysis of Individual Test Of Astronomy STandards (TOAST) Item Responses. *Journal of Astronomy & Earth Sciences Education (JAESE)*, 2(2), 89-108.
- [29] Slater, S. J. (2015). The Development And Validation Of The Test Of Astronomy STandards (TOAST). *Journal of Astronomy & Earth Sciences Education (JAESE)*, 1(1), 1-22.
- [30] Berryhill, K. J., & Slater, T. F. (2018). Opportunity to Learn: Investigating Possible Predictors for Pre-Course Test Of Astronomy STandards TOAST Scores. *Journal of Astronomy & Earth Sciences Education (JAESE)*, 4(2), 95-108.
- [31] Bolygó torták készítése: <https://cakecrumbs.me/2013/07/24/jupiter-structural-layer-cake/>

<https://bobthebakerboy.com/customisedcakes/Solar-System-Cake>

<https://www.skyatnightmagazine.com/uncategorized/astrobaking-eclipse-cookies/>

[32] Élet és Tudomány 2016. 37. szám, 1164-1165. (a hét kutatója rovatban: Trupka Zoltán: Az élet lehetősége az exoholdakon, interjú Dobos Verával)

[33] Napfogyatkozás a Marson, <https://mars.nasa.gov/resources/20145/mars-moon-phobos-eclipses-the-sun-as-seen-by-nasa-rover-curiosity/?site=insight>

[34] Magyar Csillagászati Egyesület, jelenségnaptár: <https://www.mcse.hu/jelensegnaptar>

[35] Using Visual Assessments and Tutorials to Teach Solar System Concepts in Introductory Astronomy, Michael C. LoPresto, Astronomy Education Review v. 9, n. 1 (December 2010.)

[36] Nemzeti Alaptanterv, Magyar Közlöny, 2020. 17. szám

[37] Nemzeti Köznevelési Portál, <https://www.nkp.hu/tankonyvek>

[38] Dr. Wodetzky József: Üstökösök, Budapest, 1910. Kir. Magyar Természettudományi Társulat kiadásában, a Népszerű Természettudományi Könyvtár sorozat első kötete

[39] Hédervári Péter: Üstökös kutatás az úrkorszakban, Budapest, 1983. Magvető Kiadó

[40] A Halley-üstökös, szerkesztették: Dr. Horváth András, Szalma Sándor, Bp. 1985. Uránia

[41] Szécsényi-Nagy Gábor: A Naprendszer parányai, Budapest, 1986. Gondolat Kiadó

[42] Meteor (Magyar Csillagászati Egyesület lapja) 1997/3 50. oldal

[43] Szauer Ágoston: Vajda János üstököse, Meteor 1997/3 48-50. oldal

[44] Amatőr csillagászok kézikönyve, szerk. Mizser Attila, MCSE, Budapest, 2002.

[45] David H. Levy: Comets: Creators and Destroyers, A Touchstone Book, 1998.

[46] John H. Mallas, Evered Kreimer: A Messier-album, Gondolat, Budapest, 1985.

[47] Bartha Lajos: Konkoly Thege Miklós Emlékezete (1842-1916), MCSE Budapest, 1992, CSACS REPORTS No. 3. (1991)

[48] <https://sci.esa.int/web/rosetta/-/61138-evolution-of-rosetta-s-comet-over-45-billion-years>

[49] Kiefer, F., des Etangs, A., Boissier, J. *et al.* Two families of exocomets in the β Pictoris system. *Nature* **514**, 462–464 (2014)

- [50] <https://www.csillagaszat.hu/hirek/nr-egyeb-naprendszer/apro-objektumok/nr-apro-kisbolygok/kisbolygovadaszat-az-adria-partjan/>
- [51] Surendra Verna: A tunguzkai tűzgömb, Partvonal Könyvkiadó, Budapest, 2005.
- [52] <https://www.csillagaszat.hu/hirek/a-tunguz-meteoroid-meg-mindig-a-nap-korul-keringhet-es-ujra-lecsaphat/>
- [53] <https://www.csillagaszat.hu/kozmiikus-hatasok-es-kockazatok/>
- [54] Joel Schwarz: Humans Have Feared Comets, Other Celestial Phenomena Through The Ages, (<https://www2.jpl.nasa.gov/comet/news59.html>)
- [55] Illés Erzsébet: Naprendszerkutatás a 100 éves Konkoly Obszervatóriumban (https://konkoly.hu/staff/illes/Naprkut_konkoly.html)
- [56] https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2014/10/Cooking_a_comet_ingredients_for_life_-_classroom_demonstration_video_VP06
- [57] <https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/activity/create-a-comet-with-dry-ice/>
- [58]. <https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4480> Why Comets Are Like Deep Fried Ice Cream
- [59] Dombi Margit: Jégben fogant élet? Természet Világa, 2020. szeptember
- [60] Simonyi Károly: A fizika kultúrtörténete a kezdetektől 1990-ig, Akadémiai Kiadó, 1998.
- [61] Száva István: Az ég törvénye, Móra Ferenc Könyvkiadó, Budapest, 1973.
- [62] Arthur Koestler: Alvajárók (Negyedik rész, 309-603.) Európa, Budapest, 2007.
- [63] Albert Einstein: Válogatott tanulmányok (222-226.) Gondolat, Budapest, 1971.
- [64] Ponori Thewrewk Aurél, Róka Gedeon: Kritikai megjegyzések az asztrológiáról, Csillagászati évkönyv 1971, Gondolat Kiadó, Budapest 1971.
- [65] A távcső világa, Szerk.: Kulin György, Róka Gedeon, Gondolat Kiadó, Budapest, 1980.
- [66] Ferencz Csaba: Űrtan, ELTE Eötvös Kiadó, 2009.
- [67] Dr. Halász Tibor: Fizika 9 (Mozgások, Energiaváltozások), Mozaik Kiadó, Szeged 2012.

- [68] Dr. Paál Tamás: Fizika, Mechanika I. (a reál érdeklődésű középiskolások számára), Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest 1998.
- [69] Dr. Mező Tamás, Dr. Molnár Miklós, Dr. Nagy Anett: Fizika 11. (Hullámтан, Elektromágneses jelenségek, Modern fizika), Maxim Könyvkiadó, Szeged, 2009.
- [70] Dr. Zátanyi Sándor, ifj. Zátanyi Sándor: Fizika 6. (Optika, Modern fizika, Csillagászat, tankönyv a 18 évesek számára) Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2005.
- [71] Dr. Jánossy Lajos, Főzy István, Dr. Kulin György: Fizika (a gimnázium szakosított tantervű IV. osztálya számára, III. kötet), Tankönyvkiadó, Budapest, 1983.
- [72] <https://www.iau.org/public/themes/pluto/> , 2006. IAU Resolutions B5 and B6
https://www.iau.org/administration/resolutions/general_assemblies/
- [73] https://www.esa.int/Education/Teach_with_Rosetta/Marble-ous_ellipses_-_speed_and_time_of_orbiting_bodies_Teach_with_space_P02
- [74] Ka Chun Yu, Kamran Sahami, Grant Denn: Student Ideas about Kepler’s Laws and Planetary Orbital Motions, Astronomy Education Review v. 9, n. 1 (December 2010)
- [75] <https://www.youtube.com/watch?v=GQDxFNzeDEc> An Ellipse, 3 perces filmrészlet.
- [76] Plummer JD, Palma C, Rubin K, et al. Evaluating a learning progression for the solar system: Progress along gravity and dynamical properties dimensions. Science Education. 2020;104:530–554.
- [77] Dr. Szalay Béla: Fizika, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1979, 225-226 old.
- [78] Négyjegyű függvénytáblázatok, összefüggések és adatok, Nemzeti Tankönyvkiadó 2005
- [79] https://www.princeton.edu/~willman/planetary_systems/Sol/
- [80] <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=Eger;orb=0;cov=0;log=0#elem>
- [81] <https://www.jpl.nasa.gov/news/an-accidental-discovery-hints-at-a-hidden-population-of-cosmic-objects>
- [82] Why Doesn’t the Moon Fall to Earth? Exploring Orbits and Gravity, NASA Night Sky Network ötperces videója: <https://www.youtube.com/watch?v=OKXVRu6JL54> Az amerikai Toledo Egyetem három perces videója: <https://www.youtube.com/watch?v=cHySqQtb-rk>

- [83] Kovács József: Fekete lyukak kutatói kapták a fizikai Nobel-díjat 2020-ban, Magyar Tudomány 2021/2
- [84] <http://www.astro.ucla.edu/~ghezgroup/gc/animations.html>
- [85] Hebrard G. and other 20 authors: The retrograde orbit of HAT-P-6b exoplanet, (2011.) Astronomy and Astrophysics, 527, L11
- [86] https://www.youtube.com/watch?v=5I_FOEh47RY NASA videó. (Kepler Orrery V) Animated Representation of Multi-Planet Systems Discovered by Kepler Space Telescope
- [87] <https://apod.nasa.gov/apod/ap151205.html>
- [88] <https://solarsystem.nasa.gov/resources/311/kepler-orrery-iii/>
- [89] <https://exoplanets.nasa.gov/resources/1018/kepler-orrery-ii/>
- [90] <https://www.youtube.com/watch?v=cFPa1V7LcXM> Kepler Orrery, NASA videó, 2013.
- [91] A. Leleu and other authors: Six transiting planets and a chain of Laplace resonances in TOI-178, Astronomy and Astrophysics, Volume 649, id. A26, 29 pp. May 2021
- [92] A. Leleu and other authors: Co-orbital exoplanets from close period candidates: The TOI-178 case, Astronomy and Astrophysics, January 23, 2019
- [93] Space Travel: Newton, Kepler, circular motion, gravitation, potential and kinetic energy
<http://www.science-on-stage.eu/material/space-travel>
- [94] Dionysis Konstantinou, Corina Toma: Úrutazás
http://www.science-on-stage.eu/sites/default/files/material/istage1_hu_urutazas.pdf
- [95] <http://www.save-point.io/> SAVE/Point (Society for Astronomy Visualization and Education) honlapja, egyik asztrofizikus szerző honlapja: <https://www.stefanom.io>
- [96] <http://astro.u-szeged.hu/ismeret/gravall.html>
- [97] Érdi Bálint: Égi mechanika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1989
- [98] A. M. Ghez és társai: Measuring Distance and Properties of the Milky Way's Central Supermassive Black Hole with Stellar Orbits, The Astrophysical Journal, 689: 1044-1062, 2008 December 20

- [99] S.Gillesen et al (R. Genzel): An Update on Monitoring Stellar Orbits in the Galactic Center, 2017 ApJ 837 30 (The Astronomical Journal, Volume 837, Number 1)
- [100] Németh Judit, Szabados László: A sötét anyag, Fizikai Szemle 2006/11. 362. o.
- [101] https://imagine.gsfc.nasa.gov/educators/galaxies/imagine/hidden_mass.html
- [102] Györgyi Géza: A Kepler-problémáról, Fizikai Szemle 1965/3.
- [103] Györgyi Géza: A Kepler-mozgás és a gravitációs törvény, Fizikai Szemle 1971/6.
- [104] P. A. Horváthy: Bolygómozgásról – egy régi versenyfeladat kapcsán, Fizikai Szemle, 2003/11. 405. o. (1969. Eötvös verseny első feladata)
- [105] P. A. Horváthy: Bolygómozgás és geometria I. (Maxwell bizonyítása), Fizikai Szemle, 2005/2. 48. o.
- [106] P. A. Horváthy: Bolygómozgás és geometria II.: Feynman “elveszett előadása”, Fizikai Szemle, 2005/8. 264. o.
- [107] František Mošna: From Newton to Kepler. (One simple derivation of Kepler’s laws from Newton’s ones.), Italian Journal of Pure and Applied Mathematics N. 32-2014 (393-400)
- [108] Mikola Sándor: A történeti Kepler – vonatkozással Az ember tragédiájára, Emlékkönyv Beöthy Zsolt születésének hatvanadik fordulójára. Írták tanítványai, barátai, tisztelői. Budapest: Az Athenaeum Irodalmi és Nyomdai R.T. nyomása, 1908. 375-390.
- [109] <https://exoplanets.nasa.gov/search-for-life/big-questions/>
- [110] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2021. *Pathways to Discovery in Astrophysics for the 2020s* Washington, DC: The National Academies Press.
- [111] Michael Mayor, Didier Queloz: A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature* **378**, 355-359 (1995)
- [112] Haris-Kiss András: Fizikai Nobel-díj az első exobolygó felfedezéséért, Fizikai Szemle, 2019/11 378. o.
- [113] UTIAS SFL, MOST Mission: https://www.utias-sfl.net/?page_id=311
- [114] CoRoT: <https://corot.cnes.fr/en/COROT/index.htm>

- [115] Rosenblatt F, 1971, A two-colour photometric method for detection of extrasolarplanetary systems. *Icarus*, 14, 71-93
- [116] Borucki WJ, Summer AL, 1984, The photometric method of detecting other planetary systems. *Icarus*, 58, 121-134
- [117] <https://www.nasa.gov/kepler/missiontimeline>
- [118] Megan E. Schwamb et al.: Planet Hunters: A Transiting Circumbinary Planet in a Quadruple Star System, *The Astrophysical Journal* Volume 768, Number 2. (2013 ApJ 768 127), <https://arxiv.org/abs/1210.3612>
- [119] <https://www.nasa.gov/kepler/topscience>
- [120] Regály Zsolt: Több, mint égen a csillag 1. és 2. rész *Fizikai Szemle* 2015/7-8 és 2015/9
- [121] Benkő József: A Kepler-űrtávcső egy százéves rejtély nyomában, *Fizikai Szemle* 2014/11
- [122] Molnár László: Kepler, a kötéltáncos űrtávcső, *Fizikai Szemle*, 2014/6
- [123] Szabó Róbert, Szabó M. Gyula: Kepler-bolygók kavalkádja, *Fizikai Szemle* 2013/7-8
- [124] Simon Attila: Úton az extraszoláris holdak felfedezése felé, *Fizikai Szemle*, 2012/7-8
- [125] Szabó M. Gyula, Simon Attila, Szalai Tamás: Újdonságok az exobolygók világából, *Fizikai Szemle*, 2011/7-8
- [126] Futó Péter: A Kepler-forradalom, *Fizikai Szemle*, 2011/3
- [127] Szabó Róbert: Bolygóáradat és asztroszeizmológia (Elindult a Kepler-űrtávcső), *Fizikai Szemle*, 2009/4
- [128] Paparó Margit: Asztroszeizmológia és exobolygó-kutatás, *Fizikai Szemle*, 2008/2
- [129] <https://exoplanets.nasa.gov/tess/>
<https://www.nasa.gov/tess-transiting-exoplanet-survey-satellite>
- [130] <https://exoplanets.nasa.gov/news/1672/discovery-alert-first-six-star-system-where-all-six-stars-undergo-eclipses/>
- [131] <https://www.zooniverse.org/projects/nora-dot-eisner/planet-hunters-tess>
- [132] https://sci.esa.int/documents/34122/36173/CHEOPS_media_kit_20191220.pdf

[133] CHEOPS Sizing and First Characterisation of Exoplanets

https://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/BR-342/BR_342-Cheops_web.pdf

[134] Szatmáry Károly: Bolygók mindenütt Fizikai Szemle 2007/12 433. o

[135] Rebolo, R., Osorio, M. & Martín, E. Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster. *Nature* **377**, 129–131 (1995).

[136] van de Kamp, P.: Parallax, proper motion acceleration, and orbital motion of Barnard's Star. *Astronomical Journal* 74(2): 238-240, March 1969.

[137] Peter van de Kamp: The planetary system of Barnard's star, *Vistas in Astronomy* Volume 26, Part 2, 1982, Pages 141-157

[138] Gatewood, George, and Heinrich Eichhorn: An unsuccessful search for a planetary companion of Barnard's Star, *Astronomical Journal* 78(8):769-776, October 1973.

[139] The Search for the Extrasolar Planets: A Brief History of the Search, the Findings and the Future Implications, <https://www.public.asu.edu/~sciref/exoplnt.htm>

[140] <https://palereddot.org> PALE RED DOT, A search for Earth-like planets around Proxima Centauri

[141] Anglada-Escudé G., Amado, P., Barnes, J. et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri. *Nature* 536, 437-440 (2016).

[142] Ribas, I., Tuomi, M., Reiners, A. et al. A candidate super-Earth planet orbiting near the snow line of Barnard's star. *Nature* 563, 365-368 (2018)

[143] Jack Lubin et al. 2021 AJ 162 61, Jack Lubin et al. Stellar Activity Manifesting at a One-year Alias Explains Barnard b as a False Positive, *The Astronomical Journal*, Volume 162, Number 2.

[144] Otto Struve: Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work, *The Observatory*, Vol. 72, p. 199-200 (1952)

[145] G. Á. Bakos: The HATNet and HATSouth Exoplanet Surveys, Invited review chapter, „Handbook of Exoplanets” edited by H. J. Deeg and J. A. Belmonte, Springer Reference Works

- [146] G. Bakos, R. W. Noyes, G. Kovács, K. Z. Stanek, D. D. Sasselov, and I. Domsa : Wide Field Millimagnitude Photometry with the HAT: A Tool for Extrasolar Planet Detection, *G. Bakos et al 2004 PASP* **116** 266
- [147] Przemek Mróz et al : A Terrestrial-mass Rogue Planet Candidate Detected in the Shortest-timescale Microlensing Event, *The Astronomical Journal Letters*, Volume 903, Numb. 1, 2020
- [148] Cochran, W. D. & Hatzes, A. P. :Radial velocity searches for other planetary systems, *Astrophysics and Space Science*, Volume 241, Issue 1, pp. 43-60
- [149] Fabien Malbet, A. Leger et al. : NEAT, An Astrometric Telescope To Probe Planetary Systems Down To The Earth Mass Around Nearby Solar-Type Stars, 2011
- [150] Szatmáry Károly: Exobolygók, *Magyar Tudomány*, 2006/8
- [151] Jason T. Wright, B. Scott Gaudi: Exoplanet Detection Methods, (Terry D. Oswalt, Linda M. French, Paul Kalas volume editors: Planets, Stars and Stellar Systems, Volume 3: Solar and Stellar Planetary Systems, Springer, 2013)
- [152] <https://palereddot.org/worlds-of-rock-and-ice/>
- [153] <https://www.youtube.com/watch?v=gai8dMA19Sw> Whole New Worlds: An Aladdin History of Exoplanets, A Capella Science, Trudbol, SamRobson, Gia Mora, 2017.
- [154] Piláth Károly: „Exobolygó kutatás” Trackerrel, *Fizikai Szemle* 2015/11, 387. o.
- [155] Alan Gould: NASA Kepler Activities and Remote Astronomy Meeting Techniques, Discover The Cosmos Conference, (e-Infrastructure for an Engaging Science Classroom) http://handsonuniverse.org/wp-content/uploads/2013/07/DtC_conf_proceedings.pdf
- [156] <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-watch/about-exoplanet-watch/overview/>
- [157] <https://www.exoclock.space>
- [158] Ollé Hajnalka, Kovács Tamás: Mi rejlik fényképen, avagy fénygörbe analízise az osztályban, Exobolygó kutatás nyilvános adatbázisát felhasználó önálló adatelemzés a tanulók bevonásával, *Fizikai Szemle* 2020/9, 324. o.
- [159] https://www.oktatas.hu/koznevelés/erettsegi/feladatsorok/kozepszint_2011tavasz

- [160] [https://www.odysseus-contest.eu/odysseus-ii/the -project/](https://www.odysseus-contest.eu/odysseus-ii/the-project/) ,(http://www.odysseus-contests.eu/)
- [161] Vida József: Túl az egy évtizednyi működésén a Varázstorony, https://www.uni-miskolc.hu/~microcad/publikaciok/2018/C1_Vida_Jozsef.pdf
- [162]https://www.oktatas.hu/kozneveles/tanulmanyi_versenyek_/oktv_kereteben/versenyfeladatok_javitasi_utmutatok/tartalomjegyzek/foldrajz
- [163]https://www.oktatas.hu/kozneveles/tanulmanyi_versenyek_/oktv_kereteben/versenyfeladatok_javitasi_utmutatok/tartalomjegyzek/fizika_I
- [164] <https://www.ioaastrophysics.org/history-2/>
- [165] Szalai Tamás: Fiatal asztrofizikusok a Balaton partján – beszámoló a XIII: Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpiáról, Fizikai Szemle 2020/2
- [166] Hegedűs Tibor: Csillagászati diákolimpia (és Felhívás), Meteor 424. szám (2011.szeptember 25.)]
- [167] Világos Blanka: A Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpiáról (egy háromszoros olimpikon visszaemlékezései), Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok, 2019/5

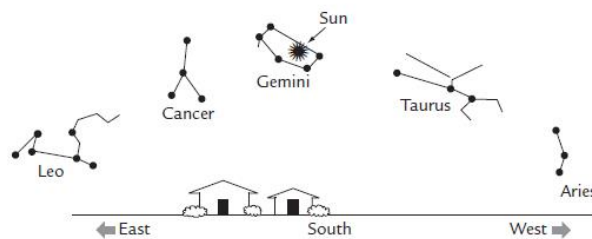
Függelék

Függelék 1. Csillagászati tudásfelmérő teszt (TOAST)

Ez a csillagászati alaptudást felmérő teszt elektronikusan, angol nyelven elérhető a következő webcímen: <https://www.aavso.org/request-take-astronomy-knowledge-survey>

A teszt egyes kérdéseinek szövege után a diákok megoldásainak részarányát mutatom be egy táblázatban összehasonlítva szakirodalmi adattal majd megjegyzésként utalok a feladat által feltárt tévképzetre is. Magyarországon 86 leánytanuló töltötte ki ezt a tesztet magyar nyelven. A diákok többsége tizenegyedikes volt, a többiek végzősök vagy OKJ-s képzésben résztvevők, így már befejezték fizika és földrajz tanulmányaikat, amelyek során csillagászati ismereteket is tanultak. Minden kérdésnél egy választ kellett megjelölniük a diákoknak, amelyiket a legmegfelelőbbnek tartották. A kérdések az északi féltekén, közepes földrajzi szélességeken (pl. Magyarországon) álló megfigyelőre vonatkoznak.

Az alábbi ábra segítség a következő két kérdéshez. (Fordítási segítség: Sun-Nap, Leo-Oroszlán csillagkép, Cancer-Rák csillagkép, Gemini-Ikrek csillagkép, Taurus-Bika csillagkép, Aries-Kos csillagkép, East-Kelet, South-Dél, West-Nyugat)



1, Ha a csillagok láthatóak lennének nappal, akkor az ábra szerinti égboltképet látnánk egy adott napon, délben. A Nap (Sun) aznapi legmagasabb helyzetét elérve az Ikrek (Gemini) csillagkép csillagai között látszik. Ugyanezen a napon, amikor a Nap lenyugszik, melyik csillagkép csillagai között látszik?

- A. Leo (Oroszlán csillagkép)
- B. Taurus (Bika csillagkép)
- C. Aries (Kos csillagkép)
- D. Cancer (Rák csillagkép)
- E. Gemini (Ikrek csillagkép)**

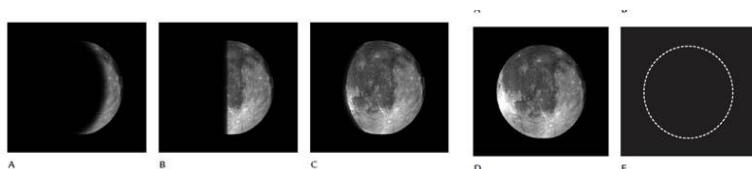
A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	10,47%	11,07%
B	9,3%	2,77%
C	60,47%	38,34%
D	4,65%	2,77%
E	15,12%	36,76%

Diákjainknál a szakirodalmi adathoz képest is erősebben jelentkezik az a tévképzet, hogy a csillagok nem mozognak az égbolton.

2, A fenti ábra egy adott napon délben mutatja a csillagok helyzetét. Mennyi idő múlva lesz ugyanebben a helyzetben az Ikrek (Gemini) csillagkép éjfélkor?

- A. 12 óra múlva.
- B. 24 óra múlva.
- C. 6 hónap múlva.**
- D. 1 év múlva.
- E. Az Ikrek (Gemini) csillagkép sohasem látható ebben a pozícióban éjfélkor.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	33,72%	17,79%
B	13,95%	7,51%
C	17,44%	39,13%
D	5,81%	6,72%
E	27,9%	18,18%



3, A keleti horizonton éppen felkelő Hold fázisa újhold. Melyik kép mutatja ugyanazon a napon később a Holdat, amikor az égbolton legmagasabban látszik?

- A. B. C. D. E.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	30,23%	12,65%
B	5,81%	6,32%
C	5,81%	4,74%
D	29,07%	12,65%
E	27,91%	57,31%

Az A és D válaszokat megjelölők jelentős aránya azt mutatja, hogy azt hiszik a Hold egy nap alatt is jelentősen változtatja „alakját” (fázisát).

4, Október elsején Magyarországról végzel megfigyeléseket. Két hét múlva milyen változást tapasztalsz a Nap helyzetében az égbolton délben?

- A. Észak felé fog elmozdulni a Nap.
- B. Magasabban fog elhelyezkedni az égbolton a Nap.
- C. Ugyanott fogjuk látni.
- D. A Nap a horizonthoz közelebb fog elhelyezkedni.**
- E. Nyugat felé fog elmozdulni a Nap.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	3,49%	3,95%
B	13,95%	12,25%
C	6,68%	9,49%
D	66,28%	65,61%
E	9,3%	3,95%

Bár a többség helyes választ jelölt meg, elgondolkodtató azok válasza (B) is, akik úgy gondolták, hogy az északi féltéken télen egyre magasabban delel a Nap.

5, Melyik állítás írja le a legjobban azt, hogy miért vannak a Holdnak fázisai?

- A. A Föld árnyéka különböző időszakokban a Holdnak más részeire esik.
- B. A Hold egy korongszerű, lapos égitest, attól függően látszik többé, vagy kevésbé kereknek, hogy pontosan milyen szögben látunk rá.
- C. A földi felhők takarják el egy részét a Holdnak, ennek következményeként látunk változó holdfázisokat.
- D. A Földről visszaverődő napfény világítja meg a Holdat. Ez kevésbé hatásos, amikor a Hold alacsonyan van az égbolton, mint amikor magasabban.
- E. Mi csak a Hold megvilágított felszínét látjuk a Hold Földhöz és Naphoz viszonyított helyzetétől függően.**

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	16,28%	13,04%
B	3,49%	11,46%
C	1,16%	5,93%
D	4,65%	6,72%
E	72,09%	60,87%

A jelentős részarányú helyes válaszadó mellett a szakirodalom megemlíti azok csoportját (A választ jelölők), akik a Hold fázisának változásait a Föld Holdra vetett árnyékával magyarázzák.

6, Képzeld el, hogy látod a Mars bolygót keleten felkelni délután 6:30-kor. Hat órával később, milyen irányba kell fordulnod, hogy lásd a Marsot, amikor legmagasabban van az égbolton?

- A. Észak felé.
- B. Dél felé.**
- C. Kelet felé.
- D. Nyugat felé.
- E. Pontosan a fejed felett kell keresned.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	17,44%	17%
B	15,12%	23,32%
C	10,47%	2,77%
D	20,93%	5,93%
E	34,88%	39,53%

A helyes választ adók alacsony részaránya a hiányos égboltismeretre utal. Diákjaink nem ismerik az égitestek mozgását az égbolton és fellelhető a Föld tengelyferdesége következményeinek gyenge megértése is.

7, Képzeld el, hogy a Föld nem dől, hanem függőlegesen áll. Milyen hatással lenne ez az évszakokra?

A. Nem lennének évszakok.

B. Továbbra is lennének évszakok, de a különbség közöttük kevésbé lenne észrevehető.

C. Továbbra is lennének évszakok, de a különbség közöttük még jobban észrevehető lenne.

D. Továbbiakban is lennének évszakok lényegében ugyanúgy, mint most.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	30,23%	52,96%
B	26,74%	22,92%
C	30,23%	13,04%
D	9,3%	4,35%

A, B, és C, választ jelölők jelentős részaránya mutatja azt, hogy nem teljesen értik ezek a tanulók, hogy mi okozza az évszakokat.

8, Hogyan termeli a Nap az energiát, amellyel melegíti bolygónkat?

- A. A Nap belsejében lévő gázok elégnék hatalmas mennyiségű energiát termelve.
- B. A Nap belsejében lévő gázok felmelegednek miközben összenyomódnak és ebből adódik a hatalmas mennyiségű energia.
- C. A Nap mágneses tere által bezárt hő szabadul fel energiaként.
- D. A hidrogén héliummá egyesül és ez adja a hatalmas mennyiségű energiát.**
- E. A Nap magjában levő radioaktív atomok bomlásakor szabadul fel energia.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	12,79%	18,97%
B	12,79%	11,46%
C	9,3%	10,67%
D	48,84%	43,08%
E	13,95%	8,3%

Diákjaink közül még mindig vannak, akik a Nap energiatermelését az égéssel hozzák összefüggésbe (A válasz), vagy más hőt termelő folyamattal.

9, Az Ősrobbanás a legjobban a következőképpen írható le:

- A. Az az esemény, amikor egy végtelenül kicsi méretű „energiapontból” keletkezett az összes anyag és tér.**
- B. Az az esemény, amikor az összes anyag keletkezett és szétszóródott a térben.
- C. Az az esemény, amikor az összes anyag és energia szétszóródott az egész térben.
- D. Az az esemény, amikor a mostani bolygórendszerek kialakultak.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	58,14%	46,64%
B	5,81%	10,67%
C	19,77%	23,32%
D	16,28%	10,67%

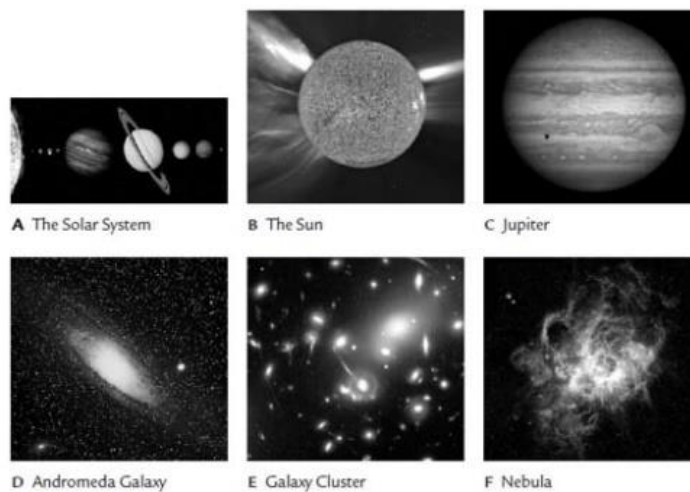
Az Ősrobbanással kapcsolatosan a válaszadók egy jelentős része gondolta, hogy a tér az Univerzum keletkezése előtt is létezett és többen keverték össze a Világegyetem keletkezését a bolygórendszerek kialakulásával.

10, Melyik a helyes sorrend, ha a Földhöz legközelebbtől haladunk a legtávolabbi felé?

- A. A Nap, a Hold, a Naprendszer peremvidéke, a Sarkcsillag, Galaxisunk peremvidéke
- B. A Nap, a Sarkcsillag, a Hold, Galaxisunk peremvidéke, a Naprendszer peremvidéke
- C. A Hold, a Sarkcsillag, a Nap, a Naprendszer peremvidéke, a Galaxisunk peremvidéke
- D. A Hold, a Nap, a Naprendszer peremvidéke, a Sarkcsillag, a Galaxisunk peremvidéke**
- E. A Sarkcsillag, a Hold, a Nap, a Naprendszer peremvidéke, a Galaxisunk peremvidék

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	9,3%	4,35%
B	5,81%	2,37%
C	38,37%	18,58%
D	33,72%	63,24%
E	8,14%	5,53%

A C választ jelölők esetében nemcsak a naprendszerbeli távolságok ismerete hiányzik, hanem annak az ismerete is, hogy a Nap egy csillag.



11, Melyik a helyes sorrend, ha a legkisebttől a legnagyobbig rakjuk sorrendbe a képen láthatóakat? (Fordítási segítség: The Solar System-A Naprendszer, The Sun- A Nap, Andromeda Galaxy-Androméda-galaxis, Galaxy Cluster-Galaxishalmaz, Nebula-Köd)

A, C<F<B<A<D<E

B, E<D<F<A<B<C

C, C<B<A<F<D<E

D, F<C<B<A<D<E

E, Egyik sem helyes a fentiek közül.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	3,49%	9,09%
B	8,14%	10,28%
C	60,47%	60,08%
D	9,3%	8,3%
E	16,28%	7,11%

Ugyan a többség helyesen rangsorolta az égitesteket nagyság szerint, de a helytelen választ jelölők összessége mutatja, hogy ezen a területen is vannak alapvető hiányosságok.

12, Képzeld el, hogy a Föld pályája tökéletes kör alakúra változik a Nap körül, vagyis a Föld-Nap távolság sosem változik. Hogyan érintené ez az évszakokat?

A. Nem lennének évszakok.

B. Az évszakok közötti különbség kevésbé lenne észrevehető, mint most.

C. Az évszakok közötti különbség jobban észrevehető lenne, mint most.

D. Ugyanúgy tapasztalnánk az évszakok váltakozását, mint mostanában.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	45,35%	18,7%
B	36,05%	27,83%
C	9,3%	13,04%
D	9,3%	40,43%

Ez a kérdés a 7. kérdésnél is jobban mutatja, hogy a diákok nem a Föld tengelyferdesége következményeként tekintenek az évszakokra, hanem egyedül a Naptól való távolság változását tartják oknak.

13, Mi a csillag?

- A. Gázgömb, amely visszaveri egy másik energiaforrás fényét.
- B. Ragyogó fénypont a Föld légkörében.
- C. Forró gázgömb, amely a gáz égetésével termel energiát.
- D. Forró gázgömb, amely atommagok egyesülése által termel energiát.**
- E. Forró gázgömb, amely atommagok bomlása által termel energiát.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	11,63%	7,51%
B	3,49%	2,77%
C	37,21%	35,18%
D	32,56%	32,02%
E	12,79%	11,86%

A 8. kérdéshez hasonlóan sok diák gondolja, hogy a Napban égés történik és ezért világít.

14, A csillag melyik tulajdonsága határozza meg leginkább élete során további jellemzőit?

- A. Fényessége.
- B. Hőmérséklete.
- C. Színe.
- D. Tömege.**
- E. Kémiai összetétele

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	11,63%	12,65%
B	26,74%	19,37%
C	8,14%	4,35%
D	12,79%	39,13%
E	40,7%	13,04%

A helytelen válaszadók nagy aránya mutatja a csillagok fejlődésével kapcsolatos ismerethiányt.

15, Az Univerzum változásának jelenlegi bizonyítékai arra utalnak, hogy:

- A. Az Univerzum középpontjának közelében vagyunk.
- B. A galaxisok tágulnak az üres térbe.
- C. A galaxisok csoportjai távolodnak egymástól.**
- D. A közeli galaxisok fiatalabbak, mint a távoliak.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	8,14%	17,86%
B	53,49%	30,36%
C	30,23%	32,81%
D	5,81%	14,73%

A 9. kérdéshez hasonlóan megjelenik a tér Világegyetemtől való függetlensége, önálló volta, az Univerzum keletkezése előtti létezése, mint tévképzet.

16, A csillagok életük kezdetén olyanok, mint

- A. egy csillag vagy bolygó kisebb darabja.
- B. egy fehér törpe.
- C. egy földi légköri anyag.
- D. egy fekete lyuk.
- E. egy gáz-, vagy porfelhő.**

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	8,14%	3,16%
B	12,79%	7,11%
C	2,33%	5,53%
D	5,81%	1,98%
E	68,6%	79,45%

Ennél a kérdésnél azok válaszoltak helyesen, akik ismerték a csillagok keletkezésének folyamatát, a többiek helytelen válasza ismerethiányból adódik, nem téves elképzelésből.

17, Mi történik a Nappal, amikor eléri élete végét?

- A. Fekete lyukká válik.
- B. Fel fog robbanni, elpusztítva a Földet.
- C. Elveszíti külső héjait (rétegeit) hátrahagyva a magját.**
- D. Nem fog elpusztulni a tömege miatt.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	30,23%	25,69%
B	43,02%	26,09%
C	12,79%	28,46%
D	12,79%	8,97%

A helytelenül válaszolóknak nagy részaránya mutatja, hogy diákjaink többsége nincs tisztában a Nap fejlődésével, élete végével, vagyis azzal, hogy a csillagok melyik csoportjába tartozik.

18, Ha egy űrhajóval utaznál a Nap közeléből a Plútóhoz, milyen égitestek mellett haladnál el?

- A. Bolygók
- B. Csillagok.

C. Holdak.

D. A fentiek közül kétféle mellett.

E. Mindegyik megnevezett objektum mellett.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	5,81%	1,58%
B	3,49%	2,77%
C	3,49%	2,77%
D	60,47%	56,13%
E	26,74%	30,83%

19, Hogyan keletkeztek a Nap körül keringő bolygók

A. A bolygók ugyanabból az anyagból keletkeztek, mint a Nap.

B. A bolygók és a Nap az Ósrobbanás idején keletkeztek.

C. A bolygókat befogta a Nap, gravitációs ereje által.

D. A bolygók a magjukban lévő hidrogén fúziója által formálódtak.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	5,81%	22,92%
B	34,88%	18,18%
C	47,67%	33,6%
D	11,63%	11,86%

A 9. kérdéshez képest nagyobb mértékben jelenik meg ennél a kérdésnél az Ósrobbanás és bolygórendszer keletkezésének keveredése. A C választ jelölők esetében egy régebbi, már megcáfolt hipotézist fedezhetünk fel. A kevés helyesen válaszoló mutatja, hogy nemcsak a csillagfejlődés vagy az Ósrobbanás folyamatát ismerik kevéssé a diákjaink, hanem a bolygórendszereket, így a sajátunkét, a Naprendszerét sem ismerik eléggé.

20, Melyik okozná a következők közül azt, hogy súlyunk feleakkorává válna?

- A. Eltűnne a földi légkör fele.
- B. Megduplázódna a Föld-Nap távolság.
- C. A Föld fele olyan gyorsan forogna, mint most.
- D. Eltűnne a Föld tömegének fele.**

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	17,44%	21,46%
B	23,26%	18,91%
C	13,95%	14,45%
D	41,86%	45,18%

A helytelenül válaszolók a gravitációs kölcsönhatást a levegő jelenlétével, a bolygó forgásával, forgási sebességével, illetve a bolygó Naptól való távolságfüggésével magyarázzák.

21, Az űrhajósok „lebegnek” az űrhajóban miközben az kering a Föld körül, mert:

- A. Az űrben nincs gravitáció.
- B. Ugyanolyan módon esnek, mint az űrhajó.**
- C. Kívül vannak a földi légkörön.
- D. Az űrhajó belsejében kisebb a gravitáció.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	48,84%	28,92%
B	26,74%	40,16%
C	13,95%	19,34%
D	9,3%	11,58%

Az előző kérdéshez hasonlóan a légkör, levegő hiányát hasonló arányban azonosítják a gravitáció hiányával. Megjelenik jelentős mértékben az a tévképzet is, hogy az űrben nincs gravitáció.

22, Energia szabadul fel fény formájában az atomban, amikor

- A. elektronokat bocsájt ki az atom.
- B. az elektronok alacsonyabb energiaszintről magasabb energiaszintre ugranak.
- C. az elektronok magasabb energiaszintről alacsonyabbra ugranak.**
- D. az elektronok mozognak atommag körüli pályájukon.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	9,3%	17%
B	40,7%	25,3%
C	38,37%	45,06%
D	10,47%	7,11%

23, Melyik állítás igaz a látható fény és a rádióhullámok összehasonlításakor?

- A. A rádióhullám kisebb energiájú és lassabban halad, mint a látható fény.
- B. A látható fénynek kisebb a hullámhossza és kisebb az energiája, mint a rádióhullámnak.
- C. A rádióhullámnak nagyobb a hullámhossza és ugyanolyan sebességgel halad, mint a látható fény.**
- D. A látható fény nagyobb energiájú és gyorsabban halad, mint a rádióhullám.
- E. A rádióhullámnak kisebb a hullámhossza és magasabb az energiája, mint a látható fénynek.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	10,47%	12,65%
B	8,14%	11,46%
C	31,4%	40,32%
D	36,05%	19,37%
E	10,47%	7,91%

A kérdés a fény természetére kérdezett rá, a helytelen válaszok azt mutatják, hogy az elektromágneses hullámokkal kapcsolatban vannak hiányosságok. Ennél a kérdésnél a válaszok felületes átolvasása is hibás válasz megjelöléséhez vezethetett.

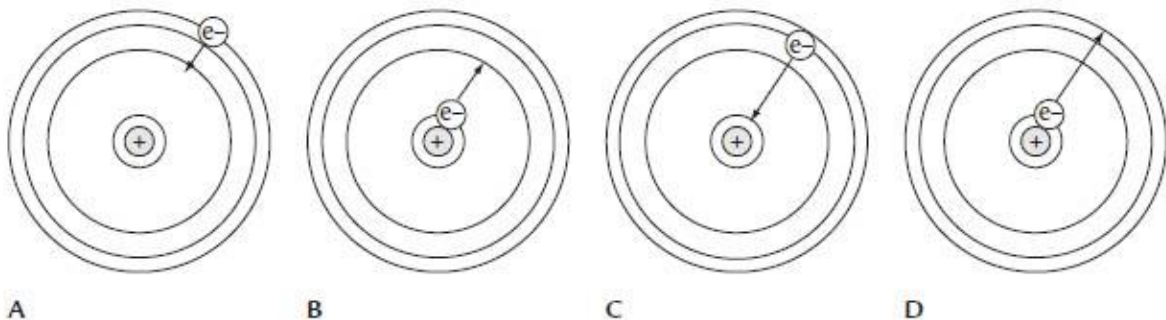
24, Hol keletkeztek egy műanyag szék atomjai?

- A. A Napban.
- B. Egy a Napunk keletkezése előtt létező csillagban.**
- C. Az Ősrobbanás pillanatában.
- D. Körülbelül 100 millió évvel ezelőtt.
- E. Egy távoli galaxisban, egy másik részén a korai Univerzumnak.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	2,33%	9,88%
B	9,3%	27,67%
C	58,14%	32,81%
D	24,42%	12,65%
E	3,49%	5,53%

A 9. és 19. kérdéshez hasonlóan sokan gondolják itt is helytelenül, hogy minden anyag az Ősrobbanás során keletkezett.

Az alábbi rajzok segítségével válaszolj a következő két kérdésre!



25, Melyik atom nyelte el a legnagyobb energiájú fényt?

- A. B. C. **D.**

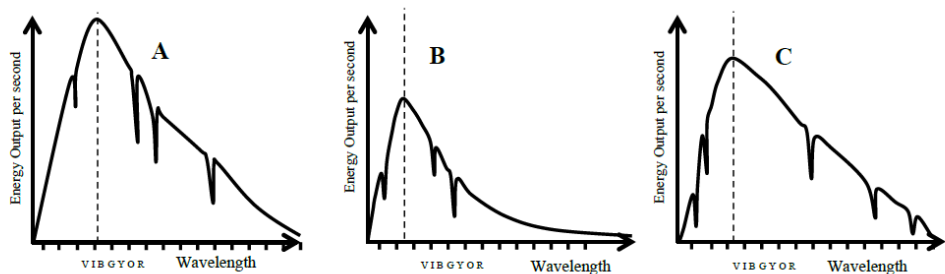
A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	10,47%	10,67%
B	9,3%	12,65%
C	48,84%	27,27%
D	30,23%	41,11%

26, Melyik atom bocsájtotta ki a legrövidebb hullámhosszú fényt?

A. B. C. D.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	45,35%	26,09%
B	36,05%	28,06%
C	8,14%	19,76%
D	8,14%	16,21%

A 25. és 26. kérdés a fény keltésével kapcsolatos és arra lehet következtetni a válaszok szórásából, hogy a diákok nehezen értelmezik a grafikus megjelenítést.



(V=violet, I=indigo, B=Blue, G=Green, Y=yellow, O=orange, R=red)

27, A grafikonokon a (másodpercenkénti) energia kibocsájtást láthatjuk a hullámhossz függvényében három ismeretlen test A, B és C esetében. Melyik testnek a legmagasabb a hőmérséklete?

A. B. C.

D. Mind a három test hőmérséklete azonos.

E. A válasz nem határozható meg ezekből az információkból.

A válasz betűjele	Válaszadók aránya	Szakirodalmi összehasonlító arány
A	50%	35,18%
B	10,47%	25,69%
C	5,81%	8,3%
D	3,49%	6,72%
E	24,42%	11,46%

Ez a feladat grafikonelemzést és a Wien-féle eltolódási törvény ismeretét várta volna el. Az A választ jelölők esetében közrejátszhatott, hogy ott tűnik legmagasabbnak a függvénygörbe.

Függelék 2. Üstökös kvíz, megoldással

(Kiemelve a helyes válasz, a válaszok végén levő zárójelben az adott válasz aránya.)

1) Ki írta a következő verset?

- A. Arany János (22%)
- B. Ady Endre (28%)
- C. József Attila (22%)
- D. Vajda János (28%)**

AZ ÜSTÖKÖS

Az égen fényes üstökös; uszálya
 Az ég felétől le a földre ér.
 Mondják, ez ama "nagy", melynek pályája
 Egyenes; vissza hát sohase tér.

Csillagvilágok fénylő táborán át
 A végtelenséggel versenyt rohan.
 Forogni körbe nem tud, nem akar, hát
 Örökké társtalan, boldogtalan!

Imádja más a változékony holdat,
 A kacéran keringő csillagot;
 Fenséges Niobéja az égboltnak,
 Lobogó gyász, én neked hódolok.

Szomorú csillag, életátkom képe,
 Sugár ecset, mely festi végzetem,
 Akárhová mégysz a mérhetlen égbe,
 Te mindenütt egyetlen, idegen!...

- 2) **Ki volt az, aki a Halley-üstökös egyik visszajövetelénél született és egy másik visszatérésénél halt meg?**
- A. Herman Ottó (25%)
 - B. Lev Tolsztoj (14%)
 - C. **Mark Twain (50%)**
 - D. Mikszáth Kálmán (11%)
- 3) **Hány évvel korábban halt meg Edmund Halley, a később róla elnevezett üstökös visszatérésénél, amelynek időpontját helyesen jósolta meg?**
- A. 1 évvel korábban (28%)
 - B. 2 évvel korábban (25%)
 - C. **16 évvel korábban (33%)**
 - D. 86 évvel korábban (14%)
- 4) **Ki nevezte az üstökösöket először „*piszkos hógolyónak*”?**
- A. **Fred Whipple (14%)**
 - B. Gerard Kuiper (47%)
 - C. Jan Oort (22%)
 - D. Kenneth Edgeworth (17%)
- 5) **Ki ismerte fel először, hogy az üstökösök nem légköri jelenségek, hanem a Föld atmoszféráján kívüliek?**
- A. Nikolausz Kopernikusz (23%)
 - B. **Tycho Brahe (11%)**
 - C. Johannes Kepler (47%)
 - D. Galileo Galilei (19%)
- 6) **Hogyan különböztetik meg az üstökösöket egymástól?**
- A. A színük és a nagyságuk alapján. (22%)
 - B. Az alakjuk alapján. (3%)
 - C. **A pályájuk alapján. (67%)**
 - D. Minden üstökös más, nem látunk többször egy üstököst. (8%)

7) Átlagosan milyen méretű egy Nap közelében járó üstökös?

- A. A magja néhány méter, a kómája ezer km átmérőjű és a csóvája akár 10000 km hosszú is lehet. (20%)
- B. A magja száz méter, a kómája 10000 km átmérőjű és a csóvája akár millió km hosszú is lehet. (9%)
- C. A magja néhány kilométer, a kómája millió kilométer átmérőjű és a csóvája 150 millió km hosszú is lehet. (40%)**
- D. A magja ezer kilométer, a kómája 100 millió kilométer átmérőjű és a csóvája 1,5 milliárd km hosszú is lehet. (11%)

8) Mennyire sűrű az üstökös csóvája?

- A. Olyan ritka, hogy nem is tudunk annyira ritka vákuumot létrehozni. (19%)**
- B. Olyan ritka, mint a bennünket körülvevő levegő. (11%)
- C. Egy sűrű ködhez hasonló sűrűségű. (17%)
- D. Mivel por is van benne, egy porviharhoz hasonlíthatnánk leginkább. (53%)

9) Átlagosan milyen távol haladnak el bolygónk mellett az üstökösök?

- A. Néhány kilométernyire közelítenek meg bennünket. (11%)
- B. A földi légkör tetejét súrolják. (17%)
- C. 50-100 millió kilométer távolságban suhannak el. (69%)**
- D. Egy-két fényévnire. (3%)

10) Milyen anyagokból állnak az üstökösök általában?

- A. Víz, széndioxid, por, metán, ammónia (61%)**
- B. Víz, nitrogén, oxigén, szén (28%)
- C. Szén, aminosavak, szénhidrogének, cián (11%)
- D. Szilikátok, nátrium, szulfidok (0%)

11) Hány üstökös létezik a Naprendszerben?

- A. Néhány száz (11%)
- B. Néhány ezer (11%)
- C. Néhány millió (53%)
- D. Több milliárd (25%)**

12) Honnan jönnek az üstökösök?

- A. Főleg az aszteroida övből. (28%)
- B. A rövid periódusúak a Kuiper-övből, a hosszú periódusúak az Oort-felhőből. (53%)**
- C. A legtöbb üstökös a csillagközi térből származik. (33%)
- D. Más galaxisokból jönnek. (6%)

13) Mitől mozognak folyamatosan napköri pályán az üstökösök?

- A. Az üstökös magjából kiszabaduló gázok hajtják, mint egy rakétát. (44%)
- B. Valójában nem is mozognak, csak a Föld keringése miatt látjuk mozogni őket az égen. (6%)
- C. A Nap gravitációs vonzása miatt keringenek, mint a bolygók. (36%)**
- D. Aszteroidákkal való ütközésekből kapnak újabb lendületet a mozgásukhoz. (14%)

14) Melyik a legkisebb periódusú üstökös, amelyiknek kicsit több mint három év a periódusa?

- A. A Halley-üstökös. (19%)
- B. A Hale-Bopp-üstökös. (19%)
- C. Az Encke-üstökös. (23%)**
- D. Az ISON-üstökös. (39%)

15) Mi történik, ha a Föld áthalad egy üstökös csóváján?

- A. Az egész égen keresztül látjuk átívelni az üstököst. (67%)**
- B. Lehül a Föld légköre. (5%)
- C. Nem látunk semmit, mintha sűrű köd venne körül bennünket. (17%)
- D. Meghalunk a csóvában levő mérgező gázoktól. (11%)

16) Hány darabban csapódott be a Shoemaker-Levy 9 üstökös a Jupiterbe? Mennyi idő telt el körülbelül az első és az utolsó rész becsapódása között?

- A. Egy óra alatt 4 üstökös darab csapódott a bolygóba. (17%)
- B. Egy nap alatt 5 üstökös darab csapódott a bolygóba. (36%)
- C. Egy hét alatt 20 üstökös darab csapódott a bolygóba. (39%)**
- D. Egy hónap alatt 103 üstökös darab csapódott a bolygóba. (8%)

17) Mennyire közelítette meg 2013. november 28-án, (perihélium átmeneténél) a Napot az ISON-üstökös?

- A. Egy nap-átmérőnyire. (34%)**
- B. Tíz nap-átmérőnyire. (49%)
- C. Száz nap-átmérőnyire. (14%)
- D. Ezer nap-átmérőnyire. (3%)

18) Melyik űrszonda hozott a Földre üstökösport?

- A. Az európai Giotto. (6%)
- B. A japán Sakigake. (18%)
- C. Az amerikai Stardust. (44%)**
- D. Az amerikai Deep Impact. (32%)

19) Melyik üstökösre szállt le 2014-ben a Rosetta-űrszonda?

- A. A Halley-üstökös magjára. (46%)
- B. A Lovejoy-üstökös magjára. (14%)
- C. A Csurjumov-Geraszimenko-üstökösre. (17%)**
- D. A Donati-üstökösre. (23%)

20) Más csillagok körül már több ezer exobolygót ismerünk. Vannak exoüstökösök is?

- A. Nincsenek, mert a többi bolygórendszer más, mint a mi Naprendszerünk. (6%)
- B. Lehetnek, de nem tudjuk biztosan. (49%)
- C. Más csillagok körül is vannak üstökösök, de nem észleljük őket. (37%)
- D. Már több ilyen exoüstököst fel is fedeztek. (8%)**

Függelék 3. Üstökösök öt tanórás feldolgozása

	A téma órákra bontása	Ismeretanyag (fogalmak, szabályok)	Módszerek, munkaformák	Szemléltetés, eszközök	Házi feladat
1.	Az üstökösök, mint égi jelenségek.	Üstökös. (Felhő, kondenzcsík, rakétanyom, haljelenségek, meteor, csillaghalmaz, köd, galaxis.)	Frontális munka, csoportmunka. Játék (üstökös puzzle).	Papírképek, kivetített képek. Számítógép, projektor.	Írják le, hogy milyen üstökösökkel kapcsolatos kérdésekre szeretnének választ kapni. Válasszanak ki egy üstökösöt és hozzanak egy képet róla.
2.	Az üstökösök, mint naprendszerbeli égitestek.	Naprendszer és részei. Üstökös részei (mag, kóma, gáz- és porcsóva)	Tanári magyarázat, szemléltetés, csoportos megbeszélés.	Számítógépes prezentáció. Számítógép, projektor.	Egy (a választott) üstökösről információgyűjtés.
3.	Az üstökösök alkotóelemei.	Vízjég, szárazjég, nitrogén egyéb gázok, szénvegyületek, szilikátok, szerves vegyületek. Szublimáció. Napszél.	Tanári demonstráció, kísérlet, Játék az üstökös-maggal.	Anyagok, kellékek az üstökös készítéshez.	Milyen anyagokból áll a választott üstökös?
4.	Az üstökösök pályája, származási helye.	Kepler első törvénye, perihélium távolság, gravitációs erőtvény. Naprendszer külső vidékei (Kuiper-öv, Oort-felhő)	Tanári magyarázat, szemléltetés, csoportos megbeszélés.	Számítógépes prezentáció. Számítógép, projektor.	A választott üstökös pályájának jellemzői.
5.	Üstökösposzterek bemutatása. Felmerült kérdések megbeszélése.	Üstökösök.	Tanulói kiselőadás, poszter bemutatás.	Diákok által készített poszterek.	Milyen üstökösökkel kapcsolatos esemény lesz a közeljövőben?

A Kepler-törvények tanításához kapcsolódó segédanyagok

Függelék 4. Kepler személye, tudománytörténeti és irodalmi vonatkozások



F.3.1. ábra. Johannes Kepler (1571-1630) német matematikus csillagász¹.

Simonyi Károly szerint Johannes Kepler (1571-1630) „a tudománytörténet egyik legizgalmasabb egyénisége” [60]. Kepler mozgalmas, sokszor kalandos életét a magáról készített feljegyzéseiből és levelezéséből ismerjük, melyekben családjáról, ismerőseiről és életének eseményeiről is részletesen beszámol. Mikola Sándor szerint² „Kepler a világirodalom legőszintébb tudósa. Műveiben és igen kiterjedt levelezésében – amelyek teljességükben ránk maradtak – lelkének minden mozzanatáról, érzelmvilágának minden megrezdüléséről, próbálgatásairól, tudományos eljárásáról, kudarcairól és sikereiről egyformán számot ad.”. Több magyar nyelvű életrajzi regény is megjelent Keplerről és a tudománytörténettel kapcsolatos művekben is megtaláljuk. Ezek közül két könyv: Száva István: Az ég törvénye [61] és Arthur Koestler: Alvajárók [62]. Míg az első egy hiteles életrajzi regénye Keplernek, a második mű is részletesen foglalkozik vele, több más híres tudós mellett, hangsúlyozva az Univerzumról alkotott képünk változásában játszott jelentős szerepét. Kepler híres kortárs tudósai közül együtt dolgozott Tycho de Brahe-val, aki még a távcső előtti korszakban végzett igen pontos, megbízható csillagászati megfigyeléseket, méréseket. Ezek segítségével ismerte fel Kepler a bolygómozgás törvényeit. Galileivel³ kapcsolatban említésre érdemes közös

¹ <https://apod.nasa.gov/apod/ap010114.html>

² Mikola Sándor: A történeti Kepler – vonatkozással Az ember tragédiájára, Emlékkönyv Beöthy Zsolt születésének hatvanadik fordulójára. Írták tanítványai, barátai, tisztelői. Budapest: Az Athenaeum Irodalmi és Nyomdai R.T. nyomása, 1908. 375-390

³ Vekerdi László: Így élt Galilei, Budapest, Neumann Kht., 2004

vonása Keplernek a kopernikuszi heliocentrikus világkép elfogadása, bár ismerték egymás munkáit, írtak levelet egymásnak, szorosabb (munka)kapcsolat azonban nem alakult ki közöttük.

Diákjaink könnyen utána olvashatnak Kepler életrajzának, itt csak személyéről két fizikus gondolatait említem meg. Einstein méltató szavai Keplerről: „Éppen a mi gondoktól terhes és mozgalmas világunkban, amelyben olyan nehéz az embereknek és az emberi dolgoknak örülni, vigaszt nyújt számunkra, ha olyan nagy és szerény emberekre gondolhatunk, mint amilyen Kepler volt. Olyan időben élt, amikor a természeti jelenségek lefolyásának törvényszerű voltát még korántsem ismerték. Milyen nagy lehetett hite ebben a törvényszerűségben, amely erőt adott neki ahhoz, hogy a bolygók mozgását empirikusan, és e mozgások matematikai törvényszerűségeit évtizedek türelmes és fáradságos munkájával kutassa, magányosan, senki által sem támogatva, s csak kevesek által megértve.” [63]. Mikola Sándor pedig, akire híres fizikatanárként is emlékezünk, Keplert „melegszívű, élénk kedélyű, költői fantáziával megáldott tudós” egyéniségként jellemzi⁴, akinek „tragikus és küzdelmes fordulatokban gazdag élete” volt. Szerinte azért is kedves számunkra Kepler, „mert Madách őt szerepelteti, nem pedig azokat, kiknek neve inkább élt a köztudatban, pl. Kopernikust vagy Galileit.”.

Kepler élete, egyénisége valóban mély hatást gyakorolt Madách Imrere is, aki nemcsak Kepler életútját tanulmányozta, hanem műveit is olvasta. Az ember tragédiája című művének egyik kulcsszereplője Kepler, így a magyar irodalom tantárgyhoz is kapcsolódhatunk Madách ezen írásával, amely szerepel a diákjaink irodalmi tanulmányaiban 11. évfolyamon. A mű elemzése nem feladatunk fizikaórán, de Kepler szerepe kapcsán érdemes ismét Mikola Sándort idézni: „Lehetetlen nem éreznünk a tragikus mozzanatokat Kepler életében. Aki a hit lényegét felismerte s élete munkásságát isten dicsőségének kimutatására szentelte, az vallása miatt üldöztetésben részesül. S aki vallásos hitéhez való törhetetlen ragaszkodása miatt a kemény üldözéseket végigszenvedi, azt hitsorsosai heretikusnak tartják s exkommunikálják. Korának egyik legnagyobb szelleme, jobb meggyőződése ellenére kénytelen jóslatokat árulni, hogy éhen ne haljon, pedig a császár is barátja. Korának legfelvilágosodottabb embere kénytelen édesanyját védeni a legsötétebb babonáság vádjá: a boszorkányság ellen. És végül: aki a nagy mindenség harmóniáját felfedezte, gyermekkorától halála napjáig ide-oda hányatik. Hát nem tragikum ez? Kepler tragikuma a kiváló ember tragikuma, kit kora meg nem ért, nem méltányol; az ideális ember tragikuma, akit a hétköznapi élet reális követelményei fojtogatnak; a

⁴ Mikola Sándor: A történeti Kepler – vonatkozással Az ember tragédiájára

tisztességes becsületes ember tragikuma, aki nem számol az önző emberek törekvéseivel. Kepler mindent igazán hisz, képmutatásra nem képes, mindent becsületesen és tisztességesen akar, mások romlására nem törekszik. Ezért kell szenvednie. Szóval Kepler tragikuma „az ember” tragikuma, ha ezt a szót az ő nemes értelmében használjuk.”.

Kepler két színben is szerepel Az ember tragédiájában műben, a nyolcadikban és a tizedikben, de találhatunk a drámában máshol is utalásokat személyére, gondolataira. A mű más jeleneteiben is foglalkozik tudósokkal, a tudomány kérdéseivel, amelyekről lehet beszélni fizika órán is, de Keplerrel kapcsolatosan az asztrológia és egyéb áltudományok tárgyalása mindenképpen javasolt.

Függelék 5. Kepler és az asztrológia

Kepler nem hisz az asztrológiában, csillagjóslásban, de anyagi helyzete rákényszeríti ennek művelésére. Első felesége szeretett költekezni és abban a korban a horoszkópkészítést megfizették, míg az udvari csillagász állás jövedelme sokszor csak ígéretként létezett. Madách így fogalmazta meg Kepler kifakadását felesége felé művének nyolcadik színében:

„Nem fáradok-e éjet és napot,
Elárulom tudásomat miattad,
Mégfertőzőm, midőn haszontalan
Időjóslást, horoszkópot csinállok,
Eltitkolom, mit lelkem felfogott,
És hirdetem, mit jól tudok, hamis.
Pirulnom kell, mert rosszabbá levék,
Mint a szibillák, kik hívének abban,
Amit jósoldak, míg én nem hiszek.
De megteszem, hogy leljem kedvedet.
Hová teszem, mit bündijul kapok?
Hisz nékem nem kell semmi a világon,
Csak az éj és tündöklő csillaga,
Csak a szférák titkos harmóniája
Tiéd a többi. - Ámde ládd, ha a
Császár pénztára többnyire üres
Sok kérelemre rendetlen fizetnek.

Tiéd lesz most is, mit reggel kapok,
S te hálátlan vagy, ládd, ez fáj nekem.”

Kepler maga így ír erről: „Az asztrológia, a csillagászat leánya, bár hóbortos leánya, és vajon nem természetes-e, hogy a leány táplálja az anyját, ha az különben éhen halna.” [63]. A téma tárgyalása fontos, hiszen napjainkban is sokan hisznek a horoszkópokban, a média és a világháló is tág teret ad az asztrológiának. Szinte mindenki tudja, hogy mi a csillagjegye, de az állatöv csillagképeiről nem jut eszükbe az ekliptika, amely a Föld pályasíkja de a többi bolygóé is ehhez közeli.

A legújabb fizika és földrajz (okos)tankönyvekben szerepel az asztrológia (csillagjóslás) és asztronómia (csillagászat) megkülönböztetése, az asztrológia áltudományos minősítése. A nyolcadikos és kilencedikes fizika tankönyvekben, valamint a kilencedikes földrajz tankönyvben néhány mondatot írnak ezzel kapcsolatban, míg a tizenegyedik osztályos fizika tankönyv egy egész órányi tananyagban⁵ foglalkozik a tudomány, áltudomány és vallásos hit megkülönböztetésével. Itt kap hangsúlyos helyet az asztrológia tárgyalása is, az anyagrész címének is a következő kérdést választották: „Meg van írva a csillagokban?”. Igazodva az új oktatástechnikai trendekhez egy rövid, 8 perces videóban magyarázzák el a csillagjóslást és működését: „Kamuvadász sorozat: A megismerés útjai: asztrológia”. Ez a videó több más tantárgynál és tananyagnál is megtalálható például tizenkettedikes biológia okostankönyvben „A megismerő lény” anyagrésznél is. Fontosnak tartom, hogy tanárként hangsúlyozzuk, hogy az asztrológia nem a megismerésnek, hanem a jóslásnak az egyik módja. Az asztrológia kihasználja azt, hogy az emberek szeretnék ismerni sorsukat, tudni, hogy mi fog velük történni a jövőben. A csillagjósok az égitestek Földről látszó geometriai helyzetéből, illetve ennek változásából következtetnek az emberi jellemre, jövőbeli történésekre. Az asztrológia a geocentrikus világkép alapján, annak fogalomrendszerével dolgozik. A régi korokban az emberek isteneknek tekintették a Napot, Holdat, bolygókat, a csillagképek is egy-egy nép mondavilágát tükrözik. A megmagyarázhatatlan jelenségeket, történéseket természetfeletti beavatkozásoknak tekintették, az égbolt isteneinek is hatalmat tulajdonítottak például az emberek életének alakulása felett, ez szolgál az asztrológia alapjául is. Ugyan az emberek már nem tartják isteneknek az égitesteket, nagyrészt elvetik a földközéppontú világképet is, sajnálatos módon mégis olvassák a horoszkópokat és nem kevesen vannak, akik hisznek is bennük. Az asztrológiát „J. S. Bailly csillagász már a 18. század végén az emberi értelmet valaha is pusztító leghosszabb betegségnek minősítette” [65]. Kepler kényszerűségből,

⁵ https://www.nkp.hu/tankonyv/fizika_11/lecke_06_036

megélhetése céljából készített jóslatokat, de nyilván látva ezek beteljesülésének hiányát egyre bizonyosabbá vált számára, hogy semmi alapja sincs az asztrológiának. A Wallenstein hadvezérnek készített horoszkópja 24 jóslatából például csak 5 teljesült, de az sem akkor, amikor jelezte Kepler [65].

A témához kapcsolódik a világvége jóslatok egy része is, amelyekben nem egyénre szabottan, hanem a világ egészére szól a jóslat. A bolygókhoz kapcsolódóan különös jelentőséget tulajdonítanak az égbolton való közeli láthatóságuknak, az úgynevezett együttállásoknak. Minél több bolygó tartózkodik az égbolt egy kis tartományában, annál nagyobb az érdeklődés a jelenség iránt. Előfordul az is, hogy felsorakoznak a bolygók az égbolton. 1962. 2. 4-én nem csak az öt szabadszemmel látható bolygó látszott egy sorban, hanem a Hold és a Nap is a közelükben tartózkodott⁶. Ilyen elrendezésben természetesen a Nap mellett nem látszódnak a bolygók, de Indonéziában éppen teljes napfogyatkozás volt és így az esemény alatt a bolygókat is láthatták az ott élők. Az ilyen világvége jóslatokban természeti katasztrófákat jósolnak például nagyobb mértékű árapályt. A bolygók ilyen hatása bár létezik, de gyakorlatilag észrevehetetlen még akkor is, ha az összes bolygó a Föld egyik oldalán sorakozna fel.

Természetesen a bolygók valódi helyzetének ismerete nagyon fontos kozmikus környezetünk, a Naprendszer felfedezése szempontjából is. Az 1970-es és 1980-as években a külső bolygók ritka, közelítően egyirányban állása tette lehetővé a Voyager űrszondák segítségével többek között az Uránusz és a Neptunusz meglátogatását, lefényképezését [66]. Azóta sem indult űrszonda ezekhez a bolygókhoz csak a Plútó törpebolygóhoz, amelyik végül kimaradt a Voyager űrszondák útvonalából. Az űrmissziók nagyon energiaigényesek így nagy jelentősége van a bolygók gravitációs parittyahatásának kihasználásának. A hintamanőverként is ismert gravitációs rásegítés, lendítés jelentős mértékben megnövelheti vagy lecsökkentheti egy űrhajó sebességét, így ezzel nagymértékben csökkenteni lehet az űrhajó szükséges üzemanyagkészletét. A kívánt hatáshoz az űrhajó megfelelő távolságban, illetve szögben kell, hogy megközelítse a bolygót, ezért beszélnek indítási ablakokról. Egy ilyen különleges lehetőség állt elő az 1970-es évek végén, amelynél egy megfelelő pályájú űrszonda (Voyager 2. 1977. aug 20-i indítással) mind a négy külső bolygót meg tudta közelíteni. Ilyen helyzet körülbelül 175 évente adódik ezért örülhetünk, hogy az űrkorszak hajnalán is kihasználták ezt a lehetőséget.

⁶ Szabó Róbert: Bolygóegyüttállások, Meteor csillagászati évkönyv 2001

Több planetáriumi program segítségével megnézhetjük egy adott időpontban az égboltot, de léteznek olyan honlapok is, amelyeken a bolygók valóságos helyzetét láthatjuk. Ilyen honlap például a <http://www.fourmilab.ch/cgi-bin/Solar>, amelyen változtathatjuk a dátumot, attól függően, hogy mikor szeretnénk ismerni a bolygók helyzetét.

Függelék 6. A bolygófogalom fejlődése

A legtöbb embernek és diákjainknak is ismerősként hangzik a bolygó szó, de vajon mindenki ugyanazt érti-e alatta. Milyen bolygókról beszélhetünk, mit értünk a nagybolygó, a kisbolygó, a törpebolygó, az exobolygó vagy éppen a magányos (nomád) bolygó kifejezéseken? Minden kornak megvoltak a maga értelmezései és ezek nagyon nehezen változtak, az adott kor tudását tükrözték. Eleinte nem foglalkoztak a bolygók vagy csillagok mibenlétével, égi (égbolthoz tartozó) testeknek tekintették őket. Lényegében most is ez a legtágabb meghatározása a Földön kívüli testeknek, azok az égitestek. Évezredek óta átívelő probléma volt a bolygók mozgása, különös kihívást jelentett a hátráló mozgásuk leírása, magyarázata. Már az ókorban voltak elgondolások erre, közülük az arisztotelészi, ptolemaioszi geocentrikus világkép egészen a XVI. század végéig meghatározó volt. Ekkor sikerült Kopernikusz heliocentrikus rendszerét Keplernek továbbfejlesztenie, pontosítania. Az egyre bővülő tudásunk szerint változott a bolygókról alkotott képünk, de tudományos definiálásukra nem került sor egészen mostanáig. Általában felsorolták azokat az égitesteket, amelyeket bolygóknak tartottak és csak akkor változtattak ezen, ha túl sok eleme lett volna a bolygók halmazának.

A Nemzetközi Csillagászati Unió (IAU), 2006-ban osztályozta, definiálta a Naprendszer égitestjeit, köztük a bolygókat. Korábbi definíciója megmaradt az exobolygóknak (Naprendszeren kívüli bolygók), új kategóriát is bevezettek, a törpebolygókét, de például a kisbolygók már nem lettek tudományosan meghatározva, bár a nevük alapján mindenki számára világos lehet a jelentésük, de hivatalosan nincs ilyen égitest kategória.

A Naprendszer égitestjeit négy különböző csoportba sorolták a legújabb ismereteinknek megfelelően:

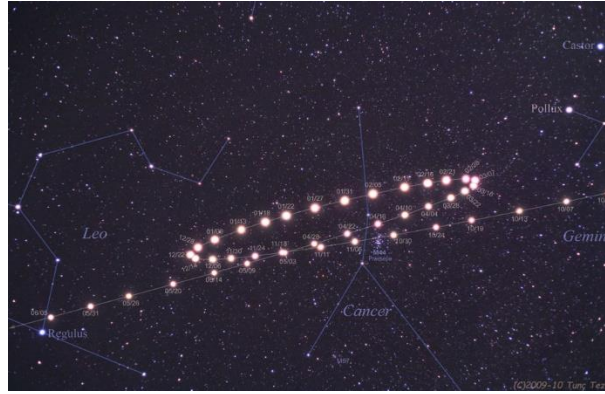
Bolygónak nevezzük azt az égitestet, amely a Nap körül kering, és elegendően nagy tömegű ahhoz, hogy kialakulhatott a hidrosztatikai egyensúlyt tükröző közel gömb alakja, valamint tisztára söpörte a pályáját övező térséget. Ezen meghatározás alapján a Naprendszerben nyolc bolygó található: a Merkúr, a Vénusz, a Föld, a Mars, a Jupiter, a Szaturnusz, az Uránusz és a

Neptunusz. A Plútó és a hozzá hasonló égitestek *törpebolygók*, melyek szintén a Nap körül keringenek, elegendően nagy tömegűek ahhoz, hogy kialakulhatott a hidrosztatikai egyensúlyt tükröző közel gömb alakjuk, de nem söpörték tisztára a pályájukat övező térséget. A Nap körül keringő összes többi objektumot a *Naprendszer kis égitestjei* közé soroljuk. A *holdak* a bolygók körül keringő égitestek [72].

Hogyan jutottak el a csillagászok ehhez az azóta is sok vitát kiváltó osztályozáshoz? Érdeemes nagy vonalakban áttekinteni ennek tudománytörténeti folyamatát, mert különben nehezen értjük meg a pontos meghatározás szükségességét.

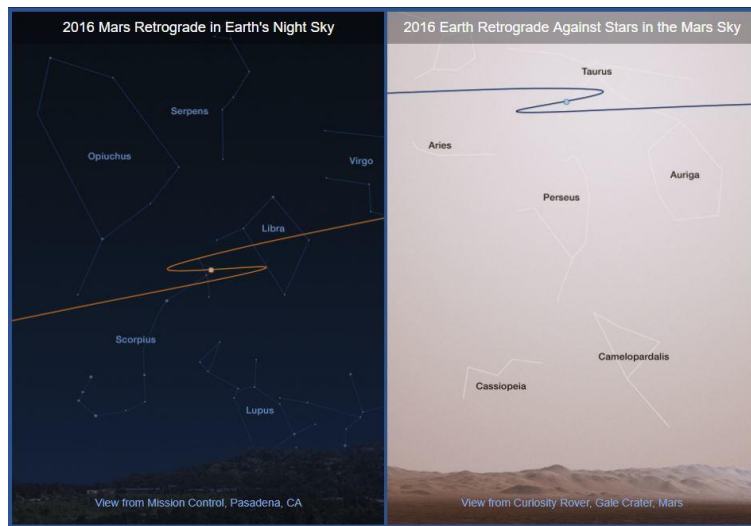
Egészen a távcső használata előtti időkhöz kell visszatérnünk és meg kell ismerkednünk az éjszakai égbolttal is. Elődeink éjszaka nemcsak gyönyörködtek a csillagos ég látványában, hanem észrevették az égitestek mozgásának törvényszerűségeit is. Látták, hogy a csillagok naponta keleten kelnek és nyugaton nyugszanak, még az állandóan látható, cirkumpoláris csillagok mozgásában is felfedezhető ez a keletről nyugatra való napi vándorlás. Csak a Sarkcsillag látszik gyakorlatilag mindig egy helyen az égbolton, kijelölve azt a pontot, amely körül a többi csillag rója éjszakáról éjszakára a köreit. Ugyan volt változás évszakokról évszakokra abban, hogy mely csillagok látszanak a Föld egy adott pontján éjjelente, de a csillagképek egyes tagjai mindig ugyanabban az elrendezésben tűntek fel. Ezt az égi rendet törte meg néhány (fényes) égi vándor, amelyeket bolyongó mozgásuk miatt el is neveztek bolygóknak. Ezek néha visszafordultak, hátráló, hurokszerű mozgást is mutattak. Kevés ilyen volt az égbolton és nem tudták az okát az emberek a különleges viselkedésüknek, ezért a Nappal és a Holddal együtt természetfölötti természetet tulajdonítottak a Merkúrnak, a Vénusznak, a Marsnak, a Jupiternek és a Szaturnusznak is.

Úgy tapasztaltam, hogy diákjaink nem ismerik a bolygók égbolton látszó mozgását, ezért fontosnak tartom ezt is megmutatni nekik. Leghatásosabb az lenne, ha napról napra figyelnék a bolygók (például a Mars) látszó mozgását, de ez nagyfokú kitartást és kevésbé fényszennyezett helyszínt igényel, ráadásul esti, éjszakai időpontban. Ha erre nincs lehetőségünk legalább képen, szimuláción kell megmutatnunk egy ilyen hátráló mozgást.



F.6.1. ábra. A Mars retrográd (hátráló) mozgása az égbolton. (Tunc Tezel, NASA)

Igazi érdekesség a Mars egén a Föld hátráló mozgásának bemutatása, amelyet a Curiosity marsjáró készített:



F.6.2. ábra. Baloldalt a Mars retrográd mozgása (a Földről nézve). Jobboldalt a Föld retrográd mozgása a Marsról nézve.

Az égi mozgások egyik magyarázataként, úgy gondolták az ókoron át egyenesen az 1500-as évekig, hogy minden égitest a Föld körül, égi szférákon (Arisztotelész, i.e.384-322) teszi meg előre megjósolható útját. Voltak ugyan másképp gondolkozók (Arisztarkhosz, i.e. 310-230), akik a csillagos ég törvényszerűségeit eltérően magyarázták, a Napot helyezték a világ közepére és körülötte keringett a többi égitest. Herakleidész (i.e. 500 körül élt) azon megfigyelésből, hogy a Merkúr és a Vénusz mindig a Nap irányából látszik, úgy gondolta, hogy ez a két bolygó a Nap körül kering, de a többit a Föld körül keringőnek tartotta ő is. Ez a kétközéppontú, geoheliosztatikus elmélet lényegében megegyezik Tycho Brahe (1546-1601) világképével, aki korának legpontosabb megfigyelő csillagásza volt. A heliocentrikus világképet pedig Nikolausz Kopernikusz (1473-1543) elevenítette fel, úgy, hogy matematikailag is kidolgozta a részleteit.

Bár leírása nem volt egyszerűbb és pontosabb az addig uralkodó, Ptolemaiosz (87-165) által tökéletesített geocentrikus rendszerhez képest, de alapvetően megváltoztatta az égitestekről alkotott képet. A Föld is egy lett a bolygók között. Az égi vándorok már nem istenségek voltak, hanem a Földhöz valamilyen szempontból hasonló testek. Johannes Kepler (1571-1630) el tudott vonatkoztatni a tökéletes körpályáktól és az egyenletes mozgástól is, első törvénye szerint a bolygók ellipszis pályákon keringenek a Nap körül, míg a második törvényéből a pályamenti sebességre, illetve annak változására is következtethetünk. Az ő általa készített bolygótáblázatok, már pontosabbak voltak az előzőleg használtaknál. Kepler harmadik törvénye a bolygók keringési ideje és a pályájuk fél nagytengelye között ír le kapcsolatot, amely alapján a Naprendszer felépítésére, a bolygók Naptól való távolságaira következtethettek, legalábbis az arányokra. Galileo Galilei (1564-1642) elsők között vizsgálta távcsővel az eget és többek között a Holdon hegyeket látott, megerősítve a Hold Földhöz való hasonlóságát. Christiaan Huygens (1629-1695) a Marson látott elmosódott felszíni részleteket, Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) pedig a Mars sarki jégsapkáit fedezte fel. Isaac Newton (1642-1727) pedig magyarázatot is adott a bolygók mozgására a gravitációs törvényével.

Tehát a 17. században már bolygónak a Nap körül keringő égitesteket nevezték: a Merkúrt, a Vénuszt, a Földet, a Marst, a Jupitert és a Szaturnuszt. Miután ismerték a bolygók Naptól való távolságát (a Nap-Föld átlagos távolsággal, vagyis a csillagászati egységgel kifejezve) összefüggéseket kerestek ezen adatokban. Johann Daniel Titius (1729-1796) talált is egyet, amelyet Johann Elert Bode (1747-1826) népszerűsített, így az utókor Titius-Bode szabályként ismeri. E szerint a bolygók pályáinak fél nagytengelyeire igaz, hogy:

$$a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$$

A képlet helyességének megállapításához az F 6.1. táblázatban már a később felfedezett „bolygókat” is láthatjuk (a távolságok csillagászati egységben értendők):

Bolygó	n	a (számolt)	a (valódi)	Bolygó	n	a (számolt)	a (valódi)
Merkúr	$-\infty$	0,4	0,39	Jupiter	4	5,2	5,2
Vénusz	0	0,7	0,72	Szaturnusz	5	10	9,55
Föld	1	1	1	Uránusz	6	19,6	19,2
Mars	2	1,6	1,52	Neptunusz	7	38,8	30,1
Kisbolygók	3	2,8	2,77 (Ceres)	Plútó	8	77,2	39,5

F 6.1. táblázat: A bolygók Naptól való számolt és valódi távolságai (a fél nagytengely)

Kezdetektől látszott, hogy hiányzik egy bolygó ($n=3$) a Mars és a Jupiter között, el is kezdték keresni. Néhány éven belül, 1781-ben William Herschel (1738-1822) távcsöves észlelései során véletlenül felfedezte az Uránuszt. Amint a fenti táblázat is mutatja az Uránusz is beleillett a Titius-Bode szabályba. A keresett résben is elég hamar találtak bolygót, 1801-ben Giuseppe Piazzi (1746-1826) megtalálta a Cerest. Utána szinte évente találtak a Mars és a Jupiter között keringő bolygókat, amelyek ugyan halványak voltak, de számuk egyre nőtt. Matematikusok hada számolta ezeknek az égitesteknek a pályáját, hogy könnyen követhetők, megfigyelhetők legyenek. Megjósolták az Uránusz pályaháborgásaiból, hogy rajta kívül is létezik még bolygó. A kiszámolt helyen felfedezték a Neptunuszt 1846-ban (Gottfried Galle, 1812-1910). Ez a bolygó már nem illett bele a Titius-Bode szabályba. A kisbolygóövben felfedezett égitestek száma továbbra is gyarapodott és egyértelműen kisebbek voltak a „nagybolygóktól”, ezért számukra a kisbolygó elnevezést kezdték használni. Tehát a 19. század végén bolygónak a Nap körül keringő nagyobb égitesteket nevezték, ezek voltak a Merkúr, Vénusz, Föld, Mars, Jupiter, Szaturnusz, Uránusz és a Neptunusz.

A Neptunusz pályaháborgásaiból is következtek (Percival Lowell, 1855-1916) újabb, Neptunuszon túli bolygóra, a bolygók utáni keresés tehát nem maradt abba. A siker 1930-ban Clyde Tombaughnak (1906-1997) a Plútó megtalálásához köthető, bár a későbbi számítások szerint a Neptunusz pályamozgását a Plútó léte sem magyarázza teljesen. A 20. században a Plútóval együtt már 9 bolygóról beszéltek, a meghatározás maradt, Nap körül keringő nagyobb égitesteket nevezték bolygónak. Persze az nem volt egyértelmű, hogy mit nevezünk nagyknak. A Plútó sugara 1200 km, míg a Ceresé kevesebb, mint 500 km, tehát jelentős a különbség. Az 1990-es évektől a távolabbi, Neptunuszon túli Kuiper-övben is egyre több égitestet fedeztek fel. Ezek közül a 2003-ban felfedezett Eris volt a legjelentősebb, mert az első adatok szerint még a Plútónál is nagyobbnak gondolták, felmerült, hogy a tizedik bolygónak kellene tekinteni. A későbbi pontosabb adatok alapján a Plútóhoz hasonló méretű, de 27%-kal nehezebb. Ismét el kellett gondolkodni arról, hogy mely égitesteket nevezzük bolygónak, amelyre végül a már említett 2006-os IAU közgyűlésen került sor. Több csillagász érzi fontosnak az égitestek, köztük a bolygók definíciójának további pontosítását, vannak, akik egységes definíciót szeretnének, amelyben nem különülnek el a Naprendszer bolygói. Más bolygórendszerekben nem annyira az alsó tömeghatár, hanem inkább a felső meghatározása jelent problémát, valamint a szabadon mozgó, nomád bolygók besorolása.

Függelék 7. A területi törvény és perdület megmaradása, a bolygók pillanatnyi sebessége

Kepler második törvénye a perdület megmaradásának következménye. A perdület tömegpontra:

$$\vec{N} = \vec{r} \times m \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{r} \times m\vec{v}$$

megváltozása: $\Delta\vec{N} = \vec{M} \cdot \Delta t = (\vec{r} \times \vec{F}) \cdot \Delta t = \vec{0}$, hiszen \vec{r} és \vec{F} egyirányú, így vektoriális szorzatuk nullvektor lesz.

Tehát

$$\vec{N} = \vec{r} \times m \frac{d\vec{r}}{dt} = \text{áll.}$$

a bolygók tömegét állandónak vehetjük így

$$\vec{r} \times \frac{d\vec{r}}{dt} = \text{áll.}$$

$$\frac{1}{2} \left| \vec{r} \times \frac{d\vec{r}}{dt} \right| = \frac{1}{2} \frac{|\vec{r} \times d\vec{r}|}{dt} = \text{áll.} = v_{\text{területi}}$$

ahol $\frac{1}{2} |\vec{r} \times d\vec{r}| = T_{\text{ellipsziscikk}}$.

Az egyenlő időtartamok egyenlő területek törvénye nem csak a bolygómozgásra igaz, hanem bármilyen centrális erő hatására végbemenő mozgásra teljesül. A fenti levezetésben is csak az erő és sugár (távolság) vektorok párhuzamosságát használtuk feltételként.

A bolygó perihélium és aphélium helyzetében merőleges a sugárra a sebesség, így a két helyzetben a perdület egyenlőségéből a következő egyszerű összefüggés kapható:

$$r_p \cdot m \cdot v_p = r_a \cdot m \cdot v_a$$

ahol r_p a perihélium távolság (bolygó-Nap távolsága napközelen), v_p a bolygó sebessége napközelen, r_a az aphélium távolság és v_a a bolygó sebessége naptávolban. Egyszerűsítve:

$$r_p \cdot v_p = r_a \cdot v_a$$

Fontos megemlíteni, hogy v_p egyben a bolygó pályamenti sebességének maximális értéke, míg v_a a bolygó pályamenti sebességének minimális értéke.

A bolygók pillanatnyi sebessége

A bolygók pillanatnyi sebessége: $v = \sqrt{f \cdot M \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$

Ennek levezetéséhez, magyarázatához ismerni kell a keringő test összenergiájának képletét:

$$E_{\text{össz}} = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{f M m}{r}$$

Az energia megmaradása alapján a perihélium és aphélium helyzetekben az összenergia ugyanakkora:

$$\frac{1}{2} m v_p^2 - \frac{f M m}{r_p} = \frac{1}{2} m v_a^2 - \frac{f M m}{r_a}$$

Egyszerűsítve, majd rendezve:

$$\frac{1}{2} v_p^2 - \frac{f M}{r_p} = \frac{1}{2} v_a^2 - \frac{f M}{r_a}$$

$$\frac{1}{2} v_p^2 - \frac{1}{2} v_a^2 = \frac{f M}{r_p} - \frac{f M}{r_a}$$

A perdületmegmaradásból következik, hogy $r_p \cdot v_p = r_a \cdot v_a$, amelyből $v_a = \frac{r_p}{r_a} \cdot v_p$

$$\frac{1}{2} v_p^2 - \frac{1}{2} v_a^2 = \frac{1}{2} v_p^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{r_p^2}{r_a^2} v_p^2 = f M \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_a} \right)$$

$$\frac{1}{2} v_p^2 \left(1 - \frac{r_p^2}{r_a^2} \right) = f M \left(\frac{r_a - r_p}{r_p \cdot r_a} \right)$$

$$\frac{1}{2} v_p^2 \left(\frac{r_a^2 - r_p^2}{r_a^2} \right) = \frac{1}{2} v_p^2 \left(\frac{(r_a + r_p) \cdot (r_a - r_p)}{r_a^2} \right) = f M \left(\frac{r_a - r_p}{r_p \cdot r_a} \right)$$

$$\frac{1}{2} v_p^2 \left(\frac{(r_p + r_a) \cdot (r_p - r_a)}{r_a^2} \right) = f M \left(\frac{r_a - r_p}{r_p \cdot r_a} \right)$$

felhasználva, hogy $r_p + r_a = 2a$ összefüggést:

$$\frac{1}{2} v_p^2 \left(\frac{r_p + r_a}{r_a} \right) = \frac{1}{2} v_p^2 \left(\frac{2a}{r_a} \right) = f M \left(\frac{1}{r_p} \right)$$

$$\frac{1}{2}v_p^2 = fM \frac{r_a}{2a \cdot r_p}$$

Visszahelyettesítve az összenergia képletébe:

$$E_{\text{össz}} = \frac{1}{2}mv_p^2 - \frac{fMm}{r_p} = \frac{fMm \cdot r_a}{2a \cdot r_p} - \frac{fMm}{r_p} = fMm \left(\frac{r_a}{2a \cdot r_p} - \frac{2a}{2a \cdot r_p} \right)$$

$$E_{\text{össz}} = fMm \cdot \frac{-(2a - r_a)}{2a \cdot r_p} = -fMm \frac{r_p}{2a \cdot r_p} = -\frac{fMm}{2a}$$

Az összenergia negatív volta kötött pályára utal. A kapott összefüggésünk mutatja, hogy a pálya összenergiája csak a nagytengely hosszától függ és például nem függ a pálya excentricitásától.

$$E_{\text{össz}} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{fMm}{r} = -\frac{1}{2} \frac{fMm}{a}$$

A bolygó tömegével egyszerűsítve és átrendezve az egyenletet kapjuk, hogy

$$\frac{1}{2}v^2 - \frac{fM}{r} = -\frac{1}{2} \frac{fM}{a}$$

$$v^2 = \frac{2fM}{r} - \frac{fM}{a} = fM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$$

$$v = \sqrt{fM \cdot \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$$

Ezt az egyenletet, szokták vis viva egyenletnek is hívni.

Függelék 8. A Nap-Föld távolság meghatározása

Már az ókorban is voltak elképzelések a Föld, Hold, Nap méretének és egymástól való távolságának meghatározására, de az ehhez szükséges mérési pontosság sokáig hiányzott. A fogyatkozásokból és geometriai megfontolásokból sajnos a nagyon pontatlan adatok miatt nem sikerült megfelelő értékekhez jutni, főleg a Nap esetében.

Kepler korában még csak a Nap és egyes bolygók távolságának arányát ismerték. A belső bolygóknál a legnagyobb kitérés szögéből, míg a külső bolygóknál egy oppozíció és egy másik helyzet segítségével lehet meghatározni a Naptól számított bolygótávolságok arányát. Kepler harmadik törvénye alapján a keringési idők ismeretében még pontosabban számolta ki a Naptól

való bolygótávolságok arányát. A valós értékeket nem tudta meghatározni, a legjobb becslése is 3469 földugár volt a Nap-Föld távolságra (Nap parallaxisát 1'-nek vélte, a helyes érték⁷: 8,79"). Bár Eratoszthenész elég jó értéket számolt a Föld méretére a mérések folytatódtak Kepler korában és utána is. Newton gravitációs törvénye (1687-ben) egyben felhívás volt a gravitációs állandó meghatározására is. Mind a méretek, távolságok meghatározása, mind a gravitációs állandó mérése igen nagy pontosságot kívánt. A mérések módszerei ismertek voltak, de a megvalósításuk már nem volt könnyű. Henry Cavendish (1797-1798-ban) érzékeny torziós ingával megmérte a gravitációs állandót és ezzel ismerté vált a Föld tömege ($\approx 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$) és átlagsűrűsége is ($5,45 \text{ g/cm}^3$).

A Föld méretének és a Föld-Nap távolság egyre pontosabb meghatározásához sokszor veszélyes és hosszú expedícióra indultak a tudósok. Problémát okozott az idő pontos mérése is.

A bolygóátvonulások a napkorong előtt alkalmasak a Nap-Föld távolság meghatározására. Kepler bolygómozgást leíró törvényei segítségével pontos bolygótáblázatokat készített (Rudolf-féle táblázatok, 1627), amelyek a távcsöves észlelések korában is megállták hosszú ideig helyüket és egyben a Kepler-törvények helyességét is bizonyították. Kepler megjósolta 1629-ben, hogy két év múlva, mind a Merkúr (1631 novemberében), mind a Vénusz (1631 decemberében) átvonul a Nap korongja előtt. Felhívta a figyelmet arra is, hogy a Vénusz-átvonulást nem lehet majd Európából látni, de Amerikában, illetve az óceánon hajózók megfigyelhetik. Kepler elsőként jelezte a bolygóátvonulásokat, lehetőséget teremtve ezzel a megfigyelésükre. Sajnos 1630-ban bekövetkező halála megakadályozta mind az átvonulások észlelésében, mind jóslata beteljesülésének megérésében. Nincs adat arról, hogy valaki is megfigyelte volna a Vénusz-átvonulást 1631-ben, de a Merkúrét többen is látták, köztük Pierre Gassendi (1592-1655 francia csillagász), aki részletes beszámolót is készített róla, de ekkor még nem használták ezt a Nap-Föld távolság meghatározására. Az viszont eredménye volt ennek a megfigyelésnek, hogy a Merkúr látszó átmérőjét jóval kisebbnek találták annál, mint amelyet addig feltételeztek (Kepler is). Kepler megjósolta az 1761-es Vénusz-átvonulást is, de táblázatai annyira nem voltak tökéletesek, hogy az 1639-es Vénusz-átvonulást is kiolvasta volna az adatokból. Johan Philip van Lansberge (1561-1632 holland csillagász, matematikus) saját táblázataiból meghatározta, majd Jeremiah Horrox (1618-1641 angol csillagász) meg is erősítette az 1639-es Vénusz-átvonulást. Horrox így egyike lett a Vénusz-átvonulást először megfigyelőknek, de ebben az esetben is csak arra az eredményre jutott, hogy a Vénusz látszó

⁷ Donald A. Teets: Transits of Venus and the Astronomical Unit, Mathematics Magazine (An Official Publication of The Mathematical Association of America) Vol.76. No. 5, December 2003

átmérője is jóval kisebb az addig gondoltak. James Gregory (1638-1675 skót matematikus, csillagász) 1663-ban már felvetette, hogy az átvonulásokat fel lehet használni a Nap-Föld távolság meghatározására. Edmond Halley (1656-1742, angol királyi csillagász), miután megfigyelhetett egy Merkúr-átvonulást 1677-ben, felismerte, hogy a Vénusz-átvonulásból sokkal könnyebb pontosabb eredményt kapni, így a következő két Vénusz-átvonulásra (1761 és 1769) nemzetközi összefogást sürgetett, minél több és lehetőleg egymástól messze levő helyszíneken történő mérésekhez⁸. Az átvonulások megfigyeléséhez kapcsolódó, sokszor kalandos történetek jó kapcsolódási pontok a történelem (Nagy-Britannia és Franciaország hétéves háborúja) és a földrajz tantárgyakhoz.

A már említett csillagászokon kívül mindenképpen érdemes megemlíteni a magyar vonatkozásokat is, Hell Miksa (1720-1792 csillagász) és Sajnovics János (1733-1785 csillagász, nyelvész) vardői expedícióját (1769). Hell Miksa több írást is megjelentetett a témával kapcsolatosan, de a napparallaxis szögét megállapító tanulmánya vitákat váltott ki az elismerés helyett. Az átvonulások megfigyelésének történetéről és a Nap-Föld távolság (Csillagászati Egység) meghatározásáról többek között Döményné Ságodi Ibolya: A légkörfizika és a csillagászat elemeinek felhasználása a fizika középszintű oktatásában című értekezésében, és Abonyi Iván: Hell Miksáról, aki 1769-ben elsőként mérte meg a Nap-Föld-távolságot című Fizikai Szemle (2010/7-8) cikkben olvashatunk.

A Vénusz napkorong előtti átvonulása igen ritka jelenség (előre ismert időpontok voltak: 1631, 1639, 1761, 1769, 1874, 1882, 2004, 2012), de vannak más módok is, amelyekből szintén következtetni lehet égitestek távolságára, majd Kepler harmadik törvénye segítségével további távolságokra. Bizonyos időközönként a Mars megközelíti a Földet akár 0,371 Csillagászati Egységre is. 1672-ben majdnem elérte ezt az értéket, 0,381 Csillagászati Egységre közelítette meg bolygónkat. Giovanni D. Cassini (1625-1712 itáliai matematikus, csillagász) Párizsban míg Jean Richer (1630-1696 francia matematikus, csillagász) Cayenne-ben (Francia Guyana) végzett (parallaxis) méréseket és ezek összehasonlításából következtettek a Csillagászati Egység $1,32 \cdot 10^8$ km-es értékére⁹, amely közelítőleg 10%-os alulbecslése a valódi értéknek ($1,49 \cdot 10^8$ km).

⁸ Donald A. Teets: Transits of Venus and the Astronomical Unit, Mathematics Magazine Vol.76. No. 5, 2003
Jay M. Pasachoff, Bernd Gährken, Glenn Schneider: Using the 2016 Transit of Mercury to find the distance to the Sun, Physics Teacher, 2017 jan. 30

⁹ Christine M. Rodrigue: The Geography of Mars Lab, Cassini, Richer, and Picard Experiment, 1672
F. Mignard: Astronomical distance scales in the Gaia era, Comptes Rendus Physique, Special issue: The new International System of Units 2019

Célszerű említést tenni a modern radaros és műholdas mérésekről is. Már 1946-ban Bay Zoltán vezetésével radar segítségével meghatározták a Föld-Hold távolságot, egyidőben amerikai tudósokkal. 1969-ben tükröt is helyeztek el a Holdon a további lézeres mérések segítésére. Sikerült a Vénusz távolságát is radar (rádióhullámok) segítségével megmérni 1961-ben¹⁰.

Természetesen a Nap-Föld távolság az év során változik, hiszen a Föld ellipszis pályán kering a Nap körül, így nem beszélhetünk egy értékről, csak átlagos Nap-Föld távolságról, vagy a földpálya fél-nagytengelyének hosszáról. Az egyre pontosabb mérések ezt az értéket is pontosították, folyamatosan változott, míg 2012-ben a Nemzetközi Csillagászati Unió magát a csillagászati egységet lerögzítette 149597870700 m-nek¹¹. (Sor került ekkor a nap 86400 s-ként és a csillagászati tömeg egység $1,9891 \cdot 10^{30}$ kg-ként való definiálására is. Az állandóságra való törekvés megjelent a Nemzetközi Mértékegységrendszer megújításában is 2018-ban.)

A Nap-Föld távolság ismeretében Kepler harmadik törvényének alkalmazásával már meg tudták határozni, hogy milyen nagy a Naprendszer, legalábbis az akkor ismert része.

Függelék 9. A Nap és más égitestek tömegének meghatározása

Kepler harmadik törvényének általánosabb alakjából meghatározható a Nap tömege:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{f \cdot M_{Nap}}{4\pi^2}$$

$$M_{Nap} = \frac{4\pi^2 \cdot a^3}{f \cdot T^2} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

Holddal rendelkező bolygó tömegének meghatározása is lehetséges hasonló módon:

$$\frac{a_h^3}{T_h^2} = \frac{f \cdot M_b}{4\pi^2}$$

$$M_b = \frac{4\pi^2 \cdot a_h^3}{f \cdot T_h^2}$$

¹⁰ G. H. Pettengill : A Radar Investigation of Venus, *Astronomical Journal*, Vol. 67, p. 181 (1962)

¹¹ Measuring the Universe, <https://www.iau.org/public/themes/measuring/>
IAU 2012 Resolution B2, on the re-definition of the astronomical unit of length
https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2012_English.pdf

Kepler még nem ismerhette a bolygók, vagy a Nap tömegét és Newton is csak a holddal rendelkező bolygók tömegének a Nap tömegéhez való arányát ismerhette:

(Feltételezzük, hogy a bolygó a Naphoz képest, a hold a bolygóhoz képest elhanyagolható tömegű.) Kepler harmadik törvénye a hold-bolygó illetve a bolygó-Nap rendszerekben:

$$\frac{a_h^3}{T_h^2} = \frac{f \cdot M_b}{4\pi^2}$$

$$\frac{a_b^3}{T_b^2} = \frac{f \cdot M_{Nap}}{4\pi^2}$$

A két egyenletet elosztva egymással kapjuk:

$$\frac{\frac{a_h^3}{T_h^2}}{\frac{a_b^3}{T_b^2}} = \frac{a_h^3}{T_h^2} \cdot \frac{T_b^2}{a_b^3} = \left(\frac{a_h}{a_b}\right)^3 \cdot \left(\frac{T_b}{T_h}\right)^2 = \frac{\frac{f \cdot M_b}{4\pi^2}}{\frac{f \cdot M_{Nap}}{4\pi^2}} = \frac{M_b}{M_{Nap}}$$

$$M_b = \left(\frac{a_h}{a_b}\right)^3 \cdot \left(\frac{T_b}{T_h}\right)^2 \cdot M_{Nap}$$

Kepler harmadik törvénye lehetőséget ad a gravitációs állandó meghatározására is:

$$\frac{a_b^3}{T_b^2} = \frac{f \cdot M_{Nap}}{4\pi^2}$$

$$f = \frac{4\pi^2 \cdot a_b^3}{M_{Nap} \cdot T_b^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (1,49596 \cdot 10^{11} \text{ m})^3}{1,9885 \cdot 10^{30} \text{ kg} \cdot (3,1558 \cdot 10^7 \text{ s})^2} = \frac{132,166 \cdot 10^{33} \text{ m}^3}{1,9885 \cdot 10^{30} \text{ kg} \cdot 9,959 \cdot 10^{14} \text{ s}^2}$$

$$= 6,675 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

A gravitációs állandó egy 2000-es minden addiginál pontosabb mérés szerint

$f = (6,674215 \pm 0,000092) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, tehát az egyezés középiskolában megfelelő, de nem ilyen módon fogják pontosítani az értékét.

Kepler harmadik törvényének általánosabb, az égi mechanikában használt alakja, amelyet pontosabb számításoknál használnak:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{k^2}{4\pi^2} (m_1 + m_2)$$

ahol a a pályae ellipszis félnagy tengelye, T a keringési idő, és m_1 és m_2 a két tömeg k a Gauss-féle gravitációs állandó, amelynek értéke $k \approx 0,0172 M^{\frac{-1}{2}} A^3 T^{-1}$, (M a Nap tömege, A a csillagászati egység, T a középnap) [97].

A bolygók tömege elenyésző a Napéhoz képest (a legnagyobb bolygóé a Jupiteré is csak ezrede a Napénak) ezért a számításban a bolygótömeg elhanyagolható, és az összefüggés jobb oldala minden bolygóra (közel) ugyanaz. Hasonlóan egyszerűsödik az összefüggés egy olyan bolygóhold rendszer esetén, amelynél a bolygó tömegéhez képest elhanyagolható a holdak tömege (például a Jupiter és holdjai), de természetesen az állandó értéke változik, a Nap tömege helyett a Jupiter tömegével kell számolnunk.

Tehát Kepler harmadik törvényének segítségével ki lehet számítani egy olyan égitest tömegét, amelynek holdja van, vagy műhold kering körülötte. Így határozták meg pl. az (243) Ida kisbolygó tömegét a körülötte keringő kicsiny hold, a Dactyl pályadataiból. A Galileo űrszonda repült el az aszteroida mellett (Jupiter felé tartó útján 1993-ban) és az általa készített képeken fedezték fel a holdját. Az űrszonda 5,5 órán keresztül figyelhette a rendszert és a mérésekből a Dactyl hold 85 km-re volt akkor az Ida kisbolygótól és 6 m/s sebességgel mozgott a kisbolygóhoz képest¹². Az űrszonda adataiból nem sikerült pontosan meghatározni a hold pályáját. Mind a kisbolygó, mind holdja szabálytalan hosszúkás alakú, így most nem kezelhetjük tömegpontként az égitesteket, mint a közel gömb alakú bolygókat és a Napot. A Dactyl hold pályája nem lesz egyszerű ellipszis, mind az egyenlőtlen tömegeloszlás, mind más égitestek (Nap, közeli bolygók) perturbáló hatása miatt.

A felfedezés rövidsége nem tette lehetővé például a hold keringési idejének pontos megállapítását, viszont a hold kisbolygóhoz viszonyított sebességét ismerjük. Ilyen adatok alapján is következtethetünk a kisbolygó (helyesebben a kisbolygó és a holdjának együttes) tömegére. Körpályát feltételezve Kepler harmadik törvényéből:

$$v = \sqrt{\frac{f \cdot (m_1 + m_2)}{R}}$$

ahol v a két égitest egymáshoz viszonyított sebessége, R az egymástól való távolságuk¹³.
Átalakítva:

¹² Michael J. S. Belton és társai: The Discovery and Orbit of 1993 (243)1 Dactyl, Icarus, Volume 120, Issue 1,

¹³ Douglas W. MacDougal: Newton's Gravity, An Introductory Guide to the Mechanics of the Universe, Springer, 2012

$$(m_1 + m_2) = \frac{v^2 \cdot R}{f}$$

Az Ida kisbolygó és holdjának adataiból¹⁴ látszik, hogy méreteiben legalább húszszoros, térfogatában és így feltételezhetően tömegében is akár tízezerszerese is lehet a kisbolygó a holdjához képest, tehát jó közelítéssel az együttes tömeg a kisbolygó tömegét mutatja.

Érdekes lehet összehasonlítani a felfedezéskor ismert adatokból számított tömeget, a hold későbbiekben meghatározott pályadataival ($a=108$ km, $T=1,54$ nap $\approx 1,33 \cdot 10^5$ s) a szokásos módon számolt értékkel:

$$M_{Ida} \approx \frac{R \cdot v^2}{f} = \frac{8,5 \cdot 10^4 \cdot 6^2}{6,675 \cdot 10^{-11}} \text{ kg} = 4,584 \cdot 10^{16} \text{ kg}$$

$$M_{Ida} \approx \frac{4\pi^2 \cdot a^3}{f \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (1,08 \cdot 10^5)^3}{6,675 \cdot 10^{-11} \cdot (1,33 \cdot 10^5)^2} \text{ kg} = 4,209 \cdot 10^{16} \text{ kg}$$

Az Ida kisbolygó tömegére a csillagászok által megadott érték: $M_{Ida} = 4,2 \cdot 10^{16} \pm 6 \cdot 10^{15} \text{ kg}$

Vannak olyan esetek, amikor a sebesség ismert, de a keringési idő bizonytalanabb, így akkor az első módon határozhatjuk meg a rendszer együttes tömegét. Aszteroidák tömegét vagy holdjuk adatainak segítségével, vagy egy odaküldött űrszonda méréseiből határozhatjuk meg, ezért van jelentősége az ilyen többes rendszerek felfedezésének, amelyek közül az első megerősített eset volt az Ida kisbolygó Dactyl holdja¹⁵.

Elképzelhető olyan eset is, amikor nem látjuk a központi égitestet csak a körülötte keringőt. Galaxisunk közepén levő fekete lyuknak (Sgr A*) nemcsak a létezését bizonyították a 2020-as Nobel-díjat kapó tudósok, hanem például a tömegét is meghatározták. A fekete lyuk körül keringő S2 jelű csillagnak a keringési idejét körülbelül 16 évnek, míg félnagy tengelyét 1000 CsE-nek határozták meg [98], [99], így a fekete lyuk tömege égi mechanikai mértékegységeket (csillagászati egység, középnap, Nap-tömeg) használva:

$$M = \frac{4\pi^2 \cdot a_{S2}^3}{k^2 \cdot T_{S2}^2} = \frac{4\pi^2 \cdot 10^9}{0,0172^2 \cdot (16 \cdot 365,256)^2} \approx \frac{39,48 \cdot 10^9}{10106} \approx 4 \cdot 10^6 m_{Nap}$$

¹⁴ <http://www.johnstonsarchive.net/astro/astmoons/am-00243.html>

¹⁵ <http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoons.html>

Függelék 10. Asztrobiológiai, exobolygós kérdéssor

1. Mit gondolsz, egyedül vagyunk az Univerzumban, vagy vannak máshol is értelmes lények a Világegyetemben?
2. El tudnál képzelni a földitől eltérő életformákat is? Röviden írd le elképzeléseidet!
3. Hol keresnéd az „idegeneket”?
4. Hogyan, milyen módszerrel keresnéd a földönkívüli élet nyomait?
5. Mit jelent számodra az élet? Melyek azok az életjelenségek, amelyek megkülönböztetik az élőt az élettelen anyagtól?

A természettudományos kutatások az előző kérdésekre nem adnak biztos, egyértelmű választ, de úgy gondoljuk, hogy a földihez hasonló élet, földihez hasonló körülmények között létezhet. Napjaink egyik fontos kutatási területe „bolygók” keresése más csillagok körül. Ezek neve extraszoláris- (Naprendszeren kívüli) vagy röviden exobolygók.
6. Szerinted mennyi exobolygót ismernek már? (Tudják például a tömegét, keringési periódusát.)
7. Mit gondolsz, a felfedezett exobolygók mennyire hasonlítanak, illetve mennyire különböznek a mi Naprendszerünkben található bolygóktól?
8. Válaszd ki az egyik kedvenc sci-fi filmedben levő, Naprendszeren kívüli exobolygót, és gondold át, hogy lehet-e ilyen a valóságban? Esetleg találtak már ehhez hasonlót?
9. Mit gondolsz, eljut valaha ember egy távoli exobolygóra?
10. Milyennek kellene lenni egy exobolygónak, hogy egyáltalán érdemes legyen odamenni? Mitől lakható egy bolygó az ember számára?
11. Szerinted létezik a Föld „ikertestvére” valahol a Világegyetemben?
12. Melyek azok a fontos tulajdonságai a Földünknek, amelyeket elvárnánk egy exobolygótól, hogy „másik Földnek” hívhassuk?
13. Mit gondolsz találtak már ilyen exobolygót?
14. Te hogyan keresnél exobolygókat?

15. Hallottál már exobolygókereső módszerekről? Ha igen, írd le őket!

16. Mit gondolsz, a magyar kutatók (csillagászok) mennyire tudnak bekapcsolódni ilyen kutatásokba? Van már magyar felfedezésű exobolygó?

17. Ha téged is érdekel ez a téma, írd le milyen kérdésekre szeretnél választ kapni az exobolygókkal kapcsolatosan! Ha nem érdekelnek az exobolygók vagy a földönkívüli élet keresése, akkor azt írd le, hogy miért nem fontos ez a téma számodra!

Függelék 11. A 2011. évi (májusi) középszintű fizika érettségi exobolygós (3/A) feladatának szövege és ábrái¹⁶:

3/A Az exobolygók (azaz a mi Naprendszerünkön kívüli bolygók) egy része olyan pályán kering a csillaga körül, hogy a Földről nézve áthalad a csillag előtt. Ilyen exobolygókat, különösen a nagyobbakat, fel lehet fedezni úgy, hogy a csillag fényességét folyamatosan mérve észleljük, amikor a bolygó áthalad előtte, ugyanis ilyenkor a bolygó részleges takarása miatt a mért fényesség lecsökken. Az első grafikon mutat egy tipikus mérési görbét, ahol a csillagfény intenzitásának százalékos csökkenése van feltüntetve.

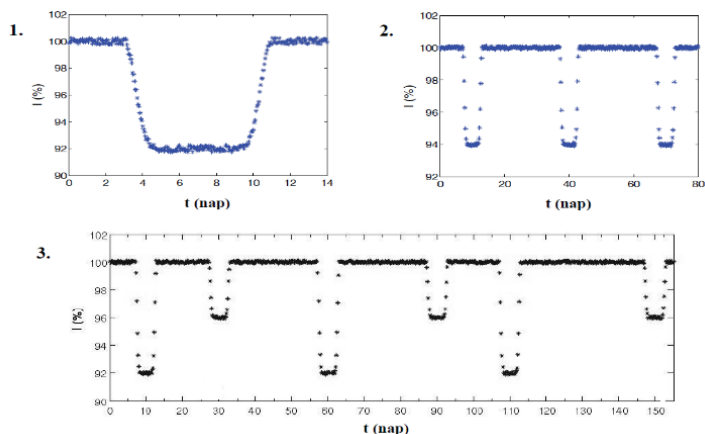
a) Körülbelül mennyi idő alatt haladt át a bolygó a csillag előtt?

b) Mit mondhatunk a görbe alapján a csillag és a körülötte keringő bolygó átmérőjének viszonyáról (arányáról)?

c) A második ábra egy másik csillag fényintenzitásának az előzőnél hosszabb időn át mért változását tartalmazza. A csillag felületének mekkora hányadát takarja ki a bolygó? Mekkora a keringés periódusideje és nagyságrendileg mennyi idő alatt halad át a csillag előtt a bolygó?

d) A harmadik grafikon egy harmadik csillag fényintenzitásának mérési eredményét mutatja. Olvassa le a grafikonról a fényintenzitás csökkenések közelítő időpontjait! Mi lehet a magyarázata annak, hogy a fényintenzitás-minimumok eltérő mértékűek? Hogyan értelmezhető az egymást követő fényintenzitás-minimumok között eltelt időintervallumok eltérő nagysága?

¹⁶ https://www.oktatas.hu/pub_bin/dload/kozoktatas/erettsegi/feladatok2011tavasz/k_fiz_11maj_fl.pdf



A javítási-értékelési útmutató ide vonatkozó része:

3/A feladat

a) A bolygó áthaladási idejének leolvasása a görbéről: **(2 pont)**

A bolygó kb. 8 nap alatt halad át a csillag előtt (a csillag fényességcsökkenésének kezdetétől a teljes fényesség újbóli eléréséig számítva).

(Nem kell hibának tekinteni, ha a vizsgázó csak a kb. 6 napig tartó minimális fényességű időszak tartamát olvassa le, így a 6 nap is teljes pontszámot ér. Ez a megjegyzés a továbbiakban is érvényes.)

b) A takarás mértékének megállapítása: **(2 pont)**

A csillag felületének 8%-át takarja ki a bolygó.

A csillag, illetve a bolygó sugara közti viszony kiszámítása: **(4 pont, bontható)**

A bolygó és a csillag látszólagos felületének viszonya 0,08.

$$\frac{r^2 \cdot \pi}{R^2 \cdot \pi} = 0,08 \quad (2 \text{ pont}) \quad \text{amiből} \quad \frac{2r}{2R} \approx 0,28 \quad \text{arány adódik} \quad (2 \text{ pont}).$$

c) Az adatok helyes leolvasása: **(4 pont, bontható)**

A bolygó a csillag látszólagos felületének kb. 6%-át takarja ki (1 pont).

A bolygó 30 napos periódusidővel kering a csillag körül (2 pont).

A bolygó áthaladási ideje kb. 2-8 nap (1 pont)

(Mivel a grafikonról az áthaladás ideje csak rosszul látható, a becslést tág határok között kell elfogadni.)

d) A közelítő időpontok helyes leolvasása: (2 pont, bontható)

(2 pont akkor adható, ha mind a hat adatot helyesen olvasta le a vizsgázó. 1 pontot egynél nem több félreolvasás esetén lehet adni.)

Az eltérő mértékű fényintenzitás-csökkenés magyarázata: (3 pont, bontható)

A csillag körül két, különböző átmérőjű bolygó kering. (A két bolygó felismerése 2 pont, a különböző átmérőre utalás 1 pont. Egyéb értelmes ötletekre, magyarázatokra 1 pont adható.)

Az egymást követő fényintenzitás-csökkenések között eltelt időintervallumok eltérő voltának magyarázata: (3 pont, bontható)

Hol az egyik, hol a másik bolygó takarja a csillagot. A két exobolygó keringési periódusa különböző. (A két bolygó váltakozó lefedésére való utalás 1 pont, a különböző periódusidő kimondása 2 pont.)

Összesen 20 pont

Függelék 12. Asztrobiológiai szakköri tematika

Foglalkozás megnevezése	Foglalkozás témája	Foglalkozás módszertana	Elvárt eredmények
1. Egy kis asztrobiológia	A téma ismertetése	Irányított témaválasztás, tanulói érdeklődés felmérése. A téma iránti elkötelezettség részeként elküldtük neveinket a Marsra.	A földönkívüli élet keresésével kapcsolatos témák megismerése, érdeklődés felkeltése.
2. Az élet	Mi az élet, melyek a fontosabb életjelenségek, élettelen és élő közötti különbségek (Gánti Tibor chemoton elmélete)	Egyénileg és csoportosan keressük a témával kapcsolatos kérdésekre a választ. Vita és tanári előadás. Interaktív számítógépes játék.	Diákjaink találkoznak nehezen definiálható fogalommal (élet). Az élet jellemzőinek keresésénél önmagukról is többet tudnak meg.
3. Élet a Marson	Egy kis történeti bevezetőben bemutatjuk, hogy az emberek körében elterjedt hiedelem volt, hogy a Marson (értelmes) lények vannak, voltak. Diákjaink véleménye után ismertetjük, mit találtak űrszondáink a Marson.	Kvíz kérdések után tanári előadás sok képpel, szimulációval.	Várhatóan diákjainkban is vannak tévképzetek bolygó szomszédunkkal kapcsolatosan, ezek helyesbítése, valamint a Mars megismertetése a célunk.
4. Emberek a Marson	Egy Marsról szóló film (The Martian, Mentőexpedíció) megtekintése, amelyik NASA alkalmazottak, űrhajósok szaktanácsadásával készült.	Filmélmény általi ismeretszerzés.	Diákjaink megismerjék a Marsi körülményeket.
5. Emberes marsutazás	A látott film alapján megbeszéljük, hogy milyen nehézségekkel jár mind a Marsra való utazás, mind az ott tartózkodás. A Mars One projekt bemutatása.	Filmelemzés. Vita, szerepjáték. Megoldások keresése.	Egyre többet hallani a médiában az emberes marsutazásról, ennek a projektnek minél több oldalát világítjuk meg tudományos szempontok szerint. Vitakultúra fejlesztése.
6. Élet keresése a Naprendszerben	Mi szükséges az élethez? Folyékony vizet tartják a legfontosabbnak, ezt keresik.	Csoportmunka.	Tudatosítjuk, hogy mivel nem ismerünk másfajta életet ezért a földihez hasonlót keressünk, amelynek alapja a folyékony víz. Fizikából, kémiából tanultak alkalmazása.
7. Holdak felszín alatti óceánjai	Egyre több naprendszerbeli holdról derül ki, hogy felszínalatti vízréteggel rendelkezik.	Előadás, gyűjtőmunka.	Az árapályerők lehetővé teszik, hogy a Naptól messze is előfordulhasson folyékony víz.

Foglalkozás megnevezése	Foglalkozás témája	Foglalkozás módszertana	Elvárt eredmények
8. Naprendszerbeli égitestek áttekintése	Az eddig nem tárgyalt bolygók, törpebolygók, kisbolygók holdak és üstökösök bemutatása a lakhatósági viszonyok előtérbe helyezésével.	Diák előadások, tanári kiegészítéssel.	A Naprendszer megismerése, égitestjein lévő fizikai viszonyok bemutatása. Űrkutatás, űrszondák.
9. Exobolygók	A Naprendszeren kívüli élet keresésének helyszínei az exobolygók, vagyis más csillagok körül keringő bolygók. Az exobolygókutatás története, különleges exobolygók.	Kvíz. Előadás.	Galaxisunk megismerése. Vannak hasonló és másféle bolygórendszerek is, mint a Naprendszer.
10. Exobolygó felfedezési módszerek	A négy legfontosabb módszer ismertetése számítógépes szimulációk segítségével.	Előadás. Számítógépes szimulációk.	Tananyagot túlmutató fizikai ismeretek: fénygörbék, Dopplertolódás, gravitációs mikrolencse.
11. Exobolygókeresés	Nyilvános adathalmazok bemutatása, keresési módszerek alkalmazása	Számítógépes adatfeldolgozás. (Planethunter program)	Kutatási módszer megismertetése, kipróbálása.
12. Lakható exobolygók	Lakhatósági zóna definiálása, elhelyezkedésének függése a csillag típusától.	NASA Eyes on Exoplanet interaktív oldalon lakható exobolygók keresése.	Földönkívüli lehetséges élőhelyek megismerése.
13. Föld ikertestvére	Földhöz hasonló lakható exobolygók.	Gyűjtőmunka. Előadás.	Exobolygó katalógusok megismertetése, használata.
14. Exobolygó légkörök	Biomarkerek keresése exobolygók légkörében.	Ötletbörze, irányított vita	Diákjaink megismerik, hogy milyen jelei vannak az életnek.
15. Diákakadémiai előadások	Lakható élőhelyek az Univerzumban.	Tanulói előadások.	A tanulói előadás segít rögzíteni az eddig tanultakat.
16. Exobolygókereső távcsövek	Exobolygókereső földi és űrtávcsövek bemutatása.	Előadás, gyűjtőmunka.	A csillagászati kutatások technikai környezete, és hatása mindennapjainkban (fényképezés fejlődése).
17. Értelmes élet keresése	Drake-egyenlet, SETI program ismertetése. Csillagközi kommunikáció.	Önálló becslés, számolás. Ötletbörze.	Matematikai alkalmazás, Drake-egyenlet alakítása. Rádióhullámok, az emberiség üzenetei a világűrbe.
18. Űrutazás	Csillagászati távolságok. Űrhajók. Fermi paradoxon.	Csoportmunka, számolás. Logikus gondolkodás.	Hasonlatok keresésével próbáljuk felfogni a csillagászati távolságokat. Az idő és energia problematikája az űrutazásban.

Foglalkozás megnevezése	Foglalkozás témája	Foglalkozás módszertana	Elvárt eredmények
19. Élet az űrállomáson, űrturizmus	Súlytalanság hatása az élő szervezetre, sugárzási veszélyek.	Gyűjtőmunka. Előadás. A nemzetközi Űrállomás bemutatása filmen.	Az emberi szervezetben bekövetkező változások a súlytalanság hatására.
20. Extremofil életformák	Milyen szélsőséges körülmények között található életet.	Gyűjtőmunka. Előadás.	Extrém körülmények között is vannak élőlények, az egész Földön elterjedt az élet.
21. A földi élet	A földi élet kialakulásának, fejlődésének, sokszínűségének bemutatása.	Előadás, gyűjtőmunka, törzsfa készítés egyénileg.	Megismerik diákjaink az élet keletkezésének, fejlődésének főbb lépéseit.
22. Társadalmi hatások	Milyen hatással lenne az emberiségre, ha találnánk a Földön kívül is életet?	Csoportmunka, vita.	Saját vélemény megfogalmazása, indoklása a témában.

Függelék 13: IOAA felkészítő feladatsor megoldásokkal (2019)

Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia

12. feladatsor megoldása

1. feladat (Mod. csil. fgy. 2.8.)

Az alábbi táblázat a Pegazus csillagképben látható 51 Pegasi nevű csillag sebességének mért értékeit mutatja a napban számított eltelt idő függvényében. (A sebességértékek pontatlansága mindössze ± 5 m/s körül van.)

Idő (nap)	Sebesség (m/s)
0,62	56
0,71	67
2,60	-35
3,64	-33,5
3,82	-23
6,65	-23
7,61	-44
7,66	-34
8,61	25
8,75	41
9,60	61
10,66	-2,5
10,71	1
10,75	-5
11,69	-39
12,61	3

(Adatok: Marcy, G. W., Butler, R. P., Williams, E., Bildsten, L., Graham, J. R., Ghez, A. M., & Jernigan, J. G. 1997, *Astrophysical Journal*, 481, 926)

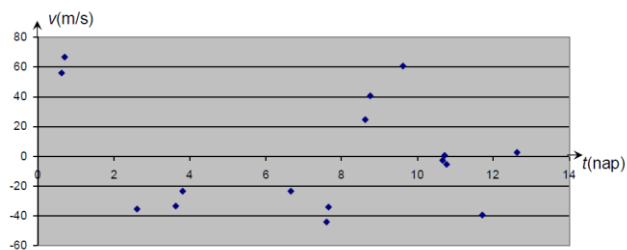
a, Ábrázold a csillag sebességét az idő függvényében, és határozd meg a körülötte keringő exobolygó keringési periódusát!

b, Mekkora az exobolygó pályájának fél nagytengelye, ha feltételezzük, hogy az 51 Pegasi tömege egyenlő a Nap tömegével?

c, Becsüld meg az exobolygó tömegét! Hasonlítsd össze a Föld, illetve a Jupiter tömegével!

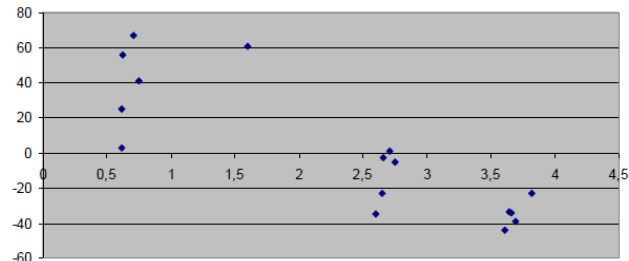
Megoldás:

a, Az ábrázolt pontokhoz szinuszos függvényt kellene illesztenünk, de a grafikon nem mutat szembetűnő periodicitást.



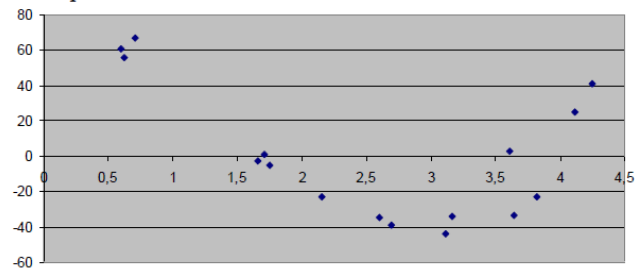
Van egy maximum valahol 1 és 2 nap között, a következő maximumnál nincs adat, majd van egy csúcs valahol 9 és 10 nap között. Ez alapján próbálkozhatunk 4 napos periódussal: tekintsük az időadatokat mod 4.

4 nap:



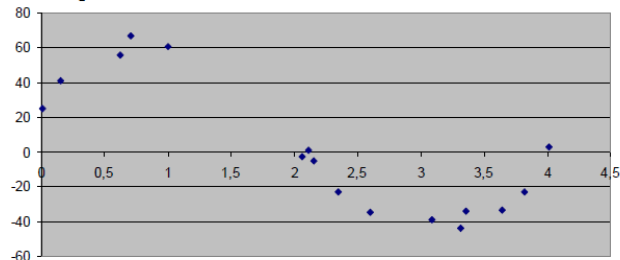
Kissé eltérő periódusokkal próbálkozva azt találjuk, hogy 3,5 nap rosszabbat, 4,5 nap viszont valamivel jobb eredményt ad. Ez már inkább görbét mutat, de nem szinuszgörbét (akkor találtuk meg a periódust, ha a grafikon egy szinuszos függvénynek egyetlen periódusát mutatja).

4,5 nap



Tovább közelítve megállapíthatjuk, hogy a periódus 4,25 nap körül van. **2 pont**

4,25 nap



b, Nap-tömegű csillagra az évben kifejezett periódusidő négyzete egyenlő a csillagászati egységben kifejezett fél nagytengely köbével.

$$T=4,25 \text{ nap}=0,0116 \text{ év}, \quad a = 0,0116^{\frac{2}{3}} = 0,0514 \approx 0,05 \text{ CsE}$$

Tehát a bolygó mindössze huszadakkora távolságban kering a csillagától, mint a Föld. (Kb. a Merkúr távolságának a nyolcada a kapott érték.) **1 pont**

c, A becsléshez tételezzük fel, hogy a bolygó körpályán kering. Ekkor a bolygó sebessége:

$$v_B = \frac{2\pi a}{T} = \frac{2\pi \cdot 0,0514 \cdot 1,5 \cdot 10^{11}}{4,25 \cdot 24 \cdot 3600} = 130000 \frac{m}{s} = 130 \frac{km}{s}$$

Tételezzük fel továbbá, hogy a keringés síkjára éléről látunk rá, vagyis a fenti grafikonról leolvasható maximális sebesség a csillag sebessége. A grafikon maximum-értéke kb. +65 m/s, a minimuma kb. -45m/s, a sebességingadozás amplitúdója tehát kb. 55 m/s. A sebességek a tömeggel fordítottan arányosak, a bolygó tömege tehát:

$$m_B = m_{Nap} \cdot \frac{v_{cs}}{v_B} = 2 \cdot 10^{30} \cdot \frac{55}{130000} = 8 \cdot 10^{26} kg$$

Ez a Föld tömegének mintegy 140-szerese, a Jupiter tömegének valamivel kevesebb, mint a fele. **2 pont**

2. feladat (Mod. csill. fgy. 1.8.)

Egy exobolygó $e=0,2$ excentricitású, $a= 4$ CSE félnagytengelyű pályán kering. A csillag lakhatósági zónája $r_{belső}=3$ CSE és $r_{külső}=4$ CSE között húzódik. Számítsd ki, hogy a bolygó a keringési időnek hány százalékát tölti a lakhatósági zónában!

Megoldás:

$$c = 0,2a = 0,8 \text{ CSE}$$

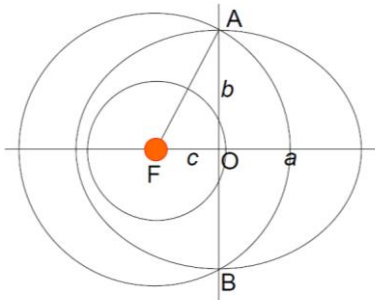
$$a - c = 3,2 > 3 \text{ CSE},$$

a lakhatósági zóna belső határán belül tehát sosem tartózkodik a bolygó. **1 pont**

A lakhatósági zóna külső határának távolsága megegyezik a fél nagytengellyel, ezért a lakhatósági zóna külső határát a bolygó a kistengely végpontjaiban lépi át.

A bolygó területi sebessége állandó, ezért azt kell kiszámítani, hogy az FA és FB sugarak által határolt kisebbik cikk hányad része az ellipszis területének. **1 pont**

A cikk területe a fél ellipszis mínusz az OFA háromszög kétszerese:



$$\frac{\frac{ab\pi}{2} - bc}{ab\pi} = \frac{\frac{\pi \cdot c}{2} - a}{\pi} = \frac{1}{2} - \frac{c}{a\pi} = \frac{1}{2} - \frac{e}{\pi} = 0,5 - \frac{0,2}{\pi} = 0,44 = 44\% \quad \mathbf{3 \text{ pont}}$$

3. feladat

Milyen határok között változik a Halley üstökös sebessége?

Megoldás:

A Halley üstökös olyan ellipszis pályán kering a Nap körül, amelynek egyik gyújtópontjában a Nap található.

Az ellipszis pályán keringő üstökös pillanatnyi sebességét (a Naphoz rögzített koordináta-rendszerben) a következőképpen számolhatjuk:

$$v = \sqrt{G \cdot M_N \cdot \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)} = \sqrt{\frac{G \cdot M_N}{a} \cdot \left(\frac{2a}{r} - 1\right)} \quad (\text{vis-viva egyenlet})$$

ahol G a gravitációs állandó, a a fél nagytengely, M_N a Nap tömege, r pedig a vezérsugár aktuális értéke. Az üstökös sebessége napközben a legnagyobb és naptávolban a legkisebb, tehát ezeket az értékeket kell meghatározni. **2 pont**

Adatok: **1 pont**

$$a = 17,84 \text{ CsE} \approx 2,66 \cdot 10^{12} \text{ m}$$

$$r_{\text{perihélium}} = 0,587 \text{ CsE} \approx 8,75 \cdot 10^{10} \text{ m}$$

$$r_{\text{aphélium}} = 35,11 \text{ CsE} \approx 5,23 \cdot 10^{12} \text{ m}$$

$$M_n \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

$$v_p = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30}}{2,66 \cdot 10^{12}} \left(\frac{2 \cdot 2,66 \cdot 10^{12}}{8,75 \cdot 10^{10}} - 1 \right)} \approx 5,47 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{1 pont}$$

$$v_a = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30}}{2,66 \cdot 10^{12}} \left(\frac{2 \cdot 2,66 \cdot 10^{12}}{5,23 \cdot 10^{12}} - 1 \right)} \approx 9,3 \cdot 10^2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{1 pont}$$

4. feladat (Mod. csill. fgy. 2.5.)

Nagyságrendi becslés:

(a) Mekkora sugarú pályán kering a Nap a Nap-Jupiter rendszer tömegközéppontja körül?

(b) Mekkora a keringés sebessége?

(c) Egy idegen csillagász 10 pc távolságból a Napot figyeli. Szuperérzékeny spektrográfiával egymilliomodnyi $\Delta\lambda/\lambda$ Doppler-eltolódást már ki tud mutatni. Fel tudja fedezni műszerével a Jupitert?

Megoldás:

a, A Nap és a Jupiter tömegaránya $\frac{2 \cdot 10^{30}}{1,9 \cdot 10^{27}} \approx 1000$

a tömegközéppont tehát kb. a Jupiter pályasugarának ezredrészére van a Nap középpontjától.

A keresett sugár tehát $0,001r = 0,001 \cdot 7,8 \cdot 10^{11} \text{ m} \approx 8 \cdot 10^8 \text{ m}$. **1 pont**

b, A Jupiter keringési periódusa kb. 12 év

$$v = \frac{2r\pi}{T} = \frac{2\pi \cdot 8 \cdot 10^8}{1,9 \cdot 10^8} = 13 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{1 pont}$$

c, A Jupiter miatti Doppler-eltolódás csak

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = \frac{13}{3 \cdot 10^8} \approx 4 \cdot 10^{-8} \ll 1 \cdot 10^{-6} \quad \text{2 pont}$$

Nem tudja kimutatni. 1 pont

5. feladat (Mod. csill. fgy. 3.10.)

A STEREO műhold-pár a Nap körül kering. Egyikük a Föld pályáján kissé belül, a másik pedig kissé kívül. Így két nagy távolságra levő pontból, különböző irányból tudják egyidejűleg megfigyelni ugyanazt a jelenséget, ezáltal képesek háromdimenziós képet alkotni napkitörésekről, viharokról és más, a Nap felszínén vagy annak közelében lejátszódó eseményekről. Vizsgálhatók velük a Napból a Föld felé haladó plazmafelhők is. Meghatározható a távolságuk, sebességük, alakjuk stb.

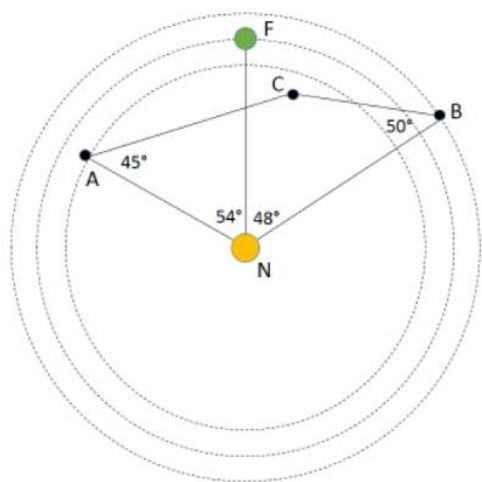
Az ábrán N a Nap, F a Föld, A és B a két STEREO műhold, és egy koronakitörésből származó C plazmafelhő közelít a Földhöz.

Az A műhold mérése szerint az NAC szög 45° , B műhold szerint pedig az NBC szög 50° .

A mérés pillanatában az ANF szög 54° , a BNF szög 48° .

A Föld pályája 150 millió km sugarú körnek tekinthető,

az A műhold pályasugara 145 millió km, a B műholdé 156 millió km.



(a) Határozd meg a CF távolságot és a CNF szöget.

(b) Ha a napkitörésből származó plazmafelhő 2 millió km/h sebességgel halad, mennyi idő alatt tette meg az NC távolságot?

Megoldás:

a, Az ANB háromszögben ANB szög: $54^\circ + 48^\circ = 102^\circ$

Koszinusztétellel $AB^2 = 145^2 + 156^2 - 2 \cdot 145 \cdot 156 \cdot \cos 102^\circ$

$$AB = 234$$

Az NBA háromszögben az NBA szög (β) szinusztétellel

$$\sin \beta = \sin 102^\circ \cdot \frac{145}{234}$$

$\beta < 102^\circ$, tehát $\beta = 37,3^\circ$.

Az ABC szög így $50^\circ - 37,3^\circ = 12,7^\circ$ **1 pont**

Az ABC háromszögben szinusztétellel

$$AC = 234 \cdot \frac{\sin 12,7^\circ}{\sin 163^\circ} = 176$$

Az ACN háromszögben a CN oldal koszinusztétellel

$$CN^2 = 150^2 + 176^2 - 2 \cdot 150 \cdot 176 \cdot \cos 45^\circ$$

$CN = 127$ millió km. **1 pont**

Az ANC szög (ν) szinusztétellel

$$\sin \nu = \sin 45^\circ \cdot \frac{176}{127}$$

$\nu < 102^\circ$, tehát $\nu = 78,5^\circ$. **1 pont**

A keresett FNC szög tehát

$$78,5^\circ - 54^\circ = 24,5^\circ$$

Az FNC háromszögben a CF oldal koszinusztétellel:

$$CF^2 = 150^2 + 127^2 - 2 \cdot 150 \cdot 127 \cdot \cos 24,5^\circ$$

$CF = 63$ millió km. **1 pont**

b, $CN = 127$ millió km, a sebesség 2 millió km/h, tehát kb. 60 óra alatt ért C-be. **1 pont**

