

Úrtan a hőtanban¹

Komáromi Annamária

Szent István Király Zeneművészeti Szakközépiskola, Budapest

Bevezetés

A 21. század első évtizedében nemcsak Magyarországon, de egész Európában válságban a fizika tanítása. Felmérések támasztják alá, hogy a diákok számára nem vonzó tantárgy. Rajtunk, fizikatanárokon múlik, hogy ezen változtassunk. Ezen a téren különböző innovációs kísérletek folynak. Mindenképpen arra van szükség, hogy a kísérleteknek az eredményessége ne csak abban nyilvánuljon meg, hogy többen jelentkeznek a tudományegyetemek fizika szakára, illetve több diák választja a műszaki pályát, hanem az egész ifjúság számára szerethetőbbé kell tenni a fizikát. Én egy művészeti szakközépiskolában tanítok, itt próbálok megbirkózni ezzel a kihívással.

A kiindulási pontom az, hogy a huszonegyedik században, amikor az emberiség egész jövőjét befolyásoló folyamatokról állandóan hallani a médiában, fontos lenne, hogy fizikaórán se ugyanúgy és ugyanazokat a gyakorlati példákat tárgyaljuk meg, amikor a fizika alapvető fogalmait és általános törvényszerűségeit tanítjuk, mint húsz, harminc, vagy akár ötven évvel ezelőtt, hanem kövessük a tudományos kutatások új eredményeit, s azokon keresztül is próbáljuk jobban megértetni a tananyagot. Mindezt úgy, hogy egyúttal érdekes és izgalmas legyen azok számára is, akik nem kifejezetten reálérdeklődésűek. Az én választásom az űrkutatásra, s azon belül különösen nagy hangsúllyal a műholdakra és alkalmazásukra esett.

Első hallásra talán merész vállalkozásnak tűnik, hogy a műholdak és alkalmazásaik segítségével illusztráljuk és magyarázzuk a középiskolai fizika tananyag nagy fejezeteinek alapvető törvényszerűségeit. Néhány éve ennek kidolgozásával foglalkozom és tanórai bevezethetőségének módszertanát kutatom. Munkám eddigi eredményeit az ELTE Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása Programjának keretében folytatott kutatási tevékenység keretében kívánom összegezni és bemutatni.

Azért esett a választásom az űrkutatásra, mert a mai ember élete minden percében együtt él olyan eszközökkel és szolgáltatásokkal, amelyek igen magas műszaki színvonalat képviselnek, s komoly kutatási, ezen belül gyakran űrkutatási eredményeket alkalmaznak, továbbá az űrkutatás révén olyan jelenségekről szerezhetünk egyre

¹ A BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar Egyesült Innovációs és Tudásközpontja, valamint a Magyar Asztronautikai Társaság által 2015. február 13-án megrendezett 1st International Conference on Research, Technology and Education of Space (H-SPACE 2015) konferencián elhangzott előadás anyaga.

bővülő ismereteket, amelyek meghatározó tényezői bolygónk további sorsának. Az űrkutatás témaköre az eddigi években éppen csak egy-két óra erejéig volt jelen az iskolai tantervben. S bár eddig is szerepeltek a fizika tankönyvekben a műholdak, de leginkább csak a Kepler-törvények és a körmozgás témakörében.

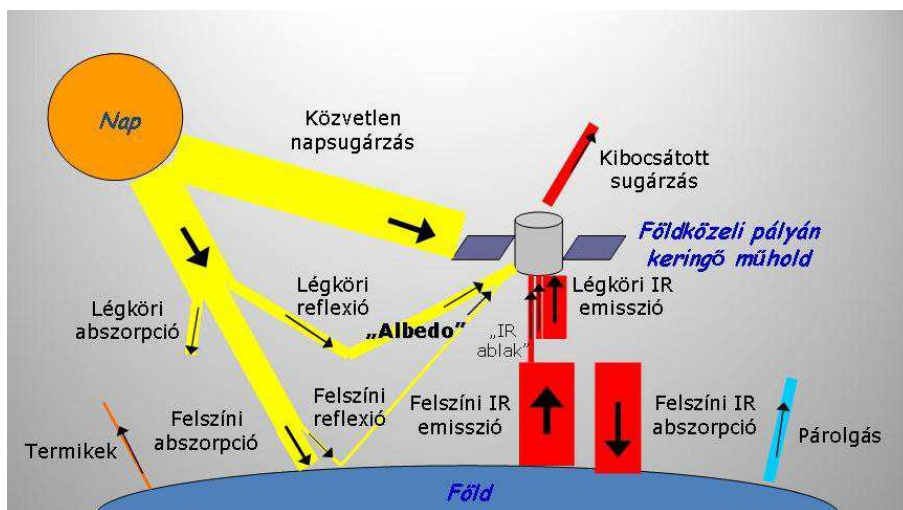
Jelen cikkben a fizika egy olyan területén mutatom be az űrkutatás – ezen belül a műholdak – tananyagba történő beágyazását, mely első ránézésre talán nem tűnik nyilvánvalónak: ez a hőtan. Célul tűztem ki, hogy minél többet hivatkozzak a Masat-1 műholdra, hiszen ez a műhold nemcsak hazánk büszkesége, de tekintettel arra, hogy a tervezői nagyrészt egyetemista diákok, akik csak néhány évvel idősebbek a középiskolás korosztálynál, ezáltal a diákokhoz talán közelebb lehet hozni magát a fizikát is. A Masat-1-nek azért is helye van a fizikaórán, mert tulajdonképpen egy rendkívül sikeres kísérletet követhetünk általa nyomon.

A hőmérséklet fogalma a Földön és az „égben”

A hőtan témakörének bevezetésekor megtárgyaljuk a hőmérséklet fogalmát. Itt érdemes „elrugaszkodni” képzeletben a Földről és megbeszélni, hogy a tengerszinthez képest kb. 10 km magasságban haladó utasszállító repülőgépek esetében hány fokos a külső környezeti hőmérséklet. Majd továbbléphetünk, és egy on-line műholdkövető honlap felkeresése közben feltehetjük a kérdést, mekkora hőmérsékletű térben keringenek a műholdak. Erre már nem biztos, hogy tudnak válaszolni. Mondjuk el, hogy a műholdak rendkívül nagy külső hőmérsékleti tartományban kell, hogy jól működjenek. Ekkor megbeszélhetjük velük, hogy nem mindegy, hogy a műhold keringése során – bár abban a magasságban a hőmérséklet közel állandó – melyik oldala néz a Nap felé: az árnyékos és napos oldal között jó néhány száz fok eltérés is lehetne, éppen ezért szokták forgatni a műholdat, hogy ne lépjenek fel az anyagában akkora mechanikai feszültségek, amelyek a műhold meghibásodásához vezethetnének. A Masat-1-nél folyamatosan figyelték a belső hőmérsékletét is, és amikor 5 °C alá süllyedt, akkor elindították a fűtést, nehogy az érzékeny akkumulátora meghibásodjon. A fűtésre olyankor volt szükség, amikor a Masat-1 a Föld árnyékában tartózkodott, és így az oldallapjait borító napelemek nem tudták hasznosítani a Nap energiáját [1].

Még mindig a hőmérséklet fogalmánál maradva, a műholdak felhasználási területei között megemlíthetjük, hogy az utóbbi években segítenek egy esetleges vulkánkitörés előrejelzésében is, ugyanis vulkánkitörés előtt megemelkedik a kráter fölött a hőmérséklet, és ezt műholdas távérzékeléssel ki lehet mutatni [2]. Ki lehet vetíteni – érdekességgéppen – a Rosetta űrszonda által 2014 augusztusában készített hőtérképet a 67P üstökösről [3]. Ez alkalmat ad arra, hogy

felhívjuk a tanulók figyelmét, hogy a képen a hőmérsékletet Kelvinben adják meg, amivel – a tananyag szerint – először középiskolás korukban találkozhatnak a diákok.



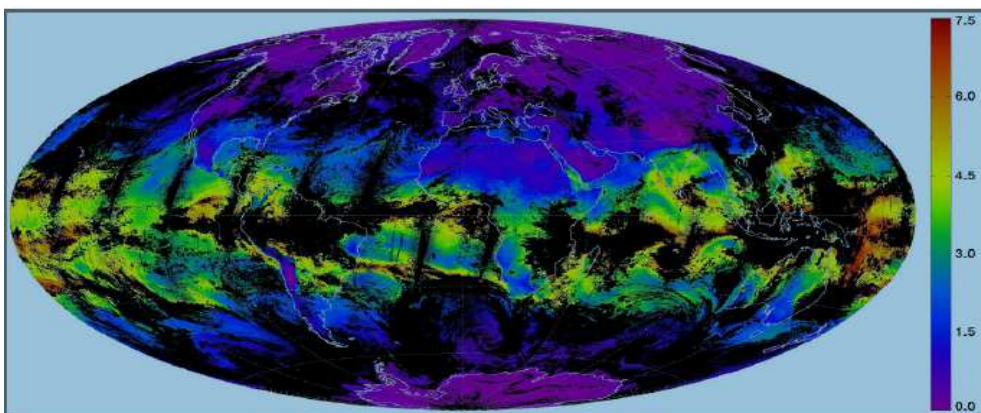
1. ábra: Földközeli pályán keringő műholdat érő sugárzások (saját szerkesztés [4] alapján)

Hőterjedés és az üvegházhatás

A hő terjedésének módjait (hőáramlás, hővezetés és hősugárzás) felsorolva, beszéljük meg, hogy ezek közül melyik nem lehetséges a világűrben. A hősugárzás illusztrálásához célszerű kivetíteni az 1. ábrát.

Ezen az ábrán jól lehet elemezni a műholdat érő különböző sugárzásokat. Együttal lehetőség nyílik a planetáris albedó fogalmának tisztázására is, mely ugyan nem tananyag, de hasznos megemlíteni. Továbbá felhívhatjuk az ábra segítségével a diákok figyelmét arra, hogy minden test sugároz ki magából hőt, aminek a tényét már Kirchhoff megállapította a 19. században. A földfelszíni sugárzást az üvegházgázok részben elnyelik, részben pedig visszasugározzák. Ennek a következménye a melegebb légkör. Ezt a jelenséget nevezzük üvegházhatásnak.

Jegyezzük meg, hogy a CO_2 – melyet az üvegházhatás fontos előidézőjeként szoktak emlegetni – a teljes üvegházhatásnak csak 10-25%-áért felelős. Ennél sokkal meghatározóbb szerep jut az üvegházhatásban a légkörben levő vízpárának: 36-72% [5]. A Föld légkörében levő vízpára eloszlást a NASA MODIS műholdas észlelőrendszere által 2006. március 1-jén készített felvétellel érzékeltethetjük a diákokkal. A vízpárára vonatkozó méréseket napszinkron pályán lévő műholdakról érdemes készíteni, mert azok közelebb vannak a felszínhez, és így pontosabb eredményeket lehet kapni.



2. ábra: A NASA MODIS műholdas észlelőrendszere által meghatározott globális vízpáraeloszlás, 2006. március 1.

Forrás: Jánosi-Tél: Bevezetés a környezeti áramlások fizikájába, 2012 [5]

Hőtágulás és a hőpajzs

Ebben a témakörben, miután elvégezzük az alapkísérleteket – gondolok itt például a Gravesend-gyűrűre, azaz a golyó és karika melegítésére –, ismét érdemes képzeletben kilépni az űrbe. Tanulságos annak a feladatnak a megtárgyalása, melyben megkérdezzük, hogy hány százalékkal volt kisebb a Masat-1 élének a hossza, felszíne és térfogata keringése közben, amikor már éppen a kritikus $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot elérte a hőmérséklete, ha feltételezzük, hogy a startnál $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ volt a környezet hőmérséklete. A feladat első ránézésre könnyen megoldhatónak tűnik, hiszen ha megadjuk a vázát képező fém anyagát, a függvénytáblázatból már kinézhető annak hőtágulási együtthatója. Közöljük, hogy 1 mm vastag speciális repülőgép-alumíniumból készítették a műholdat [6], majd beszéljük meg a tanulókkal, hogy most tekintsünk el a speciális jelzőtől, számoljunk egyszerűen az alumíniummal. A diákok között van olyan, aki ezután a szokott képletbe behelyettesít, majd a számolás végeztével úgy gondolja, rendben megoldotta a feladatot. Néhányan talán elolvassák a táblázat felső sora fölött levő zárójeles megjegyzést, mely szerint ezek az adatok 101 325 Pa nyomáson, azaz csak légköri nyomáson érvényesek, tehát az eredmény nem csak azért lehet különböző a valóságtól, mert nem a speciális alumíniummal számoltunk, hanem a nyomás eltérése miatt is. Ezt elemelve hatásosabban tudjuk megbeszélni, milyen nagy műszaki kihívás a tervezők számára a műhold építőelemeit úgy megválasztani, hogy ne legyen probléma az összeillesztéseknél, a forrasztásoknál, az integrált áramkörök belső kötéseinél az űrben sem.

Itt megemlíthetjük az űrtechnika fogalmát, melynek keretén belül történnek azok a kutatások és fejlesztések, melyek lehetővé teszik

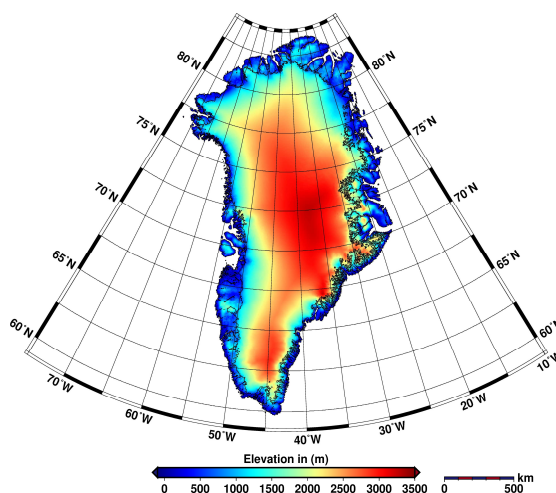
az űreszközök űrbéli működését. Példaként elmondhatjuk, hogy az űrtechnika fejlődésének köszönhetően a VesselSat-2 30 cm-es élhosszúságú kocka alakú műholdnál sikerült elérni, hogy a pálya mentén végighaladva a belső hőmérséklet-ingadozás 1 foknál ne legyen több, és az évszakok változásából eredő hőmérséklet-változás sem több 6 foknál [7]. Feladhatjuk önálló kutatómunkának a hőpajzs szerepét az űrhajók visszatérésekor. Motiválhatjuk a diákokat például úgy, hogy az órán megmutatjuk az Űr Világ űrkutatási hírportál egy ide vonatkozó ismertetését a felfújható hőpajzsról [8]. Érdekességgéppen említsük meg, hogy ezek a kutatások és fejlesztések gyakran új anyagokat, új műszaki megoldásokat eredményeznek, amelyek idővel a mindennapi életünkben is megjelenhetnek.

Gáztörvények

A gáztörvények kapcsán szóba kerül a Föld légköre. A barometrikus magasságformula szerint állandó hőmérsékleten, homogénnek tekinthető gravitációs térben a tengerszinttől felfelé haladva a részecskesűrűség exponenciálisan csökken. Felső határa nincs a légkörnek. Közelítőleg 300-400 km magasságban éri el a részecskesűrűség a Naprendszer bolygóközi részecskesűrűségének igen alacsony értékét [9]. Itt említsük meg, hogy a műholdak pályának magassága is legalább ilyen értékű kell, hogy legyen ahhoz, hogy zavar-talan legyen a működésük.

Halmazállapot-változás és az üridőjárás

A hőtanban esik szó a halmazállapot-változásról. A huszonegyedik század fizikaórán nem tehetjük meg, hogy például az olvadásról csak egy főzőpohárban levő jég olvadása kapcsán beszéljünk. A halmazállapot-változás kapcsán ugyanis fizikaórán is felvetődik a sarki jégtakaró csökkenése, és innen már csak egy röpké gondolati lépés, és szóba jönnek a műholdak, melyek segítségével évről évre vizsgálják az állandó jégtakarók alakulását. Az alábbi ábra szemlélteti az ESA „jeges” műholdjának az utóbbi né-



3. ábra: A jég magassági térképe Grönlandon, 7,5 millió mérési pont alapján. Az adatokat a Cryosat-2 2012 folyamán gyűjtötte. Forrás: Helm et al. 2014 [10a]

hány évben történt mérései alapján a jégtakaró zsugorodását Grönlandon. Itt megemlíthetjük, hogy ez a műhold közel pontosan poláris pályán kering, így az eddigi hasonló küldetésű műholdaknál magasabb földrajzi szélességeket is elér [10].

A 3. ábra kapcsán lehet beszélni a klímaváltozásról, melyre ebben a cikkben nem térek ki, de érdemes megtárgyalni, hogy az előrejelzésekhez feltétlenül szükséges a folyamatos, hosszú távú adatgyűjtés. Ez különböző mérőállomásokon történik. Alapvetően két csoportról beszélhetünk: felszíni bázisú és űrbázisú mérések. A műholdak mérései jelentős szerepet töltenek be az éghajlatváltozással kapcsolatos modellek megalkotásában. A meteorológiai műholdakkal figyelhetjük a felhőzetet, a levegő páratartalmát, a légmozgásokat, valamint a felszín hőmérsékletét. Az adatok az aktuális állapotot mutatják, amely alapján többek között az időjárási előrejelzések készülnek. A műholdak nagy előnye, hogy nagy területet egy időben látnak, amelyre korábban egyetlen eljárás sem volt alkalmas [11]. Fizikatörténeti ismeretként elmondhatjuk, hogy az első meteorológiai műholdakat 1960-ban helyezték Föld körüli pályára.

Manapság egyre gyakrabban hallani egy új fogalomról, az űridőjárásról. Fizikaórán beszéljük meg, hogy az űridőjárás nem a hagyományos időjárási paraméterek (hőmérséklet, csapadék, stb.) űrbeli változását jelenti, hanem az ionoszférában, a magnetoszférában és a földközeli interplanetáris térben végbemenő jelenségeket. Az űridőjárást befolyásoló legfontosabb hatások a napszél, a Napból kilépő anyagáramlás, a bolygóközi térben végbemenő mágneses jelenségek. Az űridőjárás megfigyelése is leginkább a Föld körül keringő műholdakon elhelyezett műszerekkel történik, jellemzően néhány száz kilométer magasan a felszín felett [12]. A diákok figyelmét felhívhatjuk arra, hogy több honlapon is nyomon lehet követni a naptevékenységet. Fontos megemlíteni, hogy a különböző űreszközök – ezeken belül a műholdak, melyek szolgáltatásaik révén egyre szélesebb területen részei a mindennapjainknak is – ki vannak téve az űridőjárás viszontagságainak, így az űridőjárás egyáltalán nem közömbös számunkra sem, hiszen az űrtávközlés zavarainak súlyos következményei lehetnek. A kommunikációban fellépő problémák komoly pénzügyi következményekkel járhatnak, gondoljunk akár a banki, tőzsdei tranzakciókra. Beszéljük meg, hogy ilyen veszélyes időszakban célszerű a műholdakat biztonsági üzemmódba helyezni [13].

A hőtan első főtétele és az űrszemét

A hőtan első főtételének tanításakor felhívjuk a diákok figyelmét, hogy igazából az energia megmaradásának törvényét fogalmazzuk meg benne. A törvény jobb megértését szolgálja, ha minél szélesebb területről veszünk rá példákat. Nézzük meg, hogy a műholdak ese-

tében milyen példákat hozhatunk fel a törvény érvényességének bizonyítására. Problémafelvetés: nézzünk egy geostacionárius műholdat. Együtt kering a Földdel, állandóan mozog. Miért nem mond el lent ez az „örök” mozgás a termodinamika I. főtételének, amely tulajdonképpen az energia megmaradásának általánosabb törvénye? Remélhetőleg minden nehézség nélkül érkezik a válasz a diákoktól, hogy valóban nem örökké maradnak pályájukon a műholdak, előbb-utóbb a sűrűlódás következtében (mely ugyan nagyon kismértékű az érintett magasságokban) lelassulnak annyira, hogy bekerülnek a Föld légkörébe. Arra az időszakra, amikor még ez a sűrűlódás olyan kis mértékű, hogy el lehet tekinteni tőle, a

$$\frac{dU}{dT} = Q + W$$

összefüggésben a műholdak esetében a munkát nullának vehetjük, a Q a műhold által felvett, illetve leadott hőnek feleltethető meg, a belső energia változása alatt pedig a műhold elektromos energiájának változását értjük. A fellépő sűrűlódás hatására bekövetkező légkörbe kerülés és megsemmisülés a műholdaknál időben nagyon elhúzódó folyamat lehet. Így előfordulhat, hogy egy már nem működő műhold évekig, esetleg évtizedekig is kering még az űrben. Például az ESA ENVISAT földmegfigyelő műholdja számítások szerint még 150 évig „kísért” majd. Ez a probléma a huszonegyedik századra egy újabb kihívást jelent az emberiség számára. A felgyülemlett űrszeméttel most már feltétlenül foglalkozni kell a kutatóknak. Fizikaórán is érdemes róla beszélni, a téma érdekessége miatt biztosan van olyan diák, aki szívesen elmélyed az „űrszemétben”. Az Űrvilág űrkutatási hírportál 2014. júniusi cikkében például megemlíti, hogy az ESA megpróbál egy új módszert kidolgozni az űrszemét begyűjté-



4. ábra: Űrszigony (Fantáziakép: Airbus Defence and Space [14a])

sére. Ez egy ősi vadászási technikát jelent: szigonnyal próbálnák le vadászni a már működésképtelen és irányíthatatlan űreszközöket [14].

A világűrben keringő irányíthatatlan űreszközök kapcsán valószínűleg a diákokban is felmerül a kérdés, hogy mi történik akkor, ha összeütköznek? Az ilyen objektumok száma ugyan mostanra már elérte a 17 000-et, de ennek ellenére az ütközés valószínűsége nagyon csekély. 2009-ben történt egy komoly űrkarambol: egy amerikai távközlési hold ütközött össze egy használaton kívüli orosz műholddal [15].

A hőtan második főtétele és a műholdak „tűzhalála”

A hőtan második főtétele középiskolában csak szemléletesen fogalmazható meg, ugyanis nincs meg hozzá az entrópia fogalma, illetve az ehhez kapcsolódó matematikai háttér. Clausius 1850-ben fogalmazta meg úgy a hőtan második főtételét, hogy a termikus energia hő alakjában hidegebb testről melegebb testre nem mehet át önként. Erre az iskolában a legklasszikusabb példa, hogy amikor egy forró tárgyat letesszünk a hideg asztalra, soha nem következik be az, hogy az asztal még hidegebb, a tárgy még melegebb lesz. Adja magát, hogy ismét kitekintsünk a világűrbe, és a műholdak esetében megbeszéljük, hogy nem létezik például, hogy a műhold a Nap sugarainak hatására lehűlne, az árnyékos részekben pedig felmelegedne. Ugyanígy lehetetlen, hogy a légkörbe kerülő műhold a súrlódás közben veszítene hőmérsékletéből. A Masat-1 hároméves életének befejezése, azaz megsemmisülése, a Föld légkörében való elége-se szintén egy konkrét bizonyítéka a második főtételnek. Ezek a példák is hozzájárulhatnak ahhoz, hogy érzékeltessük a diákoknak, hogy ez a törvény – melyet középiskolában csak úgy tárgyalunk, hogy a természetben lezajló spontán folyamatok iránya meghatározott – valóban tapasztalati törvény, és a Földön kívül is érvényben van.

Zárszó helyett

Az említett űrkutatási vonatkozásokat tanításomban évek óta alkalmazom, s úgy érzem, ennek is köszönhető, hogy az alapvetően a művészi pálya iránt érdeklődő diákjaim közül a korábbi évekhez képest többen választják a fizika érettségét, még emelt szinten is, sőt versenyeken is indulnak. A Mérei Ferenc Fővárosi Pedagógiai Intézet által meghirdetett „Fizika a tudományokban és művészetekben” versenyre diákjaim nagy számban jelentkezők és évek óta sikeresen szerepelnek. Tavaly a Masat-1-et bemutató diákom, aki egyébként zongoraművész szeretne lenni, második helyezést ért el [16]. Idén többen is választottak űrkutatási témát, egyikük az „Origami és a

NASA” című anyagot készíti, másik csapat pedig a Föld mágneses mezejét vizsgáló műholdakról gyűjt ismereteket. Fontosnak tartom nagyon, hogy olyan diákok is közelebbi információkat szerezzenek az űrkutatásról, akik egész más területen képzelik el továbbtanulásukat.

Irodalomjegyzék:

- [1] <https://cubesat.bme.hu>
- [2] Végi András: Műholdak felhasználási területei, 2005, Szakdolgozat, SZTE TTK Kísérleti Fizika Tanszék, <http://astro.u-szeged.hu/szakdolgozatiandras/felhasznalas/vulkanok.html>
- [3] <http://blogs.esa.int/rosetta/2014/09/08/virtis-maps-comet-hot-spots/>
- [4] K.E. Trenberth, J.T. Fasullo, J. Kiehl (2009): Earth’s global energy budget. Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 90, pp. 311-323
- [5] Jánosi Imre, Tél Tamás: Bevezetés a környezeti áramlások fizikájába, 2012, Typotex, Budapest, ISBN 978-963-279-550-8, http://etananyag.ttk.elte.hu/FiLeS/downloads/EJ-Janosi-Tel_kornyaram.pdf
- [6] <http://www.magyar-mernok.hu/?view=doc;800>
- [7] www.urvilag.hu/hazai_kutatohelyek_es_uripar/20140109_vesselsat2_a_hibatlan_keteves
- [8] http://www.urvilag.hu/uj_eszkozok_es_anyagok/20090818_mukodik_a_felfujhato_hopajzs
- [8a] Clara Moskowitz: Inflatable Spacecraft Shield Works, Space Test Shows, 2009, <http://www.space.com/7144-inflatable-spacecraft-shield-works-space-test-shows.html>
- [9] Nagy Mária, Radnóti Katalin: A Boltzmann-eloszlás középiskolai feldolgozásának lehetőségei II. rész, 2013, A Fizika Tanítása, Mozaik Kiadó, Szeged, 2013/3. 3-11, http://www.mozaik.info.hu/Homepage/pdf/folyoirat/A_fizika_tanitasa_2013-3.pdf 9. oldal
- [10] http://www.urvilag.hu/kornyezetunk_vedelme/20140827_jeg_veled (a [10a] magyar nyelvű kivonata)
- [10a] V. Helm, A. Humbert, H. Miller: Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2, 2014, The Cryosphere, 8, 1539-1559 (doi:10.5194/tc-8-1539-2014) <http://www.the-cryosphere.net/8/1539/2014/tc-8-1539-2014.html>
- [11] <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/MeteorologiaiAlapismeretek/ch12s04.html>
- [12] Nagy János, Szalai Sándor: Magyar műszerek a Nemzetközi Űrállomáson - Az űridőjárás megfigyelése, 2012, Élet és Tudomány,

67. évf. 11. szám, 329-331, <http://wigner.mta.hu/hu/node/861>
[13] Ludmány András: Naptevékenység és Űridőjárás, 2012, Fizikai Szemle 62. évf. 6. szám 181-184, <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1206/LudmanyAndras.pdf>
[14] http://www.urvilag.hu/uj_eszkozok_es_anyagok/20140625_szigonnyal_muhold_ellen
[14a] http://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2014/06/harpoon_used_to_capture_a_satellite/14588915-1-eng-GB/Harpoon_used_to_capture_a_satellite.jpg
[15] http://www.urvilag.hu/katasztrofak_ellen/20090212_peldatlan_muholdutkozes
[16] http://www.fppti.hu/data/cms186928/FIZ_TUD_MUV_VERSENY_2014_donto_vegeredmenye.pdf