

FEKETETEST-SUGÁRZÁS ÉS ALKALMAZÁSAI

– napelemek, üvegházhatás, a Föld és más égitestek klímája

Hömöstre Mihály

Német Nemzetiségi Gimnázium, Budapest
Georg-Cantor-Gymnasium, Halle, Németország

A Földön végbemenő klimatikus változások tényét egyre kevesebben vitatják. E folyamatok természetes eredetűek, vagy az emberi tevékenység következtében alakultak ki, a klímakutatók számára sem egyértelmű. Középiszolás módszerekkel persze mi sem tudunk választ találni, viszont a légkör egyik alapvető funkciójáról, az üvegházhatásról már a gimnazista diákok körében is képet alkothatunk. A megismerési folyamatot *egyre finomodó modellekkel* hajtjuk végre. A modellrendszert a feketetest-sugárzásra alapozzuk, amelynek ismerete később is hasznos lehet a diákoknak. A cikk fő célja, hogy a fizikát tanító kollégáknak egyszerű és használható példákat adjon a címben említett aktuális témák középiszolai feldolgozásához.

Előkészítés

A cikkben bemutatott projektet egy németországi gimnázium, a hallei Georg-Cantor-Gymnasium 10. évfolyamának két osztályában hajtottuk végre az osztályok csillagászat tanárával, *Wolfgang Pannickével*. Az osztályok a fizika terén elég heterogén képet mutattak, a diákokkal való sikeres munkához lényeges a célok megfelelő szintű megfogalmazása és a tanulók motiválása.

Különösebb előismeretekre nincs szükség, a számítások során az egyik fontos eszközünk, az energiamegmaradás elve – természetesen – a legtöbb diák számára ismert fogalom. A napállandóval is többen találkoztak már, a napelemek kapcsán akár a hétköznapi életben is.

Az esetleg hiányzó alapfogalmak az első pár órában könnyen megismertethetők, ilyen lehet például a Földet elérő sugárzás, annak feketetest-sugárzással való közelítése, vagy a Wien-féle eltolódási törvény.

Célok megfogalmazása, motiváció

Alapvető cél annak megértése, hogy mely folyamatok eredményeképpen áll be a Föld hőmérséklete egy adott értékre. Nulladik modellezési lehetőségként elhagyjuk a Föld légkörét és csak az energiamegmaradást használjuk a bolygó hőmérsékletének kiszámításához. Első igazi modellünkben, ahol már van légkör is, az atmoszférára mint egy üvegházra gondolunk, ami a Földdel és a világűrrel termikus egyensúlyban van. A modell további finomításának irányába is teszünk lépéseket. Modellünket végül kiterjeszthetjük más bolygókra is.

Emellett érdekes cél lehet a napenergia-felhasználás jobb megismerése. Milyen tényezők befolyásolják a

hasznosítható napenergia értékét? Azt hinnénk, hogy az európai napenergia-felhasználás egyik legaktívabb országában ezekkel a kérdésekkel gyakran találkozunk az emberek és köztük hallei diákjaim is. A gyakorlat persze mást mutatott, így érdemes volt ezen sok milliós eurós üzletág fizikai alapjait kicsit megvizsgálni.

Minden függvénytáblázatban szerepel például a Nap, a Föld, valamint egyéb csillagok és bolygók felszíni hőmérséklete. A közvetlen mérés természetesen sokszor lehetetlen, még akár a Föld esetében is. De vajon honnan tudjuk ezeket? S vajon honnan tudják a tudósok különböző bolygókról, hogy az életre alkalmasak-e?

A megvizsgálandó területek mindegyikét megemlítettük, és az adott csoport érdeklődésétől függően helyeztük el a hangsúlyokat.

Feketetest-sugárzás, napsugárzás

A témák vázolója után meg kellett ismerkedni a már korábban említett feketetest-sugárzással és a Wien-féle eltolódási törvénnyel.

A feketetest-sugárzás egy idealizált test – az abszolút fekete test – sugárzása, így idealizált elméleti alapot ad az anyag és a sugárzás kapcsolatának vizsgálatához. Fekete test ideális formában sohasem fordul elő a természetben, de számos csillagászati objektum megközelítőleg fekete test.

Az ide vonatkozó ismereteket – a diákcsoporttól függően – közölhetjük csupán egy képlet, a Stefan–Boltzmann-törvény formájában:

$$P = \sigma A T^4, \quad (1)$$

itt P a fekete test sugárzásának teljesítménye, σ a Stefan–Boltzmann-állandó (értéke $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), A a sugárzási felület és T a sugárzó test hőmérséklete. Ha csoportunk felkészültsége megengedi, a Stefan–Boltzmann-törvényt le is vezethetjük dimenzióanalízis segítségével.

Másik fontos ismeret, amellyel a diákok még nem rendelkeztek, a Wien-féle eltolódási törvény. Ez egy egyszerű empirikus összefüggés egy adott test hőmérséklete és az általa kisugárzott elektromágneses sugárzás intenzitásmaximumának hullámhossza között.

$$\lambda_{\max} T = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ mK}. \quad (2)$$

Ennek alapján egy elég távoli test hőmérsékletét akár fényének elemzése segítségével is megállapíthatjuk (1. és 2. ábra).



1. ábra. Épületrész hőterképe. (Forrás: <http://www.bau-sv.de/thermographie/thermo-5/thermo-5.html>)

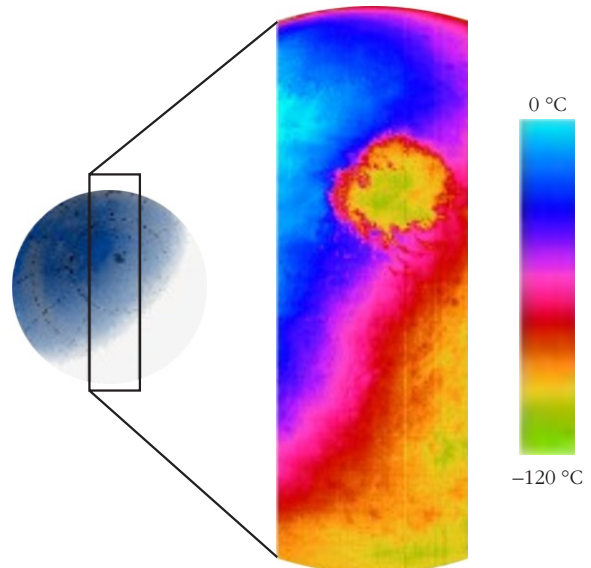
Ezután megvizsgáltuk a Nap sugárzását, összehasonlítva egy fekete test sugárzásával. A 3. ábrán látszik, hogy a légkörnek fontos szerepe van ezen egyszerű mérés eredményében. Mindemellett a Nap felszíni hőmérsékletét könnyen megbecsülhettük.

Az ábráról leolvasott maximális intenzitású sugárzás hullámhossza nagyjából 500 nm. Ennek alapján és a (2) Wien-féle eltolódási törvény szerint a Nap felszíni hőmérséklete nagyjából 5800 K. A 3. ábrán az is jól látszik, hogy a Nap nem tökéletes fekete test, az eltérés okára is érdemes pár percet szánni.

A házi feladat egy egyszerű becslési feladat: gyűjtsek össze a diákok azokat a tényezőket, amelyek a napsugárzás földfelszínen mérhető értékét meghatározzák, és ennek alapján becsljék meg, mekkora maximális és mekkora átlagos teljesítményt lehet elérni napelemekkel Németországban, Közép-Európában.

Napelemek és a Nap adatai

A házi feladat megoldásánál a diákok többsége nagyjából helyes megfontolásokat használt. Néhányan pontosan végiggondolták a jelenséget: a beérkező sugárzás egy részét még tiszta időben is visszaveri, illetve elnyeli a légkör. Európában a beesési szög hatásával is nagyjából 50%-os értéken számolhatunk. Azonban az ég ritkán teljesen felhőmentes, ezért úgy számolhatunk, hogy a felhők az átlagos teljesítményt 50%-kal csökkentik. Az átlagos teljesítményhez természetesen a nappal-éjszaka periódussal is számolnunk kell, ezt a hatást is 50%-kal vehetjük figyelembe. Ezek után már csak a hagyományos napelemek hatásfokára kell tekintettel len-



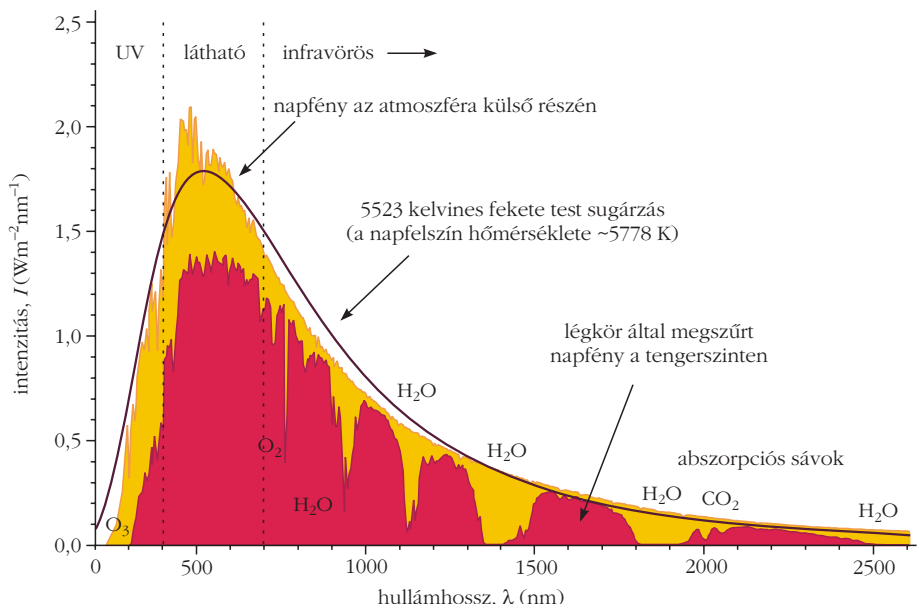
2. ábra. Égítést hőterképe. (Forrás: <http://www.fs121.com/channel/news/mars45.html>)

nünk, ami az interneten fellelhető adatok szerint 10-20%-nak vehető. Ez összességében azt jelenti, hogy a sugárzás 1-2%-át hasznosíthatjuk a jelenlegi szinten, és a maximális teljesítmény hatásfoka is csupán néhány százalékkal több [1]. Már csak az a kérdés, wattban kifejezve mennyit jelent ez a pár százalék.

Mivel felmerült, definiáltuk a Föld albedóját: $a_f = 0,3$, amely a földfelszín által visszavert sugárzás és a Naptól beérkező sugárzás hányadosa. Számításainkhoz hasznos az $\bar{a}_f \equiv 1 - a_f = 0,7$ is, amely a felszín által elnyelt sugárzás és Naptól beérkező sugárzás arányát adja meg.

A feketetest-sugárzásra vonatkozó Stefan–Boltzmann-törvénnyel a Nap sugárzási teljesítménye meghatározható. A szükséges adatok a Nap már korábban meghatározott $T = 5795$ K felszíni hőmérséklete, a σ

3. ábra. A Nap sugárzási spektruma és a feketetest-sugárzás. (Forrás: <http://www.builditsolar.com/Experimental/SunSim/SunSim.htm>)



Stefan–Boltzmann-állandó értéke, a Napfelszín, illetve a Nap $R_N = 6,96 \cdot 10^8$ m sugara. Ezek alapján a Nap sugárzási teljesítménye:

$$P_{Nap} = 4 \pi \sigma R_{Nap}^2 T^4 = 3,89 \cdot 10^{26} \text{ W}. \quad (3)$$

Most már meg tudjuk mondani egy németországi (vagy magyarországi) napelem várható átlagos teljesítményét.

A Földet elérő sugárzás a Nap által kisugárzott teljesítmény töredéke. Kiszámításához a Föld keringési pályája által meghatározott gömbfelületet kell venni (4. ábra), amelyen a Nap teljes teljesítménye kisugárzódik, és azt kell vizsgálni, hogy e képzeletbeli felületen négyzetméterenként mekkora sugárzás jut keresztül.

Ezt az $R_{NF} = 1,5 \cdot 10^{11}$ m átlagos Nap–Föld-távolság segítségével határozzuk meg, amelyből a Földet érő négyzetméterenkénti sugárzási teljesítmény:

$$\frac{P_{Nap}}{4 \pi R_{NF}^2} = c_N = 1375 \text{ W/m}^2. \quad (4)$$

Itt bevezettük a c_N napállandó fogalmát, amely a Földet érő sugárzási teljesítmény elméleti maximális értéke.

Ebből következik a válasz a házi feladatban feltett kérdésre: egy közép-európai napelem átlagosan csupán 14–28 W/m² teljesítmény leadására képes. Az eredmény meglepte a hagyományosan erősen napenergia párti német fiatalokat.

Újabb házi feladatként meg kellett becsülniük egy ember átlagos sugárzási teljesítményét, ha az emberi test átlagos felszíni hőmérséklete 31 °C és átlagos felszíne 1,5 m², amennyiben közelítésként fekete testnek tekintik azt.

Az emberi test teljesítménye

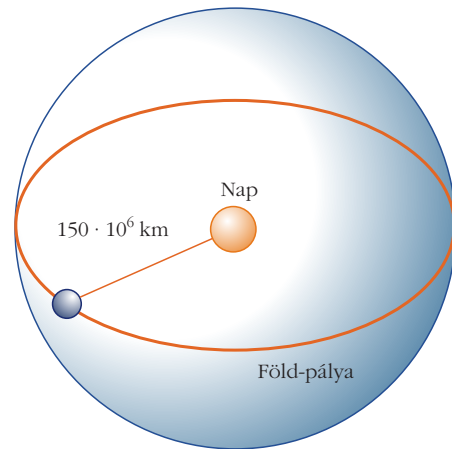
A házi feladat eredményeként az emberi test sugárzási teljesítményére

$$P_{ember} = A \sigma T_{ember}^4 = 726 \text{ W}$$

adódott. Ez a sugárzás napi 62 760 kJ (14 940 kcal) energiakibocsátást jelent. Ez jóval több a köztudatban levő 1000-2000 kcal napi energiabeviteli szükségletnél. Az eltérés oka: az ember nem 0 K hőmérsékletű környezetben él, az onnan származó hő energianyereségnek kell tekinteni. Feltételezve, hogy az ember átlagosan 20 °C hőmérsékletű környezetben érzi magát a legjobban, akkor onnan naponta átlagosan

$$E_{környezet} = P_{környezet} t_{egy nap} = 12 900 \text{ kcal} \quad (5)$$

energiájú sugárzás éri. A napi leadott és a felvett energiák közti különbség így átlagosan 2050 kcal, ami egy átlagos felnőtt napi energiaigénye. Persze itt a ruházat adta energianyereséget, valamint a napi tevékenység energiavesztését elhanyagoltuk.



4. ábra. A Nap által besugárzott felület a Föld pályájánál. (Forrás: http://www.fakko.de/school/sonne/solkonstante_c.htm)

Ezzel az egyszerű számolással kicsit betekinthe-tünk a biológia világába. A számítások természetesen elő voltak készítve, így nem a számolás, hanem a közös gondolkozáson volt a hangsúly.

A Föld felszíni hőmérséklete

Ezen kitérő után újra visszakanyarodhatunk a csillagászat felé. A következő feladat a Föld átlagos felszíni hőmérsékletének meghatározása volt. A feladat érdekességét bemutató pár szóban utaltam arra, hogy – számos kutatás szerint – más bolygók esetében a legfontosabb kritérium az élet létrejöttéhez a megfelelő hőmérséklet (nem túl hideg és nem túl meleg: folyékony vízhez megfelelő hőmérséklet). Ez más bolygónál is jól meghatározható, de vajon hogyan?

A megoldás egy egyszerű energia-, illetve teljesítménymérleg [3] a Földet érő bejövő és elhagyó sugárzásról. Mivel a Föld átlagos hőmérséklete jó közelítéssel állandónak vehető, ezért a beérkezett – a Nap sugárzásából származó P_N – és a kisugárzott (a Föld által kisugárzott P_F) teljesítmény értéke nyilván egyenlő:

$$P_{be} \equiv P_N = P_F \equiv P_{ki}. \quad (6)$$

Az albedó fogalmával már korábban megismertkedtek a diákok, így ezt is belevehettük számításainkba. Gondoljuk végig, milyen tényezők határozzák meg a beérkező sugárzás értékét! Ezek a c_N napállandó, a Föld albedójából származó \bar{a}_F , illetve a besugárzott felület nagysága. A légkör hatását – az \bar{a}_F értékén keresztül – csak annyiban vesszük figyelembe, hogy bizonyos mértékben árnyékolja a Naptól érkező sugárzást. Mivel a c_N napállandó csak a felületre merőleges sugárzás értékét adja meg, ezért a besugárzott felület a Föld sugárzásra merőleges, vagy más szóval A_n normális felületét jelenti

$$A_n = \pi R_F^2, \quad (7)$$

ahol R_F a Föld átlagos sugara.

Ezekből a beérkező, a Nap által a Föld felszínét melegítő sugárzási teljesítmény értéke:

$$P_N = c_N A_n \bar{a}_F. \quad (8)$$

Másfelől a Föld által kisugárzott teljesítmény csak a Föld T_F felszíni hőmérsékletétől és teljes A_F felszínétől függ

$$A_F = 4 \pi R_F^2, \quad (9)$$

ahol a Földet gömb alakkal közelítettük. A Föld felszíni emissziós tényezője 0,96-0,995 között van [4, 5], ezért a Föld sugárzását jó közelítéssel feketetest-sugárzásnak vehetjük ebben és a későbbi modellekben egyaránt. Így a kisugárzott P_F teljesítmény a következő összefüggéssel számítható:

$$P_F = A_F \sigma T_F^4. \quad (10)$$

Ebben az első, legegyszerűbb modellünkben a (6) egyenlet – felhasználva a (7)–(10) egyenleteket – az alábbi módon fogalmazható meg:

$$P_N = c_N R_F^2 \pi \bar{a}_F = 4 R_F^2 \pi \sigma T_F^4 = P_F. \quad (11)$$

Ezt az egyenletet T_F -re átrendezve és a megfelelő értékeket behelyettesítve kapjuk:

$$T_F = \sqrt[4]{\frac{c_N (1 - a_F)}{4 \sigma}} = 255 \text{ K} = -18 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (12)$$

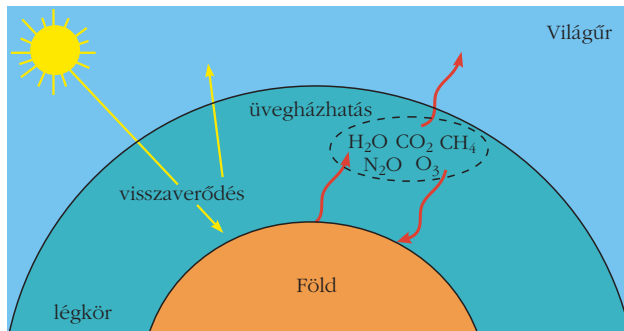
Ezen egyszerű modellünkből kiindulva, ahol a Föld légkörének hatását teljesen figyelmen kívül hagytuk, a Föld felszíni átlagos hőmérsékletére $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ -os értéket kaptunk. Az eredmény természetesen nem egyezik a tapasztalatainkkal, hiszen ilyen átlagos hőmérséklettel a felszíni vizek nagy része az év jelentős szakaszában fagyott állapotban lenne.

Az eddigi modell egyszerűnek tűnik, de egy fontos tényezővel, a légkörrel nem számol.

A légkör hatása

Itt érünk el egyik fő célkitűzésünkhöz, a légkör hatásainak modellezéséhez. A következő modellünk azonban, a modellek fokozatos fejlődésének elvét betartva, nem lesz túl bonyolult. A légkörre mint egy egyszerű üvegházra gondolunk. A légkör – ezen modellünk szerint – a beérkező, javarészt rövid hullámhosszú sugárzást egyszerűen átengedi, míg a Föld a felszínre érő sugárzás egy részét ($a_F = 0,3$) visszaveri, s a sugárzás jelentősebb részét ($1 - a_F = \bar{a}_F = 0,7$) elnyeli. A visszavert sugárzás sem a Földet, sem a légkört nem melegíti, egyszerűen távozik a világűrbe, hiszen azt a légkör továbbra is átengedi (5. ábra).

A Föld saját hőmérsékletéből fakadó, javarészt hosszú hullámhosszú sugárzás egy részét azonban a légkör visszaveri, másik részét az űr felé továbbengedi.



5. ábra. Egyszerű üvegházmodell. (Forrás: <http://bildungserver.hamburg.de/atmosphaere-und-treibhauseffekt/2069648/treibhauseffekt-natuerlich-artikel.html>)

di. Az egyszerűség kedvéért feltehetjük, hogy a Föld felől érkező sugárzás fele-fele arányban visszaverődik a légkörről, illetve távozik a világűr felé.

Az imént vázolt képet a Földre felírható teljesítménymérleggel fogalmazhatjuk meg, ami annyiban különbözik a (6) egyenlettől, hogy a Nap Földet melegítő P_N teljesítményéhez még hozzáadódik a Föld által kisugárzott P_F teljesítmény fele – hiszen ennyi verődik vissza a légkörből és melegíti Földet –, ezzel tart egyensúlyt a Föld felől érkező P_F teljesítmény:

$$P_N + 0,5 P_F = P_F. \quad (13)$$

A (11) egyenlet a fenti értelmében az alábbi módon változik:

$$P_N = c_N R_F^2 \pi \bar{a}_F = \frac{1}{2} 4 R_F^2 \pi \sigma T_F^4 = \frac{1}{2} P_F. \quad (14)$$

Ebből

$$T_F = \sqrt[4]{\frac{c_N (1 - a_F)}{2 \sigma}} = 30,4 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (15)$$

Ez az eredmény természetesen még mindig nem adja vissza a valóságot, de már közelebb kerültünk a mért értékhez.

Egy összetettebb modell

A korábbiakban nem foglalkoztunk a légkör fizikai tulajdonságaival, mint például tömeg, hőmérséklet stb.. Azonban a légkör rendelkezik az előbb említett tulajdonságokkal, ezért pontosabb eredményt kapunk, ha a légkörre, mint egy a Földdel és a világűrrel termikus egyensúlyban levő rendszerre gondolunk (6. ábra).

Ez esetben a Naptól érkező sugárzás egy részét már a felhők és a légkör visszaveri, illetve elnyeli. Ezen értékeket mérésekkel jól meg lehet határozni, a fellelhető irodalmi adatok szerint, a Naptól érkező sugárzás körülbelül 50%-át a Föld, körülbelül 20%-át a légkör nyeli el – tehát körülbelül 30% verődik vissza [3]. Így a Nap által a Föld felszínét melegítő sugárzási teljesítményre kapott (8) egyenlet az alábbiakban módosul.

– P_{NF} : a Nap által a Föld felszínét melegítő sugárzás teljesítménye:

$$P_{NF} = c_N A_n 0,5.$$

– P_{NL} : a Napból eredő, a légkört melegítő sugárzás teljesítménye:

$$P_{NL} = c_N A_n 0,2.$$

Feltettük, hogy a légkör nap-sugárzásra merőleges felülete jól egyezik Föld A_n normálfelületével.

Mivel a légkör ebben a modellben már saját tömeggel és hőmérséklettel rendelkező rendszer, van saját hőmérsékleti sugárzása is. Ezen sugárzási teljesítményt – a korábbiakkal összhangban – P_L jelöli, amelyet az alábbi módon számolhatunk ki

$$P_L = A_{\text{légkör}} \sigma T_{\text{légkör}}^4 \quad (16)$$

ahol a légkör $A_{\text{légkör}}$ „felszínét” a Föld felszínének kétszeresével közelíthetjük, hiszen két irányba sugároz, $T_{\text{légkör}}$ pedig a hőmérsékletet jelenti a felső rétegekben. Feltehetjük, hogy a légkör sugárzásának a felét a Föld, másik felét a világűr felé adja.

A fizikai modellezés szempontjából fontos, bár az eredményt nem jelentősen befolyásoló tényező még a két különböző hőmérsékletű rendszer közötti áramlási hő. Ez a sugárzásoktól mentes, elsősorban a Föld felszínén felmelegedett levegő által a légkörbe szállított energiaátadási folyamat. E hőáramlási teljesítmény értéke a mérések szerint átlagosan $j = 17 \text{ W/m}^2$, amely a Föld felszíni hőmérsékletét csökkenti, a légkört pedig növeli. A Földön vett teljes hőáramlási teljesítmény: $J = jA_F$.

Modellünk folyamatos fejlődése érdekében az áramlási hőteljesítményt csak később vesszük számításba. A Föld által közvetlenül az űrbe kisugárzott energiát ebben a modellben elhanyagoljuk. Az itt leírt modellnek megfelelő teljesítménymérleg a Földre

$$P_{NF} + \frac{1}{2} P_L = P_F \quad (17)$$

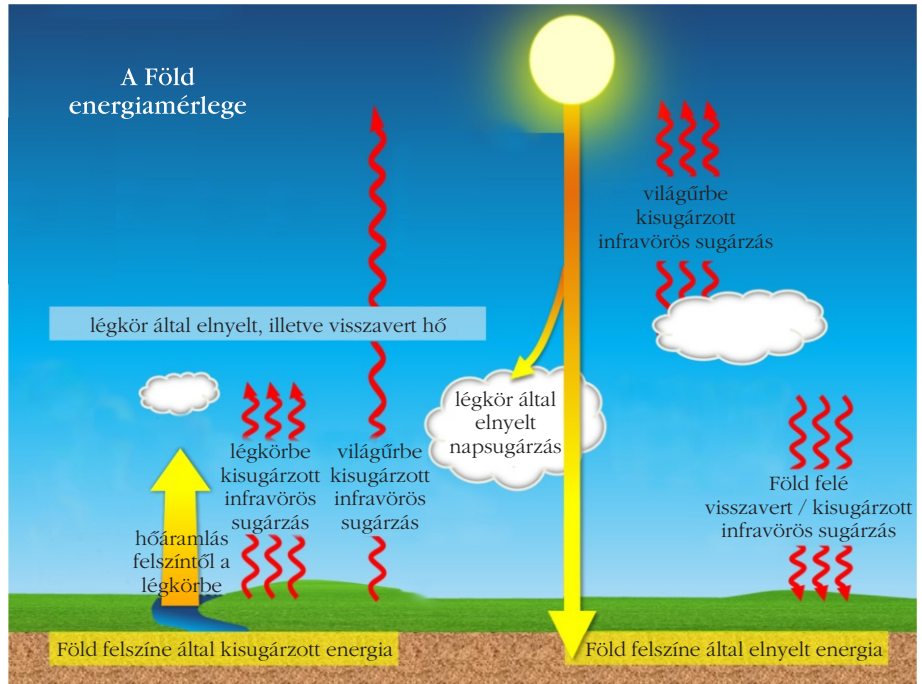
és a légkörre

$$P_{NL} + P_F = P_L \quad (18)$$

A (17) és (18) egyenletekből:

$$P_F = 2 P_{NF} + P_{NL} \quad (19)$$

A (19) egyenletben már csak a T_F az ismeretlen. Az egyenleteket megoldva $T_F = 292,1 \text{ K} = 18,95 \text{ °C}$ és



6. ábra. Komplex üvegházmodell. (Forrás: <http://131.91.162.18/nasa/module-2/earth-energy-balance>)

$T_{\text{légkör}} = 255,28 \text{ K} = -17,87 \text{ °C}$ adódik, ahol a Föld felszíni hőmérsékletére már nagyjából a valóságnak megfelelő értékeket kapunk.

Előző modellünkben azonban elhanyagoltuk a hőáramlási teljesítményt. Nem nehéz ezzel a taggal kiegészíteni a számításainkat. A (17) és (18) egyenleteket csupán J értékével kell kiegészíteni, a Föld esetében a kisugárzott

$$P_{NF} + \frac{1}{2} P_L = P_F + J, \quad (20)$$

míg a légkör esetében a felvett teljesítmény oldalán:

$$P_{NL} + P_F + J = P_L \quad (21)$$

A (20) és (21) egyenleteket megoldva $T_{\text{Föld}} = 289 \text{ K} = 15,85 \text{ °C}$ és $T_{\text{légkör}} = 255,24 \text{ K} = -17,91 \text{ °C}$ adódik, s ezek már nagyon jó közelítéssel a valóságnak megfelelő értékek (a Föld mért átlagos hőmérséklete mintegy 15 °C).

A légkör átlagos hőmérsékletét persze nehéz meghatározni, hiszen az erősen függ a magasságtól és a sűrűségtől [6].

Más bolygók vizsgálata: a Mars

Egy másik érdekes feladat lehet egy jól ismert bolygó, például a Mars felszíni hőmérsékletének becslése. Modellválasztásunknál gyorsan felvetődik, hogy milyen tulajdonságú légkörrel érdemes számolni. Figyelembe véve a Mars viszonylag kis tömegét és gyenge mágneses mezejét, adódik a gondolat, hogy első közelítésben hagyjuk el a Mars légkörének hatásait, és számoljunk a (6) – (10) egyenletek Marsra lefordított

alakjával. Így a Mars által elnyelt $P_{be,M}$ sugárzási teljesítmény:

$$P_{be,M} = c_{N,M} A_{n,M} \bar{a}_M, \quad (22)$$

ahol $c_{N,M}$ a napállandó a Nap–Mars-távolságban, értéke $595,48 \text{ W/m}^2$, amelyet a diákokkal érdemes kiszámoltatni, $A_{n,M}$ a Mars keresztmetszete vagy normális felülete, $\bar{a}_M = 0,75$ a marsi elnyelt sugárzási arány. Az elnyelt sugárzási teljesítménnyel egyensúlyban lévő, tehát azzal azonos nagyságú, Mars által kibocsátott $P_{ki,M}$ sugárzási teljesítmény pedig:

$$P_{ki,M} = A_M \sigma T_M^4, \quad (23)$$

itt A_M a Mars felszíne, T_M pedig a hőmérséklete. A földi minta alapján a Mars emissziós tényezőjét is 1 közelinek vesszük. Az egyenleteket megoldva: $T_M = 210 \text{ K}$ értéket kapunk. Az irodalmi 218 K -től való eltérés oka nyilvánvalóan az általunk teljesen elhanyagolt légkör hatásainak tudható be, bár az eltérés nem jelentős. Az itt felhasznált eljárást persze más bolygókra is alkalmazhatjuk.

Összefoglalás

Feketetest-sugárzás, csillagászat és egy kis környezetfizika. Ezeket a témákat sikerült érinteni mindössze az energiamegmaradás elvének felhasználásával. Kellemes felüdülés lehet a diákoknak és a tanároknak egyaránt, ha az energiamegmaradás törvényét nem min-

dig az unalomig ismételt feladatokban, illetve problémákban használjuk fel. Mindemellett egyértelműen látszik, hogy a hőmérsékleti sugárzásból kiindulva mennyi érdekes és sokrétű témába nyerhetünk betekintést, kaphatunk ízelítőt.

Azonban nem csak egyes, éppen aktuális tudományos kutatások alapjaival ismerkedhetnek meg a diákok, hanem a *fizikai modellezés*, mint a tudományos megismerési folyamat egyik legfontosabb részének logikáját, működését is magukévá tehetik.

Köszönetnyilvánítás

A projekt jelentős részét a hallei diákok végezték, nekik ez úton is szeretném a köszönetemet kifejezni. Köszönöm még Wolfgang Pannicke, a hallei diákok csillagászat tanárának, hogy segített megtalálni a megfelelő léptéket a gyerekekkel való munkában.

Köszönettel tartozom még témavezetőmnek, *Rácz Zoltánnak*, akinek segítő munkája és motivációja nélkül e cikk nem jött volna létre.

Irodalom

1. <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/regenerative-energieversorgung/ausblick#Strahlungleistung> auf die Erde
2. *Természettudomány tanítása korszerűen és vonzóan*. Előadáskivonatok, ELTE Természettudományi Oktatásimódszertani Centrum, Budapest (2011) 295–300.
3. Bardo Diehl, Roger Erb: *Physik Oberstufe Gesamtband*. Cornelsen Verlag, Berlin, 2008.
4. <http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/seawater.html>
5. <http://terpconnect.umd.edu/~sliang/papers/Jin2006.emissivity.pdf>
6. <http://www.kowoma.de/gps/zusatzerklaerungen/atmosphaere.htm>
7. Szirtes Tamás: *Dimenzióanalízis és alkalmazott modellelmélet*. Typotex Kiadó, Budapest, 2006.
8. *Fizikatanítás tartalmasan és érdekesen*. Előadáskivonatok, ELTE Fizika Doktori Iskola, Budapest (2010) 281–286.