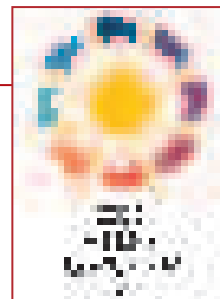


LENTE GÁBOR

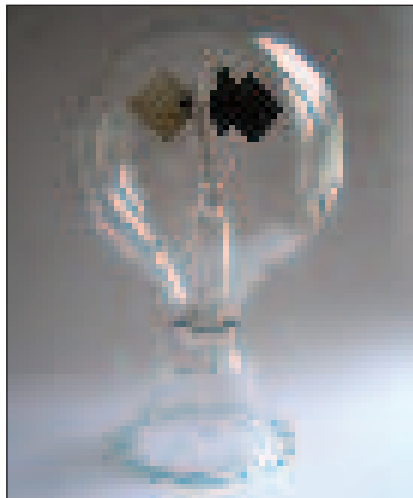
# Távolban egy napvitorla



A modern tudomány szerint minden anyagnak kettős természetű van: egyszerre mutat részecske- és hullámsajátságokat. A fény ebből a szempontból kivételesen fontos a fizikában, mert más hétköznapi jelenségekkel szemben mind a hullám-, mind a részecskesajátságát viszonylag könnyű tanulmányozni. A fény részecskesajátságainak egyike, hogy mechanikai nyomást fejt ki arra a felületre, amelyen elnyelődik vagy visszaverődik. A fizikusok ennek a hatásnak a leírására a Maxwell–Bartoli-tételt használják, amelynek gyakori formája egy adott felszín  $\vartheta$  beesési szögben érő fénynyaláb által kifejtett  $p$  nyomást adja meg:

$$p = w(1 + r - d) \cos \vartheta \quad (E1)$$

A képletben  $r$  a felület fényvisszaverő képessége (tehát annak a valószínűsége, hogy egy adott foton visszaverődik róla), míg  $d$  az áteresztőképesség. Ezen  $r$  és  $d$  számok összege soha nem lehet nagyobb 1-nél, míg az  $1 - r - d$  különbség pontosan megadja egy beeső



1. ábra. Crookes-féle radiométer

foton elnyelődésének valószínűségét. Az E1 egyenletben egy mennyiséget nem definiáltunk még:  $w$  a fénysugár energiasűrűségének időbeli átlagértéke. Itt érdemes megemlíteni, hogy a térfogati energiasűrűség (energia/térfogat) és a nyomás (erő/felület) fizikai dimenziói megegyeznek.



2. ábra. Dooku gróf Napvitorlása a *Csillagok háborúja című* filmsorozat második részében

A fénynyomással kapcsolatban gyakran megemlített demonstrációs eszköz a Crookes-féle radiométer vagy más néven *fénymalom*. Ez lényegében egy vákuumba helyezett, tü heggyére illesztett négykarú lapátos kerék, amelynek lapátjai egyik oldalukon kormozottak (1. ábra). A kerék napfény vagy mesterséges fény hatására is látványosan forgásba jön. Habár valójában a jelenség magyarázata meglehetősen bonyolult, és benne a lapátok két oldalán kialakuló hőmérséklet-különbség hatása a legfontosabb, a fénynyomásnak is van szerepe a mozgás létrejöttében. Fénymalmot először Sir William Crookes (1832–1919) brit fizikus és kémikus készített, miután felfigyelt arra, hogy a vákuumban végzett nagy pontosságú tömegmérést a közvetlen napfény megzavarja.

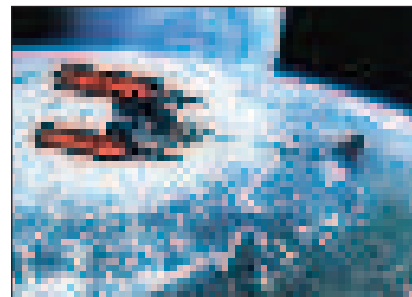
A Nap, hasonlóan más csillagokhoz, igen sok fényt bocsát ki, ezért felmerül az ötlet, hogy ennek a fénynek a nyomását – a Földön vitorlázásra használt szélenergiához hasonlóan – akár űrhajók mozgatására is fel lehet használni. Félreértésre adhat okot, hogy létezik napszélnek nevezett jelenség is, de ez igazából nem a fény nyomására utal, hanem a Naptól kiáramló egyéb részecskékre: elektronokra, protonokra és alfa-részecskékre. Tehát a napvitorlázás igazából nem a napszelet, hanem a napsugárzás fénynyomását használná fel.

A fényenergia ilyen típusú felhasználásának lehetőségére már Jules Verne is utal 1865-ben írt *Utazás a Holdba* című regényében: „Mi azonban ráérős emberek vagyunk, nekünk semmi sem sürgős: a mi sebességünk nem haladja meg a 9900 mérföldet, s ez

a sebesség is egyre lassúdni fog. Kérdezem önöket: érdemes-e ezért annyira lelkesedni? Nyilvánvaló, hogy úgymint túlhaladjuk egyszer ezt a sebességet, ennél jóval nagyobb sebességet érünk majd el, valószínűleg a fény vagy a villamosság mozgatóerejének felhasználásával!” (19. fejezet, A népgyűlés)

Ezen sorok különlegessége, hogy Verne mindössze egyetlen évvel azután említi meg a fény mozgatóerejét, hogy James Clerk Maxwell (1831–1879) skót elméleti fizikus publikálta az elektromágneses sugárzásokról szóló, manapság a róla elnevezett négy egyenletben összefoglalt elméletét.

Svante Arrhenius (1859–1927), a Nobel-díjas kémikus 1908-ban megjelent, *Worlds in the making* című könyvében már tudományos alapossággal is megvizsgálta a fénynyomás felhasználásának lehetőségét csillagközi utazásra. A napvitorlázás tudományos-fantasztikus filmek alkotóinak a fantáziáját is megmozgatta: a *Csillagok háborúja* című filmsorozat második részének végén Dooku gróf űrhajója nyit ki egy látványos vitorlát (2. ábra), míg James Cameron nagy sikerű, *Avatar* című film-



3. ábra. Az *Interstellar Vehicle Venture Star* űrhajó az *Avatar* című filmben

jében az *Interstellar Vehicle Venture Star* nevű űrhajónak is van ilyen célt szolgáló, nagy felületű, tükröződő része (3. ábra).

Visszatérve a tudományos realitásokhoz: az E1 egyenletet érdemes részleteiben is elemezni. Minél jobban visszaveri a fényt egy felület (minél közelebb van  $r$  az 1-hez), annál nagyobb lesz a rá ható fénynyomás. Tehát az ideális vitorla egy minden réső sugárzást visszaverő, tökéletes tükör. A tel-

jes hajtóerőt a nyomás és a felület szorzata adja, ezért aztán ilyen céllal minél nagyobb tükröt érdemes készíteni.

Az E1 képletben szerepel a napsugárzás energiasűrűsége ( $w$ ) is: ez természetesen függ a Naptól mért távolságtól; értéke a Naprendszerben kifelé haladva gyorsan csökken. Részletes számítások szerint a Naptól  $l$  távolságban  $w$  a következőképpen adható meg:

$$w = P_{\text{Nap}} / (4\pi l^2 c) \quad (\text{E2})$$

Az E2 képletben  $P_{\text{Nap}}$  mennyiség a Nap által egységnyi idő alatt kisugárzott energia, vagyis a Nap fényteljesítménye ( $3,85 \times 10^{26}$  W),  $c$  pedig a fénysebesség ( $3,00 \times 10^8$  m/s). A Föld átlagos távolsága a Naptól mintegy 150 millió km; ilyen távolságban a napsugárzás fénynyomása egy rá merőleges, tökéletesen tükröző felületre ( $r = 1$  az E1 egyenletben) nagyjából  $9 \mu\text{Pa}$  ( $9 \times 10^{-6}$  Pa), vagyis a Föld felszínén uralkodó légköri nyomásnál mintegy tízmilliárdszor kisebb.

Mire elég ez a hajtóerő? Ez sok mindentől függ. Az első összehasonlítást talán a gravitációval érdemes megtenni. Az E2 képlet azt fejezi ki, hogy a fénynyomás a gravitációhoz hasonlóan a távolság négyzetével fordítottan arányosan csökken. A két törvény összehasonlításából viszonylag egyszerű kiszámolni, hogy egy 1 kg teljes tömegű napvitorlásnak ideális körülmények között  $650 \text{ m}^2$  tökéletesen tükröző

maznia kell! Ha ezt a feltételt figyelembe vesszük, egy alumíniumból készített tükör (amelynek egyébként igen kedvezőek a visszaverési sajátságai) vastagsága legfeljebb fél mikrométer lehet, amely nagyjából huszadrésze a ma az iparban előállított legvékonyabb alufóliának. Ugyanakkor még fél mikrométer is nagyjából 2000 atomnyi távolságot jelent, így elvi akadály a nin-

nyabban: az oldalszél kedvezőbb. Ugyan egészen más okokból, de ez a napvitorlásokra is érvényes: az ideális vitorla-beállítási szög pontosan félúton van az űrszonda mozgási iránya és a napsugárzás iránya között. Az előző gondolatmenetben elképzelt napvitorlás így programozva sokkal könnyebb juthat (4. ábra, 3. napvitorla). A Szaturnuszig szűk tíz év alatt lehetne eljutni, ami első pillantásra talán soknak tűnik, de valójában a jelenlegi, üzemanyagot felhasználó meghajtáshoz képest még előrelépést is jelentene: a Cassini-Huygens űrszondának például 17 évre volt szüksége ahhoz, hogy elérje a gyűrűiről híres bolygót.

Ugyanakkor nem szabad feledni azt sem, hogy a napvitorlázás a Naprendszeren belüli mozgásra alkalmas, viszont a Föld felszínéről az űrbe juttatáshoz gyakorlatilag semmilyen segítséget nem jelent. Vagyis a napvitorlásokat is rakétákkal kellene kiszabadítani a Föld gravitációjából.

Természetesen a fénynyomás mozgató hatásának elvi lehetőségét a szakemberek nagyon régóta ismerik, és már jó néhány kísérlet is történt arra, hogy ezt felhasználják űrrepülés közben. A Vénuszt tanulmányozó Mariner-10 (1973–1975) és a Merkúr körül keringő Messenger (2004–2015) űrszondák a Naphoz viszonyított helyzetük, vagyis orientációjuk szabályozásához felhasználták a fénynyomást is, így üzemanyagot takarítottak meg, noha igazi vitorlával nem is szerelték fel őket. Ez a megoldás már csak azért is kézenfekvő volt, mert a két szonda közelebb került a Naphoz, mint a Föld, vagyis az E1 egyenletben  $w$  értéke emiatt is nagyobb volt. Az aszteroidakutatásban kiemelkedő szerepet játszó, sok üzemzavart átvészelő japán Hayabusa (2003–2010) űrszonda esetében a fény szerepe már nélkülözhetetlen volt a meghibásodók ellensúlyozására. A Himawari-6 (2005–, más néven MTSAT-1R) nevű, Föld körül keringő műholdon egy kisméretű napvitorla segíti a stabil pozíció fenntartását. 1993. február 4-én még a Mir űrállomás kozmonautái is végeztek ilyen jellegű kísérletet: sikerrel nyitották ki a Znamja-2-nek elnevezett, 20 méter széles napvitorlát, bár végül is a hajtóerő tesztelésére már nem került sor.

Az első komoly űrvitorlás a Japán Űrügynökség (Japan Aerospace Exploration Agency, Jaxa) IKAROS nevű szondája (5. ábra); ez a Földet 2010. május 21-én hagyta el. 7,5 mikrométer vastag, poliimid típusú műanyagból készült,  $14 \text{ m} \times 14 \text{ m}$ -es, négyzet alakú vitorláját 2010. június 3-án sikerrel nyitotta ki, s segítségével 2010. december 8-án elérte a Vénuszt. Az IKAROS így bekerült a Guinness Rekordok Könyvébe, mint az első olyan eszköz, amely a fény nyomását sikeresen használta bolygóközi utazásra. Ezzel a szonda

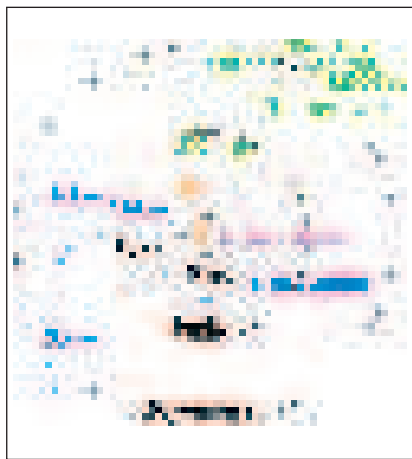


5. ábra. Az IKAROS japán napvitorla (1: 64 méretarányú makett)

csen akár még vékonyabb vitorla készítésének sem. Ha elképzelnünk egy a Földről indított, 10 kg teljes tömegű űrszondát  $10\,000 \text{ m}^2$  (nagyjából egy focipálya méretével megegyező) felületű vitorlával, ez a Naprendszert majdnem egyenes vonalban el tudná hagyni, és bő harmincezer év alatt eljuthatna a legközelebbi csillagig, a Naptól 4,24 fényévre lévő Proxima Centauri-ig (4. ábra, 1. napvitorla). Persze a Naptól eltávolodva a fénynyomás már annyira kicsiny értékre csökken, hogy egy ilyen űrhajó két-három év után akár be is vonhatná a vitorláját...

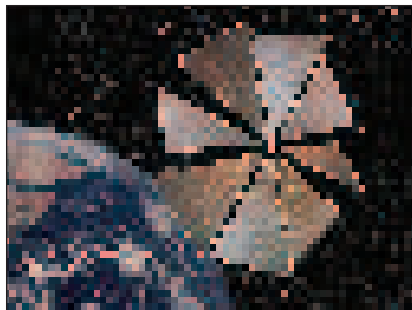
A Naprendszerben való mozgáshoz azonban egyáltalán nem szükséges az, hogy a gravitációt meghaladó erők hajtás az űrhajót. Képzelnünk el egy jóval nagyobb, 1000 kg tömegű űrszondát  $100\,000 \text{ m}^2$ -es vitorlával. Az 1000 kg talán nem tűnik soknak, de valójában a jelenlegi űrhajók tömegének igen nagy hányadát az üzemanyag teszi ki, amire egy napvitorlásnak nincsen szüksége. Az E1 egyenlet alapján azt gondolhatnánk, hogy a vitorlát mindig a napsugárzásra merőlegesen érdemes tartani, hiszen a beesési szög ekkor nulla, vagyis a fénynyomás és a hajtóerő így lesz maximális. Valójában ez azonban korántsem ideális: egy ilyen programozású szonda a Földről indulva még a Marsot is csak kb. 13 millió kilométerre tudná megközelíteni, elérni pedig nem lenne esélye (4. ábra, 2. napvitorla).

A Föld óceánjain közlekedő vitorlás hajók mozgásának érdekessége, hogy nem teljes hátszélben haladnak a leghatéko-



4. ábra. Elméleti napvitorlázási pályák a Naprendszerben. 1. napvitorla: 10 kg tömeg és  $10\,000 \text{ m}^2$  felület (napsugarakra merőlegesen), 2. napvitorla: 1000 kg tömeg és  $100\,000 \text{ m}^2$  felület (napsugarakra merőlegesen), 3. napvitorla: 10 kg tömeg és  $10\,000 \text{ m}^2$  felület (napsugarakkal ideális szögben)

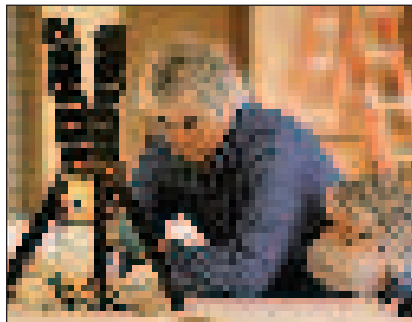
felületre van szüksége ahhoz, hogy a Nap gravitációját éppen kiegyenlítsse. Azonban az 1 kg tömegnek magát a vitorlát is tartal-



6. ábra. A Cosmos-1 tervezett felépítése

tudományos pályafutása igazából véget is ért, bár mozgását azóta is követik: jelenleg olyan Nap körüli pályán van, amelyen a keringési idő mintegy 10 hónap. Teljes eddigi működési ideje alatt az IKAROS mintegy 1500 km/h-val tudta megváltoztatni a sebességét a napvitorlának köszönhetően.

Alig néhány hónappal a japán példa után, 2010. november 19-én az amerikai űrkutatást koordináló NASA állította Föld körüli pályára saját kísérleti napvitorláját, amely a NanoSail-D nevet kapta. Ez egy úgynevezett CubeSat volt, amely teljes egészében befér egy 30 cm × 10 cm × 10 cm méretű dobozba, s tömege mindössze 4 kg. Az ilyen típusú műholdakat általában lelkes, és nagyon is hozzáértő amatőrök készítik, s nagyobb hordozórakétákkal mintegy mellékesen állítják pályára: egyik lényeges szerepük, hogy a rakéta által szállított tömeg egészen pontosan megegyezzen az előzetesen tervezettel. A NanoSail-D a Föld felszíné-



7. ábra. A LightSail űrszonda majdnem teljesen összecsomagolt állapotában

től 650 km-re keringett, napvitorlája pedig mintegy 10 m<sup>2</sup> felületű volt. Így a felszínen lévő nagyobb távcsövekkel fényképet is lehetett készíteni róla. A kísérletet nem tervezték túl hosszúra: az űrszonda a pályára állítás után 240 nappal visszatért a légkörbe és elégett, de előtte sok értékes információval gazdagította a napvitorlák tervezőit.

Persze nem minden eddigi kísérletet koronázott siker. A NanoSail-D első prototípusa 2008-ban a hordozórakéta üzemzavara miatt visszahant a Csendes-óceánba. A Carl

Sagan (1934–1996) által alapított amerikai Planetary Society különösen balszerencsésnek érezheti magát, hiszen 2001-ben és 2005-ben is rakéta-meghibásodás akadályozta meg, hogy a már megépített kísérleti napvitorlásuk eljusson az űrbe. 2005-ben duplán is fájdalmas volt a veszteség, mert a műholdnak (Cosmos-1) – a többi kísérlettől eltérően – propellerszerű, lapátokból álló napvitorlát kellett volna tesztelnie (6. ábra).

A két kudarc ellenére a Planetary Society 2009. november 9-én (éppen Carl Sagan születésének 75. évfordulóján) újabb kísérlet előkészületeit jelentette be a sajtónak. A napvitorla ezúttal a LightSail-A nevet kapta. A NanoSail-D-hez hasonlóan CubeSat méretű műhold viszonylag gyorsan el is készült (7-8. ábra), de az űrbe juttatására hosszú időn át nem volt remény, mert egyetlen olyan rakétán sem volt neki hely, amely a Földtől elég távoli pályára tudta volna állítani. A

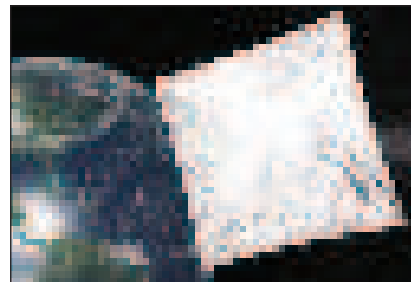


8. ábra. A LightSail napvitorlája a szerelőcsarnokban

földi tesztelés közben hibákat találtak a vezérlőrendszerben, ezek kijavításához pedig idő és mindenekelőtt pénz kellett. 2013-ban aztán végre a szerencse is rámosolygott egy kicsit a LightSail-re: a NASA egy olyan programot indított, amely során CubeSat-ok pályára állítását lényegében ingyen, az űrkutatás népszerűsítéséért végzi el. Így került a LightSail-A egy Atlas-V rakétára, amelyet 2015. május 20-án indítottak el a floridai Cape Canaveral-ből, s olyan pályára állt, amelyről az előzetes előrejelzések azt mutatták, hogy a vitorla kinyitása után is tartható néhány napig, s ez bőven elegendő a tervezett tesztek elvégzéséhez.

A korábbi tapasztalatok alapján talán nem is volt meglepő, hogy nem ment minden a tervek szerint. A földi irányítás nem sokkal a pályára állás után egy szoftverhiba miatt elvesztette a kapcsolatot az űrszondával. A problémát május 31-re sikerült részben megoldani, de a hibás szoftver helyett a próbálkozások ellenére sem sikerült javított verziót feltölteni. Június 7-én kissé akadozó kommunikációval kezdték el a vitorla kinyitását, amelyet aztán már nem gátoltak újabb üzemzavarok. A vitorla teljes felülete 32 m<sup>2</sup>, anyaga pedig egy Mylar márkanevű, a fényt nagyon jól visszaverő műanyag: lényegében

az üdítő-ásványvizet flakonok anyagaként közismert PET (polietilén-tereftalát) egy módosított változata. A teljes vitorla négy háromszögű darabból állt össze; kinyitott állapotban a róla visszaverődő napfény által okozott élénk felvillanások szabad szemmel is jól láthatóak voltak a földfelszínről. Június 10-re meggyőződtek arról, hogy a vitorla kinyitásának bonyolult művelete sikeresen be-



9. ábra. A LightSail 32 m<sup>2</sup>-es napvitorlája Föld körüli pályán

fejeződött (9. ábra). A várakozásoknak megfelelően feladatának befejezése után, június 14-én a szonda a légkörbe való visszatérés közben megsemmisült.

A napvitorlázás megvalósítása már eddig is sok kreatív embert foglalkoztatott, így biztosak lehetünk abban, hogy a jövőben is lehet majd hallani ilyen kísérletekről. A legközelebbi alkalomig már nem is kell olyan sokat várni: 2016 áprilisára tervezik a LightSail-A nagytömegű verzióját, a LightSail-1-nek a pályára állítását. ♣

## Irodalom

1. <https://www.mozaweb.hu/Extra-Videok-Fenyomalom-147817>
2. Budó Ágoston, Mátrai Tibor: Kísérleti fizika III., Tankönyvkiadó, Budapest 1977
3. Jules Verne: Utazás a Holdba és Utazás a Hold körül, Kilényi Mária fordítása, Móra Ferenc Könyvkiadó, Budapest, 1976
4. Svante Arrhenius: Worlds in the Making, Translated by Dr. H. Borns, Harper & Brothers Publishers, New York and London, 1908
5. <http://global.jaxa.jp/projects/sat/ikaros/>
6. Dennis Normile, Science, 2005, Vol. 328, No. 5979, p. 677.
7. [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/smallsats/nanosaild.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/nanosaild.html)
8. Louis D. Friedman, Planetary Report, 2002, Vol. 22, No. 2, p. 19
9. Amir Alexander, Louis D. Friedman, Planetary Report, 2004, Vol. 24, No. 6, pp. 6-11
10. Bill Nye, Planetary Report, 2005, Vol. 25, No. 2, pp. 6-7
11. Doug Stetson, Planetary Report, 2014, Vol. 34, No. 2, pp. 14-18.
12. Jason Davis, Planetary Report, 2015, Vol. 35, No. 1, pp. 6-11.
13. <http://sail.planetary.org/>