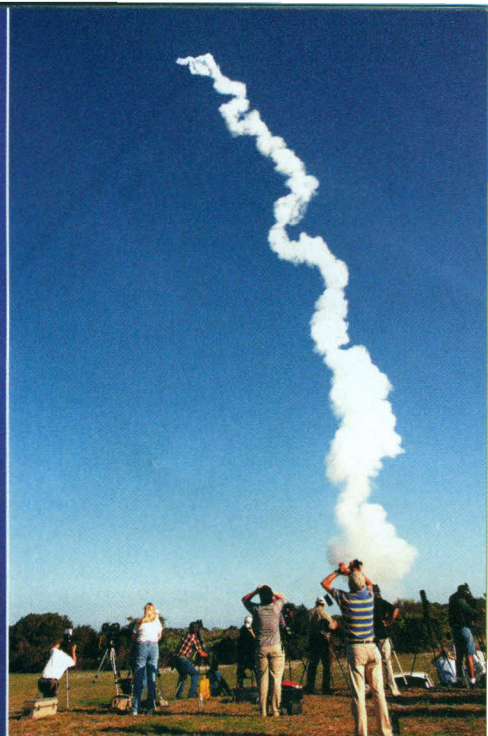
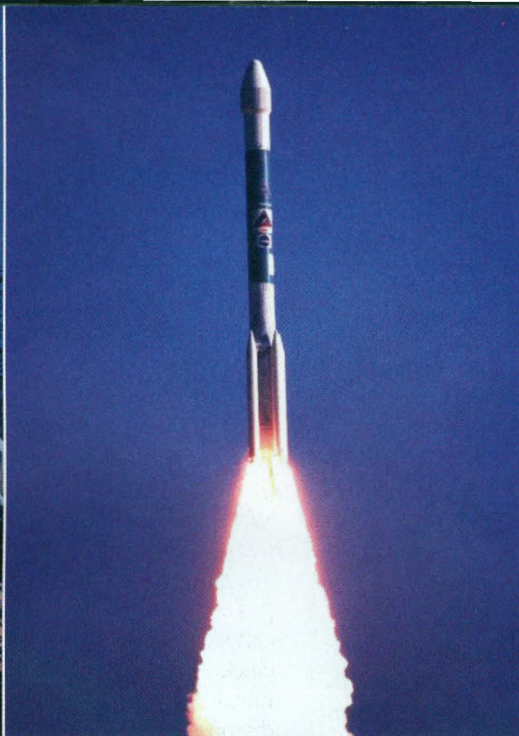


A Stardust-űrszondát  
hordozó rakéta  
kilövése és nyomvonala  
(Forrás: <http://stardust.jpl.nasa.gov>. NASA JPL Caltech)



AZ ŰRKORSZAK LÉGKÖROPTIKAI LÁTVÁNYOSSÁGAI

# RAKÉTA- NYOMVONALAK

**Az első műhold indításával 1957-ben az emberiség történetének új szakasza, az űrkorszak vette kezdetét. Azóta számos távközlési, távérzékelési, meteorológiai, navigációs és katonai műholdrendszer kezdte meg működését, napjainkban pedig különösen fontos az emberes űrrepülés és a Naprendszer bolygórendszerének minél részletesebb feltárása. A különböző célú űreszközöket hordozó rakéták kilövését ezúttal légköroptikai szempontból vehetjük szemügyre.**

**A**z űreszközök űrbe juttatásában elengedhetetlen szerepet játszanak a rakétahajtóművek. Ezeket a magukkal vitt üzemanyag elégésekor keletkező gázok gyors kiáramlása következtében fellépő reakcióerő hajtja előre. Felgyorsításukhoz szükséges módszer szerint kémiai, atom- és elektromos elven működő rakétahajtóműveket különböztethetünk meg. Utóbbi két rakétahajtómű használata ritkább, ezeket a magreakció hője, illetve elektromos energia gyorsítja a kellő sebességre. A kémiai rakétahajtóművek a hajtóanyagban rejlő kémiai energiát alakítják át mozgási energiává, ezeket az üze-

meltetésükhöz szükséges hajtóanyag halmazállapota alapján különíthetjük el.

## Hajtóművek és hordozórakéták

Egyik típusát a folyékony hajtóanyagú rakétahajtóművek alkotják, melyek a tolóerőt létrehozó gázsugarat folyékony anyagkeverék elégetése révén állítják elő. A hajtóanyag különböző komponenseit kezdetben külön tartályokban kell tárolni a rakéta fedélzetén, majd azokat megfelelő módon a tüzelőtérbe táplálni, így ezeknek a hajtóműveknek a szerkezete meglehetősen bonyolult. Ám mégis ez napjaink űrkutatásának alapvető hajtóműtípusa, a

legtöbb űreszköz felbocsátásához ilyet használnak. Bonyolult szerkezete mellett nagy előnye, hogy pontosan szabályozható, üzembiztosan működtethető és tetszés szerint leállítható vagy újraindítható. Sok esetben viszont a megfelelő tolóerőt eredményező hajtóanyagkombináció összetevői mérgezőek és nehezen tárolhatók.

A szilárd hajtóanyagú hajtóművek esetén a tolóerőt a szilárd hajtóanyagok elégetése eredményeként keletkező égéstermékágnak a fúvócsövekből való kiáramoltatásával állítják elő. Indításhoz való előkészítésük rendkívül gyors folyamat, működéskor üzembiztosak és nagy fajlagos tolóerőt adnak, de ha egyszer begyújtották azokat, ak-





Világító spirális alakzat Norvégia felett  
Jan Petter Jorgensen felvételein  
(Forrás: <http://www.spaceweather.com>)



kor a töltet kiegészéig üzemelnek. Hátrányos tulajdonságuk tehát, hogy a hajtómű gyors és pontos leállítás, mint a megbízható irányítás alapfeltétele, sokkal nehezebben oldható meg, mint a folyékony hajtóanyagú rakétahajtóművekben. E nehézségek miatt a személyzetet szállító űrhajók hordozórakétáiban – az amerikai Space Shuttle-űrrepülőgép első fokozatát kivéve – nem alkalmazták ezt a típusú hajtóművet; az űrutasítási hordozórakéták első fokozatainak teljesítménynövelésére viszont számos alkalommal. A folyékony és szilárd hajtóanyagok alkalmazása egyaránt környezetszennyező lehet, az égéstermékek a légkörbe jutva és a levegő víztartalmával keveredve ugyanis savas csapadékot eredményezhetnek.

Az űreszközök felbocsátásához szállító járműként a többlépcsős hordozórakétákat használják, melyek egymást

követően működésbe lépő, szilárd, folyékony vagy vegyes halmazállapotú hajtóanyagú rakétafokozatokból állnak. Ha nem lenne több rakétafokozat, a hajtóanyag kifogyásával a hordozórakéta egyre nagyobb tömegű holt terhet is kénytelen lenne magával szállítani. Ennek kiküszöbölésére a fokozatok kiegészése után a kiürült tartályokat leválasztják. A hordozórakéta beindítását követően a mozgást, az irányváltásokat, a rakétafokozatok leválasztását, az utolsó fokozat kivánt pillanatban történő leállítását a fedélzeti irányítórendszer vezérli.

Nézzük meg példaként a Stardust-űrszonda 1999. február 7-i felbocsátásának lépcsőit sematikus ábránk segítségével. A kilövés (1) után megkezdődött a szilárd hajtóanyag elégetése, majd 1 perccel később az azt tároló tartályok ~20 km-es magasságban leváltak (2),

miáltal sokkal kisebb tömeget kellett tovább gyorsítani. Ezután megkezdődött a fő hajtóanyagtartály üzemanyagának elégetése (3), majd 115 km-es magasságban és 20 ezer km/h sebesség elérésekor, ~4,5 perccel a kilövés után ez a tartály is levált. Néhány másodperccel később működésbe lépett a következő rakétafokozat (4), majd a légkör sűrű rétegének átrepülését követően, 130 km magasságban levált az orrkúp hasznos terhet védő burkolata is (5, 6). 30 perccel a kilövés után az űrszonda elvált a hordozórakétától (7) és megkezdte (sikeres) küldetését.

A hordozórakéták indítása és az ezzel kapcsolatos előkészületek az űrrepülőtereken zajlanak, amik Földünk számos pontján megtalálhatók. Leghíresebbek közülük az Amerikai Egyesült Államok területén található Cape Canaveral-űrközpont és a Vandenberg-támaszpontrendszer, továbbá a legfontosabb volt szovjet, ma orosz űrközpont: a kazahsztáni Bajkonur.

### Jégkristályok a magaslégkörben

A különböző típusú hajtóanyagok elégetése után a már említett káros égéstermékek mellett nagy mennyiségű vízpára is keletkezik, mely a rakéták útjának nyomvonala mentén a légkör magasabb részeibe, a sztratoszférába (10-50 km) és a mezoszférába (50-90 km) is eljuthat. A szóban forgó néhány száz tonna vízpára a légkör alacsonyabb részeiben jelentéktelennek számítana, viszont a Szaharánál akár milliószer szárazabb mezoszférában kulcsfontosságú forrásként említhető. A nyári időszakban ebben a magasságban

Rakéta-nyomvonalak Dennis Fisher, James Young és Nick Hilton felvételein

(Forrás: [http://en.wikipedia.org/wiki/Twilight\\_phenomena](http://en.wikipedia.org/wiki/Twilight_phenomena) és személyes levelezés a megfigyelőkkel)





uralkodó  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  körüli hőmérsékleten a kilövések kapcsán ide érkező vízpárából rövid időn belül jégkristályok képződnek, majd ezekből igen ritka magaslégköri felhők alakulhatnak ki. Az immár jégkristályokból álló rakétanyomvonal napközben az erős napfény miatt nem észlelhető a földfelszínről, viszont láthatóvá válik, ha a Nap a látóhatár alatt járva, szürkület idején alulról megvilágítja azt. A felhőtlen szürkületi égbolt sötét háttere előtt feltűnő, fénylőn tekergő nyomvonal jégkristályai tükrökként verik vissza a már horizont alatt járó Nap fénysugarait. A jelenség ráadásul gyakran nem csak fehér fényű lehet, hanem az azt felépítő jégkristályokon szóródó napfény következtében rendkívüli színekben is pompázhat, ami még látványosabbá teszi ezt a ritka, emberi tevékenységgel összefüggésbe hozható tüneeményt. A rakétanyomvonalak formavilága is igen változatos lehet, ami egyfelől a magaslégkörben uralkodó szélrendszereknek köszönhető.

Szintén e szélrendszerek felelősek a kilövés után keletkező vízpára nagy távolságra juttatásáért is, aminek következtében a kilövés közvetlen környezetétől távolabb is megfigyelhetővé válhat a rakétanyom jelensége. Így történt ez például 1997 augusztusában, a Discovery-űrsikló (STS-85) felbocsátása után is, amikor egy 100 km hosszú, 300 tonnányi vízpárából álló nyomvonal volt észlelhető a légkör 108–114 km közti magasságában az Északi-sarkvidék fölött, holott a kilövésre Floridában került sor.

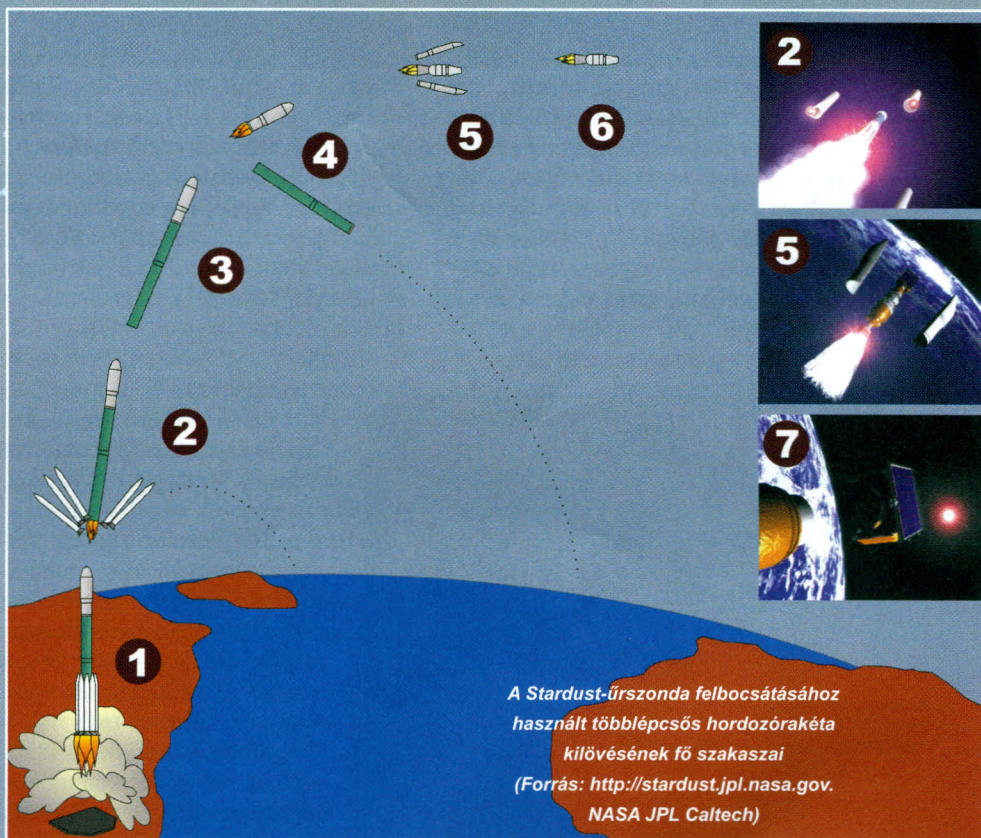
A nyomvonalak látványos formájáért magának a kilövéshez használt rakétának a mozgása, forgása is felelős. Ennek szemléltetésére jó példa az a megfigyelők körében nagy rémületet keltő, szabályos spirális alakzat, mely 2009. december 9-én tűnt fel Norvégia felett. A zöldes csóvából induló fehér, spirális képződményről számos fénykép is készült, ám ezek igen nagy vitát váltottak ki, hiszen sokan úgy vélték, hogy hamisak. Mint az később a hírügynökségek jelentései alapján kiderült, az égen valóban megjelenő fénylő spirál kialakulásáért a tengeralattjáróról indított Bulava ICBM jelű orosz rakéta hibás startja volt a felelős, ami emelkedés közben irányíthatatlanul pörögni kezdett, miközben összes

üzemanyaga kiürült. A megfigyelők elmondása alapján a spirál egyre nagyobbra növekedett, majd homályossá vált, ami az üzemanyag légkörben való szétoszlásával magyarázható.

### Világító felhők

A rakétanyomvonalak és az éjszakai világító felhők között sok hasonlóság ismerhető fel. Utóbbiak szintén a nyári mezoszférában kialakuló jégkristályokból állnak, és hasonlóképpen akkor észlelhetők, ha a Nap a látóhatár alatt  $-6^{\circ}$  és  $-16^{\circ}$  között járva alulról megvilágítja azokat. A világító felhőket alkotó víz főként természetes for-

éjszakai világító felhők formavilága a rakétanyomvonalakétól eltér: azok általában a horizonttal párhuzamos sávokból, vagy hullámokból állnak. Hasonlítanak ugyan a jóval alacsonyabban, 8–10 km magasságban megjelenő fátvolfelhőkhez, ám az éjszakai világító felhők rendkívül ritkák: jellemző sűrűségük mindössze 0,01–0,1 jégkristály köbcentiméterenként. E jégkristályok ráadásul túl kicsik ahhoz, hogy fényszóródást idézzenek elő (átmérőjük mindössze 0,03–0,15  $\mu\text{m}$ ), a felhő kékes és ezüstös színe az apró jégkristályokról visszavert napfénynek köszönhető. A szó szoros értelmé-



rásokból, például nagyobb vulkánkitörésekből, a világűrbeli érkező nagy víztartalmú meteoritokból és különböző levegőkémiai reakciókból származik.

A megfigyelések viszont arról tanúsodnak, hogy az űreszközök felbocsátását követően a világító felhők is gyakrabban tűnhetnek fel, és látványosabbak is lehetnek, ami szintén a rakéta hajtóanyagának égése után keletkező vízpára magaslégkörbe kerülésével hozható összefüggésbe. Ám az

ben véve tehát e felhők nem világítanak, csupán szintén a fénysugarak és a jégkristályok játékanak köszönhetően válnak láthatóvá. A magaslégköri felhők jégkristályai már néhány fokkal magasabb hőmérsékletű zónába süllyedve rendkívül gyorsan elszublimálnak, így e tüneemények rövid ideig figyelhetők meg és leggyakrabban az űrközpontok környezetében élők lehetnek tanúi e látványos légköroptikai jelenségnek.

FARKAS ALEXANDRA