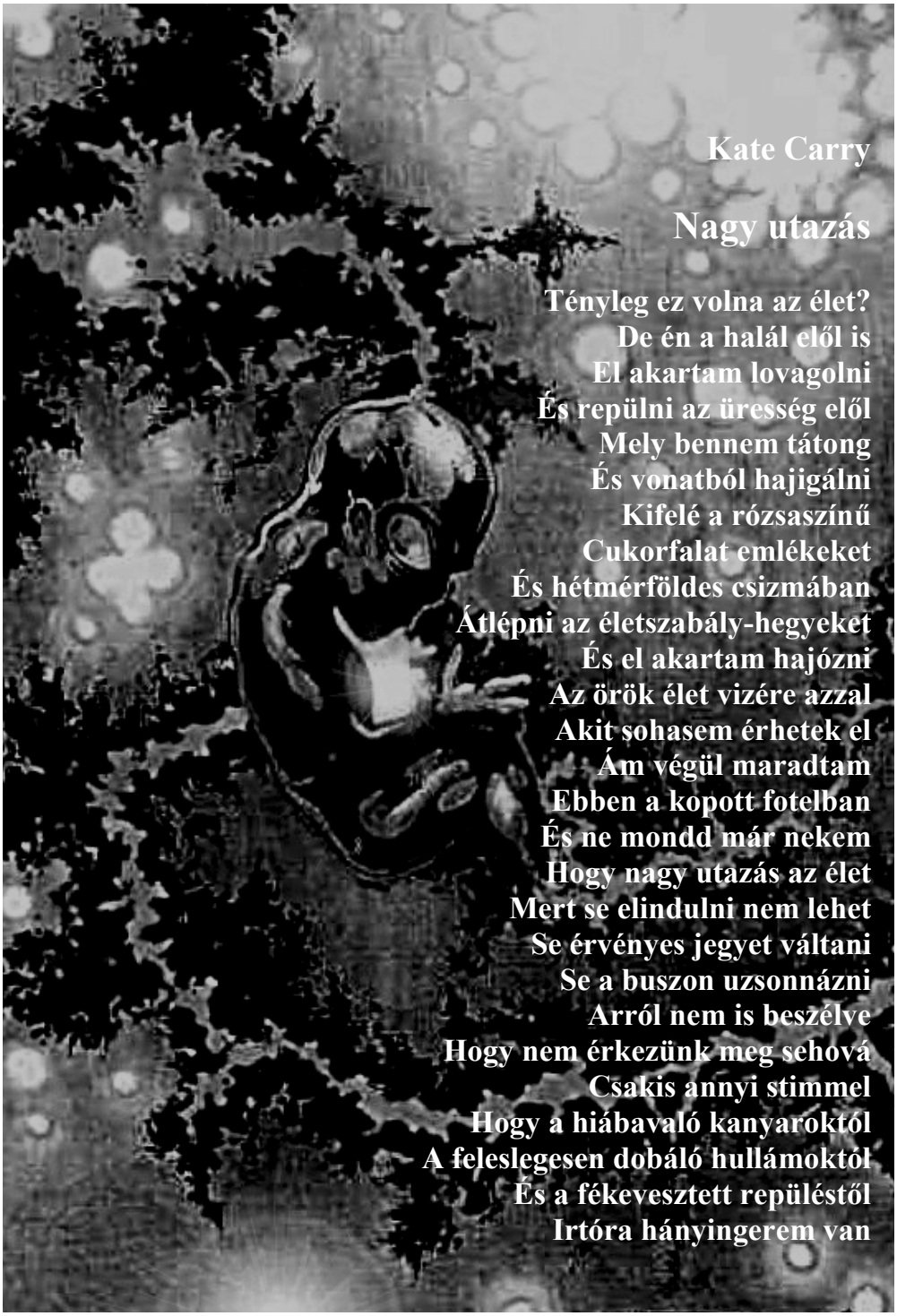


Kate Carry

Nagy utazás

Tényleg ez volna az élet?
De én a halál elől is
El akartam lovagolni
És repülni az üresség elől
Mely bennem tátong
És vonatból hajigálni
Kifelé a rózsaszínű
Cukorfalat emlékeket
És hétmérföldes csizmában
Átlépni az életszabály-hegyeket
És el akartam hajózni
Az örök élet vizére azzal
Akit sohasem érhetek el
Ám végül maradtam
Ebben a kopott fotelban
És ne mondd már nekem
Hogy nagy utazás az élet
Mert se elindulni nem lehet
Se érvényes jegyet váltani
Se a buszon uzsonnázni
Arról nem is beszélve
Hogy nem érkezünk meg sehová
Csakis annyi stimmel
Hogy a hiábavaló kanyaroktól
A feleslegesen dobáló hullámoktól
És a fékevesztett repüléstől
Irtóra hányingerem van

Csaba Zoltán

Az űrbéli hajtóműrendszerek fejlődési lehetőségei

Ezt a tanulmányt kezdhetném hagyományosan azzal, hogy az emberiség régi álma, hogy eljuthasson a csillagok közé. Persze, ez a kiinduló állítás nem minden szempontból állná meg a helyét, mert nem is olyan régen – csillagászati léptékben mérve csak egy szempillantással ezelőtt – az emberek még szentül meg voltak győződve arról, hogy az égen látható csillagok csak apró lyukak egy Földet beborító hatalmas leplen, és ezeken tündököl át a mennyország fényessége. Természetesen vallástól és kortól függően a csillagok iránt táplált hiedelmek széles skálán változtak, de abban biztosak lehetünk, hogy a XXI. század elejére kialakult világképhez hasonló az emberiség történetében még nem létezett soha. Így hát inkább azzal kezdeném a mondanivalómat, hogy változnak az idők, és ezzel együtt változnak az álmaink is.

A múlt század kezdetén valóra vált a repülés ősi álma, és a XX. század végére hétköznapjaink részévé vált, mint megannyi más technikai csoda. Hol születnek vajon ezek a néha meglepően különleges, de sokszor mégis olyan hasznos álmok? Talán meglepő lesz, amit állítok: modern korunk technikai vívmányait az emberiség nagyon szűk rétegének köszönhetjük. Ezek az emberek jórészt tudósok, mérnökök és írók (esetleg mind együtt). Fantáziájukat kivetítik alkotásaikon keresztül a nagyobb tömegek elé, és így személyes álmaik létjogosultságot nyernek társadalmunkban. Csodálatos folyamat ez, de tanulmányom nem erről fog szólni, hanem a – talán legnagyobb kihívást jelentő – vágyunk, az űr meghódításának lehetőségeiről.

De mégis miért olyan megkapó ez a látomás az emberek számára? Talán azért, mert a hétköznapi élettől annyira idegen az űr hideg és sötét óceánja, hogy mágnesként vonzza a képzeletet. A csillagok időtlen világa kiszakítja az embert a földi problémák nyomása alól, talán néhány pillanatra elménk képes felfogni a tér és az idő végtelenségét, és ettől felszabadulnak a korlátok. A fantáziánk életre kel, és máris az űr vándoraiként láthatjuk önmagunkat. Vannak olyan emberek köztünk, akikben annyira erős a vágy, hogy kíméletlen kitartással valóra váltják az emberiség újabb – talán a legnagyobb – álmát.

Sokan szeretnének a Mars felszínén állni, a Jupiter holdjaiban gyönyörködni vagy a Szaturnusz gyűrűit csodálni. Hogy miért? Igazi választ nem fogunk találni erre a kérdésre, mint ahogy arra sem, hogy mi az életünk értelme. De ha meg lehet oldani, miért ne tennénk meg? Miért ne utazhatnánk el a közeli csillagokig vagy még távolabb? Persze, százezer indokot felsorolhatnánk, miért ne tegyük meg (rengeteg energia, pénz, veszély), de az ember ezekkel igazán sosem törődött. Ha egyszer megjelenik a fejekben az igény, a megvalósítás máris megkezdődött. Vágjunk hát neki az utazásnak térben és időben, a jelenleg megvalósítható technológiáktól a távoli jövő lehetőségéig.

BARANGOLÁS A NAPRENDSZERBEN

A csillagok felé vezető út igencsak rögös és veszélyes lesz, ezt még a laikusok is belátják. Az emberiség jelenlegi technikai fejlettsége a szomszédos bolygókra már eljuttathatná fajunk képviselőit, de ennek kivitelezése is nagy veszélyekkel járna, ezért évek óta halogatják a komoly tervezői munka megkezdését. Amit jelenleg fel tudunk mutatni, az a Hold meghódítása. Azért még ez is elég erős túlzás, hiszen alig egy tucat ember hagyta lábnyomát a Hold porában, ami a valódi meghódítástól még messze van,

de az vitathatatlan, hogy a Hold felszíne technikailag már évtizedek óta elérhető. Az igazi probléma a Föld környezetének benépesítésében maga a Föld, illetve annak gravitációs mezeje. Ennek legyőzésére minden esetben szükség van, ha valamilyen tárgyat az űrbe szeretnénk eljuttatni, tehát ez teszi igazán költségessé és veszélyessé az űrutazásokat.

A hordozó rakéták [1]

A mai, korszerűnek mondható űrbéli szállítórendszerek gyakorlatilag kizárólag a kémiai reakciókra épülő rakétákkal operálnak. Fő hátrányuk, hogy a rossz hatásfok miatt óriási mennyiségű üzemanyagra van szükségük, ráadásul ennek az üzemanyagnak a felemelésére is további üzemanyag-mennyiség szükségeltetik. Jelenleg az űrbe induló rakéták tömegének 85%-a üzemanyag. Mégis, miért használjuk még ezeket a rakétákat? A fő ok, hogy ezek elkészítése biztonsággal megoldható, és az 1950-es évek óta nagyon sok tapasztalat gyűlt össze üzemeltetésükkel kapcsolatosan. Nézzük hát röviden a napjainkban használatos típusok működését.

Az űreszközök felbocsátásához legtöbbször *folyékony hajtóanyagú* rakéta-hajtóműves hordozórakétát használnak. Szerkezetük meglehetősen bonyolult, mivel a szükséges hajtóanyag-komponenseket külön tartályban kell tárolni, majd a tüzelőtérbe táplálni. A folyékony hajtóanyagú rakéta hajtóanyagtartályból, tápláló rendszerből, hajtómű házból, a működést szabályozó indító és leállító hajtómű-automatikából áll. A kétkomponensű hajtóanyag az oxidáló anyagból (folyékony oxigén, salétromsav, nitrogéntetraoxid), és a tüzelőanyagból (finomított petróleum, kerozin, metilalkohol, folyékony hidrogén) áll. A tüzelőtér nyomása körülbelül 5-6 MPa, az égési hőmérséklet 3-4000 K, a tolóerő akár több ezer MN-ig is terjedhet.

A nagyobb tömegű rendszereket, az indítás nehézségeinek leküzdésére *szilárd hajtóanyagú rakétákkal* egészítik ki. A szilárd hajtóanyagú rakétahajtóművek a tolóerőt a hajtóanyag elégetése során keletkező gáz fúvócsövön keresztül történő kiáramoltatásával állítják elő. Az ilyen hajtóművek szerkezete nagyon egyszerű, ugyanis a szilárd töltet a tüzelőtérben helyezkedik el. Előnyük, hogy gyorsan előkészíthetők az indításhoz, hátrányuk viszont az alacsonyabb fajlagos tolóerő, illetve, hogy az égési folyamat szabályozása egyáltalán nem, vagy csak nagyon nehezen oldható meg. A tüzelőtér nyomása itt jóval magasabb, mintegy 200 MPa. Hajtóanyagként zselatinszerű nitrocellulózt, ammónium-nitrátot vagy kálium-perklorátot alkalmaznak.

Napjainkban a leggyakrabban használt hordozórakéták az alábbiak:

Ariane – Az Európai Űrügynökség (ESA) hordozórakétája. Az első, Ariane-1 típusú rakétát 1979 karácsonyán próbálták ki. Az első indítások közül több is kudarccal végződött, ennek ellenére kiemelkedően magas az üzembiztonságuk. Az Ariane hordozórakéták üzemeltetője a francia Arianespace vállalat. Jelenleg ennek a rakétának már az ötödik generációja fut. A maximálisan 55 m magas 725 tonnás rakéta indításkor 13,7 MN tolóerő kifejtésére képes, amivel geostacionárius (36 ezer km-es) pályára 6,9 tonnás műholdat képes feljuttatni.

Delta – Az amerikai Boeing vállalat hordozórakétája. 1960 óta 259 indítást hajtottak vele végre, az üzembiztonsága 97%-os, és ezzel világviszonylatban az első helyen áll. A Delta II 7425 típus egy nagy megbízhatóságú középkategóriájú rakéta, amely 1,8 t hasznos terhet juttathat geoszinkron (GTO) pályára. A Delta III egy újabb, nagyobb és

erősebb típus, két darab 3,8 t tömegű űrszondát tud ugyanott pályára állítani. A legújabb fejlesztés pedig a Delta IV, amely már 13,2 t teherrel képes megbirkózni.

Titan – Az amerikai légierő hordozórakétája. Egyik legismertebb típusa talán a Titan IV-B/Centaur, amely a Szaturnuszhoz tartó Cassini űrszondát juttatta ki a világűrbe. Két darab szilárd hajtóanyagú rakétahajtóműve 15,2 MN tolóerőre képes. Az alumíniumból készült folyékony hajtóanyagú fokozata 30 méter magas, és 3 méter az átmérője. A Centaur fokozat 8,8 méter magas, és 147 kN tolóerőt fejt ki. Az alumíniumból készült raktér magassága 20,1 méter, átmérője pedig 5 méter. A Titan/Centaur előállítási költsége 250 millió USD, segítségével eddig nyolc fellövést hajtottak végre.

H-2A – Japán 1970-ben csatlakozott a saját hordozóeszközzel rendelkező nemzetek sorához egy lambda típusú rakéta indításával. 1994-től kezdve pedig geostacionárius eszközöket is képesek pályára állítani az Ariane IV-hez hasonló felépítésű H-2 jelű nagyrakétájukkal. A legújabb fejlesztésű – 2001-ben elkészült – H-2A jelű hordozóeszköz közel 285 tonna, majdnem 53 méter magas, és 3 tonna hasznos terhet tud GTO pályára juttatni. Kifejlesztése 970 millió USD-ba került a japán űrügynökségnek (NASDA).

GSLV – Az első indiai rakéta (SLV-3) 1980-ban indult a Sriharikota űrközpontból. Azóta India töretlenül halad előre a hordozórakéta-fejlesztés útján. 1993-ban megépítették az első folyékony hajtóanyagú PSLV jelű rakétájukat, majd 2001-ben útjára indult az első igazán nagy rakétájuk – a GSLV – ami komoly konkurenciát jelenthet majd a geostacionárius műholdakat pályára állító kereskedelmi célú hordozórakéták piacán. A csaknem 400 tonnás, 50 méter magas rakéta 2,5 tonnás rakományt képes GTO pályára állítani.

Long March – Fejlesztését 1960-ban kezdte el Kína. Az első generációs LM-1 típussal először 1970-ben sikerült alacsony Föld körüli pályára juttatni egy kínai műholdat. A legújabb változat, az LM-3C már 3,8 t tömegű terhet juttathat GTO pályára. Megbízhatósága nem a legjobb, de mivel olcsó, nagy a kereslet iránta.

Proton – A 60 m magas, 700 tonnás orosz hordozórakéta 1965-ben repült először. Három-, illetve négyfokozatú változata létezik, indító tolóereje 15,2 MN. A MIR űrállomásra irányuló missziók során sokszor használták teherszállításra. A Nemzetközi Űrállomás építésekor is számos modult vitt fel a világűrbe. Elsősorban műholdak geostacionárius pályára állítására használják. Az utóbbi 10 évben 93% volt a megbízhatóságuk. Mintegy 5,5 t hasznos teher GTO pályára állítására képesek.

Többször felhasználható űreszközök

Az előzőekben felsorolt eszközök közös jellemzője, hogy csak egyszer felhasználhatóak, ami tovább emeli az űrbe jutás költségeit. 1981-ben azonban az első amerikai űrrepülőgép indításával az űrutazás és az űrkutatás új korszaka vette kezdetét.

A *SPACE SHUTTLE* rendszer – Az „új típusú" szállítórendszer a világűrben űrhajóként, leszálláskor pedig repülőgépként közlekedik. Az egyik legnagyobb előnye, hogy többször felhasználható, személyzete akár 7-8 főnyi is lehet, hasznos terhe pedig a 30 tonnát is elérheti. Az amerikai Space Shuttle űrrepülőgép-rendszer (STS) az első – és jelenleg az egyetlen működő – többször felhasználható űrhajózási hordozóeszköz. A napjainkban használatos hordozórakétákhoz hasonlóan függőlegesen indul, de visszatérése a Földre siklórepüléssel történik, ezért használatos rá az űrsikló elnevezés is. A

rendszer központi eleme maga az űrrepülőgép, szerkezeti kialakítását tekintve egy deltaszárnyú repülőgéphez hasonlít. Szerkezeti anyagai alumínium- és titánötvözetek. A szárnyakat és a törzs alsó részeit a sűrű légkörbe való visszatéréskor hővédő anyagból készített csempék védik a káros hatásoktól. A mintegy 34 ezer hővédő lapka alatt a borítás hőmérséklete – a visszatérés során – nem lépi túl a 175°C-ot. A személyzet elhelyezésére kétszintes fülke szolgál. A fülke mögött helyezkedik el a két nagyméretű hengerpalást-ajtóval zárható raktér. A raktérben a hasznos teher mellett egy 15 méter hosszú manipulátor-kar is megtalálható. Hátul, a függőleges vezérsíknál három folyékony hajtóanyagú rakétahajtómű került beépítésre. A hajtóanyag egy óriási tartályban helyezkedik el, amelyre az űrrepülőgépet, valamint a pályára állást segítő két nagytolóerejű, szilárd hajtóanyagú gyorsító-rakétát szerelik.

Az STS összeszerelve 56,08 méter hosszú, tömege a start előtt 2010 tonna, hajtóműveinek tolóereje pedig 28,5 MN. Az orbitális egység (maga az űrrepülőgép) 37,68 méter hosszú, fesztávolsága 23,79 méter, teljes tömege pedig 105 tonna. A rakodótér átmérője 4,6 méter, hosszúsága pedig 18,3 méter. Föld körüli pályára állítható hasznos terhe 29,5 tonna, a Földre visszahozható hasznos teher maximálisan 14,5 tonna lehet. Előállítási költsége 1,2 milliárd USD.

Az Egyesült Államok már összesen csak három űrrepülőgéppel rendelkezik. Az első, a *Columbia* 1981-től 2003. február 1-ig üzemelt, a *Challenger* 1983-tól 1986. január 27-ig működött. Mindkettő felrobbant műszaki hiba következtében, hét űrhajós halálát okozva. A többi (*Discovery* 1984, *Atlantis* 1985, *Endeavour* 1992) használatát előreláthatóan sokáig nem fogják engedélyezni a Columbia-baleset kivizsgálása miatt, ami komoly visszalépést jelenthet az embereket is utaztató űrhajózásban.

A *Buran* – Az oroszok sem akartak lemaradni az űrversenyben, ezért el is készítették saját űrrepülőgépüket, a Buránt. Az 58,8 méter magas, 2436 tonnás szerkezet 1988. november 15-én indult első útjára automatikus repülésben, űrhajós személyzet nélkül. Ez volt az első, egyben az utolsó útja is. Pénzügyi problémák miatt ugyanis Oroszország 1993-ban véglegesen leállította a programot. A Burán az Enyergija óriásrakéta segítségével emelkedett a magasba. Működtetése elég gazdaságtalan, mivel amerikai társával ellentétben csak az orbiter tér vissza a Földre, az óriási üzemanyagtartály megsemmisül. Az egyik legnagyobb előnye viszont, hogy személyzet nélkül is feljuttatható a világűrbe, és az Enyergija hordozórakéta önmagában is használható. Egyébként a személyzet maximális létszáma tíz fő lett volna, a hasznos teher nagysága elérte volna a 30 tonnát, míg a Földre visszahozható terhe akár 20,4 tonna is lehetett volna.

A *Hermes* – Az Európai Űrügynökség is indított űrrepülőgép-programot 1986-ban. A 21 tonna tömegű Hermes egy Ariane-*5* orrára szerelve jutna ki a világűrbe három fős személyzettel és 3 tonna hasznos teherrel. A fejlesztés első fázisa lezárult, ám pénzügyi problémák miatt a programot 1992-ben leállították.

A *HOPE-X* – Ezt a személyzet nélküli űrrepülőgépet 1987 óta a japánok fejlesztik. Ez egy többször felhasználható űrszállító rendszer, amellyel sokkal olcsóbbá válhat majd az űreszközök világűrbe juttatása. A 2010-re ígért űrrepülőgép valószínűleg a Nemzetközi Űrállomás egyik teherszállító űrhajója lesz, de 2002-ben fejlesztését pénzügyi okokra hivatkozva egyelőre befagyasztották. A 16 méter hosszú HOPE 10,5 tonna tömegű, 3 tonna hasznos terhet vihet magával. Egy átalakított H-2A rakéta segítségével jut majd ki a világűrbe.

Ezzel véget is értek jelenlegi lehetőségeink. Nyugodtan állíthatjuk, hogy a hagyo-

mányos hordozó rendszerek komoly válságban vannak, és ez minden bizonnyal rá fogja nyomni bélyegét századunk első évtizedének emberes küldetéseire, de természetesen lehetnek másféle utak is. A kutatást az űrügynökségek is komolyan gondolják, többek között a NASA is pályázatot írt ki olyan többször használatos űrjárművek kifejlesztésére, amelyek leválthatják a most üzemelő rakéták generációit. Talán meglepő, de jelenleg legalább 20 újfajta eszközt fejlesztenek világszerte, hogy csökkenthetőek legyenek az űrutazás költségei. Lássunk a tervek közül néhány egymással versengő, ígéretes megoldást.

A Space Express terve – a RAMJET [2]

A NASA nemrég bejelentette, hogy befejezte egy alapvetően új technológiájú rakétahajtómű két évig tartó tesztelését, amellyel a jövő űrutazása lényegesen közelebb fog állni a légi közlekedéshez. Az új torlósugár-rakétahajtómű kombinációt a NASA Marshall Space Flight Centerben fejlesztik. A torlósugár-hajtómű (RAMJET) mozgó alkatrész nélküli sugárhajtóművet takar. A hajtóműben nem találjuk a hagyományos gázturbinákra jellemző kompresszor- és turbina lapátsorokat, mert a beömlőnyílás változó keresztmetszetű diffúzoros kialakítása, miközben lelassítja szubszonikusra (hangsebesség alá) az áramlást, össze is sűríti a levegőt. A kompresszió hatására felmelegedett levegő a tüzelőtérbe kerül, ahol tüzelőanyaggal keveredik és meggyullad. Az égéstermék speciális Laval-fúvókán nagy sebességre gyorsul, és tolóerőt hoz létre. A torlósugaras rakétahajtómű a rakétahajtómű és a torlósugár-hajtómű kombinációja. Előnye, hogy önállóan indítható, és a légkör oxigéntartalmát használja fel egy szakaszon az üzemanyag elégetésére. Az igazi nyereség ebben a rendszerben annak az oxidálószer-tömegnek a megspórolása, amely 2 Machról 6 Mach sebességre történő gyorsításhoz szükségeltetett volna.

A NASA HYPER-X programja – a SCRAMJET [3]

A Space Expressben is használt ramjetek teljesítményének felső határa körülbelül 6 Mach (hatszoros hangsebesség), efölött az égéstér olyan forróvá válik, hogy az égéstermék (víz) elbomlik hidrogénre és oxigénre, tehát nem szabadul fel olyan energia, ami az űrrepülőt előre hajthatná.

A magasabb sebességek eléréséhez szuperszonikus belsőégésű ramjetre (SCRAMJET) van szükség. Ennek a kialakításánál csökkentik a belépőnyílásnál a légáram összenyomódását, így az nem lassul le hangsebesség alá. A szuperszonikus áramlásban nem alakulnak ki a nagy energiájú torlóhullámok, így a levegő hőmérséklete nem növekszik olyan nagymértékben, mint a ramjetek esetében. Az üzemanyagot ebbe a szuperszonikus légáramba fecskendezik, ahol összekeveredik a levegővel, és ezredmásodpercek alatt elég. A scramjetek felső sebességhatárát még nem határozták meg, de elméletileg magasabb annál, mint ami a Föld körüli pályára álláshoz szükséges (20-25 Mach). Ilyen magas sebességeknél azonban már nem jelentős a scramjetek előnye a rakétákkal szemben, mivel a nagy légköri sebességeknél számos szerkezeti feszültség lép fel a súrlódástól, ami a rakétáknál felszálláskor nem következik be.

A hiperszonikus scramjet hajtóművek számos különféle üzemanyaggal működhetnek, többek között hidrogénnel és szénhidrogénekkel is. A lehűtött folyékony hidrogén –

amely az amerikai űrsiklót is hajtja – azért vált igen népszerűvé az űrrepülők fellövésénél, mert elégetés előtt felhasználható a hajtómű és a jármű hűtésére is. A szénhidrogéneket nem lehet ilyen jól hasznosítani, és alkalmazhatóságuk felső határa kevesebb, mint 8 Mach.

A scramjettel hajtott űrrepülők esetében – amelyeket úgy terveznek meg, hogy képesek legyenek nagy mennyiségű levegő befogadására – elmosódik a határ a hajtómű és a jármű között. Az érkező szuperszonikus légáram lökéshullámot hoz létre a repülőtest orránál, és szétterjed az atmoszférában. A jármű alsó fele és a lökéshullám között lévő összenyomott levegő kerül a hajtóműbe. A belépő diffúzoron az áramlás lassul, a levegő emiatt felmelegszik. Az égéstérben elég az üzemanyag, majd a reakció végterméke egy belső és egy külső fúvókán át kitágul, aminek eredményeképpen tolóerő generálódik. A jármű alsó részén fellépő magas nyomás nagy felhajtóerőt is biztosít, ami levegőben tartja az űreszközt.

Hogy kiszélesítsék a scramjetek alkalmazási tartományát, a mérnökök olyan járműveket terveztek, amelyek mind scramjet, mind ramjet üzemmódban képesek repülni. Az ilyen kétféle üzemmódú működés vagy úgy érhető el, hogy változtatható geometriájú hajtóművet szerkesztünk, vagy úgy, hogy a különböző helyeken lévő szerkezetek között váltogatjuk az üzemanyagáramot. Mivel sem a ramjetek, sem pedig a scramjetek nem működnek hatékonyan 2 vagy 3 Mach alatt, felszálláshoz egy harmadik fajta (hagyományos gázturbina vagy rakéta) hajtóműre van szükség. Az úgynevezett rakéta alapú kombinált ciklusú hajtóművek, amelyek űrjárművek esetében használhatóak, egy olyan rakétán alapszanak, amelyet beépítenek a scramjet égőterébe, hogy biztosítsa a tolóerőt a felszállás után a hangsebesség alatti és az alacsony szuperszonikus sebességeknél. 6 Mach környékén a ramjet működési módot a scramjet üzemmód követi (Mach 12-ig), ami után ismét a rakéta lép működésbe a scramjetet kiegészítve. 18 Mach felett már ismét a rakéta mozgatja és pályára is állítja a járművet, ezzel lehetővé válik a szabad űrbéli manőverezés, mivel a scramjet működéséhez szükséges levegő a világűrben nem áll rendelkezésre.

A NASA jelenleg ilyen rendszerek számos változatát teszteli számítógépeken és szélcsatornákban.

A Rotary Rocket űrhelikoptere [4] *– a hagyományos technológia versenyképes változata*

A polgári űrtechnika a jövőben jelentős konkurenciát fog okozni a jelenleg még a piac nagy részét birtokló nemzeti űrügynökségeknek, mint a NASA vagy az ESA. Az amerikai űrrepülőgép még valószínűleg sokáig üzemben marad, azonban néhány éven belül megjelenhetnek az új technológiákon alapuló, embereket is szállító polgári, katonai és nemzeti űrjárművek.

Az egyik éllovas – a *Rotary Rocket* vállalat – egy egyfokozatú, függőlegesen startoló és leszálló, pilóta által irányított, többször felhasználható űrrepülőgép fejlesztésébe kezdett. A *Roton* nevezetű űrjármű érdekessége, hogy folyékony üzemanyagú rakétaként jut a világűrbe, majd, mint egy helikopter ereszkedik vissza a földre. A munkálatok és a tervezés 1996 végén kezdődtek el, és 18 hónappal később már a prototípus megvalósításán dolgoztak.

A függőleges helyzetben fellőtt űrjármű két pilóta irányításával alacsony föld körüli

pályára áll, majd a műhold(ak) megfelelő ponton való elhelyezése után kinyílnak a rotorjai, és az űrrepülőgép belép a légkörbe. Bizonyos magasságban a rotorokat kis rakéták forgatni kezdik, majd egy helikopterhez hasonlóan, a fellövést követő 72 órán belül leszállnak. A kúp alakú űrjármű átmérője a talpánál 6,7 m, magassága 19,2 m, tömege start előtt 181 tonna. A hasznos teher lehetséges mérete 3,5 x 4,9 méter, tömege pedig 3 tonna lehet.

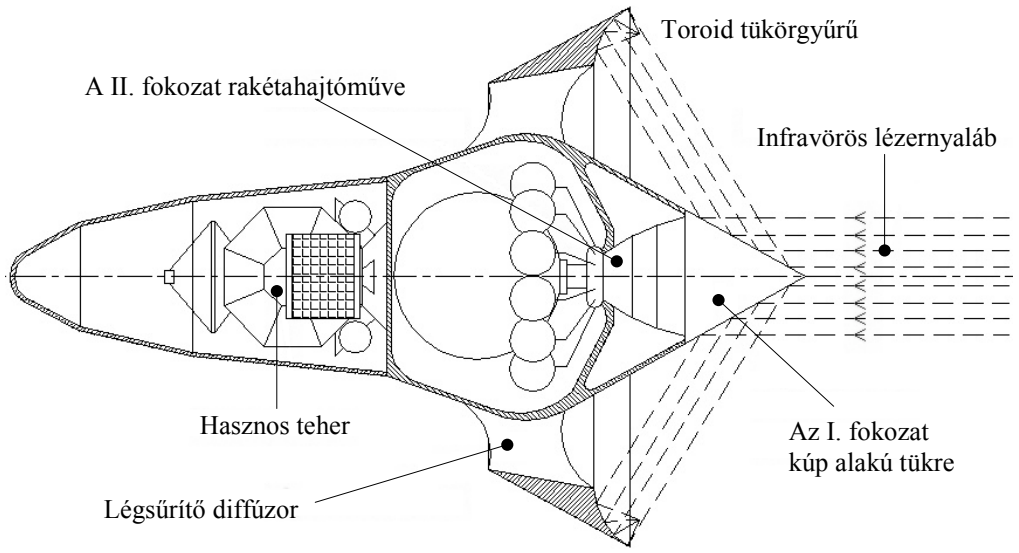
A többször felhasználható űreszközök igazán akkor tennék nagyon olcsóvá az űrrepülést, ha a meghajtáshoz szükséges energia egy részét vagy az egészet a Földön, környezetbarát energiaforrásokból állítanák elő. Ennek megoldására is léteznek kipróbált, működőképes technológiák.

Az elektromágneses katapult [5]

A megoldás lényege, hogy egy hagyományos űrsiklót nem hatalmas üzemanyagtartályra rögzítve állítanák a start helyére, hanem egy lineáris villamos motorra szerelve, mélyen a Föld alól indítanák. A megoldás elve elég egyszerű, egy háromfázisú villamos motor állórészét síkba kell teríteni, míg a forgórész lesz maga a gyorsítani kívánt jármű (hasonlóan a lebegtetett vasutakhoz). A sín hosszában végigfutó szupravezető mágneseken egy vagy több feszültség-hullámot végigfuttatva a kialakuló mágneses tér maga után húzza a „mozgórészt". A rendszer alkalmazására több országban is van már példa, hiszen Japánban és Németországban – a komoly befektetéseknek köszönhetően – jelenleg 400-500 km/h sebességgel képesek utasokat szállítani a hasonlóképpen meghajtott MAGLEV vasutak. Persze, az űrhajó indításához ennél nagyobb sebességre lenne szükség. Ha az előzőeket figyelembe vesszük, akkor a mágneses gyorsításnak az indítási folyamat végére egy ramjet hajtómű beindításához elegendő kezdősebességet kellene biztosítania. Ez azt jelenti, hogy a több kilométeres pályarendszernek legalább 2500 km/h-ra kellene gyorsítania az egész űrjárművet. Ezt elősegítheti a föld alá épített pályarendszer, mert a csatornából ki lehet szivattyúzni a levegő egy részét, ezzel is csökkentve a gyorsításhoz szükséges energiát. Az indító-rendszer tehát tiszta villamos energiával működhetne, minden gázkibocsátás nélkül. A kilövő csatornát elhagyva azonnal indítható lenne a ramjet-, majd a scramjet hajtómű, illetve a felső légrétegek elérésekor a rakétahajtóművek állítanák végső pályára a siklót. Az űrrepülőgép ezek után hagyományosan, vitorlázó repülőként térhetne vissza.

A maglev rendszer további előnye, hogy szinte alig igényel karbantartást, mivel nincsenek mozgó és súrlódó alkatrészei, ráadásul újra és újra felhasználható. A NASA és a Lawrence Livermore Nemzeti Laboratórium terveiben szereplő mágneses kilövőállásból átlagosan 90 percenként indítható lesz egy-egy űrrepülőgép. Nagyjából 2005-re várható, hogy munkába állhat az első olyan maglev rendszer, amellyel kisebb távközlési műholdakat kilogrammonként nagyjából 1000 USD költséggel lehet pályára állítani (most ez még több, mint 10 ezer dollárba kerül). További 15 éven belül az összeg néhány száz dollárra csökkenhet, és a pályára juttatandó eszközök mérete is jelentősen növekedni fog. Ha minden a tervek szerint alakul, akkor már 2020 körül mágnesesen katapultált űrsiklókkal menetrendszerű járatok indulhatnak Föld körüli pályára.

A mai űreszközök – mint láttuk – magukkal viszik energiaforrásukat. Az űrutazás költségei drasztikusan csökkenthetők lennének, ha nem kellene az üzemanyagot és a nehéz alkatrészeket szállítani, ehelyett nagyintenzitású lézerfényt vagy mikrohullámú energiát sugározhatnánk a járművekbe. A NASA és az Amerikai Légierő az elmúlt években támogatott kísérletei során bemutatott egy egészen különleges megoldást: a „fényűrhajót". A kis tömegű szerkezet egy földről indított, pulzáló infravörös lézersugár mentén halad. Az űrhajón található fényvisszaverő felületek a sugarat egy gyűrűre fókuszálják, ahol az felmelegíti a levegőt a Napfelszín hőmérsékletének ötszörösére, aminek következtében a levegő robbanásszerűen kitágul és tolóerőt generál.



1. ábra
FÉNYŰRHAJÓ-MODELL

Egy olyan 10 kW-os széndioxid lézer felhasználásával, amely másodpercenként 28-szor pulzál, sikeresen lőttek ki forgás által stabilizált 10-15 cm átmérőjű miniatűr fényűrhajókat, akár 30 méter magasságba is, mindössze három másodperc alatt. Ha 100 kW-ra emelik a lézer teljesítményét, az csaknem 30 kilométeres magasságig teszi majd lehetővé a röptetést. Jóllehet, a mai modellek kevesebb, mint 50 grammot nyomnak, az ötéves cél az, hogy egy 1 kilogrammos mikroműholdat juttassanak földközeli pályára egy hagyományos, 1 megawattos földi telepítésű lézer segítségével, ami mindössze néhány száz dollárba kerülő elektromos energiát jelentene.

A jelenlegi fényűrhajó modellek repülőgép minőségű alumíniumból készülnek. Egy aeroshellnek nevezett borításból, egy gyűrű alakú sisak-részből, és egy olyan far-részből állnak, ahol egy optikai és egy tágulási nyílás található. Az atmoszférikus repülés során az első rész összenyomja a levegőt, és a hajtómű bemenetéhez irányítja. A gyűrű alakú sisak felveszi a lökés erejét. A hátsó rész parabola alakú gyűjtőtükörként szolgál, ami egy gyűrű alakú fókuszhelyre koncentrálja az infravörös lézerfényt, és biztosít egy má-

sik felszínt is, ami ellenállást fejt ki a kifújt forró levegővel szemben. A kormányzás automatikus: ha a jármű kimozdul a sugár irányából, a tolóerő elfordul, és visszanyomja a járművet a helyes irányba. Egy 1 kg-os fényűrhajó így körülbelül 5 Mach sebességig gyorsulhat, és 30 kilométeres magasságot érhet el. Itt a levegő ritkássá válik, ezért átkapcsol a szállított folyékony hidrogén üzemanyagra. Innen már 1 kg hidrogén elegendő ahhoz, hogy pályára állítsa az űrhajót.

A számítások alapján egy 1,4 méter átmérőjű változat képes arra – egy 100 MW-os lézersugár segítségével –, hogy akár 100 kg tömegű mikroműholdakat is pályára állítson. Mivel pulzáló lézert használnak majd, ez a teljesítmény valószínűleg könnyen elérhető több kisebb lézer teljesítményének megfelelő kombinálásával. Az ilyen lézerek felhasználhatóak lennének a kommunikációs műholdak pályára állításánál és ezek későbbi megsemmisítésénél is.

A fényűrhajók mikrohullámok segítségével is hajthatók. A mikrohullámokkal nem érhető el akkora energiasűrűség, mint a lézerekkel, így nagyobb járművekre van szükség, azonban a mikrohullámforrások sokkal olcsóbbak, és egyszerűbben állítható elő segítségükkel nagy energiamennyiség.

Magneto-hidrodinamikus meghajtással az űrbe

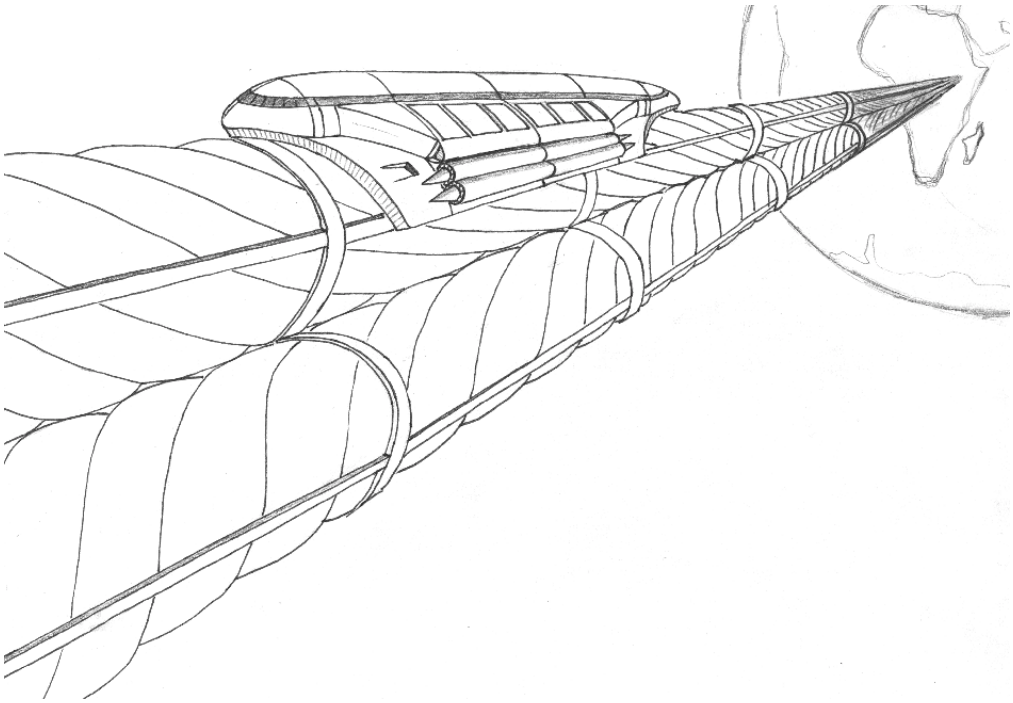
Egy, az előzőnél kifinomultabb sugárzó energiát felhasználó járművet is terveztek már, amely sokkal hatékonyabban állítja elő a tolóerőt. A járműben egy tükör a bejövő sugárzott energia egy részét egy olyan pontra fókuszálja, ami a jármű előtt van annyival, amekkora a jármű átmérője. Az intenzív hő egy légtüskét alakít ki, ami az érkező levegőt eltéríti a jármű mellé, így csökkenti az ellenállást és a jármű felmelegedését. A járműtest ezen kívül is felvesz némi sugárzott energiát, amivel nagyenergiájú elektromos mezőt alakít ki a szegély körül, és segítségével ionizálja a levegőt. A járműben ugyanitt szupravezető mágnesek kerülnének elhelyezésre, hogy ezen a területen erős mágneses tér alakulhasson ki. Amikor ebben a rendszerben az ionizált levegő keresztülhalad az elektromos és mágneses mezőn, magneto-hidrodinamikus erők jönnek létre, amelyek felgyorsítják a test körüli légáramlást, és ezzel tolóerőt generálnak. Az előretükrözött energiamennyiség arányának változtatásával a fényűrhajó szabályozhatja a jármű körüli légáramlás nagyságát.

1995 áprilisában a Renssealer Polytechnik Institute hiperszonikus léglöket csatornájában bemutatták, hogy egy légtüske hogyan csökkenti az ellenállást, azonban ehhez lézer helyett elektromos fűtésű plazmafáklyát használtak. Azok a tesztek, melyek célja magneto-hidrodinamikus tolóerő előállítása, csak mostanában kezdődtek egy 15 centiméter átmérőjű szerkezet segítségével. Ezzel a meghajtással egy emberméretű fényűrhajó, amelyet mikrohullám vagy pulzáló lézer hajt (1 GW teljesítménnyel), akár 50 kilométer magasságba is feljuthat, és könnyen gyorsulhat keringési sebességre.

Ezek a fényűrhajók forradalmasíthatják a közlekedést, ha energiájukat keringő napelemekről nyerik. Azonban a keringő infrastruktúra összeszerelésének költségeit először kilogrammonként pár száz dollár alá kellene csökkenteni. Most körülbelül 20.000 dollárba kerül egy kilogrammnyi szállítmány pályára állítása az űrsikló segítségével, ami a kívántnak körülbelül százszorosa.

A NASA merész távlati tervei szerint a jövőben nagymértékben egyszerűsödhet a világűrbe való feljutás. Az egyik hosszú távú fejlesztésük célja egy olyan szállítórendszer kidolgozása, amely a lifthez hasonlóan emeli az embereket, illetve az űreszközöket a Föld felszínétől sok ezer kilométeres magasságba. A szakemberek 1999-ben jutottak erre a véleményre egy űrinfrastruktúra-konferencián, amelyet a NASA Marshall Űrközpontjában rendeztek meg.

Az elképzelés röviden a következő: Bolygónk felszínét – egy gigászi kábel segítségével – egy geostacionárius pályán keringő „ellensúllyal" kötnénk össze. A geostacionárius pályán lévő űreszközök jellemzője, hogy a Földdel azonos szögsebességgel mozognak, vagyis folyamatosan bolygónk egyenlítőjének egy adott pontja felett tartózkodnak, a felszíntől 35.786 km-es magasságban.



2. ábra
AZ ŰRLIFT KONCEPCIÓ

Ezt, a majdnem 36 ezer km hosszú kábelt egy 50 km magas toronyhoz erősítenék a Földön, ellensúlyként pedig talán egy megfelelő pályára állított kisbolygó jöhetne szóba. Ily módon a tömegközéppont a geostacionárius pályára esik, vagyis tulajdonképpen az egész rendszer a Föld körül keringene. A kifeszülő kábelen „vágányok" helyezhetők el, amelyeken elektromágneses elven hajtott járművek szállíthatnák az utasokat, és a víz-, élelem-, illetve energia-utánpótlást. A felfelé vezető úton akárhol megállók helyezhetők el, ahonnan pályára állíthatóak lennének a különböző űreszközök.

Az űrlift egyáltalán nem az utóbbi évek ötlete, már több, mint száz évvel ezelőtt is megfogalmazódott. 1895-ben Ciolkovszkij, a rakétatudomány egyik úttörője olyan „Égi

kastély" megépítését javasolta, amelyet egy felszíni toronyhoz rögzítettek volna. Az első korszerű elképzelés 1960-ból származik, és egy leningrádi mérnök – Jurij Arsutanov – nevéhez kapcsolható, amely azonban nem keltette fel különösebben a „Nyugat" érdeklődését. Ezenkívül 1966-ban az amerikai Science magazinban is megjelent egy rövid cikk – John Isaacs tollából –, amelyben két vékony huzallal a Földhöz rögzített, geostacionárius pályán keringő űreszközről írt. Az űrrepülési mérnökök téma iránti figyelmét végül Arthur C. Clarke *„A Paradicsom szökőkútjai"* című novellája keltette fel, amelyet az amerikai légierő kutatási laboratóriumában dolgozó Jerome Pearson 1975-ben készült írása ihletett, és amelyben arról esik szó, hogy tudósok megalkották a szóban forgó űrliftet. Szintén Clark nevéhez fűződik a *3001 Űrodüsszeia* című könyv, melyben már az emberek jelentős része a Föld köré épült összefüggő geostacionárius gyűrűben él. A gyűrűt több ponton kábelek kötik össze a Föld különböző részeivel.

Természetesen a tudósok nem állítják, hogy már el tudnák készíteni a működőképes szállítórendszert, de abban biztosak, hogy 50 éven belül birtokában lesznek azoknak a technológiáknak, amelyek nélkülözhetetlenek a kivitelezéshez. Az űrlift kifejlesztése kétségkívül további nagy lendületet jelenthet az űrtudomány számára, mivel az egyik legnagyobb problémát – a hasznos teher űrbe juttatását – rendkívül alacsony fajlagos költséggel oldaná meg.

A jelenleg „legolcsóbb" űrteherszállító megoldás a Space Shuttle, amely egyszerre 30 t hasznos terhet képes föld körüli pályára állítani, kilogrammonként 20.000 USD-os költségen. Az űrlift ennél nagyságrendekkel gazdaságosabb lehet, ugyanis – jelenlegi energiaárakon számolva – üzembe helyezése után a kg-onkénti űrbe juttatási költség 1,5 USD-ra csökkenthető lenne.

Űrpányvák [8]

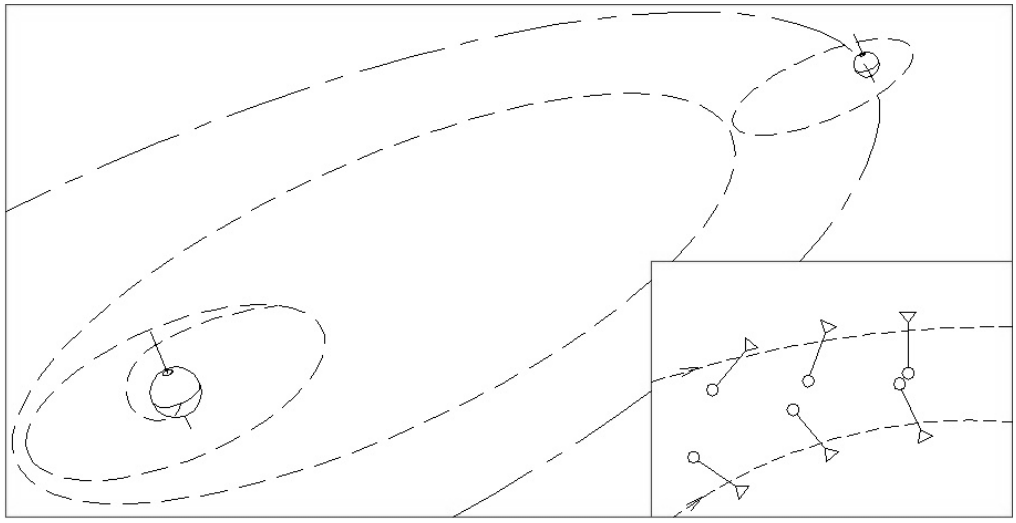
Ha már egyszer túljutottunk a Föld elhagyásának problémáján, akkor további gondok forrása lehet a megfelelő keringési pálya kialakítása. Jelenleg ezen a téren is a rakétáké a vezető szerep, de várhatóan ez sem lesz így örökké.

Amikor az emberek beköltöznek a Holdra és más bolygókra, valószínűleg már nem a hagyományos rakétatechnológiára fog épülni az űrjárművek meghajtása. Komoly esélyes lehet egy olyan ősi technológia, amit jóval az írásos történelem kezdete előtt használtak már – a kötél. De hogyan képes arra egy kötél, hogy tárgyakat hajtson az űrben?

Az egyik módszer szerint (parittya-elv) két műholdat összekötő vastag kötél segítségével az egyik „átdobhatja" a másikat egy magasabb pályára, pont úgy, ahogy egy vadász parittyával kilő egy követ. Ez az elképzelés alkalmazható a Föld körüli pályára, a Holdra, és akár a Holdon túlra szánt rakományok szállításánál is.

A Holdra jutás ötlete felettébb egyszerű (lásd a magyarázó ábrán). Először is, egy földközeli pályán keringő pányva felveszi a szállítmányt egy újrafelhasználható járműről, majd továbbítja egy másik pányvára, ami egy távolabbi, ellipszis alakú, Föld körüli pályán kering. A második pányva megfelelő pozícióban átlöki a szállítmányt a Hold felé, amit elkap a Hold körül keringő Lunavator pányva. A Lunavator már a Hold körül forogna éppen olyan sebességgel, hogy miután elkapta a szállítmányt, egy fél fordulattal később finoman le tudja tenni a Hold felszínére. Ezzel egy időben a pányva fel tudná venni a visszaútra szánt szállítmányt. Nem lenne szükség üzemanyagra, ha a hozott és vitt szállítmány tömege kiegyensúlyozott. Egy ilyen szállítási mód olyan országút lenne

a Holdra, amely hétköznapivá tenné a rendszeres Holdutazást. Nyilvánvalóan még számos technikai kihívással kell szembenéznünk, mielőtt egy ilyen rendszer valósággá válhat, de hatalmas lehetőségeket rejt magában, mivel lehetővé teszi egy gazdaságos, űrbéli „autópálya" megnyitását.



3. ábra
A PARITTYA-ELV ALAPJÁN MŰKÖDŐ ŰRPÁNYVA

A másik módszer szerint (elektrodinamikus pányva), ha a kötelet egy elektromosan vezető drót képezi, akkor a rákapcsolt feszültség hatására a benne folyó áram a Föld mágneses mezőjével kölcsönhatásba lépve hajtóerőt generálhat.

A NASA Marshall Space Flight Center elektrodinamikus pányvák üzemanyag nélküli űrbéli hajtóművekként való felhasználásának lehetőségeit vizsgálja. A 2000. év közepén a kutatók demonstrálták, hogy egy pányva milyen mértékben csökkenti a Delta-II utolsó fokozatának keringési pályája-magasságát. A Tethers Unlimitednél ennek az elképzelésének a kereskedelmi változatát fejlesztik: egy kis csomagot, amit pályára állítás előtt egy műholdhoz vagy az űrben csak szemétként keringő fokozatokhoz kapcsolnak. Ha az űrhajó befejezte küldetését – vagy meghibásodik a műhold –, a vezető pányva kinyílik, és a tárgyat a Föld mágneses ereje ellen húzza, aminek következtében az eszköz rohamosan veszít magasságából, majd elég az atmoszférában.

A NASA szintén fontolgatja az ilyen elektrodinamikus pányvák felhasználását pályakorrekciós hajtóművek kiváltására. A rendszerben napelemek biztosítanák az elektromos áramot, amelyek a pányván keresztül a Föld mágneses tere ellenében emelő erőt fejtenének ki az űrjárművekre. Ennek eredményeképpen a pányvák korlátlanul képesek lennének objektumokat mozgatni a Föld körüli mágneses térben.

A bemutatott pányvák hatalmas előnye abban rejlik, hogy kis költségráfordítással működtethetőek. Nagy mennyiségű üzemanyag elégetése helyett vagy az űrbe telepített objektumoktól kell energiát elvenni, vagy napelemekkel termelt villamosenergiát kell felhasználni a mágneses mező generálásához.

Ha már eljutottunk a Holdra, akkor itt az ideje kicsit távolabbi jövő felé kalandoz-

nunk. A bolygók közötti távolságok legyőzésére – a mai gyakorlattól eltérően – sokkal erősebb hajtóművekre lenne szükség, hogy az utazások idejét számottevően le tudjuk rövidíteni. Jelenlegi tudásunk alapján az emberi szervezet komolyabb károsodás nélkül egy évnél rövidebb időt képes eltölteni az űrben. A Naprendszer benépesítésének a kulcsa tehát olyan hajtómű-rendszer létrehozása, amely ezen rövid időtartam alatt képes eljuttatni az űrhajósokat kívánt célpontjukhoz, vagy olyan körülményeket tud biztosítani, hogy szervezetüknek ne kelljen alkalmazkodnia a mikro-gravitációs környezethez. Mint látni fogjuk, a tudomány és a fantázia jó néhány megoldást kigondolt már a probléma megoldására.

Ion hajtómű [9]

Az ionsugár-hajtómű ötlete egészen az 1964-es évekig nyúlik vissza. Ez nagy áttörést jelent az eddig használatos hajtóművek között, olyant amilyenről régebben még csak sci-fi szerzők és filmesek álmodozhattak. A hajtóművet a NASA a Deep Space 1 elnevezésű űrszondáján próbálta ki először. Ennek működési elve a következő volt: a hajtóanyagot (xenont) elektronokkal bombázták, így az atomok töltéshez jutva ionokká alakultak. Az ionokat egy nagy feszültségű elektrosztatikus mezőt generáló rács gyorsította fel, a hajtóműből kiáramló ioncsóva pedig tartós tolóerőt biztosít az űrszondának.

A xenon ionok 1280 V feszültség hatására kialakuló elektrosztatikus térben gyorsultak fel, és 30 cm átmérőjű ionsugarat alkottak. A 92 mN maximális tolóerőhöz 2,3 kW teljesítményre volt szükség. Kisebb, 500 W-os teljesítményen pedig 20 mN tolóerő keletkezik. A kémiai hajtóművek nagy tolóerőt adnak, de percek alatt elégetik üzemanyagukat, míg a Deep Space 1-hez hasonló űreszközök hónapokig, esetleg 1-2 évig használhatják a xenon-gáz hajtóanyagot. Mivel a tolóerő folyamatosan rendelkezésre áll, az ionhajtómű segítségével egy űrszonda akár tízszer nagyobb sebességet érhet el, mint a kémiai hajtóművekkel induló társa (néhány hónap alatt 100.000 km/h – 28 km/s – sebességre is felgyorsulhat az űreszköz). Így a Plútóra akár 10 év alatt eljuthat egy űrszonda.

A mai technológiák segítségével még a legközelebbi csillagok elérése is több tízezer évbe telne. 1998-ban a NASA komoly kutatásokba fogott azokkal a hajtóműelméletekkel kapcsolatban, amelyek lehetővé tehetnék, hogy egy felderítő űrhajó elég gyorsan jusson el egy csillag közelébe ahhoz, hogy negyven éven belül teljesíthesse küldetését (ami egy tudós szakmai élettartama). Csak három olyan elméletet találtak a kutatók, amelyek a belátható jövőben egyáltalán elérhetőnek tűnnek: a fúziót, az anyag-antianyag reakciót és a sugárzott energiát. A három közül csak a sugárzott energiát értjük jelenleg annyira, hogy bármilyen realisztikus, közeljövőbeli kutatási program része lehessen.

Lézer vitorlások [10]

Nem nehéz belátni, hogy miért olyan vonzó alternatíva a sugárzott energia. Ha hosszú útra indulunk autónkkal, akkor üzemanyag tekintetében a benzinkutakra bízzuk magunkat, abból a szempontból pedig, hogy autónk nem hagy minket cserben, az autószerelőkre. A ma használt űrhajók azonban magukkal viszik az üzemanyagukat, és a

közvetlen emberi beavatkozás lehetősége nélkül üzemelnek éveken át. De nem lehetne valahogy mégis a Földön hagyni a hajtóművet, az üzemanyaggal együtt? Amellett, hogy ez lehetővé tenné a repülés közbeni javításokat, az űrhajó is kevésbé lenne nehéz, és a könnyebb szerkezet jobban is gyorsulhatna.

Végignézve a jelenleg megvalósítható technológiák palettáját, a sugárzott energia látszik az egyetlen olyan megoldásnak, amely maradéktalanul teljesíti az iménti elvárásokat. A mérnökök elemzései rámutattak, hogy egy hosszú tartamú űrutazás szempontjából az a legjobb, ha egy nagy erejű optikai lézert irányítunk egy nagy, vékony vitorlára. A lézerek minimális veszteséggel hatalmas távolságokra tudnak energiát sugározni, míg a vitorla tömegéhez képest nagy felülete nagy mennyiségű energia felvételét teszi lehetővé. Ezt az ötletet először Robert L. Forward javasolta 1984-ben, és azóta – mint lehetséges hajtásrendszer – a kutatók érdeklődésének középpontjába került.

A vizsgálatok alapján a sugárzott energia más formái is felhasználhatók az energiaátvitelre – mint például a korábban már említett mikrohullámok –, de néhány kutató már azt is fontolóra vette, hogy töltött részecskéket (elektronok, protonok, nemesgáz ionok) irányítsanak egy űrrepülőre. A részecskék ebben az esetben, amikor elérnék az űrrepülő testét, egy szupervezető mágneses hurkon haladnának keresztül, így Lorentz erő alakulna ki, ami tolóerőt eredményezne. Jelenleg azonban a vitorlára irányított lézerfény tűnik a legkönnyebben megvalósítható megoldásnak.

Amikor a lézerből származó fotonok elérik a vitorlát, két dolog történhet: vagy rugalmasan ütköznek az elektromágneses mezővel, ami körülveszi a vitorla atomjait és visszaverődnek, vagy a vitorla anyaga felveszi az energiájukat egy olyan folyamat során, amely kismértékben fel is melegíti a vitorlát. Mindkét folyamat ugyanúgy gyorsuláshoz vezet, de a visszaverődés kétszer akkora erőt eredményez, mint a felszívódás, ezért hatékonyabb a visszaverő vitorla.

Az átvihető energiát azonban a vitorla felmelegedése korlátozza, mert ahogy a fémfelszín forróbb lesz, egyre kevesebb fényt ver vissza. A vitorla hőmérséklete csökkenthető – és ezáltal a gyorsulás növelhető –, ha a túloldalt bevonjuk olyan anyagokkal, amelyek hatékonyan sugározzák a hőt a környező űrbe. Magas sebességek elérésének érdekében az űrhajónak sokáig fenn kell tartania a gyorsulását, ezért az határozza meg egy fényvitorla segítségével elérhető sebesség felső határát, hogy milyen távolról tudja a Földön található lézer hatékonyan „eltalálni” célpontját.

A lézernek egy fontos tulajdonsága, hogy koherens elektromágneses hullámokból (hő, fény, mikrohullám, röntgen) áll. Ez a meghajtás szempontjából azt jelenti, hogy az az energia, amit át lehet vinni a lézerrel, nem csökken a távolsággal egy olyan kritikus értékig, amit diffrakciós távolságnak neveznek. Ezen a távolságon túl az átvitt energia hamar jelentéktelen mennyiségre csökken.

A lézer diffrakciós távolságát – és így az általa hajtott űrhajó végsebességét – a lézer apertúrája szabályozza. A leghatékonyabb lézerek azok, melyek több száz kisebb lézerből állnak, és amelyek megfelelően vannak elrendezve egy kötegben. A megfelelő apertúra-méret körülbelül az egész lézerköteg átmérőjének felel meg. Az energiaátvitel akkor maximális, ha a köteg olyan szoros, amennyire csak lehet.

A pasadenai (Kalifornia) Jet Propulsion Laboratory-nál azt vizsgálták, hogy mik az anyagi értelemben vett összefüggések az egyedi lézerek ereje és a kötegek méretei között. Egy csillagközi küldetéshez hatalmas méretű apertúrára lenne szükség. Az a lézer, amit arra terveznek, hogy segítségével 40 éven belül szondát küldhessenek vele a legkö-

zelebbi csillaghoz, közel 1000 kilométer átmérőjűre adódik. Szerencsére a közelebbi Naprendszerbeli bolygókra irányuló küldetéseknél sokkal kisebb apertúrájú lézerek is elégségesek lennének. Egy olyan 46 GW-os lézerhez, ami egy 50 méter átmérőjű, aranybevonatú vitorlát világít meg, csak 15 méteres apertúrára lenne szükség. Ezzel a berendezéssel egy tíz kilogrammos szállítmányt tíz nap alatt eljuttathatnánk a Marsra, vagy szondát küldhetnénk a napszél és a csillagközi anyag határára három év alatt.

A fényvitorlás űrhajókat meg lehet úgy tervezni, hogy automatikusan kövessenek egy vékony lézersugarat, így akár a Földről is lehetne őket kormányozni. Sőt, még az sem megoldhatatlan feladat a vitorla tervezésénél, hogy egy visszaverő külső gyűrűt is magába foglaljon a szerkezet, ami leválasztható a célpont elérésekor. A leválasztás után csak a gyűrű folytathatná útját és visszaverné a lézerfényt a vitorla hajón maradó középső részére, így segítene azt megállítani, vagy akár haza is juttatni.

Már mostanáig is rengeteg munkát végeztek a fényvitorlákkal kapcsolatban. Például orosz tudósok 2001-ben kipróbáltak egy forgó, 20 méter átmérőjű polimer napreflektort – a Znamja 2-t – annak a tervnek részeként, hogy erősebb téli megvilágítást hozzanak létre az észak-oroszországi városok felett.

Az amerikai Nemzeti Óceán és Atmoszféra Kutató Intézet azt tervezi, hogy néhány éven belül útjára indít egy napvitorla által hajtott űrhajót. A napvitorlás a lézervitorlástól annyiban különbözik, hogy a vitorla „megvilágítását" közvetlenül a Nap vagy egy olyan űrben keringő gyűjtőtükör végzi, amely a Napból érkező fénysugarakat fókuszálja egy nagy energiájú nyalábbá (hasonlóan a földi naptornyokhoz). Azonban a napfény fajlagos energiatartalma és hatótávolsága messze elmarad a koherens lézersugárétól, ezért ez a módszer csak a Naphoz közel képes megfelelő tolóerőt biztosítani.

A közeljövőben laboratóriumi teszteken már túljuthatnak azok a lézervitorlák, melyek a Marsra, a Kuiper-övbe és a csillagközi térbe tervezett programokban szóba jöhetnek. A NASA-nak pedig már most rendelkezésére állnak olyan több MW teljesítményű hadászati célú lézerek, amelyek az űrbe telepített kisebb fényvitorlások meghajtására képesek lennének. Tehát a fényvitorlákban már a közeli jövő nagyszerű és elegáns küldetéseinek lehetősége rejlik. Tiszta, gyors és olcsó utazást biztosíthatnak a Naprendszeren belül, és idővel akár azon túl is.

Mágneses napszél vitorlások [11]

Egy új elven működő „hajtómű" még a fényvitorlások elterjedése előtt forradalmasíthatja a bolygóközi utazásokat. Egyszerűségével lepipálja vetélytársait, hatékonyságával pedig megsokszorozhatja az űrszondák sebességét – állítják a Washingtoni Egyetem kutatói.

Továbbá az is figyelemre méltó, hogy a NASA fejlesztőintézete félmillió dollárral támogatja a Robert Winglee geofizikus professzor vezette kutatócsoport további kísérleteit a napszélen vitorlázó, mágneses buborékba zárt űrszonda kifejlesztésére. Ha az M2P2 (Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion) laboratóriumi, és később űrbeli tesztjei is sikerülnek, akkor egy ilyen elven működő szonda lehet az első, amely elhagyja Naprendszerünket. Ez különösen annak fényében figyelemre méltó, ha számításba vesszük, hogy a nagyjából 10 év múlva felbocsátandó szondának utol kell érnie, és le kell hagynia az 1977-ben útnak indított Voyager I-et, amely most még ugyan a Naprendszer határain belül, de már mintegy tízmilliárd kilométerre jár tőlünk.

A kutató-fejlesztő mérnökök több éve dolgoznak a szonda prototípusán, és most készítik elő az első próbákat az egyetem redmondi Plazmafizikai Laboratóriumában.

Az űrszonda körül vezetőtekercsekkel erős mágneses teret hoznak létre. Ennek a mezőnek és a napszélnek a kölcsönhatása a Föld magnetoszférájához hasonló, hagymaszerű „mini-magnetoszférát" – mágneses buborékot – hoz létre. A „hajtómű" lelke a szondához kapcsolt, 25 x 25 centiméteres plazmakamra, amelyben nagyfrekvenciás rádióhullámokkal héliumból sűrű mágneses plazmát (szabad He ionok és elektronok elegyét) hoznak létre. Ezt a plazmát a mágneses buborékba vezetve, a nagy sebességgel száguldó elektronok, mint gumiszalagnak ütköző sörétszemcsék, lendületükkel kifelé sodorják a mágneses tér erővonalait: ennek eredményeként a buborék egy léggömbhöz hasonlóan felfúvódik. A napszél részecskéi a buborék határfelületének ütköznek, és ezzel állandó nyomást gyakorolnak a létrehozott mágneses mezőre. Az összegződő erőhatások előretolják az egész buborékot, és benne természetesen a szondát is.

A mintegy 15-20 kilométeres átmérőjű mágneses buborék tehát egy olyan „mágnesvitorlát", képez, amely képes befogni a napszél töltött részecskéit, és azok mozgási energiáját elnyelve hajtja előre a szondát. Az eredő tolóerő nem túl nagy, viszont állandóan jelen van, így folyamatosan gyorsulva a szonda összességében mégis tetemes sebességre tehet szert.

Mivel a napszél sebessége eléri az 1,2-3 millió km/h-t, hajtóereje egy 150 kilogrammos szondát napi 7 millió kilométeres sebességre gyorsíthat (ez tízszerese az űrrepülőgép sebességének). Az már csak hab a tortán, hogy a Naptól távolodva az egyre nagyobb térfogatban szétterülő napszél ereje gyengül, ám ezzel párhuzamosan a buborék (amelynek határfelületét szintén részben maga a napszél alakítja ki) éppen olyan mértékben fújódik fel, így a tolóerő gyakorlatilag változatlan marad. Ez mindaddig érvényes, amíg a napszél teljesen szét nem oszlik a csillagközi térben.

A mágneses buboréknak a napszél irányához viszonyított helyzete a mágneses tér irányával változtatható, és ezáltal a szonda irányítása is megoldható.

Az M2P2 az előző pontban elképzelt lézer vitorlásokhoz viszonyítva lényegesen egyszerűbb szerkezeti kialakítású. A hatalmas méretű visszaverő vitorlához képest az M2P2 plazmakamrája sokkal kisebb és könnyebb. A mágneses buborék létrehozásához alig néhány kilowattnyi teljesítmény szükséges, és mindössze 50 kilogramm többlet hajtóanyagra van szüksége. Hozzáépítése egy hagyományos szondához ma mintegy 1 millió dollárba kerülne, de ez busásan megtérülne az egyéb költségek csökkenéséből.

Kompakt atomreaktorok 12

Egy napon, amikor az ember által tervezett szondák már keresztbe-kasul bejárták a Naprendszert, a bolygók vizsgálatában az emberiség többet akar majd. Idővel olyan űrhajókat akarunk majd indítani, amelyek képesek a hatalmas égitestek körül keringeni, robotokat akarunk leszállítani holdjaikra, és szeretnénk kőzet- és talajmintákat visszajuttatni a Földre. Végül majd űrhajósokat küldenénk a közeli bolygókra, és a távolabbi óriási holdakra, amelyek közül legalábbis néhányról azt gondoljuk, hogy akár a letelepedésre is alkalmasak lehetnek.

Az ilyen küldetésekhez olyan rakéták jelenthetik a megoldást, amelyek kémiai égés helyett a nukleáris maghasadást használják fel energiaforrásként. Az ilyen típusú űrhajók távol a Naptól, energiaszegény környezetben is nagyszerűen manőverez-

hetőek maradnak, és kialakításuknál nem kell feltétlenül mindent a súlycsökkentés elvének alárendelni.

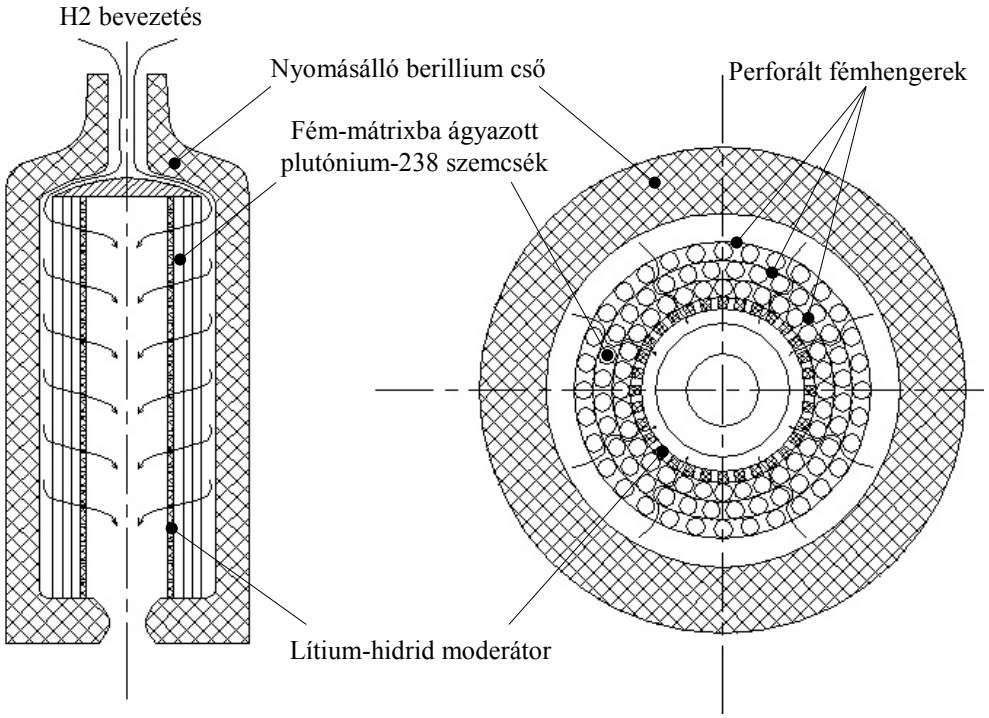
Az eddig használt kémiai elven működő rakéták jó szolgálatot tettek, azonban az a tény, hogy az üzemanyag tömegéhez képest viszonylag kis mennyiségű energia előállítására képesek, komoly megszorításokat eredményez. Jelenleg ahhoz, hogy elérjünk egy távolabbi óriás bolygót, egy kémiai elven hajtott űrjárműnek nagyon kis tömegűnek kell lennie. Másrészt ennek az űrhajónak nagyon alaposan ki kell használnia a bolygók gravitációs „segítségét" (akárcsak a Voyager szondáknak). Viszont ehhez a küldetések tervezőinek meg kell várniuk azokat az indítási „ablakokat", amikor a környező bolygók elhelyezkedése a legmegfelelőbb a „hintamanőverek" elvégzéséhez. Technikai szempontból tehát megállapítható, hogy a kémiai rakéták végsebessége nem elég nagy ahhoz, hogy távoli célpontokhoz közvetlenül eljuttassanak egy űrhajót. A legjobb kémiai rakéták, melyek működése a hidrogén és oxigén közötti reakción alapszik, maximum 10 km/s sebességnövekményt képesek biztosítani a Föld körüli pályától távolodó műholdak számára.

Ezzel szemben egy nukleáris rakéta akár 22 km/s sebességnövelésre is képes lehetne. Ez a magas érték már elegendő ahhoz, hogy akár közvetlen útvonalat is választhassunk a Szaturnuszra, ami az utazáshoz szükséges időt hét évről háromra csökkentené. Egy ilyen nukleáris rakéta ugyanakkor biztonságos, és még akár környezetbarát is lehetne, mert a közhiedelmekkel ellentétben indításkor egy nukleáris rakéta egyáltalán nem szükségszerűen radioaktív.

Az űrhajót – nukleáris hajtóműveivel együtt – egy hagyományos kémiai elven működő rakéta rakományaként indítanák. Utána, amikor a rakomány már Földtől távoli (legalább 800 km-es) pályán kering, a nukleáris reaktor is beindulna.

Az a technológia, amely a maghasadás hajtotta rakétahajtómű építéséhez szükséges, nem sokkal haladja meg jelenlegi képességeinket. Tulajdonképpen a tervek már az 1960-as évek óta készen állnak egy kompakt nukleáris rakétahajtómű létrehozására (mint például a meg is épített 250 kN tolóerejű NERVA), de az igen ígéretes fejlesztéseket 1972-ben leállították. Napjainkban – ahogy az emberes Mars expedíciók ismét szóba kerültek – újból a tervezőcsoportok asztalára került a probléma, és szükség esetén akár hat-hét éven belül meg is tudnának építeni körülbelül 600-800 millió dollárból egy új, csúcstechnológiát képviselő változatot (MITEE). Ez az összeg az űrkutatásban nem túl nagy, és voltaképpen teljes mértékben ellensúlyozná a jövőbeni indítási költségek csökkenése. Ennek oka az, hogy egy olyan űrhajónak, amit nukleáris hajtómű hajt, nem kell nagy mennyiségű kémiai üzemanyagot magával vinnie, ami azt jelenti, hogy fellövéséhez nem lenne szükség a 250 millió dollárba kerülő Titan IV hordozó-rakétára, hanem egy alacsonyabb árú rakéta is elegendő lenne, mint például a Delta vagy az Atlas (melyek felépítése csak 50-125 millió dollárba kerül).

A meglehetősen részletesen kidolgozott tervben a reaktor nukleáris üzemanyaga (plutónium-238 izotóp) lyukacsos berillium fémvázban lenne gyűrűszerűen feltekercselve, ami egy lyukas közepű zselérúdhoz hasonlítana. Az üzemanyagtekercs külseje körül egy lítium-7-hidrid köpeny kerül elhelyezésre (moderátor). Ennek feladata az üzemanyag belsejében fellépő hasadás során kibocsátott neutronok sebességének csökkentése (termikus neutronok létrehozása), ami ahhoz kell, hogy újabb plutónium atommagok is képesek legyenek befogni őket, és így ezek is széthasadjanak.



4. ábra
NUKLEÁRIS ÜZEMANYAG-ELEM

A hűtőanyag – folyékony hidrogén – eközben a tekercs külseje felől befelé halad, és gyorsan gázzá alakul, ahogy a középpont felé áramolva melegszik. A maghasadás során keletkező hő körülbelül 2700°C-ra hevíti a hidrogéngázt, ami ennek hatására kitágul, és nagy sebességgel áramlani kezd a rúd központi tengelye mentén elhelyezkedő csatorna felé, majd ott tovább gyorsulva kiáramlik az elem alján, ezáltal generálva tolóerőt.

A nukleáris hajtóművek legfőbb vonzóereje az, hogy hajtóanyaguk – a hidrogén – nagy mennyiségben rendelkezésre áll gáz formájában a Naprendszer külső részében található hatalmas bolygókon, valamint jég formában is megtalálható a távoli holdakon és bolygókon. Ezért – mivel a plutónium-238 üzemanyag elég sokáig kitart – egy nukleárisan hajtott űrhajó elméletileg tíz vagy tizenöt évig utazhatna a Naprendszerben, és szükség szerint pótolhatná a hidrogén üzemanyagot. A jármű hónapokig repülhetne a Jupiter, a Szaturnusz, az Uránusz és a Neptunusz atmoszférájában, részletes információt gyűjthetne ezek összetételéről, időjárás-mintázatáról és egyéb jellemzőiről. Egy másik lehetőségként egy űrhajó elrepülhetne az Európára, a Plútóra vagy a Titánra, hogy kőzetmintákat gyűjtsön, és hidrogént vegyen fel a megolvasztott jégből származó víz elektrolízisének segítségével, és az így nyert energiával visszajusson a Földre.

Mivel a reaktor csak a Földtől jókora távolságban indulna be, a nukleáris űrhajó tulajdonképpen sokkal biztonságosabb lenne, mint néhány űrszonda, amiket kémiai elven működő rakéta hajt. A Naprendszer távoli részeiben a Nap sugarai túlságosan gyengék ahhoz, hogy elég energiát biztosítsanak az űrhajó műszerei számára. Ezért ezek általában plutónium-238 áramforrások segítségével működnek, amely már a fellövéskor is erősen radioaktív. Egy nukleáris hajtóművekkel felszerelt szonda esetében ezzel

szemben a műszerek is ugyanabból a reaktorból kapnák az áramot, mint ami a tolóerőt biztosítja. Továbbá a keletkező nukleáris hulladék mennyisége elhanyagolható – egy, a távoli világűrt vizsgáló szonda esetén körülbelül összesen egy grammnyi lenne a hasadásos termék –, és emellett ez az anyag sosem jutna vissza a Földre.

Könnyen bizonyítható tény, hogy pusztán kémiai elven működő rakétákkal nem igazán leszünk képesek felfedezni a Naprendszer távolabbi bolygóit és holdjaikat. A legközelebbi jövőt tekintve a nukleáris rakéták adhatják meg nekünk azt az energiát, megbízhatóságot és rugalmasságot, amire szükségünk van ahhoz, hogy jelentős mértékben fejleszthessük tudásunkat azokkal a még mindig legnagyobbrészt titokzatos világokkal kapcsolatban, amelyek a Naprendszer távolabbi szegleteiben találhatók.

Aszteroidák az űrutazók szolgálatában

A távolabbi jövő felé tekintve újabb lehetőségek nyílnak majd meg az emberiség előtt. Amint az asztrotechnika fejlődésnek indul, az első feladatok közé fog tartozni a Földet veszélyesen megközelítő aszteroidák eltérítése vagy megsemmisítése. A tudósok fantáziájában innen már csak egy lépés, hogy ezeket a hatalmas sziklatömböket pályára állítsák a Föld körül és megkezdődjön nyersanyagaik kiaknázása. Nem megvetendő alternatíva a továbbiakban, ha egy megfelelően átalakított aszteroidát olyan energiamentes pályára állítanak – például a Föld és a Mars közé –, ami elhalad mindkét égitest közelében. Így gyakorlatilag a bolygóközi utazás csupán abból állna, hogy a másik bolygóra szánt ellátmányt felhordjuk a Föld közelében az aszteroida felszínére, míg a célállomáson onnan lehordjuk a másik bolygóra.

Az utazóközönség a hosszú utat az aszteroida belsejében létrehozott szálloda – űrhajókhoz képest pazar – körülményei között tölthetné, míg az energiáról napelemek vagy atomreaktorok gondoskodnának. Egy további komoly előnye is van ennek az elképzelésnek, mégpedig, hogy a hosszú űrutazásnak kitett emberi szervezet könnyen károsodhat a napszél töltött részecskéinek áramlatától, illetve a kozmikus sugárzás nagy energiájú részecskéitől. Az űrhajókat és űrállomásokat teljesen nem lehet védetté tenni ezektől a külső behatásoktól, de egy felszín alá süllyesztett épületben, több tíz (esetleg száz) méteres kőzetréteg alatt az egészségkárosodás kockázata jelentősen csökkenthető.

Az aszteroida gravitációs hintamanőverekkel a két célállomás közelében úgy igazíthatna pályáján, hogy az minél rövidebb visszatérést tegyen lehetővé a kiinduló állomáshoz, a finomabb manőverekről pedig a felszínre szerelt tartósan működtetett ionhajtóművekkel gondoskodhatnának az üzemeltetők. Ezeket az aszteroida-állomásokat akár magántőkéből is finanszírozhatnák, hiszen menet közben a különleges ásványokat kibányászva extra bevételekre is szert tehetnének a merész vállalkozók.

A szomszédos csillagok közelében

Az előző ötlet át is vezet következő témakörünkre, a csillagok közötti távolságok legyőzésének problémakörére. A technika előre látható fejlődése alapján az aszteroidákhoz hasonlóan, a kezdeti csillagközi űrjárművek is hatalmas méretűek – gyakorlatilag űrvárosok – lesznek. Az évtizedekig (évszázadokig) tartó utazások sikeréhez több száz (ezer) ember együttes munkájára lesz szükség, ehhez pedig nagy élettérrel és olyan mennyiségű élelmiszerrel, illetve üzemanyaggal kell számolnunk, hogy az űrjárművek méretei valóban vetekedhetnek a kisebb aszteroidákkal. Az azonban kérdéses, hogy bárki hajlandó lesz-e ilyen utazás megkezdésére, hiszen a kezdeti idők járműveinél a hosszú út végét várhatóan senki sem fogja megérni. Jogos feltenni a kérdést, hogy a több száz évig tartó (nem relativisztikus sebességű) utazásoknak van-e igazából értelme. Több tudós rávilágított arra, hogy ilyen hosszú idő alatt a technika annyit léphet előre, hogy esetleg a később készült űreszközök utolérnék – még jóval a céljuk előtt – a korábban indult vándorokat, így erőfeszítéseik feleslegessé válnának. Másrészt az esetlegesen visszaérkező expedíciók technikailag annyira elavulnának, hogy egyszerűen semmi hasznukat nem tudnák venni az eredményeik jó részének. Ennek a problémának a leküzdésére olyan járművek kifejlesztését javasolják, ahol a legénységnek vég nélkül kellene dolgoznia a hajó technikai fejlesztésén – tartva a Földdel a lehetséges kapcsolatot –, hogy a fedélzeti eszközök technikai fejlettségi szintjét fent lehessen tartani. Tehát az emberi tudás pezsgő fellegvárainak, kis önellátó kutató-gyártó laboratóriumokként kell elképzelnünk a jövő csillagközi űrhajóit, nem pedig véglegesen elkészült halott alkotásoknak.

Bár a csillagközi utazás még valószerűtlen álom, mérnökök és tudósok csoportjai már most is az elméleteket vizsgálják, olyan kiskapuk után kutatva, melyek lehetővé teszik, hogy az ember rácáfoljon a fizikára, és megvesse a lábát a csillagok között. Kísérletek egész sorát végzik ma annak érdekében, hogy egy napon olyan technológiák kifejlesztése kezdődhessen, melyek segítségével az űrhajók sebessége már elég nagy lehet ahhoz, hogy Naprendszerünk határán túlra látogathassunk.

Egy nukleáris fúzión alapuló hajtóműrendszer képes lenne arra, hogy a Naprendszer távoli bolygóira szállítson rövid idő alatt utasokat, és akár több ezer csillagászati egységnyi távolságra, a csillagközi űrbe is eljuttathasson robotűrrepülőket. Egy ilyen rendszer – úgy tűnik – akár az elkövetkező néhány évtized során elérhetővé válhat. Végül, még ennél is hatékonyabb lenne, ha az anyag-antianyag kölcsönös megsemmisítésén alapuló hajtóművek vihetnék az űrhajókat a közeli csillagokra, amelyek közül a legközelebbi a Proxima Centauri, ami körülbelül 270.000 csillagászati egység távolságra van tőlünk.

Az ilyen egzotikus hajtóműrendszerek vonzereje abban rejlik, hogy adott mennyiségű üzemanyagból fantasztikus mennyiségű energiát képesek felszabadítani. A magfúzión alapuló hajtómű-rendszer például elméletileg 100.000 megajoule energiát tud előállítani 1 kg üzemanyagból – ez az energiasűrűség 10 milliószor akkora, mint azoknak a kémiai elven működő rakétáknak a teljesítménye, amelyek a mai űrhajókat hajtják. Az

anyag-antianyag reakciók még ennél is nehezebben kihasználhatóak, de elképesztő mennyiségű – 20 ezer terrajoule – energiát lehetne előállítani egyetlen kilogrammnyi üzemanyagból, ami az emberiség 26 percnyi energiaigényét képes lenne fedezni.

Fúziós meghajtás – plazma hajtómű [13]

A nukleáris fúzió során nagyon kis súlyú atomokat préselnek össze olyan magas hőmérsékleten, nyomáson és olyan hosszú időre, ami elég ahhoz, hogy nagyobb atomokká egyesülhessenek. A reakcióban szereplő kiinduló elemek és a reakció-végtermékek tömegének különbsége alapján számítható ki a felszabaduló energia, az $E = mc^2$ összefüggés segítségével.

A fúzió, és még inkább az antianyag alkalmazásának akadályai azonban kiábrándítóak. A kontrollált fúzióval kapcsolatos elképzeléseket, akár a rakétahajtóműveket, akár a földi áram-előállítást érintik, két csoportra lehet bontani. Az egyik az, hogy hogyan tárolható a nagyon forró, elektromosan töltött gáz (plazma), amiben a fúzió létrejön, a másik, hogy honnan vegyük a szükséges nagy mennyiségű különleges üzemanyagot a reakcióhoz.

A mágneses elvű tárolást alkalmazó fúzió során a plazmát erős mágneses mező segítségével kontrollálják. A tehetetlenségen alapuló tárolásos fúzió esetében ezzel szemben lézer- vagy ionsugarak hevítik és nyomják össze a fúziós üzemanyag kvarccsapdába ejtett kisebb mennyiségeit.

1997 novemberében a mágneses tárolórendszert vizsgáló kutatók olyan fúziós reakciót hoztak létre, amely 65 százalékát fedezte annak az energiának, amit a rendszerbe töltöttek a reakció beindítása érdekében. Ezt a mérföldkő értékű eredményt Angliában érték el a JET nevű tokamak reaktor-telepen. Egy kereskedelmi célra szánt fúziós reaktornak azonban annál sokkal több energiát kell létrehoznia, mint amit annak érdekében tápláltak bele, hogy beindítsák vagy fenntartsák a fúziós reakciókat.

Azonban még akkor is, ha a kereskedelmi célra használt fúziós energia valósággá válik itt a Földön, sok egyedi problémával kell szembenézni a fúziós rakéták kifejlesztésénél. Egy kulcsprobléma ezek közül a reakció által létrehozott töltött részecskék irányítása a felhasználható tolóerő létrehozásának érdekében. Szintén fontos kihívást jelent még a megfelelő mennyiségű fúziós üzemanyag beszerzése, tárolása, és az űrhajó tömegéhez képest a termelt energia maximalizálása.

Az 1950-es évek vége óta a tudósok több tucat fúziós rakéta-tervvel álltak elő. Bár a fúzió nagyon nagy mennyiségű nagyenergiájú részecskét állít elő, a reakció csak akkor képes egy űrhajó gyorsítására, ha ezeket úgy irányítják, hogy tolóerőt állítsanak elő. A mágneses tároláson alapuló fúziós rendszerek esetében a járható út az lenne, hogy folyamatosan adagoljuk az üzemanyagot a reakció fenntartása érdekében, miközben egy kis mennyiségű plazma kiszabadulna, és ez generálná a tolóerőt. Mivel a plazma szétrombol bármilyen anyagot, amivel kapcsolatba kerül, így az űrhajó testét képező anyagot is egy erős mágneses mező kell, hogy megvédje a kiáramló anyagtól (mágneses fúvóka).

Egy olyan hajtómű esetén, amely a tehetetlenségi tárolás módszerén alapszik, nagyenergiájú lézerek vagy ionsugarak gyújtanák be az apró üzemanyag kapszulákat (másodpercenként körülbelül harmincat). Ez esetben is egy mágneses fúvóka venne részt a plazma kifelé irányításában és ez által a tolóerő előállításában.

A fúziós reakcióban létrejövő részecskék típusa a felhasznált üzemanyagtól függ. A legkönnyebb a deutérium és trícium közötti reakciót beindítani (a hidrogén két nehéz izotópja, melyek atommagja egy, illetve két neutronból és egy protonból áll). A reakció termékei neutronok és alfa részecskék (hélium-4 atommagok). A tolóerő szempontjából a pozitív töltésű alfa részecskék a lényegesek, a neutronok ezzel szemben nem, mert ez utóbbiak nem rendelkeznek töltéssel, így nem is irányíthatóak. Kinetikus energiájuk hasznosítható a tolóerő szempontjából, de nem közvetlenül – ennek érdekében le kellene őket fékezni valamilyen anyagban, és az így keletkező hőt kellene hasznosítani. A neutronsugárzás emellett veszélyes is a legénység számára, ezért az embereket hordozó űrhajó esetében jelentős mértékű védelemre van szükség.

Ezek a tények vezetnek a fúziós üzemanyag kiválasztásának legfőbb problémájához. Jóllehet, a deutérium és trícium között a legkönnyebb fúziót beindítani, számos hajtóműterv esetében megfelelőbb lenne a deutérium és a hélium-3 izotóp (két proton, egy neutron) használata. Ezeknek a magoknak a fúziója egy alfa részecskét és egy protont hoz létre, és mindkettő irányítható mágneses mező segítségével. A probléma ebben az esetben az, hogy a hélium-3 izotóp nagyon ritka a Földön. Emellett a deutérium-hélium-3 reakciót bonyolultabb beindítani, mint a deutérium-trícium reakciót.

Az azonban már egyértelműnek látszik, hogy függetlenül a választott fúziós üzemanyagtól – a szükséges berendezések méretei és az üzemanyag mennyisége miatt – több ezer tonnás űrrepülőre lenne szükség ahhoz, hogy fúziós hajtóművel embereket szállíthassunk a Naprendszer külső részeire vagy a csillagközi tér távoli szegleteibe (összehasonlításként a Nemzetközi Űrállomás tömege körülbelül 500 tonna lesz végső állapotban).

A fúziós hajtóművek előtt álló legfőbb akadályok külön-külön is legyőzhetetlennek tűnnek (nagy mennyiségű energia kinyerése kontrollált reakciókból, hatékony tároló szerkezetek és mágneses fúvókák építése, valamint megfelelő mennyiségű üzemanyag biztosítása), de mindegyikük esetében pislákol valami halvány remény a jövőbeni megoldásra nézve.

Először is, okkal hihetünk abban, hogy a fúziós reaktorok nemsokára messze túljutnak majd az áttörési ponton (a reaktor ugyanannyi energiát generál, mint amennyit felvesz). Világszerte több nemzetközi kutatócsoport dolgozik párhuzamosan a fúzió beindításának problematikáján, és több országban is az állam finanszírozza ezeket a kutatásokat. Az új évezred első évtizedének a végére olyan reaktort ígérnek (ITER tokamak), amely már energiatermelésre alkalmas alternatíva lesz.

Vannak olyan jelek, melyek szerint a tokamak – amely jelenleg uralja a mágneses tárolókkal kapcsolatos kutatást – egy nap olyan kompaktabb technológiákkal egészül ki, amelyek jobban megfelelnek a rakétahajtómű-fejlesztés céljainak.

1996-ban az amerikai Energiaügyi Minisztérium fúziós energia-tudományokkal foglalkozó tanácsadó bizottsága támogatott egy vizsgálatot néhány ígéretes, új szerkezetű mágneses tárolórendszerrel kapcsolatosan (fordított-mezőjű elrendezés és a gömb alakú tokamak). Eközben már megkezdődtek az elsődleges munkálatok a mágneses fúvókákkal kapcsolatban is. Jelenleg a legnagyobb kutatási erőfeszítést a NASA, az Ohio State University és a Los Alamos National Laboratory között létrejött együttműködés jelenti. A három intézmény kutatói nagyon nagy elektromos áramot használnak a plazma létrehozására – ami a kísérletekben a fúziós plazma szerepét tölti be –, és így vizsgálják az áramló plazma és a mágneses mező interakcióját. Még a fúziós üzem-

anyaggal kapcsolatos probléma is kezelhetőnek látszik. Jóllehet, nagyon kevés hélium-3 van a Földön, de nagyobb mennyiség található belőle a Hold talajában és a Jupiter atmoszférájában is. Emellett más – a Földön is megtalálható – elemek, mint a bór, szintén szóba jöhetnek olyan alternatív fúziós reakciók szempontjából, amelyeket nehéz ugyan beindítani, de amelyek szintén alfarészecskéket szolgáltathatnak.

Annihilációs reakciók – foton hajtómű [14]

A fúziós hajtóműtervekkel kapcsolatos ígéretek mellett van még egy ismert fizikai jelenség, amely sokkal több energiát szabadít fel adott tömegű reaktánsból: az anyag-antianyag megsemmisülés. Az elképzelések szerint egy ilyen elven működő űrbéli hajtómű-rendszer protonok és antiprotonok kölcsönös megsemmisítését használná ki.

A megsemmisülés sorozatos reakciókat eredményezne. Ezek közül az első a pionok képződése – ezek rövid élettartamú részecskék, amelyek közül néhány irányítható mágneses mező segítségével, és így tolóerőt generálhatna. Az anyag-antianyag megsemmisülésből származó pionok a fénysebességet megközelítő sebességgel mozognak, ezért igen nagy energiával rendelkeznek. Itt azonban ismét szemben találjuk magunkat a hiány problémájával: az egész világ nagyenergiájú részecskegyorsítói által termelt antiprotonok mennyisége évente mindössze néhány tíz nanogrammnyit tesz ki. Ahhoz, hogy embereket szállíthassunk a legközelebbi csillagra, egy anyag-antianyag rendszernek több tonnányi antiprotonra lenne szüksége.

Az antiprotonok befogása, tárolása és kezelése további nagy kihívást jelent, mivel a részecskék megsemmisülnek, ha közönséges protonokkal kerülnek kapcsolatba. Mindazonáltal megoldható, hogy közvetett módon az antianyag hatalmas energiatartalmát kiaknázzuk sokkal kevesebb antiproton felhasználásával – olyan mennyiséggel, amely valószínűleg a jövő évtizedben már a rendelkezésünkre áll majd.

Ez a rendszer arra használná az antiprotonokat, hogy beindítsa a tehetetlenségi tároláson alapuló fúziós reakciót. Az antiprotonok behatolnának nehezebb atomok magjába, és proton párjaikkal találkozva megsemmisülnének. Ezzel a nehéz atommag hasadása azonnal bekövetkezne, és az így felszabaduló energia felhevítené a körülötte elhelyezkedő fúziós üzemanyagot, amiben beindulhatna a fúziós reakció.

A fúziós- és az antianyag hajtóművek hatékonysága jelentősen megnövelhető, ha kombináljuk őket más, fent már leírt megoldásokkal. Igen vonzó alternatíva lehet egy olyan többfokozatú űrhajó terve, ahol az indításkor egy hatalmas lézer tolná maga előtt a járművet egészen addig, amíg ezzel a megoldással a hatékony energiaátvitel megoldható, és csak ezek után lépne működésbe a fedélzeti fúziós- vagy az annihilációs erőmű.

Gravitációs gyorsítók [15]

Az eddig vizsgált hajtóművek a természet majd' minden kölcsönhatását kiaknázták már, kivéve egyet, a gravitációt. Ennek oka, hogy a gravitációs kölcsönhatás 38 nagyságrenddel gyengébb, mint a fúziós magreakciókban az atommag nukleonjai között fellépő erős kölcsönhatás. Vannak azonban esetek, ahol mégis a többi kölcsönhatással összemérhető energiákat tudnak belőle felszabadítani.

A mai kémiai hajtóművekkel ellátott űreszközök a 10^{24}-10^{27} kg tömegű bolygók gravitációs mezőit hintamanőverek segítségével felhasználják a sebességük növelésére.

A leglátványosabb tesztet ezen a téren a Voyager szondák Jupiter melletti elrepülése jelentette a hetvenes évek végén. Azóta mondhatni bevett szokás, hogy ezekkel az energiamentes megoldásokkal operálnak a pályákat tervező mérnökök. Hogyan lehetne ezt a rendelkezésre álló egyszerű megoldást nagysebességű űrjárművek folyamatos meghajtására felhasználni? Meglepően egyszerűen! Magukkal kell vinniük az intenzív gravitációs mezővel rendelkező objektumot a fedélzethez rögzítve, míg az üzemanyagot egy megfelelően megválasztott mellette haladó pályán a szabadba kell engedni. Ahogy a fedélzeten lévő tömeg gravitációs mezőjében felgyorsulnak az üzemanyag részecskéi, az impulzusukkal ellenkező irányba tolják az egész hajót. Hatalmas előnye a rendszernek, hogy bármilyen üzemanyaggal működtethető, és nem kell semmilyen eszközzel a kiáramló részecskéket fókuszálni.

Mégis van egy kis bökkenő: az űrhajó nem vihet magával egy bolygót ahhoz, hogy kellően erős gravitációs mezőt tudjon kelteni. Ha pedig kisebb tömeget visz – hagyományos anyagokból –, akkor annak gravitációs mezője túl gyenge egy ilyen meghajtáshoz. A megoldás a szemünk, illetve a távcsöveink előtt van évtizedek óta. Most jönnek az égi szuper energiaforrások, a neutron csillagok és a fekete lyukak. A kulcsszó: sűrűség! A gravitációs mező helyi erősségét ugyanis nem csak a tömeg, hanem az általa kitöltött térrész mértéke is befolyásolja. Ha létre tudunk hozni egy néhány száz tonnás tömeget úgy, hogy apró térrészbe nyomjuk össze, egészen addig, amíg a testet alkotó atommagok teljesen össze nem érnek – akár egy neutron csillag magjában –, akkor a test felszínén a gravitációs térerősség olyan erős lesz, hogy a mellette hiperbola pályán elhaladó részecskéket több ezer km/s-os sebességre gyorsíthatja fel. Tehát, ha szerzünk egy merőkanálnyit egy neutron csillag anyagából, máris kész a kompakt objektumunk, amit a hajtóműbe építhetünk. A probléma már csak a rögzítés. Egy ilyen hatalmas sűrűségű anyagdarab mindent magához vonzana, rosszabb esetben egyszerűen magába roskasztaná az egész űrhajót, ezért valahogy meg kellene támasztani. Szerencsére semmilyen törvény nem tiltja, hogy többlet elektronokkal töltést vigyünk nagytömegű neutron golyónk felszínére, és így elektrosztatikus mezők segítségével a hajtóműben rögzítsük azt. Máris kész a bolygóközi repülésekhez ideális igénytelen hajtóművünk. Nem olyan egyértelmű, de azért felmerülhet mindenkiben a kérdés, hogy végül akkor mi is hajtja előre az űrhajót? Hát az üzemanyag – mondhatnák –, ami első ránézésre igaz, de a gyorsításhoz szükséges energia a kompakt tömeg (mag) gravitációs mezőjéből származik. Méghozzá nem is akárhogyan! Egyszerűen a gyorsításhoz szükséges energiamennyiségnek megfelelő mennyiséggel csökken a tömege. Ez a legtökéletesebb energiaátalakulás, ami csak elképzelhető, a mag tömege a használat során egyszerűen mozgási energiává alakul. Azaz a mag tömege a használat során folyamatosan csökken, tehát néha új magra van szükség. Ameddig a Naprendszeren belüli utazásokról beszélünk, a mag tömege sokáig fedezheti a mozgatás energiaigényét, de egy csillagközi utazáshoz ennél többre van szükség.

A neutroncsillagok anyagának energiasűrűsége korlátozott, nem is beszélve a hozzáférhetőségről. Az igazi megoldást egy kisméretű szingularitás, egy mikro-fekete lyuk jelentené. Egy néhány száz tonnás fekete lyuk körül, a precízen irányított részecskeáram sebessége megközelítheti akár a fény sebességét is. A fekete lyukak szintén elektromosan feltölthetők – így hasonlóan a neutron gömbökhöz –, elektrosztatikus mezőkkel rögzíthetőek. Már csak az előállításuk kérdésével kell megbirkóznunk.

Az univerzum keletkezésének bizonyos elméletei azt jósolják, hogy a felfúvódás

előtti világegyetemben kedvezőek lehettek a viszonyok kis tömegű fekete lyukak létrejöttéhez. Ezek a néhány grammtól a kisbolygónyi tömegig terjedhettek, és a felfúvódás során szétszóródtak a világegyetemben. A számukra vonatkozóan egyelőre semmilyen becslés nincs, mert kis gravitációs hatásuk miatt sehogyan sem mutathatóak ki. Ráadásul S. Hawking elméleti munkái alapján feltételezhető, hogy a kvantumos párolgásnak nevezett jelenségnek köszönhetően az igazán kis méretű fekete lyukak gyorsan tiszta energiává sugárzódnak szét. Ennek oka, hogy az eseményhorizonthoz közeli, nagy energiasűrűségű gravitációs mezőben keletkező virtuális részecske-párok egyik fele rendelkezhet akkora energiával, hogy el tudja hagyni a fekete lyuk vonzáskörzetét, míg a részecske-pár másik, negatív energiájú tagja visszazuhan a lyukba, csökkentve annak tömegét. Gyakorlatilag a fekete lyuk tömegének rovására keletkezik a semmiből egy új részecske, így kívülről tekintve sugárzást bocsát ki. Minél kisebb méretű az eseményhorizont (minél kisebb a tömeg), annál gyorsabban csökken a gravitációs mező térerőssége a központtól távolodva, így annál nagyobb az esélye annak, hogy a virtuális részecske-párok egyik tagja elszökhet. Paradox módon tehát a nagyméretű fekete lyukak nem párolognak, míg az egészen aprók azonnal tiszta energiává sugárzódnak szét.

Mégis honnan vegyen az emberiség ilyen kis méretű (néhány száz tonnás) szingularitásokat? Legegyszerűbb lenne felkutatni őket és felhasználni, de ha ez nem megoldható, akkor gyártani kell. A fizika itt a segítségünkre siet. Attól azonban nem kell félnünk, hogy holnapra fekete lyukak gyártásával foglalkozó cégek özönlik el a világot, de a helyzet mégsem teljesen reménytelen.

Azt mindenki tudja, hogy a fénysebesség elérésének egyik fő akadálya, hogy a gyorsítandó test tömege növekedni kezd, méghozzá egészen a végtelen felé. Eközben szintén ismert jelenség, hogy a fénysebességhez közelítő eszközök haladás irányú mérete kontrakciót szenved. Összevetve a két folyamatot: a tömeg növekszik, a térfogat pedig csökken, tehát még a fénysebesség elérése előtt megtörténik az, amire egyetlen sci-fi író sem gondol: minden test saját növekvő gravitációs erőtere hatására összeomlik fekete lyukká. Szerencsére ez jóval a fénysebesség 99%-a felett következik be, úgyhogy egyelőre az ember készítette űrjárműveket ez a veszély nem igazán fenyegeti, de ha egy atommagot minden határon túl felgyorsítunk, elérhető, hogy átlendüljön ezen a határon. Szándékosan atommagról volt szó, amely – kihasználva a kiegyenlítetlen töltését – elektrosztatikus térben visszalassítható, és máris kész az atomnyi tömegű fekete lyuk. Ezt gyorsan további atomokkal növelve (hogy elkerülhető legyen a szétsugárzódás), majd később nagyobb tömegekkel is táplálva megkapható a hőn áhított hajtómű alapegység. Persze, az egész folyamat sokkal bonyolultabb lesz ennél, hiszen a gyorsítás közben az atommag a vele közölt óriási energiák hatására nukleonokra akar majd bomlani, aztán a nukleonokba zárt kvarkok is annyi energiával kezdenek rendelkezni, hogy az egész atommag szétesik kvark-glüon plazmává, így elkerülve, hogy olyan apró térfogatra nyomódjon össze, ahol a fekete lyukká válás valós veszéllyé lenne. Nagyobb a sikerre az esély, ha két vagy több nagy tömegszámú atommagot ütköztetünk hatalmas sebességgel, de még a bomlási határnál kisebb egyedi energiával. Ebben az esetben nincs ideje a kvark-glüon plazma szétrepülésének, és jó irányítás esetén az ütközés helyén marad a mikro-szingularitás, amit azonnal kezelésbe kell venni, hogy megőrizhető legyen későbbi felhasználásra.

Látszik, hogy rögös az út egy ilyen hajtómű előállítása felé, viszont ha megoldhatóvá válik az elkészítése, olyan eszköz kerül az emberiség kezébe, amivel a fénysebesség

60-70%-ig biztonságosan felgyorsíthatóak űrjárműveink, miközben semmilyen különleges követelménynek nem kell az üzemanyagnak megfelelnie. Hiszen az csak közvetíti majd a mikro-szingularitás tömegében tárolt tiszta energiát.

A fénysebesség határán

A gravitációs gyorsítókkal egyes űreszközök már képesek lennének egészen megközelíteni a fény sebességét, mert a relativisztikus sebességeken a hajó tömegével párhuzamosan az üzemanyag tömege is megnő. Ennél a meghajtásnál pedig semmi más nem számít, csak az, hogy mennyi tömeget dobálunk ki a hajó mögé. Azonban hiába érné el egy űrhajó a fénysebesség 90%-át, a lassításhoz már nem maradna semmilyen üzemanyaga, amivel a hajtómű fékezni tudna. Az ember nem olyan élőlény, aki fennakad ilyen apróságokon. Ha nincs üzemanyagod, hát gyűjts!

A világűrre alapvetően jellemző, hogy gyakorlatilag nincs benne anyag. Azaz, egy kevés mégis akad, úgy köb-kilométerenként 3-4 atom. Ez tényleg nagyon kevésnek hangzik, de tegyük fel, hogy a hajónk már 100.000 km/s sebességgel halad és egy 100 km^2-es felületen gyűjti magába a részecskéket. Ez esetben másodpercenként 30-40 millió atom kerülhet a csapdába. Ha a sebességet tovább növeljük, a helyzet még kedvezőbbé válik, fénysebességhez közeledve pedig drasztikus változások következnek be. A teljesen üresnek hitt űr a hajó számára egyre sűrűbb közegnek fog tűnni, hiszen ahogy az idő lassul a fedélzeten, egy másodperc alatt több részecske becsapódása tapasztalható, mint amit az álló külső megfigyelő észlelne. Ez a folyamat a határsebesség közelében egyre erőteljesebbé válik: a fedélzeti idő egészen lelassul, és közben a hajtóművek részecskékkel teli egyre sűrűbb közegnek érzékelik a szinte üres vákuumot. Végezetül fénysebességhez hajszálnyira közel már tömör falat alkotnak az atomok. Semmilyen tárgy nem lesz képes áthatolni ezen a végtelen sűrű közegen, hiszen az űrhajóban teljesen lelassul az idő, de a részecskék változatlan intenzitással sorjáznak felé.

Most láthattuk a sokadik okot, ami miatt a fénysebesség normál térben nem közelíthető meg (tömegnövekedés, kontrakció, vákuum sűrűségének növekedése az időlassulás miatt), de ez utóbbi folyamatot a hasznunkra is fordíthatjuk.

Fúziós RAMJET és SCRAMJET hajtóművek [16]

A tudósok a fénysebességgel összemérhető sebességű űrutazás problémájára olyan megoldással rukkoltak elő, ami meglepően sok szempontból tekinthető lehetséges és megvalósítható alternatívának. A fénysebesség felé közeledve a legfőbb problémává az üzemanyag mennyisége, illetve annak a hiánya válik. Ha nincs a hajóban több üzemanyag, teljesen mindegy, milyen hajtóművel rendelkezik, a további manőverezés képességét végleg elveszti.

Az előző rész végén láttuk, hogy az egyre növekvő sebességek felé az űrhajót addig körülvevő tér egyre jobban megtelik anyaggal, méghozzá a világegyetemet mindenütt kitöltő hidrogénnel és kis mennyiségű héliummal. A növekvő „közegellenállást” az űrhajó a hasznára is fordíthatja. Mágneses burkot fújva maga köré a pólusok felé terelheti a szemből érkező ionizált hidrogén és hélium atomokat (a napszél javarészt ezekből áll). A frissen begyűjtött anyagot akár azonnal bevezethetik a működő fúziós reaktorba, hogy ne a hajó üzemanyaga fogyjon feleslegesen. A számítások szerint a fénysebesség

4-6%-ától már jelentős üzemanyag-megtakarítás érhető el, de ha a hajó tovább gyorsul, újabb lehetőségek nyílnak meg a hajtóműtervezők előtt.

A begyűjtött üzemanyag-mennyiség növekedésével a fúziós reakciók megindulásának központja kivihető a hajó reaktorából, a beömlőnyílás folytatásaként kialakított fúvókák felé. Az első fokozatban a begyűjtött ionizált hidrogéngázba a hajó reaktorából „égő" plazmát engedve, a fúziós reakció fenntarthatóvá válik a hajtómű-csatornában is. Az űrhajót ekkor már egyre nagyobb részt a csillagközi térből származó anyag gyorsítja. A külső meghajtás hatásfoka a sebesség növekedésével egyre javul, míg egy sebességhatárt átlépve az űrhajó körüli mágneses térbe érkező atomok annyira összesűrűsödnek és felforrósodnak, hogy a Lawson-kritérium automatikusan teljesül, azaz a hajtóműbe érkező hidrogén atomok közötti fúziós reakció segítség nélkül beindul. Egy ilyen üzemmódba juttatott űrhajó gyakorlatilag az idők végezetéig járhatja a világűrt, üzemanyag-utánpótlás nélkül. Sebességi korlátot pedig tényleg csak a fénysebesség jelentene.

Mindazonáltal ezt a korlátot megközelíteni azért komoly veszélyekkel járna, tekintettel arra, hogy az űrhajó anyaga is ütközhetne a töltés nélküli részecskékkel. Egy-egy ilyen részecske olyan energiával bírna, hogy az űrhajó burkolatát képező atomokat egyszerűen kvark-glüon plazmává robbantaná szét.

Tehát, ha önerőből a fénysebesség 4-6%-át valahogy elérjük az űrhajónkkal, akkor beindíthatjuk a fúziós SCRAMJET hajtóműveket, és a világegyetem máris emberi méretűvé zsugorítható. Látható, hogy az emberi elme nem ismer lehetetlent!

A sebesség növekedésével azonban az űrben ránk leselkedő veszélyek is egyre növekednek majd. Egyrészt a száguldó töltés nélküli atomok ellen hatásosan védekezni szinte lehetetlen, másrészt a világegyetemben nagyobb anyagdarabok is előfordulnak. Márpedig ilyen sebességeknél, egy kavics méretű testtel való találkozás is azonnali pusztulásba sodorná a több ezer tonnás, gondosan megépített űrhajónkat. Arra pedig nagyon kicsi az esély, hogy elkerülő manővereket hajtsunk végre fénysebességgel összemérhető sebességeken.

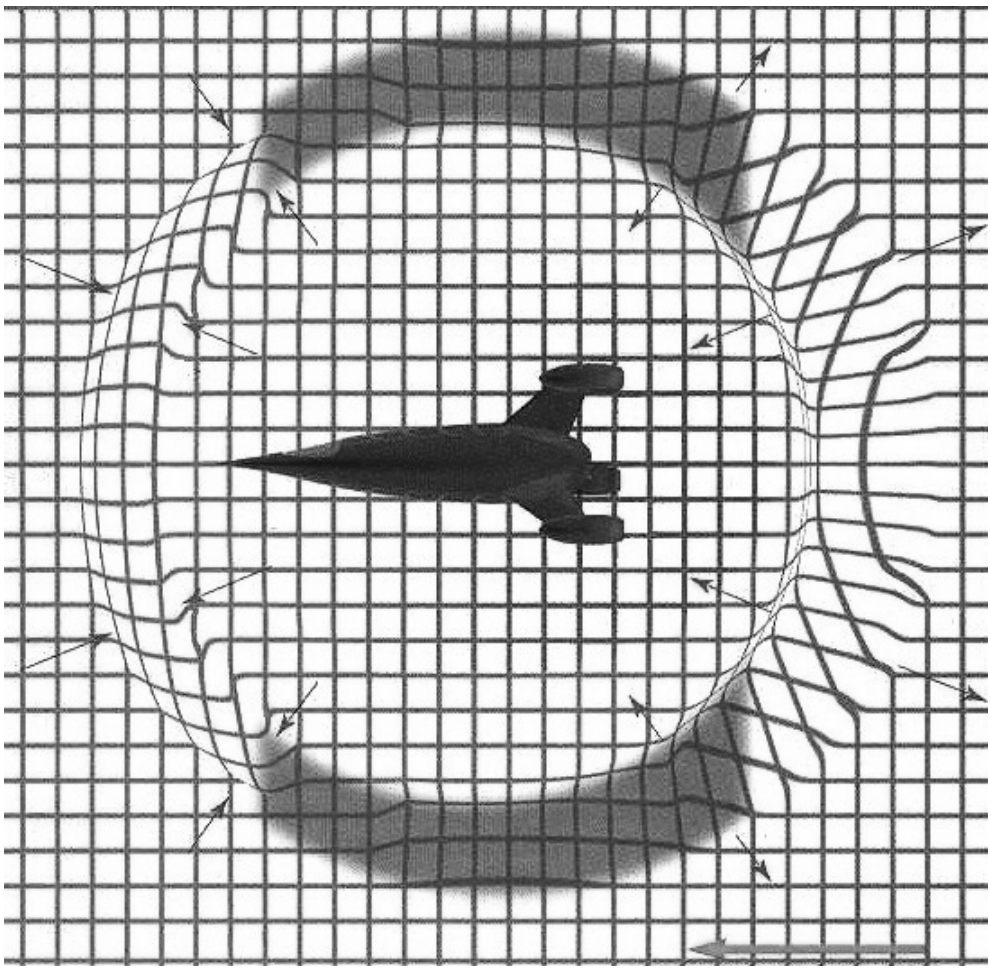
Továbbá a relativisztikus hatások is olyan problémákat vetnek fel, amelyek nem töltik el boldogsággal az emberiség leendő csillagközi vándorait. Hát ki örülne annak, hogy egy mindössze néhány évig tartó útról visszatérve a közvetlen hozzátartozók unokái is megöregedtek? A beilleszkedés problematikája épp annyira megoldhatatlannak tűnik, mint az elért tudományos eredmények hasznossága ilyen időtávlatokban nézve. Mindezek a körülmények olyan újabb megoldások felé terelik a tudósfantaszták gondolatait, amelyek szakítanak a fizika ma ismert korlátaival, és megkerülve azokat mégis lehetővé teszik, hogy emberi körülmények között népesítsük be a csillagok távoli világát.

A fénysebességen innen, a téren túl

A WARP – hajtómű [17]

A legújabb kutatások szerint elméletileg lehetségesnek látszik a fény sebességét meghaladó mozgás. Chris Van Den Broeck, a leuven-i Katolikus Egyetem (Belgium) professzora az úgynevezett „warp" (gyűrődés) hajtómű egy újabb elméletével állt elő, amellyel egy űrhajó elképesztő, fénynél gyorsabb sebességre tehetne szert, egy különleges „warp"-buborék belsejében.

A professzor azokból a számításokból indult ki, melyeket egy mexikói fizikus, Miguel Alcubierre végzett 7 éve, meghökkentve a tudóstársadalmat azzal, hogy a „warp” mozgás nem csak egy SF varázslat. Ötlete azon alapult, hogy az űrhajó előtt kitágítjuk a téridőt, mögötte pedig összezsugorítjuk. Maga a jármű, a két téridő-eltorzulás közötti „gyűrődés buborékban” megmaradhatna, és az ily módon keltett „tér-idő-hullámot” meglovagolva haladhatna a fénynél is gyorsabban úgy, hogy saját téridejében nem szegi meg a jelenleg ismert fizika törvényeit. Ugyanezen okokból nem lépne fel a gyorsuláskor és lassuláskor szokásos többszörös g-érték sem. Azonkívül az idő – a buborékon belül – teljesen normálisan telne, ellentétben a normál téridőben fénysebességhez közeli mozgás esetén tapasztalható időtorzulásokkal.



5. ábra
„WARP” BUBORÉK MOZGÁSA
A sötét terület a negatív energiájú anyag helyét jelzi.

Alcubierre elgondolása elképzelhetőnek látszott, de a később elvégzett konkrét számítások azt mutatták, hogy egy ilyen buborék képzéséhez több energia szükséges, mint amennyi egyáltalán előfordul a (belátható) univerzumban, ami komoly nehézsége-

ket támaszt a felhasználók elé.

Nemrég azonban Van Den Broeck egy olyan alternatív megoldással állt elő, amihez mindössze egy gramm negatív tömeg lenne szükséges. Az ő elképzelése egy mikroszkopikus méretű buborék, ami nem igényel olyan sok energiát. De hogy fér el egy űrhajónyi tárgy egy ekkora buborékban? A választ a fizika egyik (nem közismert) paradoxonja adja: meg lehet növelni a buborék belsejét úgy, hogy közben fenntartjuk annak mikroszkopikus külső méretét. „Létrehozható egy olyan buborék, amely kisebb egy atommagnál, de átmérője akár kétszáz méter is lehet" – mondja a professzor.

Ezen térfogatnöveléshez – nagy meglepetésre – nincs szükség túl sok energiára. Alcubierre kicsi, gömb alakú buborékot képzelt el, Van Der Broeck ötlete viszont egy palackszerű buborék nagy térfogattal, ám a palack szája – ahol a negatív tömeg is található – csak mikroszkopikus méretű lenne.

A Tufts Egyetem fizikaprofesszora, Larry Ford, aki már Alcubierre elméletéhez is szkeptikusan közelített, továbbra is óvatos, nem látván módot arra, hogy egy nagyméretű tárgyat bejuttassunk a buborékba azon a mikroszkopikus méretű nyíláson át, illetve azt firtatva, hogy milyen energia árán lenne ez mégis lehetséges. Van Den Broeck is szkeptikus, mert bár a buborékhoz „csak" egy grammnyi negatív tömeg szükséges, jelenleg még ennyi előállítása is lehetetlen az ember számára, bár azt már nagyjából sejtjük, mi fán terem.

Az általunk ismert anyag kivétel nélkül pozitív energiával rendelkezik, ami által a téridőben pozitív görbület jön létre (a korábban említett antianyag is pozitív energiával bír). A „warp" buborékhoz viszont negatív görbületű térrészre van szükség, tehát negatív energiájú (tömegű) anyagra (ez taszító gravitációnak felel meg). De mi ez a negatív energia, és hogyan lehet előteremteni?

Itt kapunk segítséget a kvantummechanika határozatlansági relációjától. Tudniillik a világűr puszta üressége a várakozásokkal ellentétben szinte „pezseg", mert minden pillanatban virtuális részecske-antirészecske párok milliárdjai keletkeznek benne, amelyek roppant rövid idővel keletkezésük után meg is semmisítik egymást. A képződésükhöz szükséges energiát a vákuumtól kölcsönzik, majd megsemmisülésükkor visszaadják azt. Ezt nevezzük a vákuum kvantum fluktuációjának.

Ha a fellépő ingadozásokat kívülről irányítani tudnánk, akkor a vákuum energiasűrűségét – mely összességében kifelé nulla – negatívvá alakíthatnánk. Az így nyert negatív energia-kölcsönért azonban súlyos árat kéne fizetnünk. A Heisenberg-féle határozatlansági reláció szerint minden mező (elektromágneses, gravitációs) energiasűrűsége ingadozhat, és bizonyos időpontokban akár negatív értéket is felvehet, de később valamikor egy nagyobb értékű pozitív sűrűség által ennek ki kell egyenlítődnie. Az elmélet alapján a negatív kitérés várhatóan túlkompenzálódik, minél nagyobb az időintervallum a kitérések közt, annál jobban. Ezt a jelenséget kvantumkamatnak is nevezik: a negatív energia a kölcsön, amit a hajtáshoz felhasználunk, kamatosan visszafizetendő. Minél hosszabb a kölcsön ideje (nagyobb időintervallum) és minél nagyobb a kölcsönösszeg (negatív energia), annál nagyobb a kamat (a pozitív kitérés), emellett az emelkedő kölcsönösszegeknél a futamidő is egyre rövidül.

Persze, még ha a negatív tömeget meg is szerezzük, akkor sem kerülünk sokkal közelebb a valódi „warp"-buborék létrehozásához, ugyanis a buborék megvalósítása a téridő nagyon finom skálán történő manipulálását igényli, melyre a közeli jövőben aligha leszünk képesek. Ugyanígy állunk a szükséges térsűrítő berendezések létrehozásának

alapfeltételeivel is. Ez a technológia egyelőre olyan távoli jövőt képvisel, hogy már az is csoda, hogy az elméleti lehetőségre rábukkantunk. A világegyetem azonban egy roppant különös hely. Elképzelhető, hogy nem kell ahhoz „warp”-buborékba préselni az űrhajóinkat, hogy a fénysebesség többszörösével haladva tegyünk meg két távoli csillag közötti távolságot; a természetes válasz neve: Einstein-Rosen híd, azaz közismertebb nevén a féregjárat.

Járatok a tér-idő szerkezetben 18

A görbült téridőről röviden

Az általános relativitáselmélet szerint a tömeg meggörbíti a teret. Az egydimenziós tér – az egyenes – meggörbítve egy kört alkothat, így a görbült egyenest – bár kerülete megadható egy véges számmal – végtelen kiterjedésűnek észleljük, mert körbe-körbe járva rajta soha nem érünk a végére. Görbült kétdimenziós felületként vehetjük például a gömb esetét, amelynek felszínét kiterítve, egy síkot kapunk. Háromdimenziós teret még könnyen elképzelhetünk, de egy görbült háromdimenziós teret már nehezen. Annyit mindenesetre tudunk róla a matematikából, hogy háromdimenziós felülete van. A mérések arra utalnak, hogy a világegyetemet kitöltő tér is ilyen háromdimenziós, de magasabb dimenziókban görbült tér.

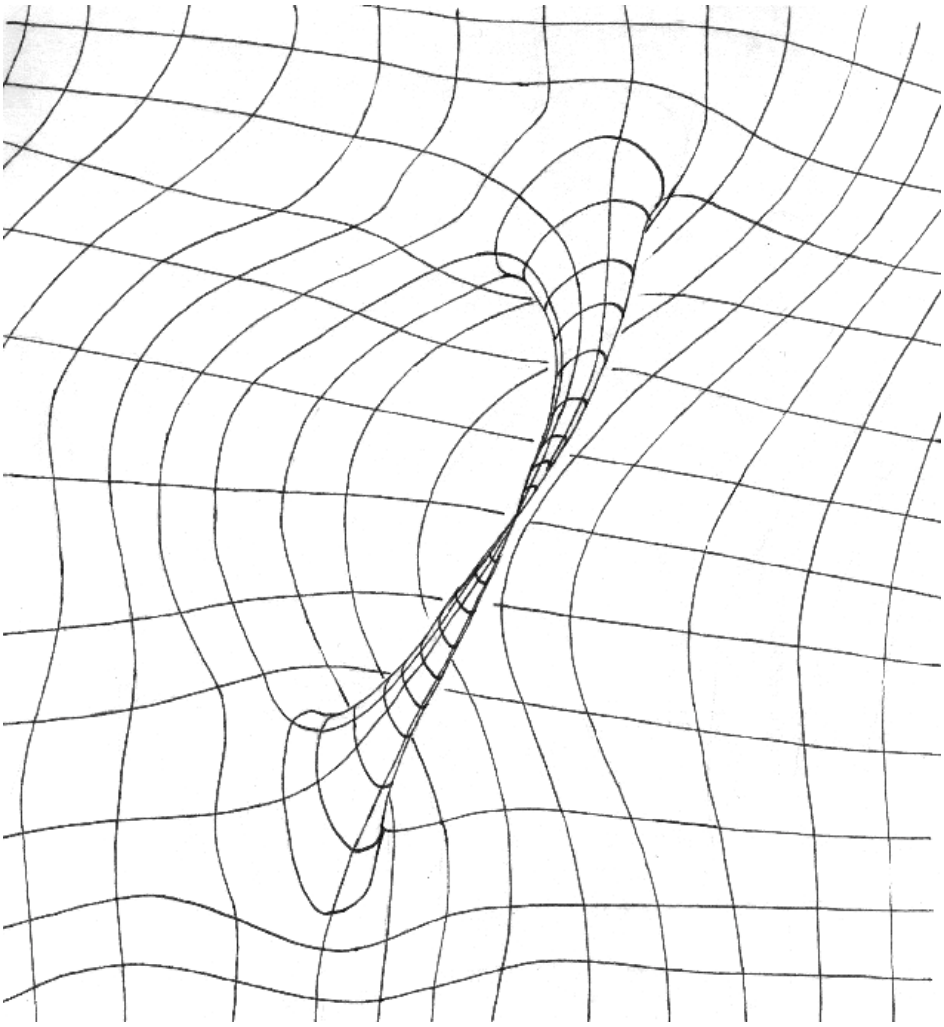
Einstein tételeinek értelmében amikor azt mondjuk, hogy a gravitáció hat valaminek a mozgására, akkor valójában a test továbbra is a legkisebb energiájú egyenes pályán mozog, de mivel a tér meggörbült, kénytelen követni annak deformált alakját. A világegyetemben fellelhető anyag olyan gravitációs kölcsönhatást produkál, ami az egyenesen haladó fényt maga felé „hajlítja”, de nem kizárt, hogy létezik (vagy létrehozható) olyan negatív tömeg (energia) amely épp ellenkezőleg: magától elhajlítja a fénysugarakat. A tér-idő kontinuum tetszőleges átjárhatóságának a kulcsa – mint azt látni fogjuk – ez az egzotikus negatív energiájú anyag.

A természetes Einstein-Rosen híd

Albert Einstein és Nathan Rosen még 1935-ben bebizonyította, hogy a relativitáselmélet a téridőben különleges „hidakat” engedélyez. Ilyen makroszkopikus méretű alagutakat fekete lyukak tudnának létrehozni, amelyek egy fehér lyukkal (talán a nemrég felfedezett hihetetlen energiájú gamma-sugár kitörések utalhatnak a létezésükre), vagy egy másik fekete lyukkal párt alkotva összeköthetik a világegyetem két távoli pontját.

Általános esetben egy gömbszimmetrikus, álló fekete lyukhoz közeledve a tér-idő görbülete egyre jobban növekszik, míg a gravitáló tömeg középpontját elérve végtelenné válik. Természetesen ez a tartomány messze az eseményhorizont alatt van, tehát valós információnk erről sosem lehet. A matematikai modell azonban nem áll meg a végtelen görbületű ponton (szingularitás), hanem tovább követve a tér-idő vonalakat egy olyan kivezető tartományhoz is elvezethet, ahol a térgörbület folyamatosan csökken, majd végül elenyészik. A fekete lyuk elméletileg megjósolt lehetséges tér-időbeli párját hívjuk fehér lyuknak. Ez a hipotetikus objektum abban tér el a fekete lyuktól, hogy ebből csak kifelé jöhet anyag és energia, de ami a legfontosabb, hogy mind térben, mind időben a fekete lyuktól teljesen különböző helyen lehet. Akármennyire is kedvezőnek lát-

szik ez a lehetőség, a tudósok rögtön kiábrándítottak mindenkit, hogy az esetlegesen létrejövő csatorna végtelen görbületű térrészén semmi nem tud sértetlenül áthatolni, de mint mindig, most is találtak kiutat. Az elméleti modellek gömbszimmetrikus és álló tömegekre vonatkoztak, a valóságban azonban az összeomlás előtt álló csillagok a legritkább esetben gömbszimmetrikusak, és általában őrült sebességekkel forognak a tengelyük körül. Roy P. Kerr 1963-ban találta meg a téregyenleteknek azt a megoldását, amely figyelembe veszi a tömegek forgását is. Számításai alapján a gyorsan forgó fekete lyukaknál pontszerű helyett gyűrű alakú szingularitás alakul ki, amely így olyan csőszerű Einstein-Rosen hidat alkot, ami már átjárható.



6. ábra
SZINGULARITÁSON ÁTVEZETŐ EINSTEIN-ROSEN HÍD
Két dimenziós görbült térben ábrázolva.

Egy fekete lyuk szingularitása felé zuhanni azonban nem gyerekjáték. A szilárd testek a rájuk ható ár-apály erők hatására egyre kisebb méretre darabolódnának zuhanás

közben, mert a gyorsan erősödő gravitációs térben a test két vége között eltérő mértékű vonzóerő lépne fel, ami a testet nyúlásra kényszerítené (amíg az el nem szakad). Van azonban itt is egy apró kiskapu. Az igen nagy tömegű fekete lyukak (10.000 naptömeg felett) már olyan erős és kiterjedt gravitációs mezővel rendelkeznek, hogy az előbb ismertetett ár-apály jelenség csak a nagyobb testeket szabdalná fel. Egy galaxis középpontjában rejtőző több millió naptömegnyi fekete lyuk közelében akár egy több kilométeres űrhajó is sérülés nélkül elhaladhatna, de ne feledjük, hogy nem minden lyuk rejt feltétlenül féregjáratot az eseményhorizontja alatt. Így az utazások kimenetele eléggé bizonytalanná válna.

De még ha létre is jönne, ez az utazás nem lenne túl szórakoztató. Az átjáró térben és időben is a világegyetem egyik távoli pontjára vezethetne, azonban az áthaladással igencsak sietni kellene, mert az Einstein-Rosen-híd csak nagyon rövid élettartamú, és a legszűkebb részén nagyon gyorsan szingularitássá omolhat össze, tehát a visszatérésre nem sok esély adódna.

Az 1960-as évek végén John Wheeler és Robert Fuller fizikusok ezt a felvetést számításokkal is alátámasztották. Egy tanulmányban bebizonyították, hogy a természetes féregjárat a nehézségi erők miatt olyan gyorsan omlik össze, hogy még fény sem lenne képes átkelni rajta, ugyanis még a lehető legkisebb zavaró tényező – egy foton – is kiválthatná az összeomlási folyamatot.

Kip Thorne 1985-ben olyan megoldást talált, amelyben megkerülhető volt az összeomlás, és így az utazót nem érte utol baljós végzete. A Thorne által talált átjárható féregjáratnak „csupán” egyetlen szépséghibája volt: ahhoz, hogy a bejáratai stabilan nyitva maradjanak, a belsejében negatív energiasűrűségű anyagnak kellett lennie, amely negatív tér-idő görbületet hozott létre. Az elméletek alapján azonban ilyen egzotikus anyag egyelőre csak az elektromágneses tér vákuumfluktuációiban fordulhat elő átmenetileg.

Miniatűr féreglyukak

A féregjáratok egy másik keletkezési lehetősége Thorne elméletéhez kapcsolódik, és a korábban már említett virtuális részecskékkel kapcsolatos. Az elméletek szerint ezek a részecskék a vákuumból keletkeznek, és a Heisenberg határozatlansági elvét követő fluktuációk miatt akár negatív energiával is rendelkezhetnek. Ezek a rövid életű részecskék a teret a normálissal ellentétes irányban görbítik meg, így keletkezésükkel egy apró féregjáratot stabilizálhatnak a tér-idő szövetében. Alkalmasan kis léptékben ugyanis a Világegyetemben is érvényesül a Heisenberg-féle határozatlansági reláció. Kvantumszinten ezért a vákuumot úgynevezett kvantumhab tölti ki, amelyben a határozatlansági reláció által megengedett rövid időre fekete-fehér lyukpárok és féregjáratok jönnek létre a semmiből, majd tűnhetnek el, ahhoz hasonlóan, ahogy a virtuális részecskepárok teszik azt a vákuumban. Feltéve, hogy egy ilyen előugró féreglyuk torkába valami módon egzotikus anyagot tudnánk tömni, stabilizálhatnánk, majd egyre nagyobbra pumpálhatnánk azt.

Ahhoz, hogy egy 1 m átmérőjű járatot szándékosan, és hosszabb időre megnyissunk, legalább 10^{-21}m „vastagságú” negatív energiájú mezővel kellene körbevenni, ehhez viszont annyi energiára lenne szükségünk, mint amennyit 10 milliárd csillag egy év alatt termel. Ha pedig egy olyan átjárót kívánnánk létrehozni, amin akár még egy űrhajó

is átférhetne, akkor a fenntartáshoz létrehozott negatív energiájú mezők több energiát emésztenének fel, mint amennyi az egész világegyetemben jelenleg rendelkezésre áll.

Újabb eredmények

Szergej V. Krasnyikov, a Szentpétervár melletti Pulkovói Obszervatórium elméleti fizikusa nemrég olyan féreglyuk létezésének elméleti lehetőségét vezette le, amely nem sérti az ismert természeti törvényeket, mégis elég nagy és stabil egy űrutazáshoz. A kvantumhatások alapján keletkező nagy féreglyukakkal kapcsolatos legfőbb ellenérv eddig az volt, hogy mivel nem lehet biztosítani a negatív energiájú virtuális részecskék megfelelő mennyiségét és utánpótlását, nagyon kis méretűnek adódtak, és bármilyen zavarás hatására gyorsan összeomlottak.

Krasnyikov elméleti úton egy olyan féregjáratot „alkotott", ahol az átjáró fenntartásához és felpumpáláshoz szükséges negatív energiájú anyagot maga a féreglyuk hozza létre, pontosabban a körülötte kialakuló, negatív görbületű tér-időszerkezet vákuumfluktuációi termelik egy visszacsatolt önerősítő folyamatban. A világ számos fizikusa elismeréssel méltatta ezt az eredményt, de azért a legtöbben óvatosságra intettek, hangsúlyozva, hogy ami elméletileg lehetséges, az még nem feltétlenül létezik. Az azonban biztos, hogy ha léteznek vagy létrehozhatóak is ezek a nagyméretű féreglyukak, az első hipertér alagutazásra még igen sokat kell várni.

A nagyon korai világegyetem működéséről alkotott elméleteink még biztosan további meglepetéseket is tartogatnak a kutató elmék számára. Már most olyan összefüggések körvonalai rajzolódtak ki a témával foglalkozó kutatók előtt, amelyek arra utalnak, hogy nagyon kis méretekben, illetve óriási energiákon a világegyetem működése gyökeresen eltér a makroszkopikus méretekben eddig tapasztalt fizikai valóságtól.

Az ősi világegyetemben úgy tűnik, semmi más nem létezett, csak a lüktető energia, úgynevezett „kvantumhab" formájában. A kvarkok és a köztük lévő erőket közvetítő glüonok elegye képviselte kvantumszinten az energiát, de a tér, az idő sem különült el úgy egymástól, mint napjainkban. A négy alapvető kölcsönhatás nem létezett, csak egyetlen, mindent elsöprő erőhatás préselte végtelenül kis térfogatba az egész világegyetemet. Az erős kvantum-fluktációk hatására felszabaduló energiák a teret idővé alakították, majd az időt energiává és így tovább, kezdet és vég nélkül örvénylett a mindenség; és úgy tűnik, ez az örvénylés a mai napig változatlanul létezik. Az univerzumot továbbra is ez a kezdeti kvantumhab tölti ki, de hatása csak olyan kis tér és idő tartományokra korlátozódik, ami annakidején, az ősi világegyetem kezdeti állapotára volt jellemző.

Tehát meg kell tanulnunk, hogy nem csak az anyag, hanem a tér és az idő is önmagában energiát képvisel. Megfelelő körülmények fennállása esetén pedig ezek át is alakulhatnak egymásba. Ahhoz, hogy az ember valamikor tetszése szerint alakítsa egymásba a teret és az időt, meg kell fejtenie a világegyetem mindent átfogó elméletét. Ez még nagyon távolinak tűnik, de az már látható, hogy az ehhez a mindenható tudáshoz vezető út egészen biztosan a gravitációs kölcsönhatáson és az újonnan felfedezett „sötét erő" működésének megfejtésén vezet majd keresztül (az idén befejezett átfogó vizsgálatok alapján ez a feltételezett „sötét erő" felelős az univerzum gyorsuló tágulásáért). Ezek a felfedezések a tér-idő kontinuum működésének szabályairól alkotott elképzeléseinket még többször és gyökeresen meg fogják változtatni, de végül

megnyílhat az út olyan újszerű lehetőségek előtt, amelyekről eddig álmodni sem mertünk. A világegyetem végtelensége úgy tűnik, nem csak a méretekre, hanem a benne rejlő lehetőségekre is vonatkozik. Létezésünk ténye sem kevésbé csodálatos, mint az a vágyunk, hogy benépesítsük a csillagok világát. Álmodjunk hát bátran abban a tudatban, hogy olyan világban élünk, ahol talán semmi sem lehetetlen, csak erős akarat kell vágyaink megvalósításához.

Jegyzetek

• *A tanulmányban szereplő ábrákat a tanulmány szerzője készítette.*

1 Űrhajózási lexikon – Zrínyi Kiadó, Budapest, 1984
SH atlasz Űrtan – Spriger Hungarica, Budapest, 1996
Szentpéteri László: India az elit klubban = Aeromagazin, 2001/6. sz.
Almár Iván: A japán űrprogram keserves évei = Aeromagazin, 2002/4. sz.
A hordozórakéták új generációja – Le Bourget 2001 = Aeromagazin, 2001/7. sz.

2 Tim Bradley: The Way to Go in Space = Scientific American, 1999 december
Next – Rockets at O'Hare = Discover, 1999 március

3 Charles R. McClinton: Air-Breathing Engines = Scientific American, 1999 december

4 http://www.rotaryrockets.com

5 Mágneses katapulttal az űrbe = Élet és Tudomány, 1998/42. sz.

6 Leik N. Myrabo: Highways of Light = Scientific American, 1999 december

7 http://spacescience.com/headlines/y2000/ast07sep_1.htm
Arthur C. Clarke: 3001. Űrodüsszeia. N & N Kiadó, 1999

8 R. L. Forward – R. P. Hayt: Space Tethers = Scientific American, 1999 december

9 Tim Bradley: The Way to Go in Space = Scientific American, 1999 december

10 Henry M. Harvis: Light Sails = Scientific American, 1999 december

11 http://www.geophys.washington.edu/Space/SpaceModel/M2P2

12 James R. Powel: Compact Nuklear Rockets = Scientific American, 1999 december

13 Stephanie D. Leifer: Reaching for the Stars = Scientific American, 1999 december
R. S. Craxton – R. L. McCrory: Progress in Laser Fusion = Scientific American, 1986 okt.
R. W. Conn – Valerij A. Csujanov: A nemzetközi termonukleáris kísérleti reaktor = Scientific American, 1992 június

14 Stephanie D. Leifer: Reaching for the Stars = Scientific American, 1999 december

15 Arthur C. Clarke: A Birodalmi Föld. Galaktika Baráti Kör Könyvklub, Budapest, 1992
Siklér Ferenc: Kísérletek a kvark-glüon plazma előállítására = Természet világa, 2000, III. különkiadás
Horváth Ákos: A nagyenergiás részecskegyorsítók nem okoznak katasztrófát! = Természet világa, 2000, III. különkiadás
M. J. G. Veltman: A Higgs-bozon = Scientific American, 1987 január

16 Almár Iván: Fantasztikus hajtóművek = Aeromagazin 2003/8. sz.

17 Is Light Speed in Your Future? = BBC News, 1999. 06. 13.
Chris Van Der Broeck: A 'warp drive' with more reasonable total energy requirements. KUL-TF-99/18.
Lawrance H. Ford – T. A. Roman: Negative energy, wormholes and warp drive = Scientific American, 2000 január
Gajzágó Éva: Tegnap veled ugyanitt = Élet és Tudomány, 2000/21. sz.

18 Stephen W. Hawking: Az idő rövid története. Maecenas Kiadó, Budapest, 1995
Stephen W. Hawking: A világegyetem dióhéjban. Akkord Kiadó, Budapest, 2002
John Horgan: Világegyetemes igazságok = Scientific American, 1990 december
Jonathan J. Halliwell: Kvantumkozmológia és a világ keletkezése = Scientific American, 1992 február