

A Föld gravitációs mezejének meghatározása

A Föld gravitációs mezejének meghatározása a tömegek egymás közti gyorsulásának meghatározását jelenti a térben, ebből az erő (a mindenkori súly) kiszámítható.

A legegyszerűbb példa a kéttestprobléma, ahol a tömegek egy-egy pontban vannak koncentráva. Ezt már *Newton* szerint: $erő = G \cdot m \cdot M/r^2$ (az általános gravitációs törvény) és *Newton* 2. törvénye: $erő = m \cdot a$ meghatározza.

A gravitációs munka pedig $= G \cdot m \cdot M/r$ alakú. Az egységnyi tömegre ható munka: $U = G \cdot M/r$. Ezt nevezük gravitációs potenciálnak. A gyorsulás úgy is kifejezhető, mint a gravitációs potenciál negatív gradiense.

A valóságban a Föld tömege nincs egy pontba összehúzóva, és eloszlása nem homogén. Ezért a Földön kívül fekvő tetszőleges pontban a Föld minden egyes pontjából származó potenciál összeadódik, tehát az $U = G \cdot M/r$ képletet integrálni kell. Ha ez kész, utána gradiensképzéssel megkapjuk a gyorsulási erőt [1–3, 21, 22].

A mesterséges holdak pályájukon pontosan követik a gravitációs mezőt. Jóval *Izsák Imre* előtt nehézségi gyorsulás mérésekből tudott volt, hogy az egyenlítő táján kisebb a „g”, mint a pólusoknál. A Föld alakja tehát közelítőleg egy forgási ellipszoid.

Nos, a fenti képlet integráljában a távolság reciproka fordul elő. Mi itt nem foglalkozhatunk ennek megoldásával, ami igen hosszadalmas és magas matematikai felkészültséget igényel, csupán utalok *Izsák* munkáira [4–9]. Annyit említek meg, hogy a megoldás sorbaféjtéssel végezhető, amelyeket gömbfüggvények formájában célszerű felírni, ez a Legendre-féle függvényekhez vezet. Erről ad áttekinthető összefoglalást a [10].

A teljes, Földhöz simuló megoldás csak akkor nyerhető, ha a különféle zavarokat (perturbációkat) még hozzáadjuk. E perturbációk okai a következők (amik az ellipszoid alapra adódnak):

- egyenlőtlen tömegeloszlás a Föld belsejében;
- szárazföldek eloszlása, továbbá tengerek apályadagálya, mely utóbbi periodikus forgatónyomatékok okoz [21–23, 40];
- a légréteg fékezése az űrhajóra, főleg alacsony repüléseknél (< 400 km), vagy nagy excentricitású pályáknál, ahol az ellipszis perigeum-pontja közel kerül a légréteghez;
- a napszél és a Föld albedójának sugárnyomása is igen érezhető az űrhajó pályáján.

Fizikailag mindezen perturbációs képletek együtthatói a pálya pontos méréseiből adódnak; ezeket mind mérésekből, azaz a pálya formájából kell meghatározni. Ezeket az együtthatókat 3 csoportra lehet felosztani: a zónai

Izsák Imre először határozta meg a Föld gravitációs mezejét és abból a Föld geoid alakját nagy pontossággal, a mesterséges holdak pályaméréseiből.

A Svájci Magyar Mérnökök Egyesületében a zürichi ETH-n 2002. szeptember 24-én elhangzott előadás átdolgozott változata. *Izsák Imre* a szerző kollégája/barátja volt a zürichi ETH-n 1957–58-ban.

(*1.a ábra*), szektoros (*1.b ábra*) és a tesszerális (*1.c ábra*) együtthatók. A mérésekben előfordulnak periodikus, aperiodikus és szekuláris értékek, amelyek csak egy irányban változnak.

Izsák Imre ezeket a perturbációs képleteket és együtthatóit addig csiszolgatta, amíg az elméleti pálya és a mesterséges holdak gyakorlati pozícióéréseinek különbsége (*2. ábra*), a reziduálok (maradványok) minimális értékek lettek.

A geoid forma definíciója: a Földnek az a képzeletbeli formája (eltelkenve a hegyektől), ahol a testek súlya mindenütt ugyanakkora. Például, ha az egész Földünk tengerekkel lenne beborítva, ez adná a geoid formát. Ez az alak természetesen a Föld belső tömegeloszlásától függ.

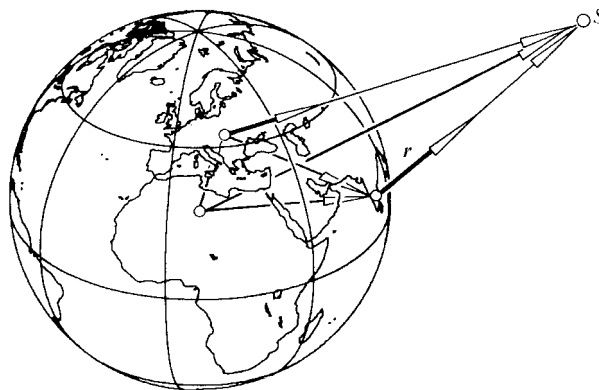
Izsák méréseinek leírása

Az első űrhajók alacsonyan repültek, körülbelül 350 km magasságban. Ezért mozgásuk gyors volt az égbolton. Éjszaka nagymezőjű távcsövekkel követhetők voltak, mert a Nap megvilágította azokat. A távcsövekre felszerelt érzékeny fényképezőgépek automatikusan követték a mesterséges holdakat és azokat filmre rögzítették. Ezekből a *Beker–Nunn*-kamerákból (*3. ábra* és [11]) a NASA 12 darabot helyezett el közel az Egyenlítő mentén elosztva. Ezenkívül *Izsák* még radaros távolságmérésre is támaszkodott. Fő tudományos munkásságát a *Smithsonian Csillagászati Intézetben* végezte. A *4.a, b, c ábra* mutat egy tipikus *Beker–Nunn*-kamera felvételt. A távcső követi a mesterséges holdat, ezért az pontszerű a felvéte-

1. ábra. A periodikus gömbfüggvények geometriai ábrázolása a Föld felületének térbeli leírásához.



2. ábra. A műhold helyzetének és vektorsebességének pontos meghatározása geodéziai háromszöggel.





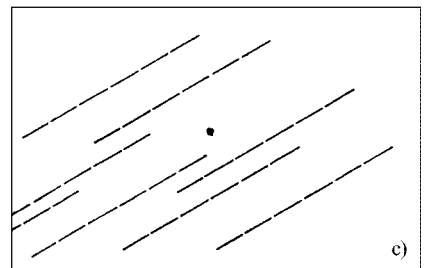
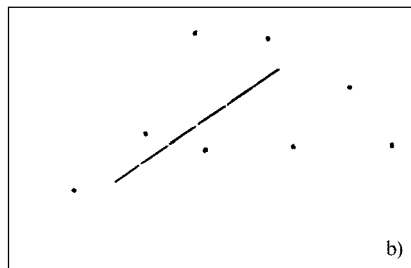
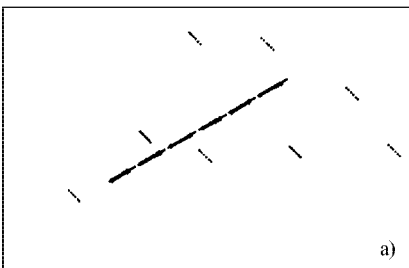
Izsák Imre 1964-ben (1929–1965)

len. A csillagok vonalként jelennek meg a Föld forgása miatt (4.c ábra). A helyzetmeghatározás a geodézia módszereivel (2. ábra) triangulárisan történt, azaz 3 távcső a Föld 3 különböző pontjain készített pontosan egyidejű felvételeket a mesterséges holdról. A filmeket kiértékelve és ismerve a 3 földi kamera pontos helyét, ki lehetett számolni az x , y , z elmozdulásokból a mesterséges hold valódi vektoriális sebességét a térben.

Izsák eredményei

1. A Föld alakja egy 3 tengelyű forgási ellipszoiddal jól közelíthető.
2. A Föld lapultsága: a poláris és az egyenlítői átmérő különbségének viszonya a nagyobbik (egyenlítői) átmérőhöz $\gamma = 1/298,3 = 0,003352$.

4. ábra. Műholdak pályáinak távcsöves fényképezése: a) a távcső a Földhöz képest mozdulatlan, b) a távcső a csillagokra rögzítve, c) a távcső követi a műholdat [11].



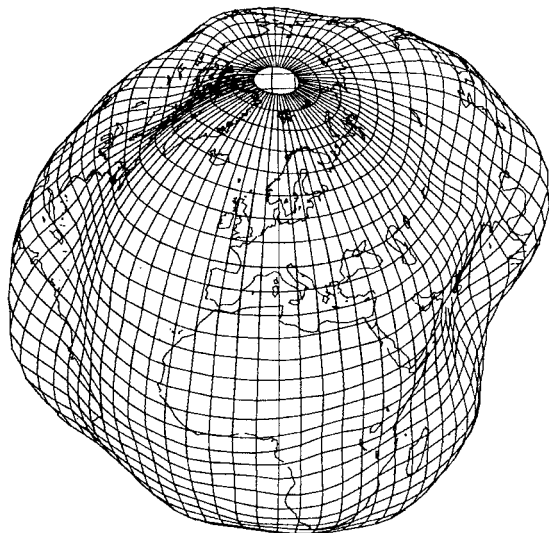
3. ábra. A Baker–Nunn műholdkövető kamerák Izsák Imre munkahelyén a Smithsonian Astrophysical Observatoryban ([1]-ből).

3. Az egyenlítő elliptikussága $\beta = 3,2 \cdot 10^{-5}$.
 4. A Föld felnagyítva egy „krumpli”-hoz hasonlít (6., 7. ábra és [12, 41]).
 5. A tengereken nagy kiemelkedések (dombok) és mélyedések (völgyek) vannak (5. ábra és [9]).
- Négy (változatlan) maximum található: Új Guinea 0° , 150°E közelében $+63$ m, Anglia közelében (50°S , 10°W) $+43$ m, Jóreménység foka közelében (50°S , 40°E) $+49$ m és Peru közelében (10°S , 80°W) $+24$ m. A minimumok: India alatt (0° , 70°E) -73 m, az Atlanti-óceán (20°N , 60°W) nyugati részén és a keleti Csendes-óceánban (20°N , 120°W) -46 m.
- Sokan kérdezhetnék, hogyan alakulhatnak ki ezek a dombok, völgyek? Nem folynak össze? A megértéshez a következő gondolatmenet vezet. Azon a helyen például, ahol sűrű és nagy tömegek rejtőznek (a tenger alatt), a g nehézségi gyorsulás értéke megnő a gravitációs vonzás következtében, és ez a vizet a mélybe „húzza”. Pillanatnyilag ott felül völgy alakul ki, de a közlekedő edények elve alapján köröskörül a víz utánafolyik. Ez addig történik, amíg egy domb kialakul és ennek súlya egyensúly-

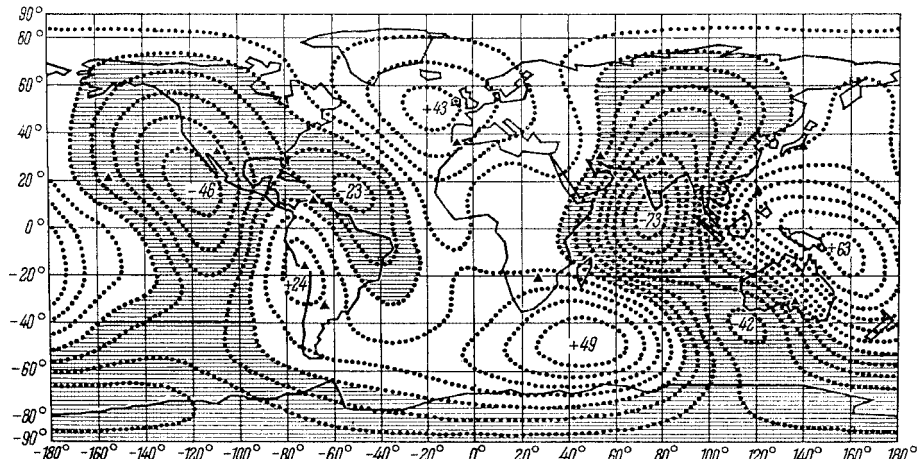
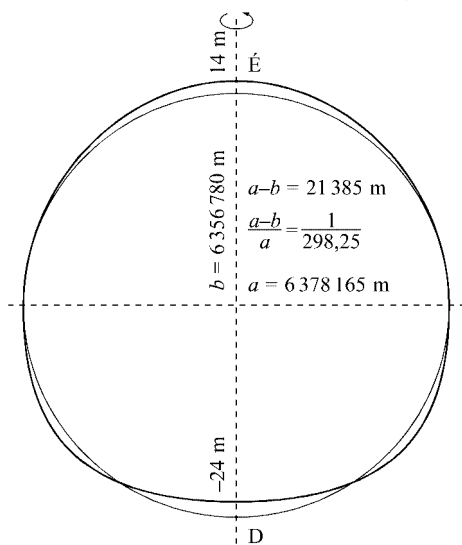
ban van az odaáramló víztömegekkel. A dombok és völgyek felületén g értéke végül ugyanakkora lesz, az érintőleges komponens eltűnik.

E domborzat hatással van a mesterséges hold pályájára. A domb magához húzza a mesterséges holdat, az közelebb kerül a Földhöz. A megnövekedett gravitációs erőt kompenzálja a centrifugális erő: $m \cdot v^2/r$ növekedése, az alacsonyabb pályán azonnal, automatikusan megnő a mesterséges hold sebessége [26]. A mesterséges hold ugyanis mindig súlytalan állapotban repül. A mesterséges hold Föld feletti távolságából, helyzetéből és térbeli sebességéből következtetni lehet a gravitációs gyorsulás változására a Föld bázis-ellipszoid felületén különböző magasságokban.

6. ábra. A Föld „krumpli” alakja erősen eltorzítva.



7. ábra. Az északi és déli féltéke aszimmetriája [12].



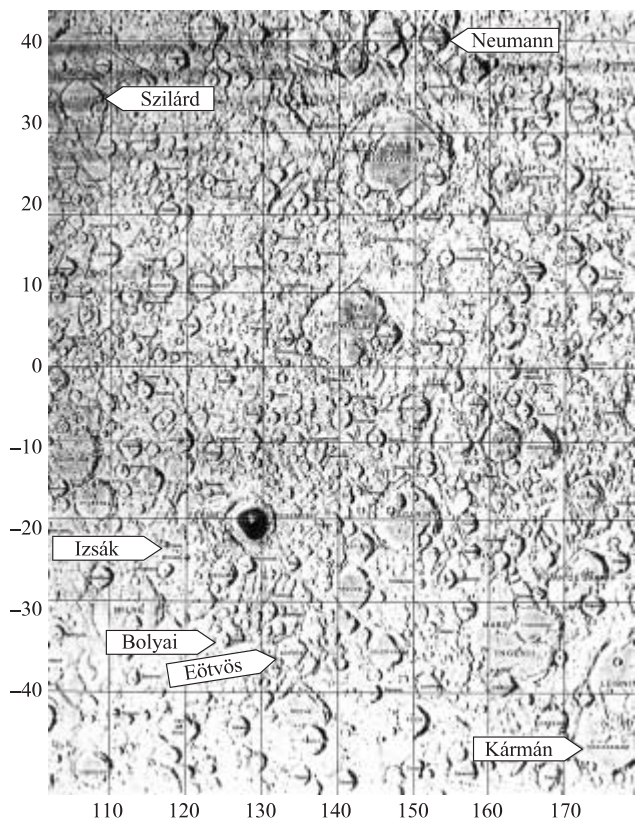
5. ábra. Izsák Imre méréseinek, számolásainak eredeti eredménye. A számok méterekben jelzik a tengerek felszínének mélyedéseit és domborulatait [9].

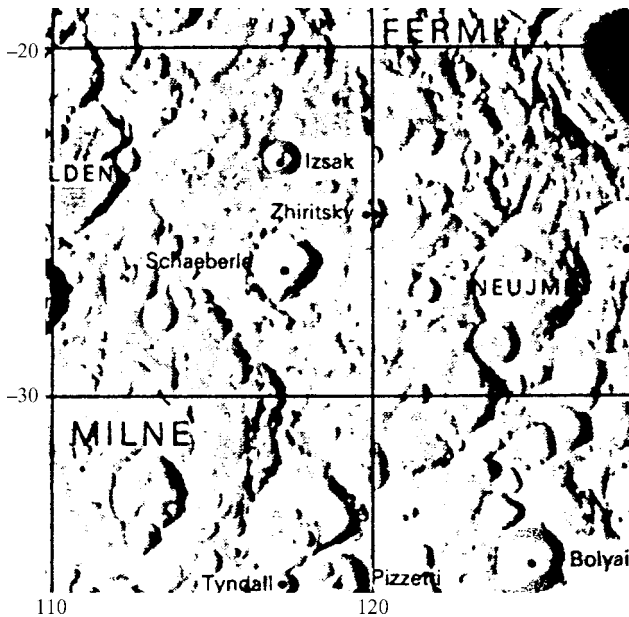
A Föld geoid alakja az lesz, ahol g nagysága mindeütt egyenlő. A mesterséges holdak gyors mozgásához nagyon sok mérési adatra van szükség. Izsáknak sikerült méteres pontossággal meghatározni a Föld geoid alakját 12 kamera 27 000 mérési adatának kiértékeléséből (5. ábra és [9]).

Izsák Imre igen mély matematikai tudását bizonyítja az a tény, hogy az úgynevezett Vinti-féle problémát először ő oldotta meg [4].

A mesterséges holdakkal jól lehet érzékelni a tömegek elmozdulását, a földrészek mozgását, így hasznosak a földrengések előrejelzése kutatásában.

8. ábra. Bolyai-, Eötvös-, Kármán-, Szilárd-, Neumann- és Izsák-kráter a Hold tültső oldalán.





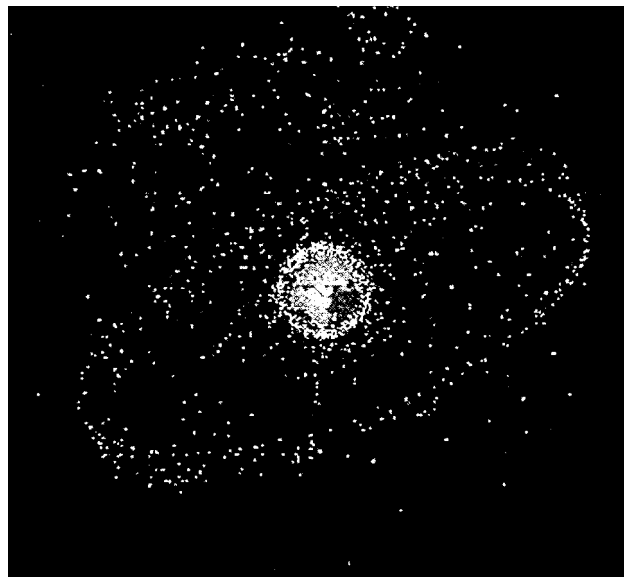
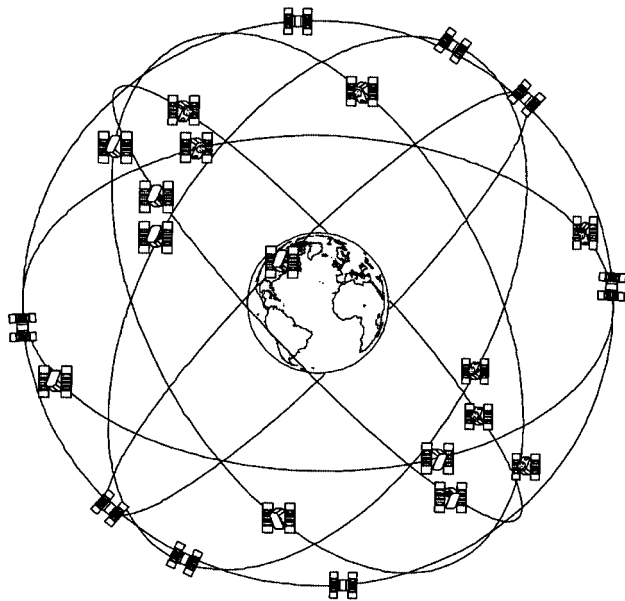
9. ábra. Izsák Imre-kráter a Holdon (-23° , $+117^\circ$ -nál).

A Nemzetközi Csillagászati Unió Izsák Imre eredményeit elismerve 1970-ben krátert nevezett el róla a Hold túlsó oldalán (8., 9. ábra és [17–20]).

Mesterséges holdak pályái

Már Newton is rámutatott arra, hogy ha egy magas hegy tetejéről vízszintesen eldobnánk nagy sebességgel egy követ (a levegő ellenállását leszámítva) a kőnek már nem lenne ideje leesni a Földre, mert Föld körüli pályára kerülne. Ezt a kritikus sebességet ki is számolta (18000 mérföld/h \sim 8 km/s), ami pontosan megfelel a valódi értéknek: 7,9 km/s. (Manapság sokan azt mondanák, hogy könnyű volt neki, mert a saját képleteit használta!)

11. ábra. Global Positioning System (GPS) helyzetmeghatározás céljából. 24 műhold 6 különböző pályasíkjában.



10. ábra. Körülbelül 2500 mesterséges hold vagy darab kering a Föld körül [21].

Ma többféle műholdpályát különböztetünk meg [21–29]. A legkevesebb energiába az alacsony pályára történő kilövés (LEO: Low Earth Orbit) kerül. Ezek körülbelül 300–1500 km távolságú kör alakú pályák. Az egyenlítő környékén közel sinus alakú pályán keringenek (erről részletesebben később).

A nevezetes égi mechanikai paradoxon így szól [28]: ha egy nehézségi erőterben, például a Föld körül (*Kepler*) keringő testet valamilyen erő hatására felgyorsítunk, tehát megnöveljük a sebességét, a keringő test erre úgy reagál, hogy távolabb kerül a Földtől és mozgása lelassul. Ha pedig fékezzük a keringő holdat, azaz elveszünk sebességéből, ennek hatására közelebb kerül és sebessége megnő.

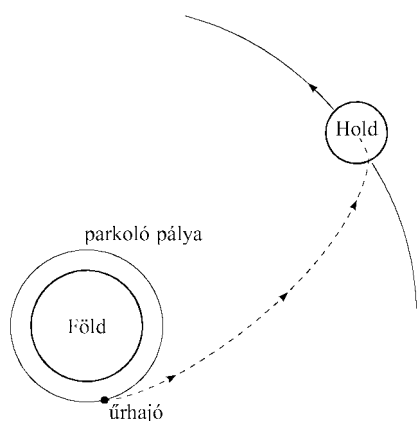
A 10. ábra egy igazi felvétel (ESA, [21]) a világűrben, messzi távolságból mutatja a Földet. A Föld körül keringő mesterséges holdak olyanok, mint a szúnyogok a Nap fényében.

Jelenleg több mint 2500 mesterséges égitest (hulladék) kering a Földünk körül. (Környezetszennyeződés: csak a fejünkre ne essenek!) Az iránymegtartás a tengelyük körüli lassú forgással történik. A következő célokat szolgálják:

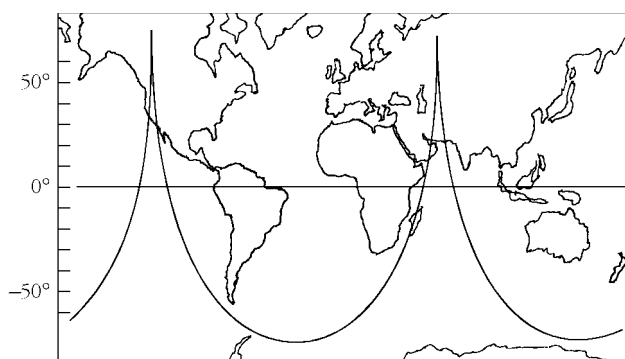
1. Meteorológia, a légkör és a magnetoszféra mérése. (Földünk északi mágneses pólusa igen megiramodott dél irányába!)
2. Telefon- és tv-összeköttetések.
3. Repülőgépek és járművek helyzetének pontos mérése, navigációja (GPS = Global Positioning System, 11. ábra és [21]).
4. Óceánok mérése.
5. Csillagászati távcsövek.

A ballisztikus rakéták alacsonyabban repülnek, mint 200 km, de ezek csak a Föld egyik pontjáról a másikra „utaznak”. (Még az a jó, hogy mindig csak a más földjére esnek!)

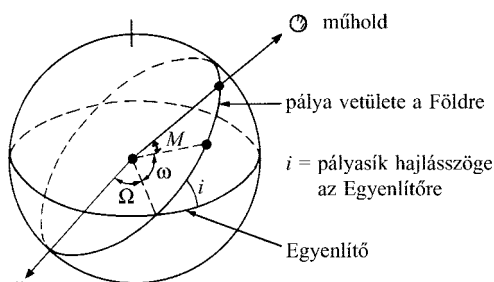
Geostacionáris műholdak az egyenlítő felett repülnek közel kör alakú pályán (GSO) körülbelül 60000 km ma-



12. ábra. Utazás a Holdba a Föld körüli parkoló pályáról.



13. ábra. Az orosz Molnyija mesterséges hold nagy excentricitású ($e = 0,72$) pályája. Apogeum 26 550 km magasan. Mivel a pálya síkja $63,4^\circ$ alatt van, nem forog el, stabil marad. tv-állomás több tagjával.



14. ábra. A mesterséges hold pályasíkjának metszete a Földdel.

gasságban. Mivel a sebességük megegyezik a Föld forgásával, mindig a Föld ugyanazon pontja felett vannak [21, 23]. Egy űrhajó felvitele GSO-ra 2 lépésben történik. Először csak egy alacsony, parkoló körpályára viszik fel (12. ábra). Innen egy másik rakéta begyűjtésével egy nagy excentricitású pályára lövik ki, amelyik elliptikusan, lassan közelíti meg az apogeum-pontot (Kepler). Itt azonban még egy impulzust kell neki adni, hogy ott a hajó egy kör alakú GSO-pályán maradjon.

A Föld, a Hold és a Nap perturbációi miatt pályájukat hetenként kell igazítani, hogy pontosan a geostacionárius pályán maradjassanak.

A Molnyija mesterséges holdat (13. ábra és [21]) az oroszok vitték fel nagy excentricitású pályára ($e = 0,73$) $63,4^\circ$ hajlási szögnél 12 órás keringési idővel. (A hajlási szög definíciója a 14. ábrából kitűnik). Ennél a hajlási szögnél a pálya tengelye időben ugyanaz marad (15. ábra). Négy ilyen Molnyija tv-adó biztosítani tudja az egész

Föld tv-ellátását, mégpedig a magas északi szélességi területektől (Szibéria), a magas déli szélességi területekig (13. ábra).

A nagy excentricitású pályák ($e = 0,7$) perigeumja körülbelül 1000 km-re és az apogeumja körülbelül 60 000 km távolságra van, ezért a Földre vetített pálya néha egy kis hurkot ír le, azaz iránya megfordul (16. ábra).

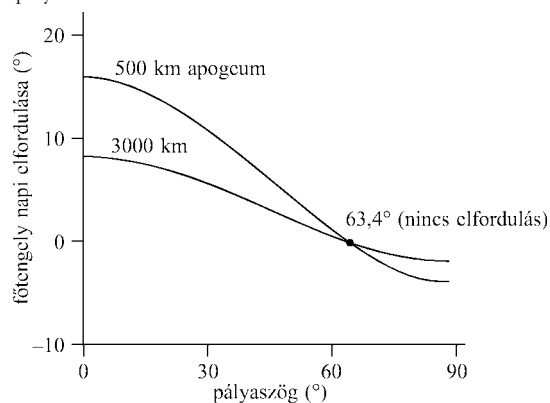
Helymeghatározó, navigációs rendszer (GPS, 11. ábra). Ez 24 mesterséges holdból áll, 6 különböző pályasíkban 55° hajlású pályán 20 200 km magasságban. Felhasználásuk: katonai és járműirányításban.

A mobiltelefonok közvetítő állomásai közül megemlítjük az Iridium rendszert 66 mesterséges holddal 700 km-es távolságban és a Globalstar rendszert 48 mesterséges holddal 1400 km-es távolságban.

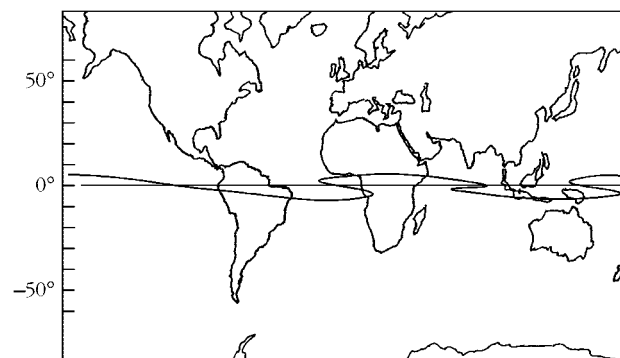
A mesterséges holdpályák zavarása a Föld lapultsága és forgása következtében

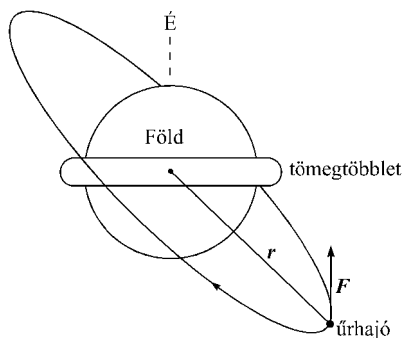
A Föld lapultságát úgy kell elképzelni, mintha az egyenlítőnél a Földnek egy vastag öve lenne (17. ábra). Ez azonban jelentős hatással van főleg az alacsony pályájú mesterséges holdak repülésére. A 18. ábra mutatja ezt az esetet: ha például az egyenlítőnél kilőnek egy mesterséges holdat egy olyan irányítású pályára, amelynek síkja „ i ”-szöget zár be az egyenlítő síkjával, a mesterséges hold pályája oszcillálni fog az egyenlítőől északra és délre, mert az övben lévő tömeg a körforgás közben egyszer északi, majd pedig déli irányban húzza a mestersé-

15. ábra. A mesterséges hold pályaeilipszise főtengelyének napi elfordulása szögfokban, a pályaszög függvényében (lásd 19. ábra). $63,4^\circ$ -nál a pálya változatlan.

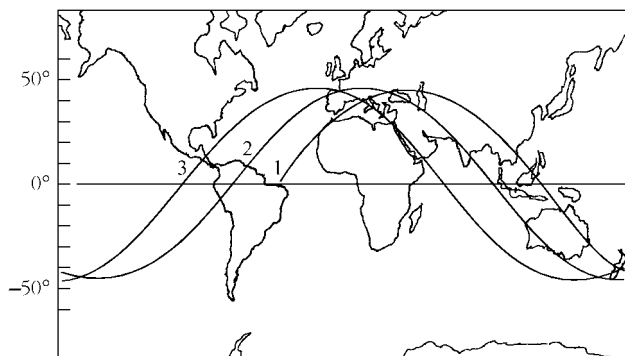


16. ábra. Geostacionáris transzfer pálya 18 000 km magasságban.





17. ábra. A Föld lapultsága (tömegtöbblet az Egyenlítő környékén) okozza a hullámzó pályát (18. ábra).

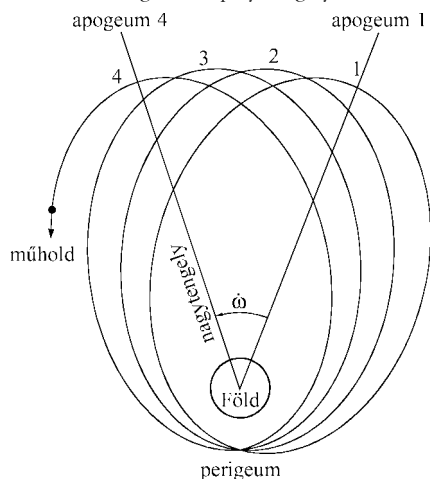


18. ábra. A mesterséges hold közel sinusalakú útjának oka a Föld lapultsága, azaz tömegtöbblet az Egyenlítőnél. A hullám elvándorol nyugati irányban a Föld forgása miatt: 1., 2., 3. kör + hullámpálya 1600 km magasságban, $i = 47^\circ$.

ges holdat (18. ábra). Ezeknek a pályáknak a Földre vetített görbéi sinusgörbéhez hasonlóak. Ezek a hullámok minden keringés után egy kissé nyugatra tolódnak el. Ez az eltolódás a Föld forgása miatt van. Ez okozza azt is – a nagyobb excentricitású pályák esetén az ellipszis nagytengelye elmozdul –, hogy az apogeum és a perigeum is mindig tovább tolódik (19. ábra).

A tapasztalat azt mutatta, hogy ha a pálya síkja $63,4^\circ$ -ot zár be az egyenlítői síkkal, akkor az ellipszis nagytengelyének iránya változatlan marad (15. ábra), azaz a perigeum és apogeum mindig egy helyben van (a Naprendszerhez viszonyítva, lásd a Molnyija pályát (13. ábra). Ez elég-

19. ábra. A mesterséges hold pályatengelyének elfordulása.



gé meglepő, de a Föld ellipszoid és krumpli alakja miatt van így. Ebben az esetben a pályának a Földre vetített alakja nem tolódik el, hanem egy helyben marad.

Hermann Oberth (1894–1989), az űrhajózás atyja

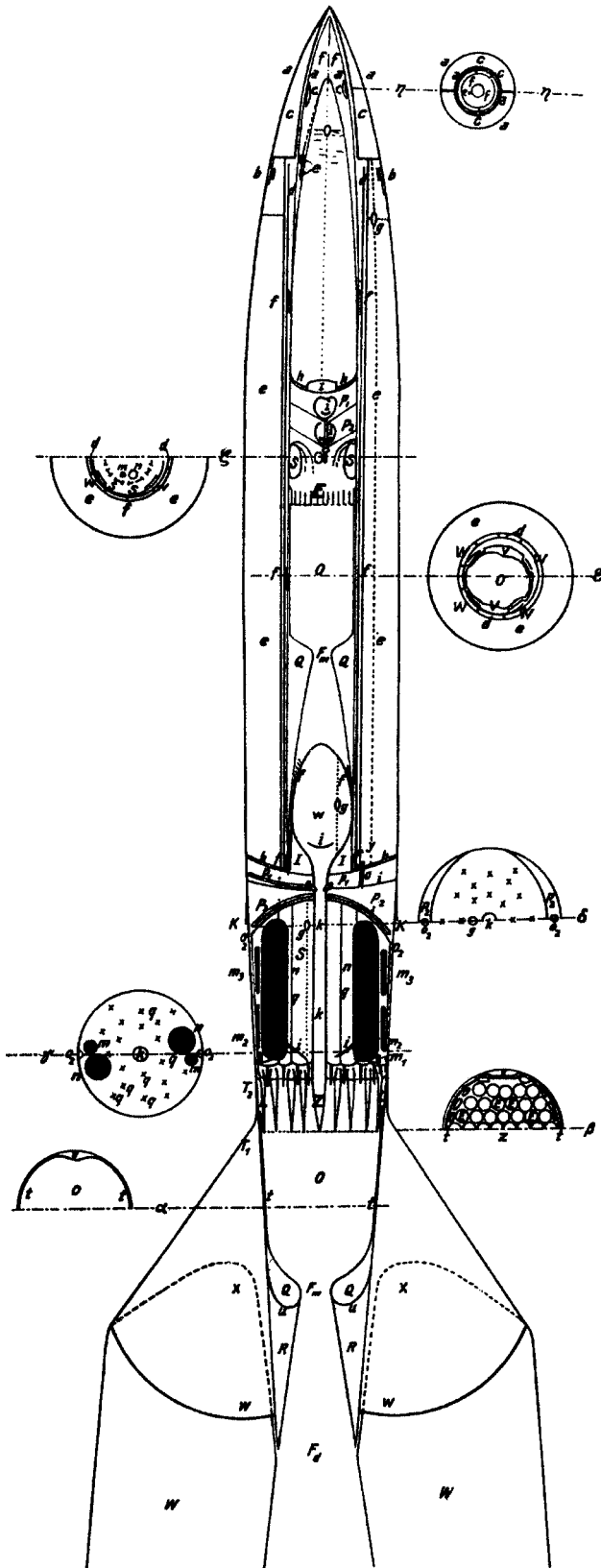
A fiatal segesvári szász gimnazista (20. ábra) kiváló tehetségére mutat az a tény, hogy már 16 éves korában (körülbelül 1911-ben) a matematikában végzett önképzésével levezette *Ciolkovszkijtől* függetlenül ([32] 31. oldal) a rakétaegyenlet egy formáját a saját maga által kitalált grafikus integrációs módszerrel [32–34]. A rakétaegyenlet már 1856-ban megtalálható a Cambridge-i Egyetem mechanikai tankönyvében ([32] 31. old.) Ezzel a képlettel a rakéta sebessége kiszámítható a tömegvesztés függvényében.

Abban az időben nem tudták, hogy valaha is lehetséges lesz-e a Holdra való utazás. *Oberth* magáévá tette a problémát, és nemcsak elméletileg bizonyította, hanem szerkesztési javaslatokkal részleteiben is kidolgozta, kiszámította, hogy milyenek kell lennie a rakétának (21. ábra), hogy elérhesse azt a nagy sebességet, amelyre szükség volt a Föld körüli keringés megvalósításához (első kozmikus sebesség). Felismerte, hogy a kiáramló gázokkal a rakéta sebessége annyira fokozható, hogy körülbelül 7,8 km/s értéket lehet elérni a Föld körüli pályához, ami a hangsebesség 24-szerese! 8-szor sebesebb, mint a puska-golyó! Annak ellenére, hogy a gáz kiáramló sebessége a rakétához viszonyítva maximálisan csak körülbelül 2,5 km/s, azaz körülbelül 7-szerese a hangsebességnek.

Mindezeket Oberth mindössze 28 éves korában jelentette meg németül a „Rakete zu den Planetenräumen” (Utazás a bolygók közti térbe) című könyvében, müncheni kiadásban saját költségén [30–33]. A könyv szakértőknek íródott, három kiadásban jelent meg és Oberth magas fokú fizikusi érzékéről tanúskodik. Integrál- és differenciálegyenletekkel a következőket számította ki:

20. ábra. Hermann Oberth, az űrhajózás atyja 24 éves korában [33].





21. ábra. Hermann Oberth eredeti rakétatervezete 22 éves korában (130-ból).

a) Melyik az az ideális tömegviszony a teljes és az üres rakéta között, milyen a súlyvesztés a sebesség és az idő függvényében, amíg eléri a kritikus sebességet.

b) Belátta, hogy a rakéta sebessége egyenesen arányos a kiáramló gázok sebességével, de egy bizonyos értéken felül nem fokozható (maximum 2,5 km/s alkohol esetén).

c) Az indulásnál előnyös a merőleges felszállás, de később mindig van egy optimális szög a légellenállás és a sebesség függvényében, amely mellett a legkevesebb üzemanyag felhasználásával nagyobb gyorsulásra és így nagyobb sebességre lehet szert tenni.

d) Bebizonyította, a sebesség akkor optimális, ha a mindenkorai légellenállás a rakéta súlykomponensével egyenlő. (A légellenállás a sebesség négyzetével nő.)

e) Mennyi üzemanyagra van szükség az alkohol és a folyékony hidrogén és oxigén felhasználása esetén?

f) Mekkora legyen az üzemanyagtartályok szilárdsága a legkisebb súly mellett. (Célszerű folyékony hidrogént és oxigént vinni.)

g) A rakéta szilárdsága növelhető a tankban lévő túlnyomás által, azaz könnyebb tartály használható.

h) Mekkora lehet a rakéta keresztmetszete a tömeg függvényében? (A légellenállás minimalizálása.)

i) Mi történik a hangsebesség elérése után?

j) Mennyivel előnyösebb a 2- vagy 3-fokozatú rakéta (a ballaszt leválása miatt)?

A 25 éves Oberth végeredményben először bizonyította be papíron, számításokkal, szerkesztésekkel, (21. ábra) hogy az űrhajózás lehetséges Föld körül és például a Holdra utazás is. Elvei, egyenletei ma is érvényesek. Oberth könyvére felfigyelt a világ, mert benne bizonyítást lehetett találni, hogy az emberiség álma, a Hold-utazás megvalósítható. Német cégek meghívták Oberthet, hogy realizálja a rakétát. Népszerűsítő filmet is készített róla az UFA filmgyár „Hölgy a Holdon” címmel. Rakétát fejlesztett. A kolozsvári egyetemen fizika szakot kezdett el, azt Németországban folytatta, végül Kolozsváron szerezte meg a doktori címet. Tudott (valamennyire) magyarul is. Kísérleti rakétája 60 km magassáig repült fel. Tanítványa volt Werner von Braun. Később a német V2 rakéták fejlesztésében nem engedték részt venni (mert külföldi volt, de ez a tény később szerencséjére vált!). A V2 rakéta később kétszer járt „sikerrel”: először Peenemündében, másodszer Londonban! Később Werner von Braun, aki a NASA-nál lett programvezető, mikor emberrel az Apollo 11 sikeresen a Holdra szállt, ezt mondta Oberthról: „Oberth volt a tanítóm, példaképem. Az ő találmányai, elméletei szerint dolgoztam, kiviteleztem. Azok még most is érvényesek. Ezért neki hálaival tartozom.” [32–33]

Indítás

Elvileg a Föld bármely pontjából bármilyen irányba lehet rakétát indítani. A pályasík mindig a Föld középpontján keresztül megy. Az indítás az Egyenlítőnél keleti irányban mindig kevesebb energiát igényel, mert a Föld forgása kezdősebességet ad a rakétának (470 m/s = 1690 km/h) [30].

Alig hagyja el a légkört (> 80 km) és megindul a Föld körüli pályáján, máris érzi az árapály és dagály periodikus befolyását a gravitációs térben. Ez a perturbáció is (mint akár a többi) hozzáadódik a Föld forgó ellipszoid

tömegeloszlásához. Ha magas, kör alakú pályán, vagy például nagy excentricitású ellipszis pályán mozog, akkor már a Hold és a Nap által okozott perturbáció is számottevő. Ez már 3- vagy 4-test problémát jelent.

Egy másik lényeges zavar a napszél nyomása és a Föld reflektált fényének hatása (albedó) az űrhajóra [21–23]. Nos, sokan mondanák, hogy ez a nyomás kicsi. Ez igaz is, de a mesterséges hold gyors mozgása miatt naponta sokszor megkerüli a Földet, idővel pedig sok kicsi sokra megy.

Oberth Németországban halt meg 1989-ben. Németország őt tekinti az űrutazás atyjának. Feuchtbán állandó múzeumot létesítettek tiszteletére. A segesvári templom toronyházában a románok is állandó múzeumot rendeztek be emlékére. Sok más között a Kolozsvári Egyetem díszdoktora. Magyarországi Széchenyi-díjjal tüntette ki.

Űrhajózás

Találka

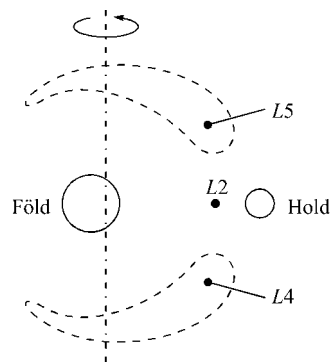
A legegyszerűbb és a legkevesebb energia felhasználásával történik, ha mindkét űrhajó ugyanazon pályasíkon repül. A követő rakéta felszállásának időpontja nagyon lényeges, hogy szinkronban repüljön az elsővel. A találkozás nem úgy történik, hogy a hátsó egyszerűen felgyorsul és utoléri az elsőt, mert akkor a nagyobb sebességgel automatikusan más pályára menne. A követő közel sinuspályán oszcillál az első mögött, alulról felfelé és vissza. Az energiafelhasználás sokban függ attól, hogy mennyi idő alatt akarják végrehajtani az összekapcsolást (10–40 perc). Nos, minél hosszabb ez az idő, annál kevesebb energiát kell felhasználni.

A Holdra szállás is egy találka (12. ábra).

Hubble űrtávcső

A NASA és ESA közös munkával helyezték a Föld körüli kör alakú pályára 600 km távolságban [36]. Súlya 12 tonna, hossza 13 m. A főtükrök átmérője 2,4 m. Módosított Cassegrain-távcső [36]. A távcső eredeti fókusz-távolsága 12,8 m, így a széles szögű látómező 30°, ami a Hold korongjának felel meg. Ügyes optikával lehetővé válik a fókusz meghosszabbítása 58 m-re. Ekkor a látómező csak 30°.

Igen nagy előnye a légkör hiánya miatti zavarásmentes mérés. Tehát lehetővé válik az UV-tartományban való mérés. Méréseket végez a 100–400 nm-es UV, a látható 0,4–0,75 μm -es, az 1,5–6 μm -es és a 6,7–15 μm -es infravörös tartományban. Nagyon gyenge fényeket egészen 29-es magnitúdóig tud mérni. Hatótávolsága körülbelül 14 milliárd fényév a múltban. Feloldóképessége = $1,2 \cdot f/D$. Iránybeállítása nem kis rakétákkal történik, ezek ugyanis beszennyeznék a tükröket. Három egymásra merőleges elektromos motor indít el három lendkereket. A perdület megmaradásának elve alapján a távcső beáll a kitűzött irányba. A beállítás egy fényesebb csillagra történik, későbbi másik két halványabb csillagra való finomabb beállítással. Ez körülbelül 15 percet vesz igénybe, és $\pm 0,007''$ pontossággal stabilizálható.



22. ábra. A Lagrange-féle egyensúlyi pontok: L_2 , L_4 és L_5 .

Nemzetközi űrállomás

Nagysága körülbelül: 107×80 m, 450 tonna, 400 km magasságban, kör alakú pályán kering, 6 személy lakik benne állandóan. Belső köbtartalma 1200 m^3 , ami körülbelül 20 lakószoba köbtartalmának felel meg. Kutatás célját szolgálja.

A Kálmán-szűrő

A legkisebb négyzetek módszere túl lassú az űrhajó helyzetének meghatározására és ebből kifolyólag vezérlésének végrehajtására. Ezzel szemben a Kálmán-féle matematikai szűrő segítségével lehetővé válik a gyors (on-board = fedélzeti) irányítás, földi segítség nélkül, mert a megfigyelési adatok folyamatosan bekerülnek a döntési eljárásba [37–38]. Az Apolló Holdra szállását ez a módszer segítette. *Kálmán Rudolf* Budapesten született. 1985-ben megkapta a japán Inamori-díjat, ami a matematikában vetélkedik a Nobel-díjjal [37].

Lagrange-féle pontok

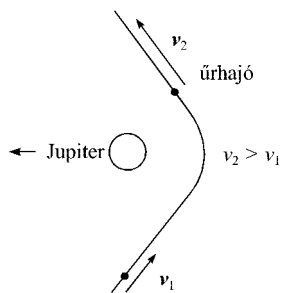
A Föld és a Hold összekötő egyenesén körülbelül 60000 km-re a Holdtól van egy olyan pont, ahova egy tárgyat elhelyezve az se a Földre, se a Holdra nem esik. Ez félstabil állapot, mert kis zavarás esetén valamelyik felé megindul (12 a 22. ábrán).

Lagrange, francia matematikus felfedezte azonban, hogy más félstabil és stabil pontok is vannak (L_1 -től L_5 -ig, 22. ábra). Ezek közül csak az L_4 és L_5 stabil. Itt egy potenciálvölgy van, az odahelyezett tárgy bármely irányú, de nem túl nagy kitérés után visszajut eredeti helyzetébe [22, 39–40].

Ezen pontoknak nagy jelentőségük van. Ide ugyanis megfigyelőállomásokat, távcsöveket lehet elhelyezni, anélkül, hogy energiára lenne szükség ezek itt-tartásához. Azon kívül veszélyes földi hulladékokat is lehetne ott tárolni, „mindörökre elásni”.

Kozmikus paritya

Feltételezzük, hogy az űrhajó pályasíkja megegyezik a Jupiter pályasíkjával, és egy irányban keringenek (23. ábra). Ekkor a Jupiter megközelítése kétféleképpen történhet: az űrhajó a bolygó elejébe vág, vagy a Jupiter



23. ábra. A parittyahatás: az űrhajó sebessége megnő, de iránya is megváltozik.

mögött közelíti meg azt, és azután továbbmegy útján távolabbi célok felé.

Az első esetben a Jupiter az űrhajót fékezi, a második esetben pedig felgyorsítja azt, annak sebessége megnő a Naphoz képest [22]. Ez utóbbi esetben az űrhajó energiát nyer, ez számára hasznos, mert kevesebb üzemanyagot kell magával vinnie.

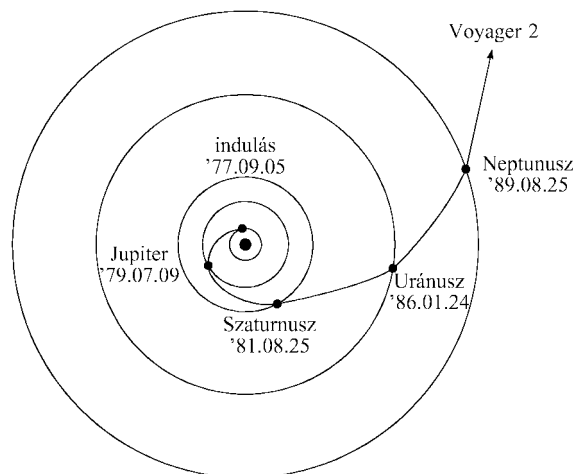
A NASA Voyager űrhajója 1977 augusztusában indult útjára, hogy elhagyja a Naprendszert. Ez már négyszer használta fel a kozmikus parittyá elvét (angolul: gravity assisted maneuvers), elrepülve a Jupiter, Szaturnusz, Uránusz és a Neptunusz bolygók mellett, kihasználván azok vonzó, felgyorsító hatását (24. ábra). Manapság már a Naprendszeren kívüli üres térben mozog. Utoljára 1998-ban küldött „haza” jeleket körülbelül 6 fényóra távolságból (a Nap csak 8 fénypercre van tőlünk!). A legközelebbi csillagot a Tejútrendszerben körülbelül 150 ezer év múlva éri el.

Ha a belső bolygókra akarnánk utazni, akkor ezek gravitációs erejét kellene kihasználni, de nem gyorsításra, hanem fékezésre, nehogy túl gyorsan érkezzünk rájuk. Tehát a Vénusz és a Merkúr elé kell vágni.

Az űrhajó a bolygóhoz viszonyított relatív sebessége ugyanaz a megközelítés előtt és után (Kepler), de a bolygónak sebessége van a Földhöz viszonyítva, és az úgyszólván magához húzza az űrhajót, utána irányváltoztatással elengedi, így az űrhajó sebességet nyer a Naphoz képest [22]. (Ez példa arra, hogyan lehet energiát „kanalizálni” mástól, előnyhöz jutni, de az eredeti útirány feladása árán!)

Irodalom

1. W. KAULA: *Theory of Satellite Geodesy* – Blaisdell Publ. Waltham, 1964–1966
2. SCHNEIDER: *Satellitengeodesie* – Bi. Wiss. Verl. Mannheim, 1998
3. ENDERLE: *Lagebestimmung von Satelliten in hochexzentrischen Orbits* – Diss. Techn. Uni. Berlin, 1999
4. IZSÁK: *A theory of satellite motion about an oblate planet. I. A second-order solution of Vinti's dynamical problem* – SAO Spec. Rep. No. 52, 1960, p. 1–54, Cambridge, Massachusetts
5. IZSÁK: *Periodic Drag perturbation of Artificial Satellites* – The Astronomical Journal 65/6 (1960) 355–357
6. IZSÁK: *On Satellite Orbits with very small Eccentricities* – The Astr. Journal 66/3 (1961) 129–131
7. IZSÁK: *A Determination of the Ellipticity of the Earth's Equator from the Motion of two Satellites* – The Astr. Journ. 66/5 (1961) 226–229
8. IZSÁK: *A Note on Perturbation Theory* – The Astr. Journ. 68/8 (1963) 559–561
9. IZSÁK: *A New Determination of Nonzonal Harmonics by Satellites in Trajectories of Artificial Celestial Bodies* – Proc. of Symp. Paris, Apr. 20–23, 1965, Springer Verl. 1966
10. BÉNYI ZOLTÁN: *Izsák Imre élete, A gondolat tükré* – Izsák Imre Alapítvány Zalaegerszeg 1997, *Érdi Bálint* cikke: 61–71 o.



24. ábra. Utazás a Naprendszerben. A parittyahatás kihasználása.

11. R. FUTUALLY: *Techniques, apports et avenir des principales méthodes de photographie des satellites artificielles* – (Camera-Baker-Numm) – Thése Université de Paris de 20.09.1974
12. BARTA GY.: *Eötvös Loránd geofizikai kutatásainak mai vonatkozásairól* – Fizikai Szemle 19 (1969) 289–295
13. ALMÁR I.: *A mesterséges holdak megfigyelése egy budapesti nemzetközi konferencia programján* – Fizikai Szemle 16 (1966) 63–64
14. NÉMEDI I.: *Űrrakéták repülési ideje* – Fizikai Szemle 18 (1968) 176–179
15. JOÓ I.: *A mesterséges holdak alkalmazása a gyakorlati geodéziában* – Fizikai Szemle 21 (1971) 274–281
16. ALMÁR I.: *Harminc éves az optikai műholdmegfigyelés Magyarországon* – Fizikai Szemle 38 (1988) 95–102
17. LOVAS M.: *Magyarok a Holdon* – Fizikai Szemle 21 (1971) 20–21
18. *Fizikai Szemle 43/1 (1993) fedőlap*
19. MARX GY.: *A marslakók érkezése* – Akadémiai Kiadó, 2000, 407, 412 Videókazetta: „Izsák Imre égi mechanikus, csillagász” – dokumentumfilm, rendező: *Jelenczki István*, Angelus Bt. Budapest
21. O. MONTENBRUCK: *Satellite Orbits* – Springer Verl. 2000
22. MADONNA: *Orbital Mechanics* – Krieger Publ. Florida, 1997
23. LONGSDON: *Orbital Mechanics, Theory & Applications* – Wiley Corp.
24. JUNG: *History of Rocketry and Astronautics* – Am. Astr. Soc. San Diego, 1998
25. GURZADYAN: *Theory of Interplanetary Flights* – Gordon and Brach Publ. Yerevan, 1996
26. KULIN GY.: *A mesterséges holdak és az űrbajózás égi mechanikájához* – Fizikai Szemle 8 (1958) 35–40
27. SZEDOV L.: *A boldrakéták pályáiról* – Fizikai Szemle 10 (1960) 241–245
28. KULIN GY.: *Mesterséges égitestek mozgásának energiaviszonyai* – Fizikai Szemle 12 (1962) 316–321
29. ÉRDI B.: *A bolygók mozgásáról* – Fizikai Szemle 24 (1974) 2–4
30. HERMANN OBERTH: *Wege zur Raumschiffahrt, 3.-e Auflage von: Die Rakete zu den Planetenräumen* – Oldenburg Verl. München, 1929
31. HERMANN OBERTH: *Menschen im Weltraum, Neue Projekte für Raketen und Raumfahrt* – Econ Verl. Düsseldorf, 1954
32. B. RAUSCHENBACH: *Hermann Oberth, eine Biographie* – Böttiger Verl. Wiesbaden, 1995
33. H. BARTH: *Hermann Oberth, „Vater der Raumfahrt”* – Bechtle Verl. München, 1991
34. BUDÓ Á.: *Kísérleti fizika I.* – Tankönyvkiadó Bp., 1997 142. o.
35. NAGY E.: *A rakéták és rakétabajtóművek működésének mechanikai alapjai* – Fizikai Szemle 9 (1959) 99–105
36. FIELD: *The space telescope* – Contemporary Books, 1989
37. *Der japanische Nobelpreis... = über den Kalman-Filter* – Zeitung Tagesanzeiger Zürich, 14 Aug. 1985 S. 17
38. KALMAN R. E.: *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems* – Journal Basich Eng. 82 (1960) 35–45
39. HORVÁTH A + G.: *A Kordolieuski-féle porholdak kialakulásának számítógépes modellezése* – Fizikai Szemle 40 (1990) 338–344
40. HORVÁTH G.: *A holdak kötött keringése az árapály-effektus és az árapály-fűtés* – Fizikai Szemle 41 (1991) 79–88
41. BÖDÖK ZSIGMOND: *Magyar feltalálók a repülés történetében* – Nap kiadó, Dunaszerdahely 2002