

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LVII. évfolyam

6. szám

2007. június

A GP-B KÍSÉRLET

Hraskó Péter
PTE Elméleti Fizika Tanszék

A NASA 1958-ben jött létre, és 1964 óta finanszírozza a *Gravity-Probe-B (GP-B)* kísérletet. Ha ettől az időponttól számítjuk a kísérlet előkészítő fázisát, akkor ez éppen 40 évig tartott, mert a kísérleti berendezést szállító űrhajó 2004 áprilisában emelkedett a magasba. Az előkészületek azért húzódtak el ennyire, mert rendkívüli technikai nehézségekkel kellett megküzdeni. Megérte-e? Arányban áll-e a kísérletben vizsgált probléma jelentősége a ráfordított szellemi és anyagi erőfeszítéssel? Az alábbiakból remélhetően kiderül, hogy igen, mert a vizsgálat célkeresztjében a fizika egyik legfontosabb fogalmi eszköze, az *inerciarendszer* állt.

Amikor az $m\mathbf{a} = \mathbf{F}$ Newton-egyenlet segítségével meg akarunk oldani egy mechanikai feladatot, előzetesen pontosan tisztáznunk kell, inerciarendszer-e az, amihez a gyorsulást viszonyítjuk, vagy sem. Ha ugyanis nem az, akkor a jobb oldalon az erők közé a valódi erőkön kívül a tehetetlenségi erőket – vagy más néven inerciaerőket – is oda kell írni. Azt gondolná az ember, hogy mindig az inerciarendszer választása a legcélszerűbb, mert az egyenlet jobb oldala az inerciaerők hiánya miatt ekkor a legegyszerűbb. De a gyakorlatban ez szinte soha sincs így, ugyanis a koordináta-rendszer megválasztásában sokkal nagyobb súllyal esik latba az a szempont, hogy a koordináta-rendszer nyugodjon azokhoz az objektumokhoz (például a laboratórium falaihoz) képest, amelyekhez a mozgást ténylegesen viszonyítjuk. Ezért szinte mindig a Földhöz képest nyugvó koordinátákat választunk, és ha pontosan akarunk számolni, figyelembe kell vennünk azokat az inerciaerőket, amelyek abból származnak, hogy a koordináta-rendszerünk együtt forog a Földdel.

A newtoni fizika azonban nem korlátozódik a Földön lejátszódó jelenségek körére. Egy merész általánosítással a Naprendszer tárgyalására is illetékesnek nyilvánítja magát azzal a feltevésével, hogy az $m\mathbf{a} = \mathbf{F}$ egyenletet a bolygók mozgására is alkalmazhatjuk, ha a jobb oldalra beírjuk a Naprendszer égitestei között

ható $\gamma M_1 M_2 / r^2$ gravitációs erőt. A Naprendszert nem kell viszonyítanunk semmilyen eleve adott objektumhoz, ezért ebben az esetben olyan koordináta-rendszer célszerű választani, amely inerciarendszert határoz meg. A mozgásegyenlet jobb oldalán ekkor csak a gravitációs erő jelenik meg, inerciaerők szóba sem jöhetnek. A csillagászati megfigyelések nagy pontossággal igazolják ezen számítások helyességét.

Az általános relativitáselmélet majdnem pontosan ugyanolyan bolygópályákat jósol, mint a newtoni fizika, de ettől tökéletesen eltérő alapokon. *Einstein* elméletében a bolygópályák kiszámításánál nem kell foglalkozni azzal, hogy a koordináta-rendszerünk inerciarendszer-e vagy sem. Ez valószínűleg elég hihetetlenül hangzik azoknak, akik általános relativitáselmélettel még nem foglalkoztak, és hozzászórtak, hogy a newtoni fizikában egyáltalán nem mindegy, melyik eset áll fenn. Az általános relativitáselméletben azonban valójában egyáltalán nincs hely kozmikus méretű (más néven *globális*) inerciarendszerek számára, noha a *lokális inerciarendszerek* ebben az elméletben is fontos szerepet játszanak. Egy szabadon, forgásmentesen keringő űrhajó ilyen rendszer, mert az elengedett tárgyak az űrhajó falaihoz képest megtartják egyenletes, egyenesvonalú mozgásukat vagy nyugalmi állapotukat (súlytalanság), és inerciarendszernek éppen az ilyen tulajdonságú vonatkoztatási rendszereket nevezzük. A globális inerciarendszer azonban az elmélet szerint üres fogalom, pusztán fikció, amelynek nincs semmiféle realitása.

Tényleg így van-e? A bolygómozgás alapján nem könnyű döntenet, mert a bolygópályákat mindkét elmélet nagy pontossággal megjósolja (igaz, az általános relativitáselmélet pontosabban), és az egyik elmélet kiinduló lépése a globális inerciarendszer megválasztása, míg a másik azon a feltételezésen nyugszik, hogy ilyen inerciarendszerek egyáltalán nincsenek. Ahhoz, hogy döntenet tudjunk, mindenekelőtt le kell szögeznünk, hogy a tapasztalattal egyező számítási eredmény

önmagában még kevés ahhoz, hogy visszamenőleg igazoljon minden feltevést, amit a számítás közben használtunk. A fizika történetéből sok ilyen példát ismerünk. A hidrogénatom Bohr-modellje például pontosan elvezetett a tapasztalatilag ismert Balmer-formulához, mégsem bizonyult igaznak. Felváltotta a kvantumelmélet, amelyből szintén levezethető a Balmer-formula anélkül, hogy szó esne a Bohr-modell alapvető fogalmáról, a Bohr-pályákról. A kvantumelmélet lényegéhez tartozik, hogy ilyen klasszikus pályák egyáltalán nincsenek is, hanem csupán fikciók.

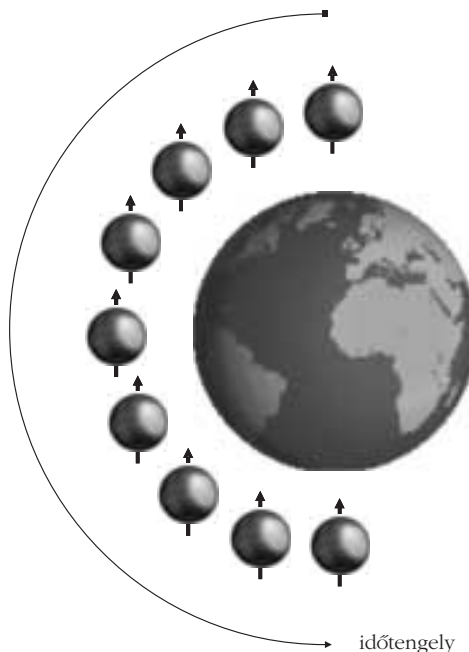
A globális inerciarendszerekkel eléggé hasonló a helyzet, de van egy fontos különbség. Ki lehetett találni olyan kísérletet (ez a GP-B kísérlet), amely a globális inerciarendszer fogalma és a tapasztalat közötti közvetlen ellentmondásra világít rá anélkül, hogy eközben el kellene dönteni, melyik gravitációelmélet igaz, *Newtoné* vagy *Einsteiné*.

Képzeljünk el egy forgó gömböt, amely a Föld körül kering. Az 1. ábra a gömb időben egymást követő pozícióit ábrázolja. A pálya a földrajzi pólusok fölött áthaladó kör, ahogy ez a GP-B kísérletben volt. Ha a kezdőpillanatban a gömb forgástengelye párhuzamos a Föld forgástengelyével, akkor a keringés során ennek végig így is kell maradnia. Ez akkor látszik a legvilágosabban, ha a mozgást inerciarendszerhez viszonyítjuk. Inerciarendszerben minden olyan test megtartja perdületének irányát és nagyságát, amelyre nem hat forgatónyomaték. Egy keringő testre csak a Föld gravitációs vonzása gyakorolhatna forgatónyomatékot, de ha a test pontosan gömb alakú, ilyen forgatónyomaték nem jön létre. Ezért mind a keringő gömb, mind a Föld forgástengelye megtartja az irányát az inerciarendszerhez és – ennek következtében – egymáshoz képest.

De mi van akkor, ha azt tapasztaljuk, hogy a gömb forgástengelye nem marad párhuzamos a Föld forgástengelyével? Ha minden kísérleti hibát sikerül megnyugtatóan kizárni, csak egy következtetés marad: Nem volt jogos inerciarendszerhez viszonyítva elképzelni a mozgást, mert a kísérlet ellentmond annak, hogy ilyen rendszer létezik.

A GP-B kísérlet, amely az első és mindeddig az egyetlen ilyen kísérlet volt,¹ arra az eredményre vezetett, hogy a forgó gömb forgástengelye nem marad állandó irányú, hanem körülbelül $6''/\text{év}$ szögsebességgel forog a körpálya síkjában. Ez rendkívül lassú forgás, de ahhoz elég, hogy döntsön a globális inerciarendszerek kérdésében: Ennek a fogalomnak a természetben nem felel meg semmi.

Hangsúlyozni kell, hogy ez a következtetés csupán az inerciarendszer fogalmán és a kísérlet eredményén alapul, nem kell hozzá hivatkozni se Newton, se Einstein elméletére. De ha figyelembe vesszük, hogy az általános relativitáselmélet alapján a $6''/\text{év}$ szögelfor-



1. ábra. A Föld körül keringő forgó gömb

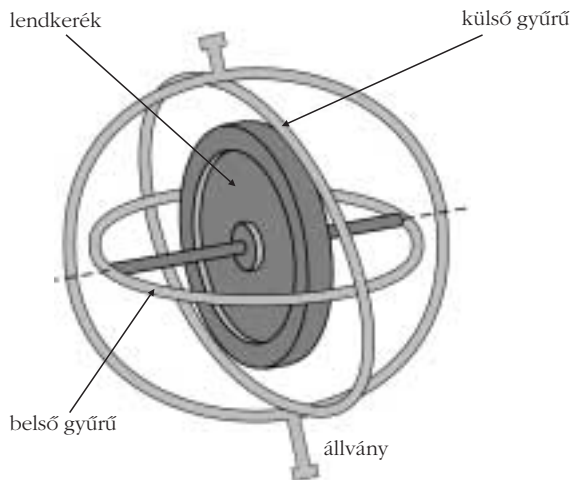
dulást *geodetikus precesszió* néven már évtizedekkel ezelőtt megjósolták, a GP-B kísérlet fontos új bizonyítékkal szolgál az általános relativitáselmélet mellett. A kísérletnek többnyire csak ezt a következményét szokták hangsúlyozni, de ha előzőleg nem tesszük világossá, hogy a geodetikus precesszió a newtoni fizika alapjainak mond ellent, nem méltányolhatjuk kellően a kísérlet jelentőségét. Összehasonlításképp gondoljunk csak a Merkúr perihéliumának eltolódására, ahol a probléma nem minőségi, hanem mennyiségi jellegű volt: A megfigyelt $575''/\text{év-század}$ eltolódásból a newtoni gravitációelmélet csak $534''/\text{évszázad}$ eltolódást tudott megmagyarázni. Az általános relativitáselmélet minden külön feltevés nélkül pontosan kiadja a $41''/\text{évszázad}$ hiányt. Történetileg ez volt az első bizonyíték az elmélet mellett, amelynek jelentőségét nehéz lenne túlbecsülni. Perihéliumeltolódás azonban a newtoni és az einsteini elméletben egyaránt van, csak egy kicsit más mértékben, ezért ez a jelenség nem világít rá élesen a két elmélet közötti gyökeres különbözősége. A geodetikus precesszió ezt inkább megteszi, mert minőségileg új jelenség a newtoni fizikához képest.

Az általános relativitáselmélet szerint azonban a poláris pályán keringő gömb forgástengelye csak akkor precesszálna pontosan a keringés síkjában, ha a Föld nem forogna. A Föld forgása miatt a gömb forgástengelye valóban kimozdul ebből a síkból, de ennek a *dregnek*² nevezett precesszióknak a szögsebessége körülbelül 170-szer kisebb a geodetikus precesszió szögsebességénél. A GP-B kísérletben azért választottak poláris pályát, hogy a kétfajta precessziót könnyebben elkülöníthessék egymástól.³ A kísérlet pontossága azonban körülbelül 1%-os lett, és ez nem elegendő a dreg megfigyeléséhez.

¹ Az ESA (European Space Agency, Európai Űrügynökség) 2020-ra tervezi a Hyper elnevezésű szonda felbocsátását, amely egyéb feladatok mellett a GP-B kísérlethez hasonló programot is végrehajt majd.

² A *drag* (húzás, vonzás) angol elnevezés magyar adaptációja.

³ Egyenlítői pályán mindkét precesszió a pályasíkjában történik.



2. ábra. A giroszkóp szerkezeti elemei

A geodetikus precesszió olyan lassú mozgás, hogy kimutatása egészen különleges eszközöket igényelt, melyek kifejlesztése évtizedekig tartott. A csúcstechnológiát felhasználó műszerek ismertetéséhez nem vagyok eléggé felkészült, de egy kérdést semmiképpen sem kerülhetek meg: Hogyan lehetett körpályán tartani egy forgó gömböt úgy, hogy közben észlelni lehessen a forgástengely parányi elfordulását?

Ezt egy űrhajóhoz rögzített giroszkóp segítségével lehetett megvalósítani. A giroszkóp vázlatos rajzát a 2. ábra mutatja. A kardántengelyes felfüggesztés lehetővé teszi, hogy a lendkerék tengelye beállhasson minden irányban, pontosan úgy, mintha a lendkerék szabadon lebegne. A giroszkóp állványa azonban az űrhajóhoz van rögzítve, ezért a lendkerék centruma az űrhajóval együtt kering anélkül, hogy ez bármilyen mértékben korlátozná a lendkerék orientációját.

A GP-B űrhajó négy giroszkópot vitt magával, amelyeknek az orientációja egymástól függetlenül változhatott. A „lendkerék” valójában nem kerék, hanem egy majdnem tökéletes gömb volt, nehogy valamilyen fizikai eredetű forgatónyomaték hathasson rá. A felület egyenetlenségei olyan minimálisak voltak, hogy ha a Föld ugyanilyen arányban térne el az ideális gömbalaktól, a legmagasabb hegycsúcsok és a legmélyebb óceáni árkok két és fél méter magasak, illetve mélyek lennének. Mind a négy giroszkóp elfordulása megfelelt a várt $6''/\text{év}$ szögsebességnek.

Még egy kérdés van hátra: Milyen *gyakorlati* következtetést kell levonnunk abból, hogy globális inerciarendszerek nincsenek? A következtetés biztosan nem az, hogy ezt a fogalmat örökre száműznünk kell a fizikából. A kérdést azzal összefüggésben kell megválaszolnunk, hogy milyen viszonyban van egymással Newton és Einstein gravitációelmélete. Mindkét elmélet ugyanazt a jelenségkört fed le (Naprendszer, kettős csillagok), de az általános relativitáselmélet fogalmilag egységesebb (nem enged meg két különböző fajtájú – súlyos és tehetetlen – tömeget), és tapasztalatilag pontosabb. Newton tömegvonzás-elmélete azonban nagyon széles körben igen pontos közelítése az általános relativitáselméletnek, amelyből jól meghatározott közelítő eljárással le is származtatható. Még az űrszondák pályaszámításához is többnyire teljesen elegendő pontosságú a newtoni elmélet, ezért pedáns szörszálhasogatás lenne, ha ilyen esetekben nem ezt az elméletet használnánk – a globális inerciarendszereivel együtt. Természetesen a középiskolában is ezt az elméletet tanítjuk. Legfeljebb arról lehet szó, hogy nagyobb hangsúlyt kellene helyezni a Newton-elmélet azon feltevéseire (globális inerciarendszerek léte, a súlyos és a tehetetlen tömeg kettőssége), amelyek az általános relativitáselmélet kiindulópontját képezik.

NÉPZENEI ÖSSZEHAONLÍTÓ ELEMZÉSEK MESTERSÉGES INTELLIGENCIÁKKAL

Juhász Zoltán

Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Kilenc eurázsiai népzene reprezentatív dallamgyűjteményeit elemeztük az úgynevezett Kohonen-féle önszervező térképek segítségével. A mesterséges intelligenciák megtanulták a különböző népzeneik jellegzetes dallamvonal típusait, mintegy modellezve a zenei nyelveket. A nemzeti zenei nyelvek egymás közti kapcsolatai felvetették egy valaha létezett közös zenei ősnyelv lehetőségét. Ennek rekonstrukciója arra a következtetésre vezetett, hogy a zenei ősnyelv legtöbb elemét éppen a mai magyar népzene őrzi, így a Kárpát-medence igazolhatóan központi helyet foglal el Eurázsia zenei térképén.

Kodály Páva-variációit hallgatva elgondolkodhatunk azon, hogy micsoda szövevényes kapcsolatrendszer fűzheti össze a népzene sok ezer dallamát, ha

egyetlen dallamtípus is ilyen csillogóan gazdag változatosságban mutatja meg különböző arcait. Ez a gazdagság elsősorban a szájhagyományos műveltség legfőbb alkotó módszerének, a variálásnak köszönhető. A népzene életéhez éppúgy hozzátartozik a változatok folytonos születése és a kevésbé sikeres változatok eltűnése, mint a mutációké az élővilághoz. A variánsok képződése és elhalása eredményeként kikristályosodó rend kutatása azonban, már csak a dallamok óriási száma miatt is, igen nehéz, hiszen például a *Zenatudományi Intézet* archívumában 200 000-nél is több egyedi dallamváltozat található.

Az elemző munkát nyilván megkönnyíthetjük olyan számítógépes algoritmusokkal, amelyek mintegy „maguktól” megkeresik a dallamsokaságokban rejtőző