

A GRAVITÁCIÓRÓL

avagy: milyen szerepet játszanak világunkban a lovasszobrok? – 1. rész

Bokor Nándor
BME Fizikai Intézet

Newton 2. axiómája ($\mathbf{F}_e = m\mathbf{a}$) szerint, ha egy testre nem hat eredő erő, akkor a gyorsulása nulla (ha $\mathbf{F}_e = 0$, akkor $\mathbf{a} = 0$). Ahhoz, hogy ezen állítás igazságtartalmát értelmezni tudjuk, meg kell állapodnunk abban, mit értünk erő és gyorsulás alatt. A gyorsulás (a sebességváltozás gyorsasága) definiálásához *vonatkoztatási rendszert* kell bevezetnünk (amihez képest mérjük a sebesség időegységre eső változását). Ez elvileg akármilyen laboratórium, szoba, úrhajó stb. lehet, de Newton szerint a fenti axióma a vonatkoztatási rendszereknek csak egy speciális fajtájában, az úgynevezett inerciarendszerekben igaz. Mi az inerciarendszer? Newton válasza: Inerciarendszer alatt olyan vonatkoztatási rendszert értünk, amelyben ha egy testre nem hat eredő erő, és nyugalmi helyzetből elengedjük, akkor egy helyben marad. (Ez Newton 1. axiómája, ami voltaképpen az inerciarendszert definiáló kijelentés.) Nem odázhathatjuk tehát tovább az erő gondos definiálását, hiszen az inerciarendszer definíciójához fel kellett használni az erő fogalmát. A szokásos megfogalmazás szerint az erő két test közötti kölcsönhatás mértéke. Ezzel a mondattal azonban nem nagyon jutottunk előbbre. Honnan tudjuk, hogy egy tömegpont éppen részt vesz-e egy kölcsönhatásban vagy nem? Ez különösen akkor nehezen eldönthető kérdés, ha a testen *nem látszik*, hogy éppen kölcsönhatásban van egy másikkal. Ha egy testhez éppen nem ér hozzá semmi, közben azért szereplője-e valamilyen kölcsönhatásnak (mondjuk mert a térnek abban a pontjában valamilyen, más testek által létrehozott „erőtér” van, a test pedig rendelkezik olyan képességgel, hogy arra az erőtérre reagálni tud), vagy éppen tényleg „békén van hagyva”?

Tegyük fel, hogy egy szobában állunk, és elejtünk egy követ. Azt látjuk, hogy a kő a szoba egyik kitüntetett irányába, a padló felé gyorsul. Erre a látványra kétféle magyarázatot is adhatunk:

(1) Inerciarendszerben vagyunk, és valamilyen erő hat a kőre, ami gyorsítja (ezt az erőt csak valamilyen erőtér fejtheti ki, mert a kőhöz esés közben – láthatólag – nem ér hozzá semmi).

(2) A kőre nem hat semmilyen erő, látszólagos gyorsulását csupán különleges nézőpontunk okozza, tudniillik az, hogy nem is inerciarendszerben vagyunk.

Hogyan tudjuk eldönteni, hogy melyik magyarázat a helyes?

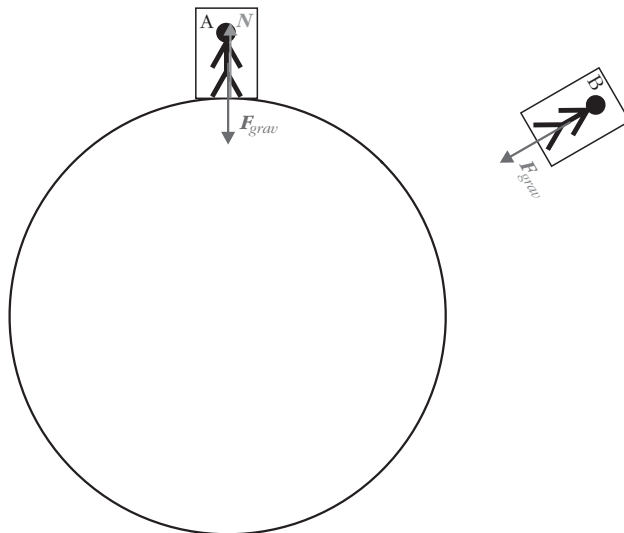
Newton válasza: *ő maga posztulálja*, hogy a Föld az üres téren keresztül erőt fejt ki a kőre, és ez készletti gyorsulásra a követ. Newton tehát *önkéntesen eldönti*, hogy a gravitációt erőnek kell tekinteni, és ezzel az (1)-es magyarázat mellett teszi le a voksát. Ugyanerre a kérdésre *Einstein* válasza: *kérdezzük meg a követ!* Mesélje el, hogy miután nyugalmi helyzetből óvatosan elengedtük, „érett-e” valamit. Ha az elengedés pillanatában, illetve esés közben lökést, rántást, nyomást érezt, akkor valami erő rántotta meg (az üres téren keresztül). Ha nem érezt semmilyen rántást, lökést, akkor erő sem hatott rá. Mivel Einstein erő-definíciójából hiányzik az a fajta önkényesség, amellyel Newton besorolja a gravitációt az erők közé, az alábbiakban Einstein erő-fogalmát fogadjuk el jogosnak. Ezzel az inerciarendszer fogalmát bizonyos szempontból ki is hagyhatjuk a diszkusszióból. Az inerciarendszer newtoni definícióját kiválthatjuk a következő állítással: *Ha egy tömegpontra nem hat erő, akkor a tömegpont nem „érez” semmit.*¹ Ezen állításnak vonatkoztatási rendszertől független, invariáns jelentése van. Az erőnek ezzel a szemléletes értelmezésével megszűnt az igény az inerciarendszer fönti, kicsit homályos definíciójára. Természetesen feladatok kiszámításakor továbbra is hasznosak az inerciarendszer, illetve a gyorsuló vonatkoztatási rendszer fogalmak, de értelmezésük egyszerűbb: gyorsuló vonatkoztatási rendszernek például azt a vonatkoztatási rendszert fogjuk nevezni, amelyben az $\mathbf{F}'_e = m\mathbf{a}'$ alakú egyenlet csak akkor írja le helyesen a test mozgását, ha a bal oldalra olyan „erő”-tagokat is felírunk, amelyeket a test *nem érez* (tehát nem erők).

Mint az alábbiakban látni fogjuk, a kezünkől elengedett kő – ha válaszolni tudna – nemleges választ adna Einstein kérdésre: az elengedés pillanata után semmiféle lökést nem „érett”, és végig az esés közben sem rántja meg semmi. Épp ellenkezőleg: amíg a kezünkben tartottuk, addig volt folyamatos nyomásnak kitéve, amikor elengedtük, azonnal a lehető „legellazultabb” állapotba került. Einstein kérdése és a kő válasza alapján a gravitációt nem tekinthetjük erőnek. Most lássuk a részleteket!

¹ A tömegpont fogalmát természetesen nem matematikai pontként értelmeztem – amely elvileg sem „érezhet” semmit –, hanem tágabb értelemben használom: tömegpont az a test, amelynek belső struktúrája az adott fizikai probléma tárgyalása szempontjából figyelmen kívül hagyható.



1. ábra. Az inerciarendszer űrhajó, benne a szabadon lebegő utas.



2. ábra. Gravitációs vonzócentrum közelében.

Mozgás leírása inerciarendszerben

A világűrben kikapcsolt hajtóművel, forgásmentesen lebeg egy űrhajó (1. ábra). Az űrhajóban nincs kitüntetett irány, az űrhajó utasa szabadon lebeg. Az űrhajó *inerciarendszer*.²

Az űrhajós mindenféle fizikai kísérletet végez. Ne kiütözik az űrhajó falának, lebegés közben belekapaszkodik egy falhoz rögzített gumi expanderbe stb. Foglaljuk össze a tapasztalatait!³

(A1) „Amikor egy testre erő hat, azt a test *megérzi*: az eredő erő valamilyen irányban meglöki.” (Éppen ilyesmire – a nagy erőhatások elviselésére – edzenek az űrhajósok a földi kiképzőközpontban, például az úgynevezett centrifugában.)

(A2) „Azokban a pillanatokban, amikor egy testre éppen nem hat erő, a test *nem érez semmi lökést*, szabadon lebeg.”

Pontos atomórákkal végzett kísérletei során az űrhajós meglepő jelenségekre figyel fel. Ha sok atomórát az űrhajó egy adott helyéről elmozgat (kiindulási esemény), majd később ismét összehozza őket egy helyre (érkezési esemény), akkor a két esemény között az atomórák különböző eltelt időt regisztrálnak. Az eredmények rendszerezése után nagyon egyszerű és alapvető természeti törvényt tud megfogalmazni:

(A3) „Adott két esemény között az a test (atomóra) *öregszik* a legtöbbet (regisztrálja a legtöbb eltelt időt), amely a két esemény között végig erőmentes, relaxált mozgást végzett.”

Ezt az elegáns és egyszerű természeti törvényt elnevezi *Extremális Öregedés Elvének*.

² Most a newtoni és az einsteini nézőpont véleménye megegyezik, a gravitáció problémáját – tudniillik erő-e vagy sem – ez a példa egyelőre nem veti fel, hiszen az űrhajó távol van minden égitesttől.

³ Itt könnyű eldönteni, hogy mikor hat egy testre erő, hiszen az összes kölcsönhatás fizikai kontaktust is jelent, a fallal, az expanderrel stb.

Newtoni nézőpont: a gravitáció erő

A newtoni nézőpont elfogadja a fenti (A1), (A2) állításokat mindaddig, amíg azok a világűrben, minden égitesttől távol, forgásmentesen lebegő űrhajóban végzett kísérletekre vonatkoznak. Gravitációs vonzócentrum közelében (2. ábra) azonban az ő nézőpontjából – aki a gravitációt erőnek gondolja – a fenti állítások látványosan nem működnek. A 2. ábrán A-nak elvileg nem lenne szabad semmit sem éreznie (hiszen a rá ható erők eredője zérus), vagy legalábbis felfelé és lefelé ható erőt egyaránt éreznie kéne, ő mégis minden porcikájában csakis felfelé ható nyomóerőt érez. B-nek elvileg folyamatosan nyomást kellene éreznie a gömb középpontja felé (hiszen hat rá arrafelé mutató erő), ő mégsem érez semmi ilyet, hanem relaxált állapotban lebeg a szabadon eső kabin belsejében, és azt sem tudja, merre van a gömb középpontja.⁴

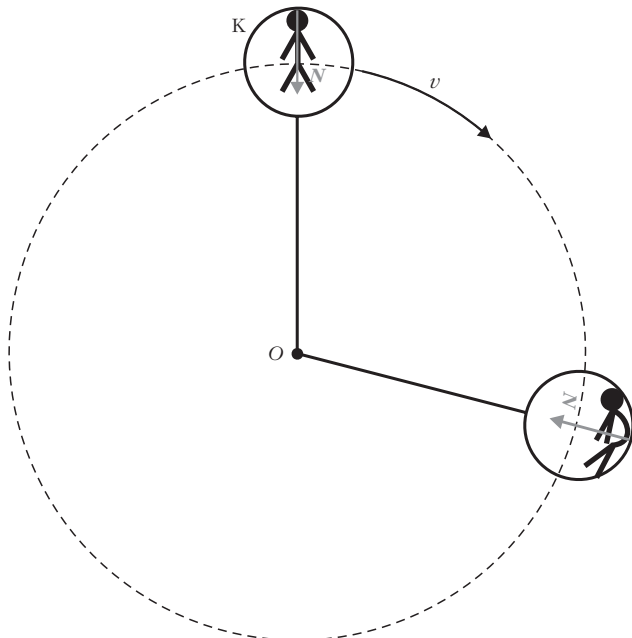
Az (A3) állítás relativisztikus effektus, nem része az időt abszolútnak tekintő newtoni fizikának. Itt is két választás áll azonban előttünk: erőnek tekintjük-e a gravitációt vagy sem. Ha igen, akkor gondba kerülünk. A 2. ábra viszonyai között ugyanis az atomórákkal végzett kísérletek szerint az az óra regisztrálja a legtöbb eltelt időt, amelyik a két adott esemény között – az ábra B űrhajósához hasonlóan – végig csak a gravitációs erő hatására mozgott.

A newtoni nézőpont szerint tehát gravitációs vonzócentrum közelében a fenti (A1), (A2), (A3) egyszerű természeti törvények módosításra szorulnak:

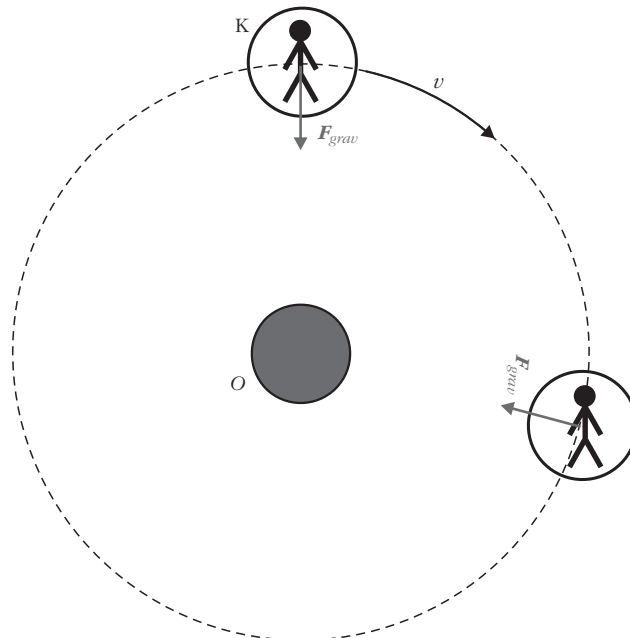
(A1, ha a gravitáció erő) „Amikor egy testre erő hat, azt a test *megérzi*: az eredő erő valamilyen irányban meglöki. *Kivéve ha a testre egyedül a gravitációs erő hat, azt ugyanis a test nem érzi meg.*”

(A2, ha a gravitáció erő) „Azokban a pillanatokban, amikor egy testre éppen nem hat erő, a test *nem érez semmi lökést*, szabadon lebeg. *Kivéve gravitációs*”

⁴ Hogy mégis érezhet *valamit*, arról bővebben lásd az írás következő, jövő hónapban megjelenő részét.



3. ábra. A körhinta.



4. ábra. Nagy tömegű test körül keringő űrhajó.

vonzócentrum közelében, ott ugyanis amikor éppen nem hat rá eredő erő, akkor is érez lökést/nyomást, nincs relaxált állapotban, nem lebeg szabadon.”

(A3, ha a gravitáció erő) „Adott két esemény között az a test (atomóra) öregszik a legtöbbet (regisztrálja a legtöbb eltelt időt), amelyre a két esemény között végig *vagy semmilyen erő nem hatott (gravitációs vonzócentrumtól távol), vagy csak a gravitációs erő hatott.*”

Látható, hogy a newtoni rendszer nagyon nyögve nyelős, erőltetett. Önkényesen besorolja az erők közé a gravitációt, majd kijelenti róla, hogy az *alapvetően* más-hogy viselkedik, mint a többi erőtípus: ez az egyetlen erő, amelyet nem érez az, akire hat, és amely nem engedelmeskedik a Maximális Öregedés Elvének.

Einsteini nézőpont: a gravitáció nem erő

Einstein elmélete sokkal egyszerűbb és elegánsabb. Azzal, hogy a gravitációt nem tekinti erőnek, az űrhajós által talált (A1), (A2), (A3) természeti törvények változatlan formában érvényesek maradnak nagy égitestek közelében is, nincs szükség az erőltetett newtoni módosításokra.

Nincs is tehát gravitáció? Az einsteini nézőpont válasza: gravitációs *erő* valóban nincs. De a gravitáció *jelensége* nagyon is létezik: ha nem létezne, akkor a Földet semmi nem készítené arra, hogy a Nap körül keringjen. *Valami* nem engedi, hogy a Föld – bár erő nem hat rá – egyenes vonalban eltávolodjon a Naptól. Einstein elmélete szerint ez a valami a téridőnek a Nap által létrehozott *görbülete*.⁵

Ha Newton és Einstein magyarázata teljesen azonos mérési eredményeket produkálna és azonos jóslásokat adna a világról, akkor ekvivalens elméletekről lenne

szó. Einsteiné mindössze elegánsabb lenne Newtonénál, de esztétikai érzékünkön kívül semmi nem indokolná, hogy érvényesebbnek tekintsük, mint Newtonét. A perdöntő bizonyítékot arra, hogy Einstein elmélete a pontosabb, azok a kísérletek adják, amelyek eredményére a két elmélet más jósol (például a Nap melletti fényelhajlás, a Merkúr perihélium-vándorlása, a GPS-műholdak helyes óraszinkronizációja).

Miért nem erő a gravitáció? További példák

Tanulságos egymás mellé állítani olyan példákat, amelyekben két egyforma tömegpont – newtoni fejjel gondolkodva – azonos mozgást végez: ugyanolyan irányú és nagyságú erő hat rájuk, és így gyorsulásuk is azonos, viszont *teljesen más tapasztalnak*. Ez newtoni szemmel nézve igazi rejtély, amelynek megfejtésében az einsteini nézőpontra való áttérés segít bennünket.

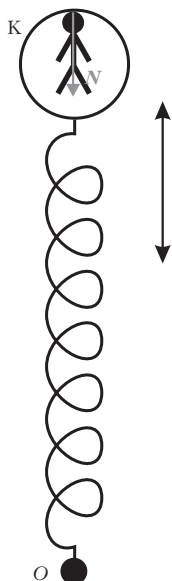
Körhinta

A 3. *ábrán* egy körhinta látható. A K kabint valamilyen centrális (az O pont felé mutató) erő tartja forgásban. Ez lehet például kötél-erő (ekkor a K kabint egy kötélt ténylegesen összekapcsolja a rögzített O ponttal), de lehet Coulomb- vagy Lorentz-erő is.⁶

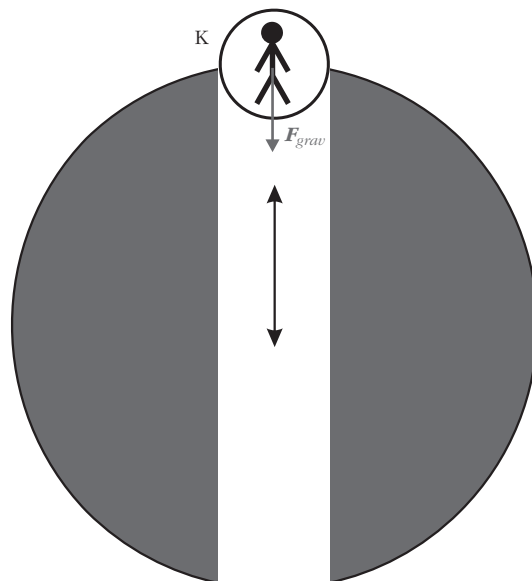
A kabinban levő ember a kabinnal együtt körpályán kering az O pont körül. A kabin utasa *érzi*, hogy odanyomódik a kabinnak mindig az O-val átellenes falához. Az utast a kabin fala által kifejtett **N** nyomóerő tartja a körpályán. Utasunk nem csak arról tud

⁵ Lásd az írás következő, jövő hónapban megjelenő részét.

⁶ Az előbbi esetben például O egy pozitív ponttöltés, amelynek elektrosztatikus tere a negatív töltéssel ellátott K kabint vonzza, az utóbbi esetben pedig az elektromosan töltött kabint az ábra síkjára merőleges homogén mágneses tér készíti körmozgásra.



5. ábra. Inerciarendszerben rugóhoz erősített kabin.



6. ábra. Gravitációval készített rezgőmozgás.

beszámolni, hogy folyamatosan erő hat rá (hiszen éri), de még azt is becsukott szemmel meg tudja állapítani, hogy éppen merre van az O pont, hiszen az N erő mindig arrafelé nyomja.

A 4. ábra látszólag ugyanilyen mozgást mutat, azzal az eltéréssel, hogy a kabint ezúttal az O pontba tett nagy tömegű test gravitációs hatása készíti körmozgásra. (Az ábra a newtoni nézőpontnak megfelelően erőnek ábrázolja a gravitációt.) Mit érez a kabin utasa, aki a kabinnal együtt körpályán mozog O körül? *Nem érez semmilyen lökést az O irányába.* Nem nyomódik neki a kabin falának, hanem szabadon lebeg a kabin belsejében. Ha nem néz ki az ablakon, akkor fogalma sincs róla, hogy éppen körmozgást végez, és azt sem tudja megállapítani, hogy merre van az O pont.

Rugó

Az 5. ábra inerciarendszerben ábrázol egy K kabint, amely egy rugóhoz van erősítve. A rugó másik végét valamilyen fix O ponthoz rögzítjük.⁷

A kabin a ráerősített rugó rugalmas erejének hatására az O ponthoz képest szinuszos gyorsulással rezeg. A kabinban levő ember is a kabinnal együtt mozog, az ő rezgőmozgásáért a kabin fala által kifejtett nyomóerő a felelős. *Érzi-e* a kabin utasa a szinuszos gyorsulást? Igen, érzi. Képzelnünk el, hogy a kabin fala szivaccsal van kibélelve. Az utasnak, attól függően hogy hol tart a pályáján, a feje vagy a lába fog különböző mértékben a szivacsba nyomódni. Kis gyakorlás után becsukott szemmel is meg tudja állapítani, milyen messze van éppen az O ponttól.

⁷ Most ne akadjunk fenn azon, hogy fizikailag hogyan hozzuk létre ezt a fix pontot. El tudunk képzelni például a világűrben egy kétszeres hosszúságú rugót, amelynek O a középpontja, és a másik végéhez egy a K -val azonos tulajdonságú kabin van erősítve. Ha a két űrkabint ellenfázisban rezgésbe hozzuk, az O pont nyugalomban marad. Egy ilyen elrendezés – amely szabadon lebeg – a felső felét mutatja az 5. ábra.

A 6. ábra látszólag ugyanilyen mozgást mutat, azzal az eltéréssel, hogy a kabint ezúttal a gravitáció készíti rezgőmozgásra.⁸ Ez a fajta rezgőmozgás jön létre, ha egy nagy tömegű, homogén tömör gömbbe lyukat fúrunk, és a lyuk felett kezdősebesség nélkül elengedünk egy kis tömegű kabint.

„A kabin gyorsulását ezúttal is szinuszfüggvény írja le az időben.” Az előző mondat a nagy tömegű gömbhöz rögzített vonatkoztatási rendszerben érvényes. Newton szerint ez a vonatkoztatási rendszer inerciarendszer. Newtoni nézőpontból a kabinban levő embert most a „gravitációs erő” készíti rezgőmozgásra. De *érez-e* a kabin utasa bármit is ebből a készítésből? *Érzi-e* lökést az ábra F_{grav} vektorának irányába? Semmi ilyen nem érez. Nem nyomódik neki a kabin falának, hanem szabadon lebeg a kabin belsejében. Ha nem néz ki az ablakon, akkor fogalma sincs róla, hogy éppen rezgőmozgást végez, és még csak arról sem, hogy melyik irányban van az O pont.

Példánk egyrészt illusztrálja, mennyire erőltetett a gravitációt erőnek tekinteni, hiszen egy tömegpont (amilyenek a kabin utasát a fenti példákban vettük) semmit sem érez a gravitáció hatásából. Másrészt pedig érthetetlennek tűnik: hogyan eredményezhetnek látszólag azonos mozgásokat (azonos pályagörbéket, azonos világvonalakat) ennyire ellentétes fizikai hatások? Einsteini nézőpontból magától adódik a magyarázat: mindkét példában míg az egyik tömegpontra (3. és 5. ábra) eredő erő hat, így inerciarendszerből nézve valóban gyorsul is, a másik tömegpont (4. és 6. ábra) erőmentesen mozog, tehát egy helyesen értelmezett inerciarendszerből nézve nem is gyorsul. Hogy mégis azonosnak látjuk a két tömegpont mozgását, az csupán illúzió, amit az okoz, hogy más típusú vonatkoztatási rendszerből nézzük őket: a 3. és az 5. ábra inerciarendszerbeli nézőpontot mutat be, a 4. és 6. ábra viszont nem.

⁸ Az ábra ismét erőnek ábrázolja a gravitációt, a newtoni nézőpontnak megfelelően.