

Száz éves az általános relativitáselmélet

EGY KLASSZIKUS TÖKÉLETESSÉGŰ TERMÉSZETTÖRVÉNY CENTENÁRIUMA

Patkós András

az MTA rendes tagja, professzor emeritus,
Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Fizikai Intézete
patkos@galaxy.elte.hu

Az alapvető kölcsönhatások körében elsőként a gravitációs erőhatást ismerte fel a modern fizika. *Isaac Newton*nak a XVII. században megfogalmazott általános tömegvonzási törvénye volt a mintája az elektromos töltések közötti erőhatás Coulomb-törvényének a XVIII. században, majd az ebben kifejeződő irányfüggetlen, sugárirányú hatást fogalmazta újra *Jukava Hideki* (Hideki Yukawa) a XX. században az atommag alkotórészei közötti kölcsönhatás véges hatótávolságú törvényében is. A gravitációs kölcsönhatás ugyanakkor az utolsó az alapvető kölcsönhatások közül, amelynek nem ismerjük kvantumfizikai hatásait.

A gravitációs kölcsönhatás intenzitása a leggyengébb az ismert négy alapvető kölcsönhatás közül, ám az egyetlen, amelynek jelenlétét folyamatosan érezzük (ha nem is éljük olyan drámai formában át, ahogyan azt Madách Imre vagy François Villon kifejezte).

Ennek egyszerű oka, hogy a nehézségi erő nem árnyékolható, szemben az elektromos töltés Coulomb-erejével. A tömegvonzás minél nagyobb távolságskálán fejt ki hatását, annál nagyobb tartományból akkumulálja az abban elhelyezkedő anyag gravitációs hatását. A folyamatosan növelt méret végül elér egy értéket, amelyen túl a gravitációs erő felülmúlja a tartományt kitöltő anyag nyomását.

A XX. század elején felismert Jeans-instabilitás a kiindulópontja a kozmikus struktúra-képződés megértésének. Newton és *Richard Bentley* levelezése, *Pierre-Simon Laplace*-nak a „sötét csillag” (a fekete lyuk) létét felvető számítása, *Robert Oppenheimer* és *George Volkoff* csillagegyenlete, *Subrahmanyan Chandrasekhar*nak a csillagok gravitációs összeomlását tárgyaló elmélete és a sötét anyag hipotetikus elemi részecskéi alkotta újfajta „sötét csillag” ideája mind azt bizonyítják, hogy a gravitációnak az anyag mozgására, illetve stabilan

állandósult állapotú csillagászati képződmények kialakulására gyakorolt hatása a modern tudomány története során egy pillanatra sem hagyta, és a ma sem hagyja nyugodni a kutatók fantáziáját.

A gravitációs kölcsönhatásról való gondolkodásunknak éppen egy évszázada *Albert Einstein* általánosított relativitáselmélete adja a keretét. Ezt az elméletet annak az elektrodinamika példáját követni igyekvő próbálkozásnak a kudarcra szülte, amely a gravitáció newtoni megfogalmazását igyekezett a speciális relativitás elméletével összhangba hozni (Einstein, 1971, 2005). *James Clerk Maxwell* elmélete az egységes téridő Minkowski-geometriája nyelvén megfogalmazva különlegesen egyszerű, természetes szépségű alakot ölt. Einstein és számos kiváló kortársa (köztük *Max Abraham* és *Hendrik Lorentz*) az elektrodinamikai négykomponensű potenciál egyenleteihez hasonló általánosító megfogalmazásra törekedtek, ám kudarcot vallottak a gravitációs Laplace-potenciál esetében.

Az új elmélet megteremtésének arkhimédeszi fix pontját, amint azt Einstein számos írásában hangsúlyozza, az ekvivalenciaelv felismerése jelentette: „Homogén gravitációs térben minden mozgás úgy megy végbe, mintha egyenletesen gyorsuló koordináta-rendszerben gravitáció hiányában történnék a mozgás.” A felismerés ráébresztette, hogy túl kell lépnie az egymáshoz képest egyenletes egyenes vonalú mozgást végző rendszerek fizikájának változatlanóságát megfogalmazó speciális relativitási elméleten. E felismerésnek alapját a testekre ható súlyerővel meghatározott tömegnek a tetszőleges erőhatással szembeni „ellenállás” mértékét adó tehetetlen tömeggel való egyenlősége adja. A speciális relativitáselmélet megalkotását (1905) követő évtized történéseit, a tudományos közösség

nagy alakjai közötti kommunikáció részleteivel mutatja be *Illy József* cikke. Benne kiemelt helyen szerepel Einstein értékelése *Eötvös Loránd* tudománytörténeti fontosságú mérés-sorozatáról, amellyel a súlyos és a tehetetlen tömeg egyenlőségét ellenőrizte.

Az évtizedes elméletkeresési erőfeszítés eredménye az 1915-ben publikált egyszerű egyenletrendszer, amely kimondja a téridő geometriáját jellemző lokális mennyiségek és az anyagot lokálisan jellemző energia-impulzus sűrűségi és áramlási adatok arányosságát. Newton gravitációs állandójának a kétfajta mennyiség közötti átszámítási állandó szerepe jutott. Az anyag és a téridő elválaszthatatlanságának megfogalmazása kvantitatív természettörvényként Newton gravitációs törvényének minden következményét egyszerűen reprodukálja.

Az elmélet közzététele előtt Einstein két évet azzal töltött, hogy megkeresse azokat a mérhető hatásokat, amelyekben a newtoni gravitációs erőtvény alkalmazásaitól eltérő eredményre vagy éppenséggel új jelenség előrejelzésére jut. Az általa talált három hatás közül kettő, nevezetesen a fény útjának lencsehatással bekövetkező megváltozása a nagy tömegű égitestek közelében haladó pályáján és a gravitációs tér nagy tömegű forrásai tartományában keletkező fény frekvenciájának csökkenése (vöröseltolódása) a gravitációs potenciálból való kilépés során végzett munka eredményeként az elméletet igazoló kuriózumból az extragalaktikus csillagászat nélkülözhetetlen kutatási módszerévé lett. *Szabados B. László* az elmélet szerkezetének alapos ismertetését követően számos további jelenséget mutat be, amelyek nagy pontosságú asztrofizikai megfigyelésekkel az einsteini gravitációs elmélet ellenőrzését adják. Közismert, hogy a globális helymeghatározás

rendszerének működtetése során a rendszer műholdas elemei közötti időszinkronizációhoz figyelembe kell venni a Föld téridő-tartományának eltérését a Minkowski-geometriától. A cikk nem titkolja, sőt rendszerezetten felsorolja az elmélet lezáratlan kérdésköreit. Két vonatkozást emelek ki a Szabados által felso-roltakból, amelyeket – talán szubjektíven – az elmélet továbbfejlesztése szempontjából meghatározó fontosságúnak látok.

A kvantumgravitáció hiányzó elmélete számos elméletépítő próbálkozásra ösztönözte a fizikusokat. Az elképzelések spektrumának egyik szélén azok állnak, akik szerint a gravitáció ún. entropikus erőhatás, amelyet nem lehet mikroszkopikus erőterkvantumoknak (gravitonok) cseréjére visszavezetni, hanem a makroszkopikus rendszer (ez esetben a térbeli tömegeloszlás) viselkedésének azon tendenciájából fakad, amely a rendezetlenség fokát maximalizáló konfiguráció irányába hajtja a rendszert. Az ilyen természetű erőhatások közül a legismertebb a polimerláncok gomolyaggá tekeredését eredményező hatás, amely a lineáris lánckonfigurációhoz képest jóval rendezetlenebb (nagyobb entrópiájú). Erik Verlinde a gravitáció entropikus erőként történő értelmezésére vonatkozó javaslatát (Verlinde, 2011) arra a felismerésre építette, amely szerint az általános relativitás Einstein-egyenletei levezethetők – a téridő geometriáját jellemző mennyiségek termodinamikai megfeleltetését követően – a rájuk kirott termodinamikai főtételekből és az ekvivalencia-elvből (Jacobson, 1995; Padmanabhan, 2005). Ez a megközelítés, amely a gravitációs kölcsönhatás fellépését kizárólag makroszkopikus tartományokra korlátozza, a fekete lyukakra kidolgozott termodinamikai jellemzés (Beckenstein, 1973; Hawking, 1976) általánosítása. Egyben elveti a kvantumgravitáció kidol-

gozása programjának értelmét, csakúgy, ahogy a kvantumtermodinamika is önellentmondó, értelmetlen fogalom.

Az előzővel felel az a kutatási irányzat, amely szerint a gravitációs kölcsönhatás kvantumozott szintje létezik, és a többi klasszikus térrelmélet (pl. a kvantum-elektrodinamika) kvantumozott változatának konstrukciójához hasonlóan kell megalkotni. Az egységes elektromágneses kölcsönhatási elmélet meg az erős kölcsönhatási elmélet az elektromos töltés, illetve az erős csatolási állandó kis értékeire (az ún. *gyenge csatolási határesetben*) megbízhatóan tárgyalható. A gravitáció erősségét jellemző Newton-állandó a nagy energiák felé haladva növekszik, de elképzelhető, hogy az ún. *aszimptotikus biztonság* (Weinberg, 1979) elvét megvalósítva növekedése lelassul, és az ultraibolya hullámhossztartomány egy pontjában a növekedés le is áll, azaz a gravitáció erősségét jellemző mennyiség nagy energián egy véges értékhez tart. A kutatások mai állása szerint ebben a tartományban az Einstein-egyenleteket a téridő-geometriát jellemző további tagok egészítik ki, amelyek hatása a ma kísérletileg hozzáférhető (makroszkopikus) mérettartományban elhanyagolható.

A kvantumgravitáció megalkotásának nehézsége, esetleges lehetetlensége, kiemeli Einstein százéves elméletének robusztusságát, amellyel ellenáll bármilyen irányú kiterjesztésnek, módosításnak. Ez a sajátossága megkülönbözteti a többi elemi kölcsönhatási törvénynek a kvantumszintű egységesülés felé haladó történetétől. Klasszikus nyugalmú közzikla a kvantumhatások nyughatatlan óceánjában.

Kulcsszavak: *Albert Einstein, relativitáselmélet, tudománytörténet, gravitációs kölcsönhatás, kvantumgravitáció*

IRODALOM

- Bekenstein, Jacob (1973): Black Holes and Entropy. *Physical Review*. D7, 2333-2346. DOI: 10.1103/PhysRevD.7.2333 • http://www.itp.uni-hannover.de/~giulini/papers/BlackHoleSeminar/Bekenstein_PRD7_1973.pdf
- Einstein, Albert (1971): *Válogatott tanulmányok* (vál., szerk. Törös Róbert, ford. Nagy Imre) Gondolat, Budapest
- Einstein, Albert (2005): Válogatott írásai (vál., szerk. Székely László, ford. Gerner József, Nagy Imre, Szécsi Ferenc) Typotex, Budapest
- Hawking, Stephen W. (1976): Black Holes and Thermodynamics. *Physical Review*. D13, 191-197. DOI: 10.1103/PhysRevD.13.191 • <http://dieumsnh.qfb.umich.mx/archivoshistoricosmq/ModernaHist/Hawking.pdf>
- Jacobson, Ted (1995): Thermodynamics of Spacetime: The Einstein Equation of State. *Physical Review Letters*. 75, 1260 DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.1260 • <http://arxiv.org/pdf/gr-qc/9504004v2.pdf>
- Padmanabhan, Thanu (2005): Gravity and the Thermodynamics of Horizons. *Physics Reports*. 406, 2, 49-126. DOI: 10.1016/j.physrep.2004.10.003 • <http://arxiv.org/pdf/gr-qc/0311036.pdf>
- Verlinde, Erik (2011): On the Origin of Gravity and the Laws of Newton. *Journal of High Energy Physics*. 4, 29, DOI: 10.1007/JHEP04(2011)029 • <http://arxiv.org/pdf/1001.0785v1.pdf>
- Weinberg, Steven (1979): *Ultraviolet divergences in quantum theories of gravitation*. In: Hawking, Stephen – Israel, Werner (eds.): *General Relativity: An Einstein Centenary Survey*. Cambridge University Press. 790-831.

