

Patkós András

■ ELTE Atomfizikai Tanszék

Egy klasszikus tökéletességű természettörvény centenáriuma

Tavaly volt egy évszázada, hogy Albert Einstein általános relativitáselmélete napvilágot látott. Az elmélet nagy fordulatot hozott az egyik legalapvetőbb fizikai kölcsönhatás, a gravitáció megértésében. A nevezetes centenárium alkalmából Patkós András akadémikus írt az elmélet születésének történetéről, máig tartó jelentőségéről és a későbbi kutatási irányokról a Magyar Tudományban. A cikket az mta.hu nyomán közöljük.

Az alapvető kölcsönhatások körében elsőként a gravitációs erőt ismerte fel a modern fizika. Isaac Newtonnak a 17. században megfogalmazott általános tömegvonzási törvénye volt a mintája az elektromos töltések közötti erőhatás Coulomb-törvényének a 18. században, majd az ebben kifejeződő irányfüggetlen, sugárirányú hatást fogalmazta újra Jukava Hideki (Hideki Yukawa) a 20. 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-erőjével. A tömegvonzás minél nagyobb távolságskálán fejt ki hatását, annál nagyobb tartományból akkumulálja az abban elhelyezkedő anyag gravitációs hatását. A folyamatosan növelt méret végül eléri egy értéket, amelyen túl a gravitációs erő felülmúlja a tartományt kitöltő anyag nyomását.

A 20. század elején felismert Jeans-instabilitás a kiindulópontja a kozmikus struktúráképződés megértésének. Newton és Richard Bentley levelezése, Pierre-Simon Laplace-nak a „sötét csillag” (a fekete lyuk) létét felvető számítása, Robert Oppenheimer

A Sombrero-galaxis egyike a világegyetem gravitáció által összetartott struktúráinak (NASA)

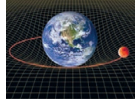


és George Volkoff csillagegyenlete, Subrahmanyan Chandrasekhar-nak a csillagok gravitációs összeomlását tárgyaló elmélete és a sötét anyag hipotetikus elemi részecskéi alkotta újfajta „sötét csillag” ideája mind azt bizonyítják, hogy a gravitációnak az anyag mozgására, illetve stabilan állandósult állapotú csillagászati képződmények kialakulására gyakorolt hatása a modern tudomány története során egy pillanatra sem hagyta, és a ma sem hagyja nyugodni a kutatók fantáziáját.

Súlyos és tehetetlen tömeg

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 kudarca 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 egyenesen gyorsuló koordináta-rendszerben gravitáció hiányában történnék a mozgás.” A felismerés ráébresztette, hogy túl kell lépnie az egymáshoz képest egyenes 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 kommuni-



káció részleteivel mutatta be Illy József cikke (Illy, 2015). Benne kiemelt helyen szerepel Einstein értékelése Eötvös Loránd tudománytörténeti fontosságú mérésorozatáról, amellyel a súlyos és a tehetetlen tömeg egyenlőségét ellenőrizte.

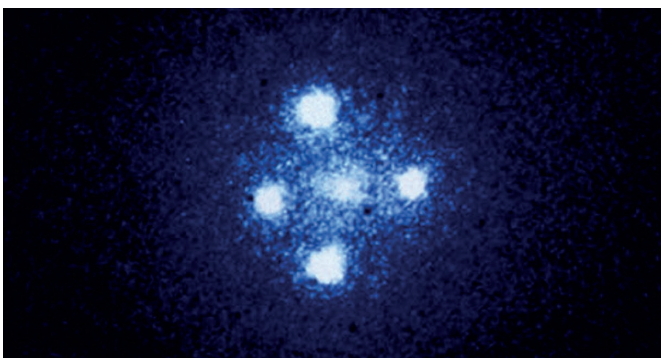
Az évtizedes elméletkeresési erőfeszítés eredménye az 1915-ben publikált egyszerű egyenletrendszer, amely kimondja a téridő geometriáját jellemző lokális mennyiségek és az anyagot lokálisan jellemző energia-impulzus sűrűségi és áramlási adatok arányosságát. Newton gravitációs állandójának a kétfajta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

Gravitációs lencsék és GPS-műholdak

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 mutatott be, amelyek nagy pontosságú asztrofizikai megfigyelésekkel az einsteini gravitációs elmélet ellenőrzését adják (Szabados, 2015). 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 felsoroltakból, 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

Az Einstein-kereszt, mely nem más, mint egy, a Földtől nyolcmilliárd fényévnire elhelyezkedő kvazár megsokszorozódott képe egy tőlünk 400 millió fényévre található galaxis gravitációs-lencse-hatása miatt (NASA, ESA)



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 polimer láncok gomolygággá tekeredését eredményező hatás, amely a lineáris lánckonfigurációhoz képest jóval rendezetlenebb (nagyobb entropiájú). 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 kirótt termodinamikai főtételekből és az ekvivalenciaelvől (Jacobson, 1995; Padmanabhan, 2005). Ez a megközelítés, amely a gravitációs kölcsönhatás fellépését kizárólag makroszkopikus tartományokra korlátozza, a fekete lyukakra kidolgozott termodinamikai jellemző (Bekenstein, 1973; Hawking, 1976) általánosítása. Egyben elveti a kvantumgravitáció kidolgozása programjának értelmét, csakúgy, ahogy a kvantumtermodinamika is önellentmondó, értelmetlen fogalom.

Az előzővel felel az a kutatási irányzat, amely szerint a gravitációs kölcsönhatás kvantumos szintje létezik, és a többi klaszikus térelmélet (pl. a kvantum-elektrodinamika) kvantum 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 kőszikla a kvantumhatások nyughatatlan óceánjában.

IRODALOM

- Bekenstein, Jacob (1973): Black Holes and Entropy. *Physical Review*. D7, 2333–2346. DOI: 10.1103/PhysRevD.7.2333.
- 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.
- Illy, József (2015): Az általános relativitáselmélet megszületése, *Magyar Tudomány* 2015. június, 646–649.
- Jacobson, Ted (1995): Thermodynamics of Spacetime: The Einstein Equation of State. *Physical Review Letters*. 75, 1260 DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.1260.
- Padmanabhan, Thanu (2005): Gravity and the Thermodynamics of Horizons. *Physics Reports*. 406, 2, 49–126. DOI: 10.1016/j.physrep.2004.10.003.
- Szabados, B. László: Száz éves az általános relativitáselmélet, *Magyar Tudomány*, 2015. június, 660–674.
- 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.
- 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.