

Idén ünnepeljük *Albert Einstein* mesterműve, az általános relativitáselmélet századik születésnapját. Megszületése óta sokan gondolták úgy (köztük például *L. D. Landau* és *E. M. Lifšic*), hogy talán ez a „létező legszebb” fizikai elmélet. A *Szemle* szerkesztője bölcsen döntött, amikor az elmélet keletkezéstörténetének összefoglalását a legilletékesebbre, magára Einsteinre hagyta. Einsteinnek ez az 1933-ban keletkezett rövid írása hatvan évvel ezelőtt, Einstein halála évében a *Szemlében* egyszer már megjelent – most *Illy József* új, értő fordításában olvashatjuk ismét –, de az általános relativitáselmélet genezisének mindmáig legtömörebb, legautentikusabb összefoglalása.

„A már megszerzett tudás fényénél a szerencsésen elért eredmény szinte magától értetődőnek látszik, és bármelyik intelligens egyetemi hallgató nagyobb nehézség nélkül fölfogja.” – áll az utolsó bekezdésben, ám ezen a naivitásnak csak mosolyogni lehet. Olvasunk csak el *Radnai Gyula* érdekesítő elbeszélését Einstein Nobel-díjának vizontagságairól, amely az évfordulós megemlékezés második darabja: „A Bizottság felkérésére ... Allvar Gullstrand állított össze értékelő jelentést a relativitáselmületről... A speciális relativitáselmélet jósolta effektusokat mérhetetlenül kicsiknek, hibahatáron belülieknek tartotta, az általános relativitáselmélet bizonyítékául felhozott perihélium-mozgást pedig nem egészen értette meg.” Pedig a Merkúr perihéliumának eltolódási sebessége, amelyet Einstein 1915 novemberében kiszámított, megegyezett a már ötven éve jól ismert, de mindaddig minden magyarázatnak ellenszegülő megfigyelési eredménnyel.

A gravitáció geometriai elméletének felfedezése káprázatos teljesítmény volt, de alig néhány évvel később Einstein fantáziáját már a továbblépés foglalkoztatta: a gravitáció és az elektromágnesség egységes geometriai leírását kereste. Sokan felróják neki, hogy tevékenységének ebben a periódusában sokkal inkább támaszkodott a matematikai lehetőségekre, mint fizikai intuíciójára, és ez is hozzájárulhatott ahhoz, hogy ez a törekvése teljes fiaskóval végződött. Az egységes tételmeletről közölt cikkei alapján ez a vélemény ugyan megalapozottnak tűnik, de *Illy József* írásából kiderül, hogy ugyanakkor létezett egy „másik Einstein” is, aki nem az íróasztal mellett, hanem a laboratóriumban, a girokompassz kifejlesztésével és gyártásával foglalkozó üzemből, vagy éppenséggel egy észak–déli irányban haladó vonaton végezhető megfigyelés segítségével kutatott kifejezetten empirikus kapcsolódási pontok után a gravitáció és az elektromágnesség között. A Föld és a Nap mágneses terének eredete akkoriban még teljesen megmagyarázatlan volt. Einstein azt remélte (egyébként nem egyedülként), hogy a tömeg nemcsak görbíti a téridőt, hanem ha forog, mágneses mezőt is létrehoz maga körül. Az ilyen irányú próbálkozásai azonban rendre kudarcot vallottak. „Semmi baj, ha ezt a reményt [is] el kell temetni; népes és jó társaságban lesz” – jegyezte meg az öniróniában sohasem szűkölködő nagy tudós. *Illy* ma egyike azoknak, akik a legjobban ismerik Einstein ilyen természetű munkásságát, amelyről Einstein maga szinte semmit sem tett közzé. 2012-ben *The Practical Einstein (Experiments, Patents, Inventions)* címmel könyvet is jelentetett meg róla.

Horaskó Péter

EGY S MÁS AZ ÁLTALÁNOS RELATIVITÁSELMÉLET KIALAKULÁSÁRÓL

Albert Einstein

Szívesen teszek eleget annak a felkérésnek, hogy mondjak valamit tudományos munkásságomról. Nem, mintha erőfeszítéseimet érdemtelenül nagyra tartanám. Mások munkásságáról írni azonban feltételezi, hogy előzetesen el kell mélyednünk az idegen gondolkodásmódban, és ezt sokkal könnyebben tehetik meg azok, akik jártasak a történelmi munkában, míg saját korábbi gondolataink megmagyarázása összehasonlíthatatlanul könnyebbnek tűnik. Itt sokkal kellemesebb helyzetben vagyunk, mint bárki más: ezt a lehetőséget nem szabad szerénységből elszalasztani.

Ezt az előadást Einstein a Glasgovi Egyetemen 1933. június 20-án tartotta, angol nyelven. Az eredeti német szöveg 1934-ben jelent meg a *Mein Weltbild* című cikkgyűjteményben. A jelen fordítás erről készült. A cikkgyűjteményt magyarul először 1934-ben, majd 1959-ben adták ki *Hogyan látom a világot?* címmel.

Az előadás korábbi fordítása, *Hogyan született meg az általános relativitáselmélet?* címen megjelent, *Fizikai Szemle* 5 (1955) 101.

Mihelyt 1905-ben a speciális relativitáselmélet révén sikerült elérni, hogy minden úgynevezett inerciarendszer egyenrangú legyen a természettörvények leírásában, szinte elkerülhetetlenül merült föl a kérdés, nincs-e még ezen túlmenő egyenrangúság is a koordinátarendszerek között. Másképp fogalmazva, ha a sebesség fogalmának csupán relatív értelmet tulajdoníthatunk, miért kellene ragaszkodnunk hozzá, hogy a gyorsulás abszolút maradjon.

Tisztán kinematikai szempontból nem volt kétséges, hogy bármely tetszőleges mozgás relatív, fizikai szempontból azonban úgy tűnt, hogy az inerciarendszernek kitüntetett szerepet kell tulajdonítanunk, és emiatt a másképp mozgó koordinátarendszerek erőltetetteknek mutatkoztak.

Természetesen ismertem *Mach* azon véleményét, amely szerint elképzelhető, hogy a tehetetlenségi ellenállás nem a gyorsítással szembeni ellenállás, hanem a

világegyetemben lévő többi test tömegével szembeni. Ez a gondolat valahogyan izgalmasnak tűnt, de nem volt elegendő, hogy új elméletet építsék rá.

Akkor kerültem egy lépéssel közelebb a probléma megoldásához, amikor azt vizsgáltam, hogyan lehetne a gravitációs törvényt a speciális relativitáselmélettel tárgyalni. Amint a legtöbb akkori kutató, én is megpróbáltam, hogy mezőegyenletet állítsak föl a gravitációnak, mert már lehetetlen, de legalábbis valamiféle természetes módon lehetetlen volt, hogy azonnali távolhatást vezessek be, mivel az abszolút egyidejűség fogalma értelmét veszítette.

A legegyszerűbb természetesen az volt, hogy a gravitáció Laplace-féle skaláris potenciálját megtartsam, és a Poisson-egyenletet egy idő szerinti deriválttal alkalmas módon úgy egészítsem ki, hogy eleget tegyen a speciális relativitáselméletnek. De a gravitációs mezőben mozgó tömegpont mozgásegyenletét is hozzá kellett illeszteni a speciális relativitáselmülethez. Az ide vezető út nem volt valami egyértelműen kitűzve, mivel a test tehetetlen tömege függhetett a gravitációs potenciáltól. Ez már az energia tehetetlenségi tétele miatt is várható volt.

Az ilyesféle vizsgálatok eredménye csak az lett, hogy nagyon elbizonytalanodtam. A klasszikus mechanika szerint ugyanis a test függőleges gyorsulása függőleges gravitációs mezőben nem függ a gyorsulás vízszintes komponensétől. Ezzel kapcsolatos, hogy a mechanikai rendszernek, illetve súlypontjának függőleges gyorsulása ilyen gravitációs mezőben függetlennek adódik belső mozgási energiájától. Az általam vizsgált elmélet szerint azonban az esési gyorsulás nem volt független a rendszer vízszintes sebességétől, illetve belső energiájától.

Ez nem hangzott egybe azzal a régi tapasztalattal, hogy a testek mind ugyanazon gyorsulással esnek egy bizonyos gravitációs mezőben. Ez a tétel, amelyet úgy is megfogalmazhatunk, hogy ez a tehetetlen és a súlyos tömeg egyenértékűségének tétele, így teljes világosságában tárult elém. Nagyon csodálkoztam, hogyan állhat fenn, és sejtettem, hogy benne rejlik a tehetetlenség és a gravitáció mélyebb megértésének kulcsa. Szigorú érvényességében annak ellenére sem kételkedtem, hogy *Eötös* szép kísérleti eredményéről nem tudtam – ha jól emlékszem, csak később szereztem róla tudomást. Felhagytam hát azzal a próbálkozással, hogy a gravitációt a fentebb említett módon a speciális relativitáselmélet keretében tárgyaljam, mert alkalmatlannak bizonyult. Nyilvánvalóvá vált, hogy éppen a gravitáció legalapvetőbb tulajdonságáról nem tud számot adni. A tehetetlen és a súlyos tömeg egyenlőségét nagyon szemléletesen a következőképpen fogalmazhatjuk meg: homogén gravitációs mezőben minden mozgás úgy megy végbe, mint olyan egyenletesen gyorsuló koordináta-rendszerben, amelyben nincs gravitációs mező. Ha e tétel bármilyen folyamatra igaz („ekvivalencia-elv”), akkor ez arra utal, hogy a relativitási elvet egymáshoz képest egyenlőtlenül mozgó koordináta-rendszerekre is ki kell terjeszteni, ha nem akarunk erőltetett gravitációelmülethez jutni. Ilyesféle gondolatok

foglalkoztattak 1908 és 1911 közt, és megkíséreltem, hogy speciális következtetéseket vonjak le, de ezekről most nem akarok szólni. Az a felismerés volt egyelőre fontos, hogy észszerű gravitációelmületet csak akkor kaphatunk, ha kiterjesztjük a relativitási elv érvényét.

Arról van tehát szó, hogy olyan elmületet állítsunk föl, amelynek egyenletei nemlineáris koordináta-transzformációval szemben is megtartják alakjukat. Hogy ennek teljesen tetszőleges (folytonos) transzformációkra is fenn kell-e állnia, vagy csak bizonyosakra, ezt egyelőre még nem tudtam.

Csakhamar beláttam, hogy az ekvivalencia-elv szerint fölfogott nemlineáris transzformációkkal a koordináták elvesztik egyszerű fizikai jelentésüket, azaz nem követelhetjük meg ezután, hogy a koordinátákülönbség ideális mérőruddal, illetve órával végzett mérés közvetlen eredménye legyen. Ez a fölismerés nagy gondot okozott, mivel sokáig nem tudtam átlátni, hogy akkor egyáltalán mit is jelentenek a koordináták a fizikában. Ettől a dilemmától úgy 1912 körül szabadultam meg, a következő megfontolással.

Kell hogy legyen a tehetetlenség törvényének olyan megfogalmazása, amely egy igazi, „inerciarendszerben vett gravitációs mező” nélküli koordináta-rendszerben a tehetetlenség Galilei-féle megfogalmazásába megy át. Ez utóbbi kimondja: az olyan anyagi pontot, amelyre nem hat erő, a négydimenziós térben egyenes vonal, azaz legrövidebb vonal vagy pontosabban extrémális írja le. Ez a fogalom feltételezi az ívelem hosszának fogalmát, azaz a metrikát. A speciális relativitáselmületben a metrika – miként *Minkowski* megmutatta – kvázieuklideszi¹ volt, azaz az ívelem ds „hosszának” négyzete a koordinátadifferenciálok bizonyos kvadratikusság függvénye volt.

Ha nemlineáris transzformációval más koordinátákat vezetünk be, a ds^2 ugyan a koordinátadifferenciálok homogén függvénye marad, de a $g_{\mu\nu}$ függvények együtthatói már nem maradnak állandók, hanem a koordináták bizonyos függvényei lesznek. Matematikailag ezt úgy fejezzük ki, hogy a fizikai (négydimenziós) térnek Riemann-metrikája lesz. E metrika időszzerű extrémálisai határozzák meg azon anyagi pont mozgásegyenletét, amelyre a gravitációs erőn kívül más erő nem hat. E $g_{\mu\nu}$ metrika együtthatói egyszersmind megadják a gravitációs mezőt a kiválasztott koordináta-rendszerre vonatkozóan. Ezzel sikerült megtalálni az ekvivalencia-elv természetes megfogalmazását, és teljesen magától adódó föltevés volt, hogy ezt tetszőleges gravitációs mezőre kiterjesszük.

A fenti dilemma megoldása tehát a következő: nem a koordinátadifferenciáloknak kell fizikai jelentést tulajdonítani, hanem csak a hozzájuk rendelt Riemann-metrikának. Ezzel leraktuk az általános relativitáselmület alapját. Két problémát azonban még meg kellett oldanunk.

1. Ha egy mezőtörvény a speciális relativitáselmület szerinti kifejezését ismerjük, miként kell ezt átvinni a Riemann-metrika esetére?

¹ Manapság ezt a metrikát pszeudoeuklideszinek hívjuk, a fordító.

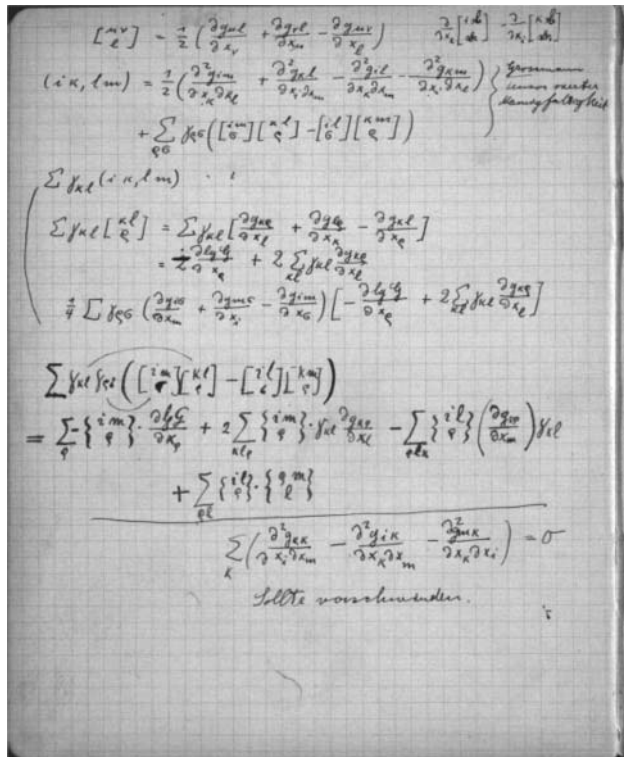
2. Melyek azok a differenciálegyenletek, amelyek magát a Riemann-metrikát – azaz a $g_{\mu\nu}$ -ket – határozzák meg?

Ezeket a kérdéseket dolgoztam 1912-től 1914-ig barátommal, *Marcel Grossmann*-nal. Úgy találtuk, hogy az

1. kérdés megoldásának matematikai eszköze már készen állt *Ricci* és *Levi Civita* infinitezimális differenciálkalkulusában.

Ami a 2. kérdést illeti, megválaszolásához nyilvánvalóan a $g_{\mu\nu}$ -kből képzett másodfokú invariáns differenciálkifejezésekre van szükség. Hamarosan rájöttünk, hogy ezeket *Riemann* már föllállította (görbületi tenzor). Az általános relativitáselmélet közzététele előtt két évvel már megtaláltuk a helyes gravitációs mezőegyenleteket, de nem tudtuk eldönteni, hogy fizikailag fölhasználhatók-e. Sőt, meg voltam győződve róla, hogy nem képesek számot adni a tapasztalatról. Általános megfontolás alapján még azt is hittem, hogy az általános koordináta-transzformációval szemben invariáns gravitációs törvényt nem lehet összeegyeztetni az okság elvével. Mindez téves elgondolás volt, és két évi nagyon kemény munkámba telt, mire 1915 végére erre rájöttem, és megtaláltam a kapcsolatot a csillagászati tapasztalat tényeivel, miután töredelmesen visszatértem a Riemann-féle görbülethez.

A már megszerzett tudás fényénél a szerencsésen elért eredmény szinte magától értetődőnek látszik, és bármelyik intelligens egyetemi hallgató nagyobb nehézség nélkül fölfogja. De csak az tudhatja, mit jelent



Einstein „Zürcher Notizen“-ből (© Héber Egyetem, Jeruzsálem).

évekig sötétben, sejtések közepette kutatni, feszült várakozással, a bizakodás és a csalódás váltakozásával, és végül az igazság feltárlásával, aki maga is átélte.

(*Illy József* fordítása)