

DR. VERMES MIKLÓS
Budapest, Jedlik Ányos Gimnázium

Einstein születésének 100. évfordulóján

Nevezetes tudományos évfordulók mindig voltak, de a tudomány rohamos haladásával matematikailag együtt jár, hogy a naptárban a jubiláris napok szükségképp megsűrűsödnek. Így a figyelem már csak az egészen kiemelkedőkre irányulhat. Ilyenre került sor ebben az évben, Einstein születésének 100 éves fordulójára. Magától értetődően a nagy mű és alkotója nem szorul rá folyóiratunk dicséretére, és ezért úgy szolgáljuk legjobban Einstein emlékét, hogy életútjának rövid felvázolása után ismertető jelleggel tekintjük át alkotásainak lényegét.

Einstein Albert 1879. március 14-én született a németországi Ulmban. Gyermekéveit Münchenben töltötte, majd a család Milánóba költözött. A zürichi műegyetemen végezte egyetemi tanulmányait, miután néhány nyelvből nagy nehezen pótérettségit kellett letennie. Bár híres tanárok hallgatója volt, elsősorban könyvekből tanulta meg az elméleti fizikát. Elvégezve az egyetemet egy évig középiskolai tanárként működött, mindkét fél nem nagy meglepődésére. Ezután 7 évig, 1909-ig Bernben a szabadalmi hivatal tisztviselője volt, és ezalatt, 1905-ben három művet alkotott, amelyek mindegyike elegendő volt ahhoz, hogy neve fennmaradjon. Az elsőben Smoluchowskival együtt a Brown-féle mozgást tanulmányozta, és kvantitatíve igazolta, hogy ez a jelenség a molekuláris hőmozgás velejárója; ezzel a molekulák létezésének egy objektív bizonyítékát szolgáltatva. Második műve a Planck-féle energiakvantumnak a fényelektromos jelenségre és a fénysugárzásra való alkalmazása volt; ezért kapott 1921-ben Nobel-díjat. A harmadikról, a speciális relativitáselméletről külön lesz szó.

Az 1909-es évtől kezdve Einstein Zürichben, Prágában, Berlinben élt mint egyetemi tanár, illetve kutatóintézeti igazgató. Közben, 1915-ben alkotta meg az általános relativitáselméletet. Ekkoriban már világhíres ember volt. A relativitáselmélet ezekben az években utcai, kávéházi, élclapi téma lett, mindenki beszélt és tréfálkozott róla, de rendkívül kevesen értették. A hitleri Németországban „betiltották”, de a hatóságoknak a természet törvényeit nem sikerült „kitranszformálni”, legfeljebb a tudósok színejavát. Einstein 1933-ban elhagyta Németországot, és letelepedett a New York melletti Princeton egyetemi városban. Világraszóló tudományos tekintélye volt, ennek alapján vett részt, az atomenergia vizsgálatát sürgető akcióban, amely egyrészt az atombomba kifejlesztéséhez, másrészt az atomenergia gyakorlati felhasználásához vezetett. Az atombomba következményeitől azután megrettent. Princetonban változatlanul figyelemmel kísérte a világ tudományos életét 1955. április 17-én bekövetkezett haláláig.

A speciális relativitáselmélet megértéséhez úgy férközhetünk legkönnyebben hozzá, ha úgy fogadjuk, mint a természet újonnan felfedezett törvényszerűségeinek összefoglalását. Az „elmélet” szó egyébként is idejét múlta. A kinetikus gázelmélet új korában tényleg elmélet volt, azóta már éppen olyan tapasztalati tény, mint bármely más megfigyelt természeti jelenség. Az ember, akár egyedileg egy csecsemőről van szó, vagy az egész emberiségről, a különálló jelenségek megfigyelésével kezdi, azután felismer egyformaságokat, összefüggéseket és a megfigyeléseket rendszerezi, absztrahál. Így alakul ki a logika, a matematika és a természettudomány, legalábbis kezdeti állapotában. Az ember azután hajlamos ezt a felépített rendszert „behunyt szemmel”, a gondolkodás belső dinamizmusával, széperzéskével folytatni, és azután megnézi (ha megnézi), a kigondolt folytatás egyezik-e a

valósággal. Ha igen, született egy nagy felfedezés, és ez sokszor bekövetkezik, ami alapján véve csodálatos. (Ha nem egyezik, illő elhallgatni.)

Tehát vannak tények, és azokat megfigyeljük. Az alkotott logikai rendszert megszokjuk, magától értetődőnek tartjuk. Azonban a megfigyelés eszközei finomodnak és felfedeződnek újabb természeti jelenségek, amelyek esetleg nem illenek az addigi tapasztalatok alapján már kialakított rendszerbe. Ilyenkor hangzik el a kiáltás: a józan ész alapján lehetetlen. De a tények megvannak, így a rendszerezésen, a megszokáson kell változtatni. Ilyen rendszeralkatrész az idő fogalma: nem tárgy, amit meg lehet találni (mint például egy sejtmagot vagy gént), hanem az események összefüggéséből elvont rendszerező fogalom, és így megtörténik, hogy megfigyelések finomodásával célszerű az időfogalom megalkotását, az idő mérését megreformálni. Lehet időt mérni homokórával, de a csillagos ég látszólagos forgásából levont időmeghatározási módszer célszerűbb, és így tovább. A speciális relativitáselmélet esetében is az történt, hogy az utóbbi évszázad igen pontos kísérletei a természet addig ismeretlen tulajdonságait tárták fel, amelyeket bele kellett foglalni a logikus rendszerbe. Erről lesz most szó.

Galilei az 1600-as években fedezte fel a természet egy nevezetes, alapvető tulajdonságát, az ún. Galilei-féle relativitási elvet. (Nem azonos az Einstein-félével.) Ez a természeti törvény így szól: sebességről csak két test kölcsönös állapotaként lehet beszélni, és az ilyen módon meghatározott adat egyformán tartozik mindkét testhez. Egyetlen test esetében a sebesség szó épp úgy használhatatlan, mint a házasság szó egyetlen ember esetében. Sötétben egy hajó sebességét meg lehet határozni például úgy, hogy hangsebességmérést végeznek el a hajó fedélzetén, és amennyiben az eredmény eltérést mutat a 330 m/s-tól, ebből a hajó sebessége kiszámítható. De csak a hang terjedését közvetítő levegőhöz képest. Közben esetleg fúj a szél. Az eljárás a Galilei-törvény egy példája. De mi van a fényvel? Felvillantott fényel végezve el a kísérletet, mit kapnánk a hajó sebességére nézve? Nyilván a fény terjedését közvetítő anyaghoz viszonyított adatot. De mi a fény terjedését közvetítő anyag, közeg? A levegő nem lehet az, hiszen a légüres téren is átmegy a fény. A kérdésre próbált választ adni az évezredes fény-éter elmélet. Feltételezett egy anyagot, a fény-étert, amely nagyon ritka, mindenütt átmegegy, mindenütt ott van és a fény ennek az anyagnak rugalmas rezgése. A fény-éter egyetlen szerepe az lett volna, hogy a fény terjedését lehetővé tegye.

Ezek után a teendő a következő: fénysebességmérést kell végrehajtani Földünkön a legkülönbözőbb időkben nappal, éjjel, nyáron és télen. Az eltérő értékekből azután kiderül, hogy merre mozog a Föld a mindenséget kitöltő fény-éterben. Természetesen az így kapott adat is két test kölcsönös sebessége, de igen érdekes adat. A kísérletet, a fénysebességméréssel egyenlő értékű Michelson-kísérletet 1880-tól kezdve a mai napig kb. százszor végezték el, a legkülönbözőbb módokon és mindinkább fokozódó pontossággal, és mindegyik egyértelműen ezt a választ adta: a sebesség zérus. Mintha a hangsebességgel mérő hajóskapitány gyorsan mozgó hajón ide-oda mérve mindig zérust kapna a hajó sebességére. Mit mondana a kapitány: a levegőnek semmi köze a hang terjedéséhez. És ha a levegőnek a hang közvetítésén kívül más szerepe nem volna, akkor azt mondaná: nincs levegő. Illetőleg észébe se jutott volna a levegőt kitalálni. Michelson kísérlete óta tudjuk: nincs fény-éter.

Michelson kísérletének és a hozzá hasonló egyéb kísérleteknek zérus eredménye a tapasztalat és az addig kialakított gondolati rendszer ellentmondását mutatta. Az egyeztetési próbálkozások folyamán Mach, Poincaré és Lorentz közel jártak a megoldáshoz, de a radikális megoldást, Einstein találta meg 1905-ben. A megoldás annyira a levegőben lógott, hogy valakinek abban az időben fel kellett fedeznie.

Einstein Albert felfedezte, hogy a természet a következő berendezésű, szerkezetű, tulajdonságú és a hosszúság és idő mérésére a következő eljárást javasolta. Készítenek igen sok méterrudat és órát teljesen egyforma kivitelben. Ezekkel egy laboratóriumon belül úgy

mérnek hosszúságot és időtartamot, mint eddig, e műveletek közben nem támad semmiféle ellentmondás. Ezután az órák és méterrudak felét átdobják egy másik laboratóriumba, amely az elsőhöz képest egyenes vonalú egyenletes mozgásban van. Ebben a második laboratóriumban az eszközökkel ugyanúgy dolgoznak hibátlanul, mint társaik az elsőben. A problémák akkor keletkeznek, ha ugyanazt a jelenséget a két egymáshoz képest egyenletes mozgásban levő laboratóriumból, koordinátarendszereiből vizsgálják. A laboratóriumokat, koordinátarendszereiket egymásba ágyazott, egymáson áthaladó két geometriai koordinátarendszer formájában kell elképzelni. Ha két esemény történik (most és itt felvillan egy piros lámpa, majd és ott egy zöld), akkor mindegyik koordinátarendszerben észlelik az esemény színhelyén a térbeli és időbeli adatokat óráikkal, méterrúdjaikkal. Az első laboratóriumban a piros lámpánál x_p és t_p adatokat, a zöldnél x_z és t_z adatokat, a másodikban X_p , T_p , illetve X_z , T_z adatokat. Mindegyik laboratóriumban az esemény helyén lenyomatot vesznek mindegyik eseményről. Az első laboratórium a távolságot $x_z - x_p$ nagyságúnak, az időtartamot $t_z - t_p$ nagyságúnak, a második laboratórium $X_z - X_p$ hosszát, illetve $T_z - T_p$ időtartamot figyel meg. Mindegyik meg van elégedve saját megfigyelésével. De ha elmondják egymásnak tapasztalataikat, akkor az egyik a másik hosszát k -szor rövidebbnek, időtartamát k -szor hosszabbnak találta, és fordítva is. Ilyen a természet, ez van! (Ún. Lorentz-transzformáció.) A híres k állandó:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

ahol v a két koordinátarendszer kölcsönös sebessége, c a fénysebesség. A k -szorzó értéke megszokott sebességeknél gyakorlatilag 1, például 10 km/s rakétasebességnél $k = 1,000\ 000\ 000\ 5$. A fénysebesség harmadánál $k = 1,06$, kétharmadánál $k = 1,34$. A Stanfordban működő elektrongyorsítóban az elektronok sebessége csak 0,000 03 %-kal kisebb, mint a fénysebesség és ekkor $k = 40\ 000$. Tehát a mindennapi életben a mozgó berendezésekről történő oda-vissza méréseknél egyforma hosszúságok, időtartamok adódnak, és ebből alakult ki az a „józan ész” magatartás, amely szerint a rövidülés, időnyúlás érthetetlen. Ha a csecsemőket a gyerekkocsival a fénysebesség felével sétáltatnák, felnőttkorukban nem értenék, miért kell erről a dologról vitatkozni. A gyorsítót tervező, üzemeltető mérnök, legalább is műszeradatain keresztül látja a természetnek ezt a tulajdonságát.

A speciális relativitáselméletből azonnal következik a Michelson-kísérlet zérus sebessége. Ez az elmélet első bizonyítéka. Ismeretes a kozmikus sugárzás folytán a sztratoszférában keletkező mű-mezonok élettartamának 12-szeres megnyúlása stb. Az időnyúlást 1971-ben Hafele és Keating egy a Földet körülutazó repülőgépen észlelték, $2,5 \cdot 10^{-7}$ másodpercet tett ki, ami atomórával könnyen és pontosan mérhető. További bizonyítékokat ad és súlyos következményekkel jár Einstein gondolatrendszerének továbbépítése. Az előbbi k -szoros eltérésekből, az ún. Lorentz-transzformációból számítással, vagyis a gondolatépület folytatásával következik, hogy egy test tömegét az egyik rendszerből k -szor nagyobbak észlelik, mint a másiktól, és viszont. Ezt a következtetést 80 év óta pontosan igazolják a kísérletek. További elméleti következmény: egy test tömege egyenesen arányos összes energiátartalmával, ha a test energiáját ΔE -vel növeljük, ezzel arányban tömege is növekszik, az arányossági szorzó $1/c^2$: $\Delta m = \Delta E / c^2$.

(A tömeg a test tehetetlenségének a nagyságát jelenti, mechanikai mérésekből meghatározható módon; minden eddigi tapasztalat szerint ezzel egyenesen arányos gravitációs hatása.) Így a test tömege és energiája ugyanazon tartalmi dolog két különböző tulajdonságbeli megnyilvánulása. Talán arra is el lehetünk készülve, hogy egy jövőbeli egységreform a kilogramm és joule közül törli az egyiket (mint a kalóriánál és joule-nál történt), akkor majd a

háziasszony a piacon néhány millió terajoule burgonyát vásárol be. Ez jogos, hiszen az élelmiszereket nem tehetlenségük, hanem energiataralmuk miatt fogyasztjuk el.

Feltétlenül meg kell említeni a speciális relativitáselmélet eredményeinek egy olyan megszövegezését, amely elméletileg igen hasznos volt. Ha mozgó laboratóriumok egymás közti adataikat hasonlítják össze, akkor hosszban k -szor rövidebbet, időtartamban k -szor hosszabbat észlelnek. Minkowski 1908-ban a következőt ajánlotta: két esemény alkalmával ne mérjenek az egyik laboratóriumban Δs hosszát és Δt időtartamot, amiket azután a másik laboratóriumban $\Delta s/k$ -nak és $k \cdot \Delta t$ -nek észlelnek, hanem számítsák ki (a távolságképlet analógiájaként) ezt a mennyiséget:

$$\sqrt{\Delta s^2 - c^2 \cdot \Delta t^2}$$

Róla kimutatható, hogy mindkét laboratóriumban ugyanakkora. E mennyiség neve: intervallum, tartalmazza a tér és idő szintézisét. A mi eddig kialakult külön tér és külön idő fogalmunk ugyanannak az intervallum néven nevezett valóságos dolognak csak vetületei és mint ilyenek csak részizgazságok, amint a citrom is innen nézve kerek, onnan nézve hosszúka, igazi formája tapogatva nyilvánul meg. Ha csecsemőinket a fénysebesség felével sétáltatnánk, bennük az intervallum fogalma alakulna ki, mert ezt látnák a sebességtől függetlenül állandónak, változatlanul, és az iskolában kellene őket keservesen arra megtanítani, hogy mik az intervallum metszetei, vetületei, a külön tér és külön idő (ha ezt az akkori tanterv majd megengedi).

A speciális relativitáselméletet minden részletében és minden következményében pontosan igazolta a tapasztalat, és eredményeinek az atomfizikában gyakorlati haszna van. Az általános relativitáselmélet szerepe más, helyes neve a gravitáció elmélete volna és nehezen jósolható meg, Einstein inspirációja nélkül mikor jött volna létre.

Ha elhelyezünk a térben egy tömeget, például a Földet, akkor a környezetébe helyezett kis kavics esést végez. Newton óta ezt a jelenséget a következő szöveggel kell kísélni: a tömegek között a tömegekkel egyenesen arányos, a távolság négyzetével fordítva arányos erő működik, és ez az erő a követ az $F=m \cdot a$ törvény szerint gyorsítva mozgatja. Az Einstein-féle általános relativitáselmélet szerint ugyanehhez a megfigyelt jelenséghez a következő szöveget kell mondani. A térbe helyezett tömeg megváltoztatja maga körül a tér mértani tulajdonságait, „görbültté” teszi. Ez azt jelenti, hogy nem az Euklidész-féle geometriai törvényeket találjuk érvényesnek, hanem általánosabbakat, amilyen például a Bolyai-geometriához hasonló Riemann-geometria. De nem a háromdimenziós x, y, z koordinátájú, hanem az x, y, z, ict koordinátájú Minkowski-térről van szó, amelyben egy vonal tulajdonképpen mozgástörvényt jelent. Einstein megadta ennek az intervallumfogalmat használó térnek felsőbb differenciálgeometriai egyenleteit, amelyek kifejezik, miként görbül, tér el az euklidészitől a tér a Föld tömege következtében. Ebben a tömeg által görbített Minkowski-térben vannak geodétikus görbék, azaz olyanok, amelyek ívhossza két pont között (természetesen intervallumban mérve) a legrövidebb. Ezek a vonalak e térnek az egyenesei. Ha odatesszük a követ a Föld mellé, akkor a kő ezen a geodétikus görbén, azaz egyenesen magától, tehetlensége folytán halad tovább. Ez az ő természetes viselkedése, mint a légpárnás kísérletben a meglökött. kocsie. Einstein úgy alkotta meg a Minkowski-tér Riemann-geometriájának Földtömegtől függő görbületét megadó egyenleteit, hogy a leírt eljárással kiszámítva a kő mozgásának lefolyása olyannak adódik, amit szabadesésként megfigyelünk. Tehát az általános relativitáselmélet szerint nincs gravitációs erő, és az esést úgy kell szöveggel kísélni, amint itt le van írva.

Mit kell mindehhez még elmondani?

1. Gyönyörűen következik mindebből, hogy a tehetetlen és súlyos tömeg szigorúan arányos, vagyis a régi gravitációs erőtvény arányossági szorzója független az anyagi minőségtől. Ezt bizonyították többek között Eötvös, Renner, Dicke és mások rendkívül pontos kísérletei. Hiszen ha magától mozog valami végig egy vonalon, a mi egyenesként szereplő geodétikus görbénken, akkor igazán mindegy, hogy az a test miből van.

2. Egyébként tetszés szerinti volna, hogy az esést Newton vagy Einstein szerint mondja el valaki. De vannak jelenségek, ahol az Einstein-féle felfogás szerint más következik, mint a Newton-törvényből, és ékkor kísérleti bizonyítékok hozhatók fel az általános relativitáselmélet mellett. Ilyenek: a bolygók perihéliumelmozdulása, a vöröseltolódás a fénykibocsátásnál, a fénysugár eltérülésének mértéke a Nap mellett. Az ide tartozó megfigyelések túrhető pontossággal igazolják az általános relativitáselméletet.

3. Az egyenletek matematikailag annyira bonyolultak, hogy a legegyszerűbb esetekben is közelítő módszerekkel lehet csak dolgozni. (Egyébként a kvantumkémiaiban is így van.)

4. Az egyenletek pontos alakját egyesek még vitatják.

Ami talán a leginkább lényeges, az elmélet szépsége mellett, hogy az általános relativitáselmélet az asztrofizikusok mindennapi kenyere. Enélkül sem a véges-határtalan mindenség, sem ennek tágulása, sem a fekete lyukak stb. nem volnának tárgyalhatók. Nem csoda, hogy egyesek Einstein gravitációs elméletének megalkotását Kopernikusz életművéhez hasonlítják.