

EINSTEIN HATÁSA A HUSZADIK SZÁZAD FIZIKÁJÁRA

Nagy Károly

az MTA rendes tagja, professor emeritus
ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék – gluon@freemail.hu

Az ENSZ közgyűlése a 2005. évet az UNESCO javaslatára a Fizika Évének nyilvánította. Az év kijelölésénél az játszott szerepet, hogy száz évvel ezelőtt, 1905-ben Albert Einstein öt olyan tudományos közleményt jelentetett meg az *Annalen der Physik* szakfolyóiratban, amelyek jelentős mértékben befolyásolták a huszadik század fizikáját és ezáltal az anyagi világról alkotott képünket. Ezek közül egyik tanulmány a speciális relativitás elméletét tartalmazza, a másik pedig az elektromágneses sugárzás energiájának és impulzusának a kvantumosságát, vagyis részecske jellegét vezeti be. A tudományos közösség mindenütt a világon – így hazánkban is – megemlékezik Einsteinról és ezekről a száz év előtti tudományos dolgozatokról. A Magyar Tudományos Akadémia idei rendes évi közgyűlésén Horváth Zalán akadémikus tartott ünnepi előadást, amelyben Einstein életét, az említett 1905-ös tanulmányokat és azok jelentőségét ismertette. A következőkben ehhez kapcsolódva azt próbálom érzékeltetni, hogy Einstein munkássága mily nagy mértékben határozta meg a fizika máig ható fejlődését. A megemlékezést a már említett centenáriumi eseményeken kívül az is motiválja, hogy áprilisban volt ötven éve, hogy Einstein eltávozott az élők sorából. Tudományos munkássága éppen fél évszázadot fog át, de századokra meghatározta a fizika alakulását.

A 19. század vége felé úgy tűnt, hogy a fizika nagy kérdéseire a tudomány megnyugtató választ adott. A testek mozgását az

Isaac Newton által megalapozott, ún. klasszikus mechanika a megfigyelésekkel egybehangzóan írta le. Példaként lehet említeni, hogy az általános tömegvonzás ugyancsak tőle származó erőtvényének alapján a mozgástörvények matematikai egyenleteiből bámulatos eleganciával lehetett a bolygók mozgását elméletileg tárgyalni. Két-három soros levezetéssel kiadódnak a csillagászati megfigyelésekből korábban már ismert Kepler-törvények, és az is, hogy ezek érvényességi határa meddig terjed. A harmadik Kepler-törvény ugyanis pontosításra szorul. Az elmélet tökéletes kimunkálásában a korszak legkiválóbb matematikusai is részt vettek. A mintegy kétszáz évig egyeduralgó mechanika mellé a 19. század közepén felsorakozott az elektromos és a mágneses jelenségeket, valamint az optikát egységes keretbe foglaló *Maxwell*-féle elektrodinamika, amely igen széles jelenségkört bámulatos pontossággal ír le a tapasztalattal megegyezően. Ismerték már az energia megmaradásának általános tételét, valamint a hőtán első két főtételét, amelyek a termodinamikai folyamatok fenomenológiai leírását tették lehetővé. A fizikai megismerésnek *Galileo Galileivel* és *Newtonnal* kezdődött csodálatos folyamata kiépítette az ún. *klasszikus fizikát*, amelyről úgy tűnt, hogy az élettelen természet jelenségeit nemcsak leírni tudja, de megmagyarázni is képes. A fizika gránitalapokon álló épülete a befejezett mű jellegét mutatta. Ez az egész így együtt olyan csodá-

latos volt, hogy szinte elbűvölte a természet törvényszerűségei iránt fogékony embereket. *Lord Kelvin* ezt úgy jellemezte, hogy „csak néhány felhőcske árnyékolja be a fizika tiszta kék eget”. A korrall foglalkozó fizikai előadásokban gyakran emlegetjük *Philipp von Jolly* német fizikaprofesszort, aki a hozzá tanácsért forduló fiatal *Max Planck*nak azt mondta, hogy a fizikában már nem sok kutatható akad, nem érdemes erre adnia a fejét. A teljesség érzetét nem nagyon zavarta a *Ludwig Boltzmann* által következetesen vallott atomhipotézis sem, hiszen az arra épített kinetikus gázelmélet, majd statisztikus mechanika reprodukálta a fenomenológiai hőtán eredményeit. Volt még néhány jelenség ugyan, amelyek értelmezése hiányzott a klasszikus fizika épületének a teljes befejezéséhez, de abban senki nem kételkedett, hogy ezek hamar megoldódnak, és megerősítik az elmélet megingathatatlannak tűnő teljességét.

A klasszikus fizika megoldatlan problémái

Mik voltak ezek a klasszikus fizika csillogását beárnyékoló felhőcskék? Csak a leglényesebbeket említve, ilyen volt például a fényelektromos jelenség, a gázatomok vonalas színeképe, a szilárd anyagok fajhőjének csökkenése a hőmérsékleti zérusponthoz közeledve. A legnagyobb tudományos érdeklődést azonban a hőmérsékleti sugárzás energiasűrűségének a rezgésszámtól és a hőmérséklettől való függése váltotta ki. Ez a tapasztalat szerint ellentétben állt a Maxwell-elmélet és a termodinamika alapján számított eloszlással. A kis rezgésszámokra elég jó volt az egyezés, de a nagyobb rezgésszámok tartományában az eltérés igen nagy. A mérések azt mutatták, hogy az energiasűrűség csökken a rezgésszám növekedésével, és zérushoz tart, ha a rezgésszámot a végtelenig növeljük. Ezzel szemben az elmélet szerint az energiasűrűségnek a rezgésszám négyzetével arányosan kellene nőnie.

A másik megoldatlan probléma az ún. *fényelektromos jelenség* volt. Képzeljünk el egy légritkított üvegcsővet, amelynek két végébe egy-egy fémlemezt, ún. katódot és anódot rögzítünk, és azokat a csövön kívül árammérő közbeiktatásával áramforrás sarkaira kötjük. Mivel a légritkított cső nem vezeti az elektromos áramot, az árammérő semmit nem mutat. Ha viszont a katódot fényvel világítjuk meg, áram indul meg az áramkörben. Ennek erőssége arányos lesz a megvilágító fény intenzitásával, de független annak rezgésszámától. Másrészt, a katód anyagára jellemző bizonyos rezgésszám fölött az áram megindul, bármilyen gyenge is a beeső fény intenzitása. E határrezgésszám alatt pedig akkor sem kapunk áramot, ha a fény intenzitását növeljük. A Maxwell-féle fényelmélet nem tudott magyarázatot adni a megfigyelt jelenségre, mert eszerint az áramnak csak hosszabb idő elteltével kellene megindulnia, továbbá az is érthetetlen volt, hogy a határrezgésszám alatt miért nem folyik áram, ha a fény intenzitását növeljük.

Még egy jellegzetes példát említek, amelyet szintén nem sikerült a klasszikus fizika törvényei alapján értelmezni, és a megmagyarázásában Einsteinnek volt meghatározó szerepe. A szilárd anyagok fajhőjének a hőmérséklettől való függéséről van szó. A hőtán harmadik főtételéből következik, hogy a szilárd testek fajhőjének zérushoz kell tartania, ha a hőmérsékletet az abszolút zérusponthoz közelítjük, de hogy milyen ez a hőmérséklettől való függés, arról a fenomenológiai hőtán semmit sem tudott mondani. Az atomhipotézisre alapozott statisztikus mechanika – amely egyébként szép eredményeket ért el a termodinamika mikrofizikai értelmezésében – a szilárd anyagok fajhőjére a hőmérséklettől független állandó értéket ad.

Az említett problémák nem tűntek olyan súlyosaknak, hogy bárki is arra gondolt volna, hogy ezekkel a klasszikus fizika nem tud megbirkózni. Később azonban kiderült, hogy ezek

a fizika huszadik századi forradalmának csíráit rejtik magukban.

Volt azonban a fizikának még az említetknél is alapvetőbb problémája, amely Newton óta foglalkoztatta ugyan a nagy gondolkodókat, de a megismerés folyamatát háromszáz éven keresztül nem befolyásolta különösebben. Ez az elvi kérdés a *vonatkoztatási rendszerekkel* van kapcsolatban. A fizikában a jelenségek jellemzésére olyan fogalmakat használunk, amelyek mérhető mennyiségekkel adhatók meg. Ezekről a kezdetben egymástól független fogalmakról a részletesebb vizsgálódás során kiderül, hogy egyesek kapcsolatban vannak egymással. Ezeket a kapcsolatokat nevezzük a fizikában *törvényeknek*. Megfogalmazásuk matematikai egyenletek alakjában történik. Mivel a jelenségek térben és időben játszódnak le, ezek a mennyiségek a tér pontjainak koordinátáitól és az időtől függenek. Egyértelmű megállapításokat csak akkor tehetünk, ha megmondjuk, hogy a koordinátákat mihez viszonyítjuk. Másként kifejezve, megadjuk azt a vonatkoztatási rendszert, amelyben ezeket a koordinátákat mérjük. Például, megmérjük a teremben egy pontnak a három faltól mért merőleges távolságát. Ez a három adat egyértelműen meghatározza a pont helyét a teremben. A vonatkoztatási rendszer problémája már az alaptörvények megfogalmazásánál jelentkezik. Newton szerint létezik egy kitüntetett vonatkoztatási rendszer, és ebben érvényesek a mechanika mozgástörvényei. Ezt a rendszert ő *abszolút koordináta-rendszernek* nevezte el. Úgy is lehet fogalmazni, hogy az abszolút térben lehorgonyozott koordináta-rendszerben érvényesek ezek a mozgásegyenletek. Könnyen be lehet látni azonban, hogy a mechanikai jelenségek ehhez a kitüntetettnek gondolt rendszerhez képest egyenes vonalú, egyenletes mozgást végző bármely vonatkoztatási rendszerben ugyanúgy játszódnak le. Ennél fogva az abszolút koordináta-rendszer fikció,

hiszen semmi sem tünteti ki a végtelen sok lehetséges rendszer közül. Ezt a tényt először Galilei ismerte fel, ezért az irodalom *Galilei-féle relativitási elvnek* nevezi.

Az elektromágnesség Maxwell-elméletének megalkotása után, a 19. század közepén úgy látszott, hogy optikai kísérlettel meghatározható az abszolút vonatkoztatási rendszer. Kezdetben ugyanis úgy gondolták, hogy az elektromágneses hullámok terjedéséhez – a hanghullámokhoz hasonlóan – valamilyen közvetítő közegre van szükség. Ehhez adva volt a fénytanban már korábban *Augustin-Jean Fresnel* által bevezetett, ún. *világéter*, amelyről azt gondolták, hogy a világmindenséget kitöltő finom anyag, amelynek rezgési állapota terjed tova az elektromágneses hullámban. A feltételezett éter alapja lehet a Newton-féle abszolút vonatkoztatási rendszernek, ugyanis abszolútnak azt a rendszert tekintették, amelyben az éter nyugszik. E felfogás szerint az elektrodinamika alapegyenletei (a Maxwell-egyenletek) és a mechanika mozgástörvényei erre, az éterhez rögzített rendszerre vonatkoznak. Ebben az elektromágneses hullám izotrop módon terjed, minden irányban ugyanakkora sebességgel. A hozzá képest egyenes vonalú, egyenletes mozgást végző másik rendszerben már más a hullám sebessége, és a hullámterjedés nem is izotrop. Az éterhipotézissel tehát megvalósulni látszott az abszolút rendszer kitüntetettsége, mert csak ebben izotrop a hullámterjedés. Mivel az elméleti következtetések igazságtartalmát a tapasztalat dönti el, itt is ehhez fordultak. Maga James Clerk Maxwell javasolta az *Albert Michelson* által elvégzett optikai kísérletet, amely hivatott volt dönteni az éterhipotézis realitásáról. A részletektől eltekintve, csak megemlítjük, hogy a fényterjedés az éterhez képest mozgó vonatkoztatási rendszerben is izotropnak adódott. A kísérlet negatív eredményét *Hendrik Lorentz* azzal magyarázta, hogy az éterben mozgó interferométer karja

a mozgás irányában megrövidül, és ezért lesz a mozgó rendszerben is izotrop a fényterjedés. Jellemző a kor világszemléletére, hogy a fizikus generációk tudatában olyan mélyen gyökerezett az abszolút vonatkoztatási rendszerbe vetett hit, hogy amikor a tapasztalat ezt nem erősítette meg, *ad hoc* feltevésekkel próbálták kiküszöbölni az elmélet és a tapasztalat között mutatkozó ellentéteket.

A kvantumhipotézis

Az említett problémák végső soron a klasszikus fizika teljesítőképességének határát jelezték, de egyáltalán nem vetettek ányékot annak csodálatos építményére. Azt mutatták inkább, hogy az a régi fogalomrendszeren belül nem tökéletesíthető tovább, *zárt elmélet* a maga teljességében.

Az új fizika felé vezető úton az első lépést Max Planck tette meg, amikor a hőmérsékleti sugárzás energiaeloszlásának problémáját a *kvantumhipotézis* bevezetésével oldotta meg. Mi e hipotézis lényege? Planck egy teljesen tükröző falakkal ellátott üregben kialakult elektromágneses sugárzás egyensúlyi állapotát tanulmányozta. Az egyensúlyi állapothoz szükséges, hogy legyen az üregben egy test, amely a sugárzás forrása, és időegység alatt átlagosan annyi energiát sugároz ki az üregbe, mint amennyit elnyel. Azt már *Gustav Kirchhoff* bebizonyította, hogy az egyensúlyi állapot független attól, hogy milyen test bocsátja ki és nyeli el a sugárzást. Planck ezt felhasználva olyan testet választott, amelyre a számítás könnyen elvégezhető. Ilyennek találta a lineáris oszcillátort. Ez egy *m* tömegű, harmonikus rezgő mozgást végző tömegpont. A klasszikus fizika szerint az oszcillátor energiáját a rezgő tömegpont kitérése és sebessége határozza meg. Ezek az időben folytonosan változó mennyiségek. *A tapasztalattal megegyező eredményre azonban csak akkor jutunk, ha elvetjük azt a több évszázados felfogást, hogy az energia folytonosan változó mennyiség.* Planck saját ötleteként

próbálkozott meg azzal a feltevéssel, hogy az oszcillátor energiája nem folytonos, hanem egy elemi kvantumnak egészszámtű többszöröse. Az energiakvantum nagyságát arányosnak vette az oszcillátor rezgésszámával. Az arányossági tényezőt *h*-val jelölte, és *hatáskvantumnak* nevezte, mivel hatás dimenziójú mennyiség. Értékét úgy választotta meg, hogy az elméleti eloszlás megegyezzen a tapasztalattal. Ez a feltevés lett a kiindulópontja a huszadik század egyik leghatásosabb fizikai elméletének, a *kvantummechanikának*. Planck a klasszikus fizika fogalomrendszerén nevelkedett nagy tudású fizikus volt. Szemléletét ez alakította ki, ezért az energia folytonosságáról sokáig nem tudott lemondani. Az oszcillátorra tett kvantum feltevést évekig munkahipotézisnek tekintette, és meg volt győződve arról, hogy a valóságos folyamatokban az energia kibocsátása és elnyelése folytonosan megy végbe.

Ekkor lépett a fizika színpadára a berni Szabadalmi Hivatal egyik tisztviselője, akinek az említett problémák mindegyikéhez volt mondanivalója. Amit mondott, az olyan hatással volt a fizika fejlődésére és a tudományos gondolkodásra, hogy ahhoz mérhető talán csak *Werner Heisenberggel* kapcsolatban ismer a huszadik század. Ez az addig ismeretlen személy *Albert Einstein* volt, aki a zürichi egyetemen végzett tanulmányai alatt egyáltalán nem vonta magára tudásával tanári figyelmét. Ezért aztán az egyetem elvégzése után nem kínáltak fel számára egyetemi tanársegédi állást, ami akkor egyetem módja volt a tudományos pályán való elindulásnak. Egyetemi tanulmányait 1900-ban fejezte be. Éppen akkor, amikor Planck a kvantumhipotézissel megdöbbentette a tudományos világot. Einstein kétévi házitanítószkodás után a berni Szabadalmi Hivatalban kapott tisztviselői állást. Az egyetemi intézetek inspiráló légkörétől távol, csendes magányában gondolkodott a bevezetőben említett problémákon, és 1905-ben a már említett öt

tanulmány közül három is robbanásszerűen hatott a fizikával foglalkozók körében. Ezek a dolgozatok a fény kvantumosságával, a Brown-mozgással és a speciális relativitás elméletével foglalkoztak.

A sugárzás kvantumelmélete

A kvantumhipotézis fizikai jelentőségét, vagyis hogy a sugárzás energiája kvantumos szerkezetű, Einstein ismerte fel. Ennek alapján sikerült a tapasztalattal megegyezően megmagyaráznia a már említett fényelektromos jelenséget. A magyarázat igen egyszerű és szemléletes. A fény energiája $h\nu$ energiakvantumok összességéből áll. (Itt h a hatáskvantum, mai nevén a Planck-állandó, ν pedig a fény rezgésszáma.) A fém felületén levő atom a ráeső fényből elnyel egy energiakvantumot, ezáltal egyik elektronja akkora energiát vesz fel, hogy kiszakad az atom kötelékéből. A fémre eső fénykvantum $h\nu$ energiája fedezi a kilépéshez szükséges munkát és az elektron mozgási energiáját. Einstein a fényelektromos jelenség elméleti magyarázatáért kapta meg 1921-ben a fizikai Nobel-díjat.

Einstein a fényenergia kvantumos szerkezetének kijelentése mellett a kvantumosságát annak impulzusára is kiterjesztette, miszerint a sugárzás impulzusa is kvantált, és pedig $h\nu/c$ nagyságú impulzuskvantumok összességéből áll. A sugárzás energia- és impulzuskvantumait *fotonoknak* nevezzük. A fotonnak tehát – Einstein nyomán – $h\nu$ energiája és $h\nu/c$ impulzusa van. Az elektromágneses sugárzásnak ilyen értelemben részecskejellege is van. A fény kibocsátásakor és elnyelésékor ez a részecskejelleg érvényesül, mert az energia $h\nu$ adagokban emittálódik és abszorbeálódik. Másrészt az interferenciánál és elhajlásnál a hullámtermeszét nyilvánul meg. Ezt az egymást kiegészítő, másként kifejezve, *komplementersajátság*ot nevezi a fizikai szakirodalom a fény kettős természetének.

A sugárzás részecskejellegeinek meggyőző kísérleti bizonyítéka az *Arthur H. Compton* által 1923-ban elvégzett szórás kísérlet. A Compton-szórásról van szó, hogy elektromágneses sugárzás, például röntgensugár szóródik könnyű elemekből álló anyagon, és közben megváltozik a szórt sugárzás rezgésszáma a beesőhöz képest. Ugyanakkor a könnyű elemből elektronok repülnek ki. A jelenség egyszerűen és szemléletesen értelmezhető és magyarázható a sugárzás részecskejellege alapján. A beeső foton (mint részecske) az atom elektronjával ütközik, ekkor energiájának egy részét átadja az elektronnak. Nagy rezgésszámú sugárzás esetén az elektron kötési energiája elhanyagolható a foton energiája mellett, és így a jelenség úgy fogható fel, mintha a foton szabad elektronnal szóródna. Az energia- és impulzustételből kiszámítható a sugárzás rezgésszámának megváltozása, amely jól egyezik a kísérleti eredményekkel. Az Einstein-féle fotonhipotézis a múlt század húszas éveinek vége felé kidolgozott kvantumelektrodinamika keretein belül elméleti és számtalan kísérleti megerősítést nyert.

Tudománytörténeti érdekességként megemlítem, hogy amikor 1913-ban Max Planck, *Walter Nernst*, *Heinrich Rubens* és *Emil Warburg* Einsteint a Porosz Tudományos Akadémia tagjainak sorába ajánlották, a munkásságát méltató sorok mellett az is szerepelt, hogy „spekulációiban néha szeret túllőni a célon, mint például a fénykvantumhipotézisében, ezt azonban nem szabad a terhére felróni”. Ez szépen mutatja, hogy az energia kvantumos voltát feltételező kvantumhipotézist nehezen fogadták el a kor vezető fizikusai. Maga Planck is csak jó pár évvel később, Einstein munkájának nyomán ismerte fel feltevésének forradalmi jelentőségét, és hogy az nem csupán munkahipotézis, hanem abban a természet egyik igen jelentős fizikai sajátsága mutatkozik meg.

Az elektromágneses sugárzással Einstein később is igen behatóan foglalkozott. Az a kérdés izgatta, hogy milyen e sugárzás valódi mechanizmusa. A sugárforrásként szolgáló oszcillátor energiája kvantált, vagyis a $h\nu$ energiakvantum egész számú többszörösét veszi fel. A két szomszédos energiaszint különbsége tehát $h\nu$. Gondoljuk el, hogy N_1 számú oszcillátor van az E_1 és N_2 számú az E_2 energiájú állapotban. Tegyük fel, hogy $E_1 > E_2$. Elvben valamennyi oszcillátor átmehet az alacsonyabb energiájú állapotba $h\nu$ energiájú foton kibocsátásával. A valóságban nem ez következik be, hanem adott idő alatt az oszcillátoroknak csak egy bizonyos része vesz részt az átmenetben. Ezért Einstein a jelenség magyarázatához bevezette az *átmeneti valószínűség* fogalmát, amely megadja azoknak az oszcillátoroknak a hányadát, amelyek időegység alatt az alacsonyabb energiájú állapotba mennek át. Az átmenetben részt vevő oszcillátorok száma az átmeneti valószínűségnek és a kezdeti állapotban levők N_1 számának a szorzatával lesz egyenlő. A sugárzás hatására az alacsonyabb energiájú oszcillátorok egy része foton elnyelésével magasabb energiájú állapotra kerül. Ebben a fordított folyamatban részt vevő oszcillátorok száma arányos N_2 -vel, a sugárzás energiasűrűségével és az átmenet valószínűségével. Első pillanatra azt gondolnánk, hogy az egyensúly feltétele e két szám egyenlősége. Ez azonban nem vezet a Planck-törvényre. Einstein felismerte, hogy egy harmadik folyamat is van, nevezetesen a sugárzás hatására bekövetkező, ún. *indukált emisszió*. Az egyensúly feltétele tehát az, hogy e kétfajta emisszióban időegység alatt átlagosan részt vevő oszcillátorok száma egyezzen meg az abszorpcióban részt vevők számával. Ez a feltétel igen egyszerűen vezet a Planck-féle sugárzási törvényhez, ha feltesszük, hogy az indukált emisszió és indukált abszorpció átmeneti valószínűségei megegyeznek egymással, másrészt, ha az

N_1 és N_2 számokat a *Boltzmann-statisztika* alapján számítjuk. A Planck-törvénynek ez a levezetése egyrészt a legegyszerűbb, másrészt fizikai tartalmát tekintve a leggazdagabb. Nem hagyhatom említés nélkül, hogy az indukált emisszió jelensége képezi a mára oly széles körben igen hatásosan alkalmazott *lézerek* fizikai alapját.

Az átmeneti valószínűség fogalmának bevezetésével Einstein a sugárzás mechanizmusának leglényegesebb kvantumfizikai törvényszerűségét ismerte fel. A később kidolgozott kvantummechanika és az erőterek kvantumelmélete ma is e fogalom felhasználásával írja le a kvantumállapotok közötti átmeneteket. A kvantummechanika állapotfüggvényének *Max Born*tól származó értelmezése is a valószínűség fogalmán alapszik. Megfejtetlen rejtélye a fizikatörténetnek, hogy Einstein, aki először vezette be a valószínűség fogalmát a kvantumelméletbe, annak statisztikus értelmezésével élete végéig nem tudott egyetérteni. Fizikus körökben közismert a mondása, miszerint nem hiszi, hogy az Úristen kockajátékos lett volna, amikor a világot teremtette. A szakemberek számára igazi intellektuális élmény olvasni azokat a vitákat, amelyek Einstein és a kvantummechanika ún. koppenhágai értelmezésének megalkotói, különösen *Niels Bohr* és fiatal tanítványai (*Heisenberg* és *Wolfgang Pauli*) között folytak a múlt század húszas éveiben. E viták központi személyisége Einstein volt. Sorra találta ki azokat a gondolatkísérleteket, amelyekkel próbálta megcáfolni a koppenhágai értelmezést. A tapasztalat nem őt igazolta.

A közelmúlt egyik fizikai aktualitása indokolja, hogy megemlítssem az indiai származású *Sattindranath Bose* nevét, aki a sugárzást Einstein nyomán fotongáznak tekintette, és feltételezte, hogy a fotonok nem különböztethetők meg egymástól. (A fénykvantumok megkülönböztethetőségét először 1911-ben *Wladyslaw Natanson* lengyel

fizikus állította.) Ezek alapján a statisztikus mechanika módszereivel legegyszerűbben jutott a Planck-törvényhez. Dolgozatát még a közlés előtt elküldte Einsteinnek, aki Bose módszerét ideális gázra alkalmazta, és ennek alapján jött rá a Bose–Einstein-kondenzáció néven ismert kvantumfizikai jelenségre. Ennek lényege, hogy egy bizonyos kritikus hőmérséklet alá hűtve a gázt, a gázmolekuláknak egy hányada a kvantummechanikai alapállapotba kerül. Az alapállapotban levő molekulák összessége a Bose–Einstein-kondenzátum. Ennek kísérleti kimutatását jutalmazták 2001-ben fizikai Nobel-díjjal.

A speciális relativitás elmélete

Einstein legnagyobb alkotása a relativitáselmélet. A fizika fejlődésére és a tudományos gondolkodásra kifejtett hatását tekintve csak a kvantumelmélet mérhető össze vele. Utóbbi azonban a huszadik század nagy fizikusainak együttes munkájával nyerte el mai formáját, és így vált a mikrovilág fizikájának elméletévé – amiben egyébként Einsteinnek is fontos szerepe volt –, a relativitáselmélet viszont egyedül Einstein alkotása. Különösen igaz ez az általános relativitásra. Ezt maga Einstein is így értékelte, amikor 1915-ben a következőképpen nyilatkozott róla: „Az én mágneses dolgozatomat (az Einstein–de Haas-effektusról van szó) bárki meg tudta volna csinálni, de az általános relativitás elmélete egészen más lapra tartozik. Hogy itt célt értem, életem legnagyobb beteljesedését jelenti, ha nincs is szaktárs, aki ennek az útnak szükségességét és mélységét mindmáig felismerte volna.” A megalkotása óta eltelt évszázad, illetve (az általános relativitásra gondolva) kilenc évtized fizikai kutatásai csak megerősítették annak igaz voltát. Egyetlen tétele és következménye sem szorult kiigazításra. A körülötte kezdetben támadt viták a tapasztalat bizonyító hatása alatt fokozatosan elcsendesültek, és az elmélet új fogalmai a világról alkotott

képünk szerves részévé váltak, radikálisan megváltoztatva az anyagi világra vonatkozó tudományos képünket.

Einstein egész tudományos tevékenységére jellemző a klasszikus fizikával szemben tanúsított legtökéletesebb elfogulatlanság. A Michelson-kísérlet negatív eredményében megmutatózó kísérleti tapasztalatot fenntartás nélkül elfogadva, arra a következtetésre jut, hogy a fényterjedés sebessége a Földdel együtt mozgó rendszerben is c , és terjedése itt is izotrop. A Föld keringése a Nap körül nem létesít észlelhető tehetetlenségi erőt, a fellépő centrifugális erő mérhetően kicsi, és ezért a Földdel együtt mozgó vonatkoztatási rendszer gyakorlatilag inerciarendszernek tekinthető. Nem igaz tehát az a feltevés, hogy a Maxwell-egyenletek a nyugvó éterben érvényesek, és csak ebben a kitüntetett vonatkoztatási rendszerben c a fénysebesség minden irányban. *Nincs kitüntetett vonatkoztatási rendszer, következésképpen az éter sem létezik.* A fényterjedése minden inerciarendszerben izotrop. Az inerciarendszerek teljesen egyenértékűek a természeti jelenségek leírása szempontjából. Semmilyen jelenség – sem mechanikai, sem optikai – nem tüntet ki közülük egyet sem: *nincs abszolút vonatkoztatási rendszer.* Az inerciarendszerek egyenértékűségében egy általános természeti elv, az ún. *speciális relativitás elve* mutatkozik meg. Einstein elévülhetetlen érdeme, hogy a Michelson-kísérlet negatív eredményében az inerciarendszerek egyenértékűségét, a relativitás elvét ismerte fel. Az éterhipotézist a mechanikai világképhez való görcsös ragaszkodás szülte. Einstein nagyságát mutatja, hogy tekintélyes elődeivel szemben bátran szakított a több évszázados felfogással, és nem újabb hipotézissel próbálta az éterhipotézist megmenteni, hanem elfogadta az objektív anyagi világot olyanoknak, amilyenek azt a tapasztalat mutatja. A tapasztalat pedig sohasem ismerte el az éter létjogosultságát.

Einstein azt is világosan látta, hogy a probléma mélyebb gyökerei a térre és az időre vonatkozó felfogásunkkal vannak kapcsolatban. A tér és az idő fogalmát a klasszikus mechanikában külön-külön abszolútnak tekintették. Különösen áll ez az időre. A tér két különböző helyén egy időben lejátszódó két eseményt minden vonatkoztatási rendszerben egyidejűnek tekintettek. Az egyidejűség fogalmának abszolút jelentése volt. Az Einstein által elvégzett elemzésből kiderül, hogy ez a felfogás téves: ha két esemény az egyik vonatkoztatási rendszerben egyidejű, a másik inerciarendszerben már általában nem az.

Valamilyen eseményről a fizikus akkor tud egyértelműen beszélni, ha tudja, hogy az a tér melyik helyén, mikor játszódott le. Minden pontszerű eseményt tehát négy adattal, a három helykoordinátával és az esemény időpontjával jellemzünk. Az esemény helyére és idejére vonatkozó kijelentésnek csak akkor van értelme, ha a hely és idő mértékszámait jól definiált és elvileg akárhányszor megismételhető mérés eredményeként adódnak. A hely mérésére a méterrudak, az időre az órák szolgálnak. A helymérés eredményeként a tér minden pontjához egy számhármass rendelhető, amely az illető pont helykoordinátáit adja meg. Az időt az esemény helyén lévő órával mérjük. Egyértelmű időmeghatározást akkor kapunk, ha a tér minden pontjába egyformán járó órákat helyezünk, és azokat valamilyen eljárással szinkronizáljuk. Fizikai szempontból kifogástalan szinkronizálás fényjelekkel történhet. Így elérhető, hogy a vonatkoztatási rendszer különböző helyein elhelyezett órák tökéletesen egyformán járjanak. A különböző inerciarendszerek óráinak szinkronizálásánál tekintetbe kell venni azt a tapasztalati tény, hogy a fényterjedés sebessége minden inerciarendszerben ugyanaz. Ebből viszont következik, hogy egységes időről csak egy vonatkoztatási rendszeren belül lehet szó, a

különböző inerciarendszerek ideje nem egyezik meg. Nem létezik tehát egységes világidő, miként azt a klasszikus fizikában évszázadokon keresztül gondolták. A relativitás elve és a fénysebesség állandósága szükségszerűen vezet a Lorentz-transzformációhoz, amely egy pontszerű esemény két inerciarendszerben mért helykoordinátái és időadatai között teremt egyértelmű kapcsolatot. Ebből már következik az egész relativisztikus kinematika. Két egymáshoz képest mozgó, egyforma rúd közül az egyikkel együtt mozgó rendszerből mérve a másik mindig rövidebb a társánál. A mozgó órák közül pedig mindegyik késik a másikhoz képest. A hosszúság és az időtartam tehát függ attól, hogy melyik vonatkoztatási rendszerben mérjük azokat. A hosszúság és az idő nem önmagukban létező fogalmak, hanem csak akkor nyernek fizikai értelmet, ha megmondjuk azt is, hogy milyen mozgásállapotú rendszerre vonatkoztatjuk azokat. A mérési eljárás is más, attól függően, hogy a testekhez képest nyugvó vagy mozgó rendszerben végezzük a mérést.

Ezek a megállapítások nagy megütőerőt és igen élénk vitákat váltottak ki, és nemcsak a fizikusok körében, hanem a viták átsaptak a filozófia területére is. Ezen nem lehet csodálkozni, mert az egész anyagi világról alkotott korábbi képünk szétrombolását jelezték, és egy új világbépe és fogalomrendszer kialakulását eredményezték. Tulajdonképpen ez is hozzájárult ahhoz, hogy Einstein nevét nemcsak a fizikusok, hanem az egész művelt világ megismerte. A tapasztalat ezeket a paradoxonnak tűnő megállapításokat teljesen Einstein szellemében igazolta.

Az inerciarendszerek egyenértékűségének felismerése óriási heurisztikus erővel rendelkező vezérelvet ad az elméleti kutató kezébe. Csak azok a természettörvények lehetnek igazak, amelyek minden inerciarendszerben ugyanúgy hangzanak. Ez más szóval azt jelenti, hogy a Lorentz-transzformációval szemben változatlanoknak kell lenniük. Az

elektromágnesség Maxwell-elmélete teljesíti ezt a követelményt, nem szorul kiigazításra. A klasszikus mechanikáról viszont ez nem mondható el. Kiderült, hogy az csak közelítő érvényű. Csak olyan mozgások leírására jó, amelyek sebessége kicsi a fény vákuumbeli sebességéhez képest. A relativisztikus dinamika a mozgások tanának olyan általánosítása, amely kis sebességek esetén a newtoni mechanikába megy át. Ezért a mindennapi életben előforduló esetekben jól írja le a mozgásokat, még a bolygók mozgását is. A nagy sebességek tartományában viszont a tapasztalat a relativisztikus mechanikát erősíti meg. A testek tehetetlen tömege nem állandó, hanem változik a sebességgel. A sebesség növekedésével a tömeg is nő. A részecskegyorsító berendezésekben olyan nagy sebességre gyorsítják fel a részecskéket, hogy ott már érvényesül a tömegnövekedés. Sőt, a berendezés tervezésekor ezt pontosan figyelembe kell venni. A speciális relativitás elméletének Einstein szerint is leghatásosabb eredménye a tehetetlen tömeg és az energia közötti $E = mc^2$ kapcsolat felismerése volt. Közismert, hogy az atomenergia felhasználásának lehetősége ezen az összefüggésen alapszik. Ezért ennek korunk fizikájára és a gazdasági életre, energiapolitikára gyakorolt hatását külön hangsúlyozni nem szükséges. Viszont rá kell mutatni arra, hogy az említett vezérlő elv vezetett a relativisztikus kvantummechanikához, az ún. *Dirac-egyenlethez*. A Heisenberg és *Erwin Schrödinger* által megalkotott kvantummechanika nem tesz eleget a relativitás elvének, nem Lorentz-invariáns elmélet, annak ellenére, hogy az atomfizika jelenségeit általában jól leírja. Már maga Schrödinger megpróbálkozott azzal, hogy elméletét relativisztikussá tegye, de nem járt sikerrel. A kapott egyenlet ugyan teljesítette a relativitás elvét, de nem adott jó eredményt a hidrogénatom színképére. Ugyanezt az egyenletet mások is levezették, többek között a magyar *Kudar János*, de

nemcsak az volt a baja, hogy a hidrogénatomra rossz eredményt adott, hanem az is, hogy a kvantummechanika lényegéhez tartozó statisztikus értelmezést nem lehetett rá alkalmazni. Dirac a témakörrel foglalkozó több fizikus véleményével ellentétben fontosnak tartotta a valószínűségi értelmezést, ezért nem fogadta el ezt az egyenletet az elektron relativisztikus hullámegyenletének. Két alapvető követelményt támasztott a keresett egyenlettel szemben. Legyen Lorentz-invariáns, másrészt az idő szerinti differenciálhányadost első rendben tartalmazza, mert ez feltétele a statisztikus értelmezésnek. Az itt nem részletezhető igen szép matematikai gondolatmenettel jutott a már említett, róla elnevezett egyenlethez. Ez azon túl, hogy teljesíti az említett két feltételt, a *spin* is tartalmazza. Ez Diracot is meglepte, de természetesen örömmel tapasztalta, hogy erről is számot ad. Természetesen kiadódik az elektron saját mágneses nyomatéka is. Az egyenlet első alkalmazása a hidrogénatom energiaszintjeinek meghatározása volt. Ennek alapján a hidrogén színképének finomszerkezete is a kísérleti eredményekkel jól egyezően adódott.

A Dirac-egyenletnek erőmentes, szabad mozgásra vonatkozó megoldása síkhullámnak adódik, amelynek hullámhosszát és rezgésszámát a részecske impulzusa és energiája határozza meg a kvantummechanikából ismert, *de Broglie*-féle képletek szerint. Az erőhatás nélkül mozgó elektron energiája az eddigi felfogás szerint természetesen pozitív. A relativitáselmélet alapján viszont az energiára olyan kifejezés adódik, amely a tömeg és impulzus bizonyos kifejezését négyzetgyök alakjában tartalmazza. Matematikai szempontból tekintve a gyöknek pozitív és negatív értéke egyaránt lehetséges. Eddig csak a pozitív előjelet vették tekintetbe, a negatívát nem, mert a negatív energiához az $E = mc^2$ képlet alapján negatív tömeg tartozna. A negatív tömegű részecske gyorsu-

lása a hatóerővel ellentétes irányú lenne. Ennélfogva egy pozitív és egy negatív tömegű elektron kölcsönhatása a következő furcsa jelenséghez vezetne. Mivel töltésük azonos, ezért közöttük taszító erő hat. A pozitív tömegű elektron az $ma = F$ mozgásegyenlet szerint a taszító erő irányába mozogna, a negatív tömegű viszont az ellentétes irányba. Tehát követné a másik elektront. Ilyen jelenséget a természetben nem ismerünk. Dirac az ellentmondást a Pauli-elv figyelembe vételével a következőképpen oldotta fel. Tételezzük fel, hogy a negatív energiájú kvantumállapotok a természetben mind be vannak töltve egy-egy elektronnal. Ez az állapot a *fizikai vákuum*. Ebben az állapotban a fizikai mennyiségek (például tömeg, töltés) értéke zérus, és a fizikai mennyiségek valódi értékeiben a vákuumállapottól való eltérés mutatkozik meg. Az elektromágneses kölcsönhatás a vákuumállapotot megváltoztathatja. Gondoljunk el például, hogy a kölcsönhatás következtében egy negatív energiájú elektron nyugalmi energiájának kétszeresét vagy ennél nagyobb energiát vesz fel az erőterétől. Ezáltal pozitív energiájú valódi elektronná alakul, és a vákuumban üres marad egy elektronállapot. Szemléletesen szólva, a vákuumban lyuk keletkezik. Az üres negatív energiájú elektronállapot negatív energiahiányt és negatív tömeghiányt jelent, amely pozitív energiaként és pozitív tömegként jelenik meg. *A vákuumbeli lyuk úgy viselkedik, mintha pozitív tömegű és „pozitív töltésű elektron” lenne.* A kölcsönhatás tehát egy „pozitív töltésű elektront” eredményezett. Mivel akkor (1932 előtt) csak két elemi részecskét ismertek, az elektront és a protont, Dirac ezt a pozitív töltésű lyukat protonnak gondolta. Szimmetria-okokból a lyuk tömegének ugyanakkorának kellene lennie, mint az elektroné, ezért később (1931-ben) elállt a proton gondolatától, és egy új, addig nem ismert részecskét tételezett fel, amit *antielektronnak* nevezett. Egy évvel később,

1932-ben *Carl D. Anderson* felfedezett egy pozitív elemi töltésű, az elektron tömegével azonos tömegű részecskét, amelyet pozitronnak neveztek el. Ez a részecske azonos a Dirac-féle antielektronnal.

A Dirac-egyenlethez vezető gondolatmenetből és az egyenlet említett sajátágaiból (mint például a spin és a mágneses nyomaték helyes értéke) következik, hogy a Dirac-egyenlet nemcsak az elektronnra, hanem minden feles spinű részecskére egyaránt vonatkozik: így a protonra, a neutronra és a többi, később felfedezett feles spinű részecskékre is. (A feles spin azt jelenti, hogy a saját impulzusnyomaték értéke a h Planck-állandó 2π -ed részének a fele.) A napjainkban folyó kísérleti részecskefizikai kutatásokban mindennapos szereplők az antirészecskék. Nemcsak az alapkutatásokban, hanem az orvosi gyakorlatban is alkalmaznak pozitronokat fontos diagnosztikai eljárásokban. Ilyen berendezés például a pozitron emissziós tomográf (közismert rövidítéssel PET). A lyukelmélethez kapcsolódó szemléletes képből is érthető, hogy a magasabb, pozitív energiájú elektron az alacsonyabb energiaszintre törekedve, beleesik a lyukba, és ekkor eltűnik a pozitív energiájú elektron és a lyuk, vagyis a pozitron. Energiájuk átalakul gamma-sugárzássá. A fizikai szakirodalom a részecskének az antirészecskéjével ilyen értelmű megsemmisülését nevezi szétsugárzásnak. A PET-ben is ez történik. Ennek alapján készítenek képet az emberi szervezet különböző részeiről.

A Dirac-egyenletre és a pozitronra azért tértem ki egy kicsit részletesebben, mert érzékeltetni akartam, hogy a relativitáselméletből kiindulva, tisztán elméleti megfontolásokkal (úgy is mondhatnám, hogy spekulatív módon) hogyan jutott Dirac egy olyan felfedezéshez, amely a huszadik század fizikájában, különösen annak második felében meghatározó szerepet játszott. Kicsit előre szaladva megemlítem, hogy napjaink egyik legizgalmasabb tudományos kutatási területe

a Világegyetem keletkezésével és fejlődésével foglalkozó fizikai és csillagászati kutatások. Ezek szorosan kapcsolódnak a mindjárt szóba kerülő általános relativitáshoz, de most az antirézecskek kapcsán megemlítem, hogy milyen izgalmas kérdés az, hogy miért csak anyagot tapasztalunk az Univerzumban. Miért nem észlelünk antianyagot, hiszen a fizika egyik szimmetriaelvéből arra lehet következtetni, hogy kezdetben mindkettő egyformán keletkezhetett. Mitől sérül ez a szimmetria, ha egyáltalán fennállt a kezdetekben? Ilyen jellegű alapvető tudományos kérdések állandóan szerepelnek a fizikai szakirodalomban. Ez a példa is érzékelteti, hogy a relativitáselméletből milyen mély elvi kérdések erednek napjainkban is. Az általános relativitásról szóló részben még ennél is izgalmasabb kérdéseket fogok említeni.

Az általános relativitás és a gravitáció

A relativitás szó előtti *speciális* jelző arra utal, hogy az egymáshoz képest egyenes vonalú, egyenletesen mozgó vonatkoztatási rendszerek egyenértékűségéről van szó. Einstein ezt a korlátozó megszorítást szeretne volna megszüntetni, mert érezte, hogy kell lennie egy általánosabb elvnek, amely szerint az inerciarendszerek végtelen sokasága nem élvez kitüntetett szerepet a fizikai jelenségek leírásánál. Az igaz természettörvényeknek a Lorentz-transzformációval szembeni invariancia helyett egy általánosabb követelményt, az *általános kovariancia elvét* kell kielégíteniük. Ez azt jelenti, hogy bármely vonatkoztatási rendszerben ugyanúgy kell hangzaniuk. Másrészt probléma volt a gravitáció Newton-féle elméletével, mert eszerint a gravitációs hatás időtartam nélkül, tehát végtelen sebességgel terjed. Ugyanis ha megváltozik a tömegek eloszlása, a gravitációs tér erősségének is azonnal meg kell változnia a tömegeloszlástól bármilyen távoli pontban. Ez ellentétben van a speciális relativitással, mert semmilyen hatás nem terjedhet a fény

vákuumbeli sebességénél nagyobb sebességgel. Tehát a gravitáció newtoni elmélete korrekcióra szorult. Einstein zsenialitását mutatja, hogy e két, egymástól távolinak tűnő problémát, vagyis az általános kovariancia elvének érvényesítését és a gravitáció elméletének a speciális relativitással történő összhangba hozását, egyszerre oldotta meg. Nem ment könnyen. Tíz évi megfeszített munkával dolgozott e nagyszerű program megvalósításán, míg végül 1915-ben az ún. *általános* relativitás elméletének megalkotásával a tökéletesség legmagasabb fokára emelte a relativitás elméletét.

A gyorsuló vonatkoztatási rendszereket kezdte tanulmányozni, és mindjárt az elején rájött, hogy ezek kapcsolatba hozhatók a gravitációs térrel. Gondoljuk el, hogy egy liftben vagyunk, és egy láthatatlan kéz a földi nehézségi gyorsulással felfelé mozgatja a liftet. A mozgással ellentétes irányú, ún. tehetetlenségi erőt érzünk, amelynek nagysága *mg*. Ezt a gyorsulás következtében fellépő tehetetlenségi erőt nem tudjuk megkülönböztetni a földi nehézségi erőtől, mert ugyanezt az erőt éreznénk, ha a lift állna a Földön. Mivel a tehetetlenségi erők a tehetetlen tömeggel, a gravitáció pedig a súlyos tömeggel arányos, ebben a már *Galilei* óta ismert törvény jut kifejezésre, miszerint a kétfajta tömeg arányos egymással. (A súlyos és tehetetlen tömeg egyenlőségét rendkívül pontos eljárással, százmilliomod pontossággal, először Eötvös Loránd határozta meg.) A kétfajta tömeg arányosságát évszázadok óta mindenki elfogadta, de mélyebb okát senki sem vizsgálta. Einstein a két tömeg szigorú arányosságában egy alapvető természeti elvet ismert fel, az ún. *ekvivalencia-elvet*. Eszerint minden tehetetlenségi erő – beleértve a centrifugális és Coriolis-erőket is – gravitációs erőként fogható fel. A gyorsuló vonatkoztatási rendszerek tehát olyanok, mintha azokban gravitációs erő lépne fel. Ez a felismerés vezette Einsteint a gravitáció modern elméletének, az *általános*

relativitásnak a kidolgozásához. Ennek a lényege az, hogy a tömegek kialakítják a tér-idő geometriai szerkezetét, és ebben a tér-időben a testek erőmentes mozgást végeznek. (A tér-idő egy négydimenziósnak elgondolt tér, amelyben a három közönséges térkoordináta mellé negyediknek hozzávesszük az időt.) Ez a geometria a tömegek közelében nem az euklideszi mértan törvényeit követi, hanem az ún. *Riemann*-féle görbült tér-idő szabályait. Kicsit szabadon fogalmazva: a tömegek mondják meg, hogy milyen legyen a geometria, a geometria pedig, hogy hogyan mozogjanak a tömegek. Az általános relativitáselméletet a bolygók mozgására alkalmazva, azok nem azért mozognak ellipszis pályákon, mert a Nap vonzóereje kényszeríti őket erre, hanem azért mert a Nap tömegeloszlása olyan tér-idő geometriát alakít ki, amelyben az erőmentes tehetetlenségi mozgás pályája ellipszis. A Nap szerepe a tér-idő geometriai szerkezetének kialakításában nyilvánul meg. A bolygók mozgásának leírása teljesen kinematikai jellegű. Az erő fogalma elő sem fordul. A testek tehetetlenségi (erő nélküli) mozgást végeznek a tömegek (esetünkben a Nap) által kialakított tér-időben. Ez a geometria a tömegek (például a Nap) közelében a görbült terekre jellemző szabályoknak tesz eleget. Einstein elévülhetetlen érdeme, hogy meghatározta azokat az egyenleteket, amelyek leírják, hogy a tömegek eloszlása milyen geometriát hoz létre ebben a négydimenziós tér-időben. Itt rá kell mutatni arra, hogy mivel a speciális relativitás szerint az energia és a tömeg egyenértékű, vagyis bármilyen energiának van tehetetlen tömege, a tér-idő geometriájának a kialakításában a tömegek mellett az energia ugyanolyan módon vesz részt. Az általános relativitásból adódó eredmények nemcsak a szemlélet miatt különböznek a newtoni gravitációtól, de a döntő jellegű kísérletek számszerű adataiban is. Másrészt olyan jelenségekre vonatkozóan is adnak jóslatokat, előrejelzéseket, ame-

lyek ezt megelőzően merész fantáziának minősíthető ötletként sem merültek fel. (Ilyenek például a fekete lyukak, a csillagok gravitációs összeomlása, vagy az Univerzum szerkezetére és fejlődésére vonatkozó következtetések.)

Az általános relativitáselmélet első kísérleti igazolását és az elismerést hozó sikerét az 1919. évi napfogyatkozásnál megfigyelt fényelhajlással aratta. A távoli csillagok fénye a Nap közelében elhaladva, a görbült tér-idő miatt nem egyenes pályán jut el a földi megfigyelőhöz, hanem egy kicsit elhajlik a Nap felé. Ezért a megfigyelőhöz érkező fénysugarat meghosszabbítva a csillagot más irányban látjuk, mint amikor a Nap nincs a látóirányhoz közel. A hat hónappal későbbi (éjszakai) felvételen jól megállapítható a fénysugár eltérülésének szöge. A megfigyelések az általános relativitáselméletnek megfelelő értéket adták, ami kétszerese a newtoni gravitáció elméletéből számított értéknek. Tulajdonképpen ez a csillagászati megfigyelés járult hozzá döntő mértékben, hogy a fizikusok többsége komolyan vette Einstein elméletét. A megfigyeléseket igen sokszor megismételték, és az eredmények az általános relativitást erősítették meg. Az optikai megfigyelések mellett – amelyeket csak teljes napfogyatkozásakor lehet végezni – a csillagok vagy kvazárok által kibocsátott rádióhullámok irányának eltérülését is vizsgálják. Ezek a megfigyelések nem kötődnek a napfogyatkozáshoz, másrészt a rádiócsillagászati koordinátamérések sokkal pontosabbak. Természetesen ezek kétséget kizáróan a relativitáselméletet igazolják. Itt csak utalok a másik két kísérlet típusra, amelyek mindjárt a kezdeti szakaszban az elmélet igazsága mellett szóltak. A Merkúr és a többi bolygó pályájának napközelpontjáról, az ún. perihélium elfordulási szögéről, valamint a gravitációs vöröseltolódásról van szó. Az utóbbi azt jelenti, hogy az atomok spektrumvonalainak a hullámhossza a gravitáció hatására

a nagyobb hullámhosszak, tehát a vörös felé tolódik el a gravitációmentes helyzet-hez viszonyítva. Az elmélet megjelenése óta eltelt kilencven év alatt a kísérleteket egyre pontosabb feltételek mellett megismételték, és ezek mind-mind az elmélet igazsága mellett szóltak.

Az általános relativitáselméletnek egy ugyancsak sokat tanulmányozott következménye, illetve jóslata, a *gravitációs hullám* jelensége. Az Einstein-féle téregyenleteknek van olyan megoldása, amely hullámot ír le, hasonlóan ahhoz, miként a Maxwell-egyenleteknek is van hullámmegoldásuk. Ez utóbbiak az elektromágneses hullámok. Létezésüket maga Maxwell jóslta meg elméleti úton, és néhány évvel később *Heinrich Hertz* kísérlettel igazolta azok létezését. A gravitációs hullámokkal kapcsolatban nem ilyen szerencsés a helyzet, mert kísérleti kimutatásuk még nem sikerült, pedig a múlt század hatvanas éve óta a legkülönbözőbb észlelőberendezéseket terveztek és építettek. Itt arról van szó, hogy a tér-idő fénysebességgel terjedő fodrozódásait kellene kimutatni, amelyek rendkívül kicsi hatást váltanak ki a berendezésben. Példaként megemlítem, hogy az olasz-francia együttműködés keretében Olaszországban felállított detektorban az interferenciacsíkok eltolódása ilyen gravitációs hullám hatására, becslések szerint mindössze 10^{-18} méter. Szinte hihetetlen érzékenység kellene hozzá.

Befejezésül az Einstein-féle gravitációs téregyenleteknek az Univerzumra történt alkalmazásáról szólok még röviden. Az első lépést ebben a vonatkozásban maga Einstein tette meg. Az egyenleteknek olyan megoldását kapta, amely táguló Világegyetemet ír le. Ez nem fért össze Einsteinnek Istenről alkotott képével, mert szerinte Isten nem olyan világot teremtett, amely a teremtés pillanatától kezdve nem tökéletes, hanem az idő múlásával magától még alakul, illetve fejlődik. Ő tehát egy időtől független, ún. sztatikus meg-

oldást várt. Ezért a gravitációs egyenleteket kiegészítette egy taggal, amelynek az lett a szerepe, hogy ezt a tágulást ellensúlyozza, hogy az időben változatlan megoldás jöjjön ki, vagyis egy állandó állapotú Univerzum. Ezt a kiegészítő tagot a tér-idő geometriai szerkezetét jellemző metrikus tenzorral arányosnak vette. Az arányossági tényezőt nevezzük *kozmológiai állandónak*. *Eduwin Hubble* amerikai csillagász 1929-ben azt a meglepő felfedezést tette, hogy a galaxisok távolodnak egymástól, ami azt mutatja, hogy az Univerzum tágul az időben. A tágulás törvényszerűségét is megállapította. Eszerint a tágulás sebessége arányos a távolsággal. A gravitációs egyenleteknek a kozmológiai taggal történt kiegészítése tehát felesleges volt. Einstein a Hubble-féle megfigyelés megerősítése után ezt a lépését élete legnagyobb tévedésének tekintette. Elszalasztott egy egyszerű felismerést, ami tulajdonképpen már a kezében volt, de a teremtés tökéletességében gyökerező világképe ettől visszatartotta. A legújabb csillagászati megfigyelések és kozmológiai kutatások ugyanis arra utalnak, hogy mégsem volt hiba e tag beillesztése a gravitációs egyenletekbe, mert úgy tűnik, hogy a Világegyetem gyorsulva tágul. Ma még nincs elfogadott magyarázat a gyorsulásra, de valószínűnek látszik, hogy a kozmológiai tagnak az antigravitáció, tehát a gravitációs eredetű taszítás felel meg.

Ha az Univerzum tágulását gondolatban visszafelé követjük az időben, akkor olyan kezdeti állapothoz jutunk, amelyben a Világegyetem összes tömege egy pontban egyesül. Ez végtelen tömeg- és energiasűrűségnek felel meg ebben a pontban. Nem lehet tudni, hogy ilyen szinguláris viszonyok mellett alkalmazhatók-e a normális körülményekre megállapított fizikai törvények. Az is lehet, hogy a megszokottól eltérő törvények érvényesülnek itt. Van olyan nézet is, hogy nem is volt kezdet, hanem a világ öröktől fogva van. A nagyenergiájú gyorsító berendezésekben

a közeljövőben várhatóan olyan nagy energiákat tudnak előállítani, amelyekkel megközelíthetők a Világegyetem keletkezése utáni másodpercekben uralkodott körülmények. Ezek a kísérleti részecskefizikai kutatások a csillagászati megfigyeléseket kiegészítve, egyre közelebb visznek az anyagi világ kezdeti állapotának, szerkezetének és fejlődésének megismeréséhez. A tudomány egyik legnagyobb kérdésére keresik a kutatók a választ. Keletkezett-e a világ? Ha igen a válasz, akkor rögtön adódik a kérdés, hogy miként? Biztos, hogy a kezdetben fennálló feltételek mellett a kvantummechanika törvényeit is figyelembe kell venni. Régóta folynak kutatások a gravitáció elmélete, az általános relativitáselmélet és a kvantummechanika összehangolására. *Stephen Hawking* például ilyen jellegű kutatásainak eredményétől várja az anyagi világ kezdeti állapotának tudományosan megnyugtató megoldását. Az valószínűnek tűnik, hogy ezek a kutatások a tér-idő mikroszerkezetére vonatkozóan is hoznak új megállapításokat. Vannak olyan elméleti vizsgálatok, amelyekből arra

következtetnek, hogy a tér-idő az egészen kis tartományokban esetleg nem folytonos szerkezetű, hanem szemcsés. Az ún. szuperszimmetrikus elméletekben felmerül az is, hogy a tér-idő dimenziója nem négy, hanem ennél több, de a négy fölötti dimenziók szerepe a négyhez képest másként nyilvánul meg.

Az eddigieket összegezve megállapíthatjuk, hogy Albert Einsteinnek nemcsak a huszadik század fizikájában volt meghatározó szerepe, hanem az anyagi világról alkotott mai tudományos képünk kialakításában is. A témakör egyik legavatottabb kutatójának, *Hawking*nak szavaival zárom írásomat. „Einstein 1915-ben gyökeresen új, forradalmi jelentőségű matematikai modellel állt elő, az általános relativitáselmélettel. Cikkének megjelenése óta eltelt években számos helyen kicifráztuk a modellt, azonban az időről és a térről alkotott mai modellünk változatlanul az Einstein által felvázolt képen alapul.”

Kulcsszavak: *Albert Einstein, relativitáselmélet, tér-idő, Univerzum*

