ALBERT EINSTEIN

A SPECIÁLIS ÉS ÁLTALÁNOS RELATIVITÁS

IV. KIADÁS

GONDOLAT BUDAPEST 1973

A mű eredeti címe:

ÜBER DIE SPEZIELLE UND DIE ALLGEMEINE RELATIVITATSTHEORIE

(Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn,
Braunschweig)

A jelen fordítás a könyv 1921-es kiadása alapján készült

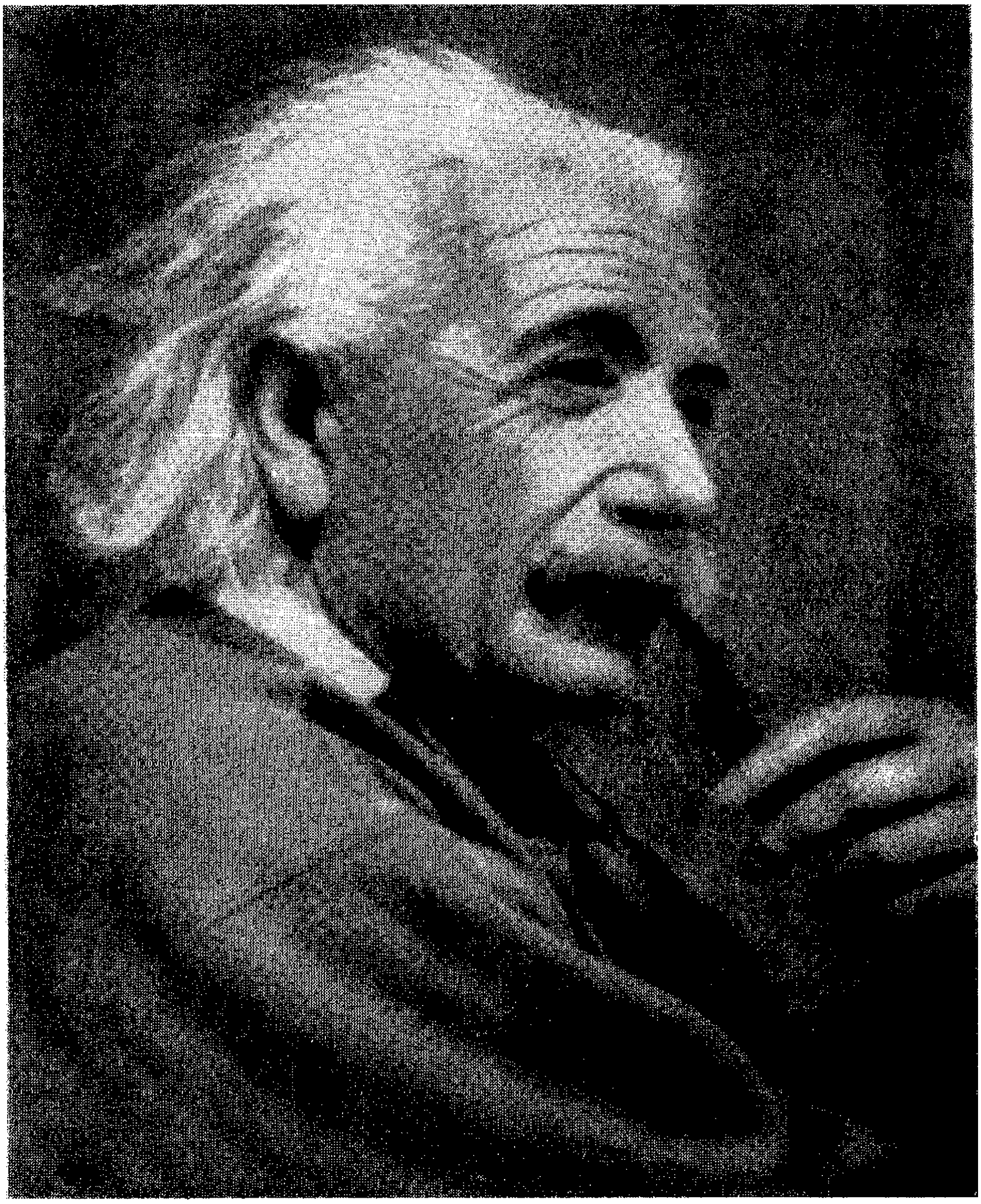
A BEVEZETŐT ÍRTA ÉS A KÖNYVET JEGYZETEKKEL ELLÁTTA:

DR. NOVOBÁTZKY KÁROLY
KOSSUTH-DÍJAS

A KÖNYVET FORDÍTOTTA:
VÁMOS FERENC

A FORDÍTÁST AZ EREDETIVEL ÖSSZEVETETTE ÉS SZAKSZEMPONTBÓI, ELLENŐRIZTE:
KÁROLYHÁZI FRIGYES

AZ UTÓSZÓKÉNT KÖZÖLT EINSTEIN-TANULMÁNYT ÍRTA :
MARÓTI LAJOS



ALBERT EINSTEIN

BEVEZETÉS

A jelen remek könyvecskében Einstein azt a merész szándékát valósította meg, hogy a relativitás elméletét a maga egészében érthetővé tegye azok számára is, akik nem rendelkeznek a megfelelő matematikai segélyeszközökkel. Csak aki tett már hasonló kísérletet, tudja teljes mértékben méltányolni ennek a népszerűsítő módszernek az összes nehézségeit. A képlethasználat, mint áttekinthető matematikai gyorsírás, erősen megkönnyíti a közlést. De rögtön felkérek minden olvasót, aki a mennyiségtan területén nem járatos, vessen el minden kisebbségi érzést. Ha a szóbeli közlésnek olyan mestere beszél hozzá, mint amilyen e könyv szerzője, talán még a szakember is inkább örülni fog a képletek hiányának, vagy ritkaságának. Mert az eleven szó sokkal inkább késztet gondolati elmélyülésre, a vitatkozó hajlam érvényesítésére, mint a színtelen betű.

Rendkívüli értéke a könyvnek, hogy a szerző oly formában és logikai egymásutánban ismerteti elméletét, amint az szellemi műhelyében az idők folyamán kialakult. Különös lélektani élvezetet jelent a könyv nyomán bepillantást nyerni egy elismert világnagyság munkamódszereibe, látni a logika és intuíció vetélkedő előretörését, látni a múlt tévedéseinek hínárjából kiemelkedő hibákat, és belső örömmel tapasztalni, mint válnak semmivé a helyes megismerés napfényében. Einstein elfogulatlanabbul és előítéletektől mentesebben tudott kérdéseket intézni a természethez, mint bárki ő előtte. Nem feszélyezte sem előítélet, sem hagyomány. E tulajdonságai képesítették arra, hogy a századok óta Newton által megalapított klasszikus fizikát, különösen a mechanikát, fundamentumaiban megrázkódtassa. Új felfogása a térről és időről, a látszólag legelemibb fizikai fogalmakról, további kihatásában a speciális és általános relativitáselmélethez vezetett, ahhoz a ragyogó alkotáshoz, amelyben a megismerés mélysége a tökéletes matematikai harmóniával párosul. Kérdéseinek új módja megkövetelte, hogy az elméletből kiküszöböltessék minden olyan kijelentés, amely nem igazolható megfigyelhető tények segítségével.

A könyv a fokozatos haladás követelményének megfelelően először a speciális relativitás elméletével foglalkozik. A legfontosabb kezdeti lépés az inerciális, vagy ahogy Einstein nevezi, a Galilei-féle koordinátarendszer bevezetése. A koordináták értelmezése megkívánja, hogy Einstein előzőleg tisztázza az elvont mértani tételek valóság-értékét. Ez az oka annak, hogy mértani meggondolásokkal kezdődik a tárgyalás. Rögtön utána a szerző bevezeti a relativitás *elvét,* amely nem tévesztendő össze a relativitás *elméletével,* s amely az utóbbinak csak egyik axiómáját, alkotja. Megköveteli, hogy a természet-törvényeket kifejező egyenletek az összes inerciarendszerekben azonos alakúak legyenek. Tehát pl. az elektrodinamika egyenletei is, amelyek kimondják, hogy a fény minden irányban egyenlő sebességgel terjed. Úgy látszik, mintha itt bizonyos tautológia forogna fenn, hiszen Einstein a fénysebesség állandóságát külön elvként is kimondja. A magyarázat abban áll, hogy Einstein az iránytól független fénysebességet nem elméleti következményként, hanem kísérleti tapasztalatként kívánja bevezetni. Súlya ily módon tetemesen megnövekszik.

Igen érdekes a 7. fejezet, amelyben a szerző mintegy önmagával vitatkozik, vajon a relativitás elve nem zárja-e ki a fénysebesség állandóságának fennállását. A Lorentz-transzformáció csattanósan kimutatja, hogy nem.

A mozgó pálcák megrövidüléséről és a mozgó órák lelassulásáról szóló fejezetet bizonyos hiányérzettel olvassuk el. Nélkülözzük annak kiemelését, hogy sem a pálcákban, sem az órákban nem történik semmi *objektív* változás, tisztán a nyugalmi és mozgási mérőszámok különbözők.

Fontos fejezete a könyv első részének a mechanika hozzáidomítása a relativitás elméletéhez. Itt adódik ki az a merőben új megállapítás, hogy minden test tömege szigorúan arányos energia-tartalmával. Ezt a törvényt tekintette Einstein a speciális relativitáselmélet legértékesebb eredményének.

Érdemes megjegyezni, amit a szerző Minkowski négyes teréről mond: Minkowski geometriai általánosítása nélkül az általános relativitás elmélete talán meg sem született volna.

Fizikus körökben elterjedt vélemény, hogyha nem Einstein alkotta volna meg a speciális relativitás elméletét, a sürgető tudományos szükséglet következtében - valószínűleg jóval később - más valaki fedezte volna fel. Egészen más felfogás uralkodik az általános relativitással kapcsolatban. Minél inkább tágul az időbeli távlat, annál egyöntetűbbé válik a szaktudósoknak az az álláspontja, hogy ez az elmélet a legnagyobb tudományos ingénium alkotásainak egyike. Maga Einstein - a szerénységnek valóságos megtestesítője - is úgy nyilatkozik, hogy ebben az elméletben élete legmagasabb beteljesülését látja.

Elgondolásának kiindulópontja az a meggyőződés, hogy az inerciarendszerek nem játszhatnak kiváltságos szerepet a természettörvények megfogalmazásában. A fizika törvényei bármilyen gyorsuló koordinátarendszerben ugyancsak megfogalmazhatók, mégpedig úgy, hogy a megfelelő egyenletek minden ilyen rendszerben egyformák. A természettörvényeknek tehát kovariánsoknak kell lenniük minden transzformációval szemben. Első pillanatra úgy tetszik, hogy ezt a matematikával összeforrott elméletet lehetetlen közérthetően előadni. Hogy Einstein ebben a könyvben sikeresen megbirkózott a feladattal, annak a természeti adottságának köszönheti, hogy a formulákból könnyedén ki tudta hámozni az értelmi lényeget. Szinte játszva vezeti be az olvasót abba a felismerésbe, hogy az általános relativitás elméletének téridő kontinuuma nem lehet euklideszi. Elképesztő forradalmat jelent elméletének az a kijelentése, hogy az anyag jelenléte befolyásolja a tér geometriai szerkezetét.

A könyv olvasása különleges élvezetet jelent mindenki számára, aki hajlandó szellemi öntevékenységgel kísérni a fejtegetéseket.

A jegyzeteket gazdaságosan iktattam a szövegbe. Céljuk a nehezebben érthető részletek megvilágítása, a kissé szétfolyó fejezetek lényegének kidomborítása, és az újabb mérési módszerek, valamint eredmények közlése.

Budapest, 1962, augusztus hó. *Novobátzky Károly*

A SPECIÁLIS
ÉS ÁLTALÁNOS
RELATIVITÁS
ELMÉLETE

ELŐSZÓ

Az előttünk fekvő könyvecske azokhoz szól, azoknak akar minél szabatosabb betekintést nyújtani a relativitás elméletébe, akiket ez az elmélet tudományos és filozófiai szempontból érdekel, anélkül, hogy az elméleti fizika matematikai apparátusával rendelkeznének. A könyvecske az olvasótól az érettségi vizsga anyagának ismeretét és - rövidsége ellenére - sok türelmet és akaraterőt követel. A szerző minden igyekezetével arra törekedett, hogy az alapgondolatokat a lehető legegyszerűbben és legvilágosabban adja elő, mégpedig olyan sorrendben és összefüggésben, amint a valóságban keletkeztek. A jobb érthetőség kedvéért el nem kerülhettem, hogy gyakran ismétlésekbe bocsátkozzam, anélkül, hogy az előadás eleganciájára a legkevésbé is ügyeltem volna; lelkiismeretesen ragaszkodtam a zseniális Boltzmann szabályához, amely szerint az elegancia a szabók és csizmadiák dolga. Azt hiszem, a lényegbéli nehézségek mindegyikét feltártam az olvasó előtt. Ezzel szemben az elméletnek a kísérleti fizika köréhez tartozó alapjaival szándékosan mostohán bántam, nehogy a fizikától távol álló olvasó is úgy járjon, mint a vándor, ki a fáktól nem látja az erdőt. Szeretném, ha könyvecském sokak számára az ösztönzés kellemes óráit szerezné!

1916. decemberében *A. Einstein*

ELSŐ RÉSZ

A SPECIÁLIS RELATIVITÁS ELMÉLETE

1. A geometriai tételek fizikai tartalma

Gyermekkorodban, kedves olvasóm, bizonyára te is megismerkedtél Euklidész geometriájának égbenyúló épületével, és talán több tisztelettel, mint szeretettel emlékezel erre a büszke várra, amelynek vég nélküli lépcsőin lelkiismeretes tanítóid megszámlálhatatlan órákon át hajszoltak fölfelé. Ha múltad ezen óráira gondolsz, mindenkit megvetéssel sújtasz, aki e tudomány mégoly félreeső részének igazságát kétségbe merné vonni. A biztonság büszke érzése azonban talán abban a pillanatban cserbenhagyna, amint valaki azt kérdezné: "Mit értesz hát azon az állításodon, hogy ezek a tételek igazak?" Időzzünk el egy kissé ennél a kérdésnél.[1]

A geometria bizonyos alapfogalmakból indul ki, ilyenek a sík, a pont, az egyenes, amelyekkel többé-kevésbé világos képzeteket tudunk kapcsolatba hozni; továbbá bizonyos egyszerű tételekből (axiómák), amelyekről feltesszük, hogy "igazak". Minden egyéb tételt ezekre a sarkigazságokra vezetünk vissza, egy logikai módszer alapján, amelynek helyességét kénytelenségből elismerjük. Valamely tételt akkor mondunk helyesnek, azaz "igaznak", ha az elismert módszer szerint az axiómákból vezettük le.[2] Így a geometriai tételek "igazságának" kérdése végül is az axiómák "igazságának" kérdéséhez vezet. Az azonban már régóta ismeretes, hogy erre az utóbbi kérdésre a geometria módszereivel nemcsak, hogy nem felelhetünk, hanem e kérdésnek egyáltalán értelme sincsen. Nem tehetjük fel ezt a kérdést így: vajon igaz-e az, hogy két ponton keresztül csak *egy* egyenes fektethető? Csak azt mondhatjuk, hogy Euklidész geometriája olyan alakzatokkal foglalkozik, amelyeket "egyeneseknek" nevez, és amelyeket olyan tulajdonsággal ruház fel, hogy két pontjuk egyértelműen meghatározza őket. Az "igaz" fogalma nem illik a tiszta geometria állításaira, miután, az "igaz" szóval végeredményben a valamilyen "reális" tárggyal való megegyezést szoktuk megjelölni. Csakhogy a geometria nem azzal foglalkozik, hogy fogalmai minő vonatkozásban vannak a tapasztalat tárgyaival, hanem kizárólag ezeknek a fogalmaknak egymás közti logikai összefüggéseivel.[3]

---

[1]A relativitás elméletében alapvető szerepet játszik a vonatkoztató rendszer, vagy szokásos műszóval koordinátarendszer. Ennek fogalmi bevezetése kényszeríti Einsteint, hogy a relativitás elméletének ismertetését geometriai fejtegetésekkel kezdje. A geometria megalapítója Euklidész, aki az időszámítás előtti harmadik században élt.

[2]Euklidész módszere korszakalkotó jelentőségű volt. A geometria számos tétele közül ki tudta választani azt az egynéhány *axiómát,* amelyből a többi tétel tisztán logikai úton levezethető. Valamely tudomány kifejlesztésének legmagasabb fokát ma is abban látjuk, ha az euklideszi "more geometrico" módszerével alapozhatjuk meg. Az összes természettudományok közül az elméleti fizika áll legközelebb ehhez az ideálhoz.

[3]Az axiómáknak igaz vagy hamis volta a tiszta geometria területén azért nem dönthető el, mert a geometria elemeit: a pontot, az egyenest, a szöget stb. fogalmilag értelmezzük, nem pedig gyakorlatilag. Az összekötő kapcsolatot a fogalmak világa és a valóság között az ún. természetes geometria teremti meg. így pl. a fogalmi definíció szerint az egyenes az a vonal, amelyet két pontja egyértelműen meghatároz. A természetes geometria azonban hozzáteszi, hogy ilyen vonal fénysugár által valósítható meg. A pontot tűheggyel vagy két pókháló szál metszésével állíthatjuk elő kisebb-nagyobb pontossággal. Azzal, hogy ezeket a megvalósításokat elfogadjuk, az elvont fogalmakhoz

Könnyen magyarázható, hogy mégis mi indít minket arra, hogy a geometria tételeit, az "igaz" szóval illessük. A geometria fogalmainak a természetben többé-kevésbé egzakt tárgyak felelnek meg, és kétségtelenül bennük találhatjuk e fogalmak keletkezésének egyedüli indítóokát. Ha a geometria el is tekint ettől, azért, hogy épületének a lehető legnagyobb zártságot adja, az a szokásunk, hogy pl. a távolságon egy gyakorlatilag merev testen levő két megjelölt hely közötti egyenes darabot értsük, mélyen gondolkodásmódunkban gyökerezik, így megszoktuk azt is, hogy három pontot akkor tekintsünk egy egyenesen fekvőnek, ha alkalmasan választott pontról, félszemmel nézve, látszólagos helyük egybeejthető.

Ha mármost követjük megszokott gondolkodásunkat és Euklidész geometriájának tételeihez még hozzákapcsoljuk azt az egyetlen kijelentést, hogy a merev test két pontjának távolsága (egyenes darab) mindig ugyanaz marad, akárhogyan változik is a test helyzete, úgy az euklideszi geometria tételeiből olyan tételek lesznek, amelyek a praktikusan merev testek lehetséges kölcsönös helyzeteire vonatkoznak. Az így kiegészített geometriát azután a fizika egyik ágaként kezelhetjük. Ezek után már jogosan kérdezhetjük, hogy "igazak"-e a geometria tételei, mert most már szó lehet arról, vajon ezek a tételek állnak-e azokra a valóságos dolgokra, amelyeket a geometria fogalmaihoz rendeltünk? Azt is mondhatnánk, ha nem is egészen pontosan, hogy ilyen értelemben egy geometriai tétel akkor "igaz", ha körzővel és vonalzóval végzett szerkesztés útján igazolható.*

A geometria tételeinek "igazságáról" való meggyőződésünk ilyen értelemben természetesen kizárólag eléggé tökéletlen tapasztalásokon alapszik. Az alábbiakban igaz voltukat egyelőre fel fogjuk tételezni, hogy meggondolásaink utolsó részében (az általános relativitás keretében) belássuk: igazságuknak vannak - és mennyiben vannak - határai.

2. A koordinátarendszer

A távolság már jelzett fizikai értelmezése alapján valamely merev test két pontjának távolságát mérések alapján meg tudjuk állapítani. Szükségünk van ebből a célból egy egyenes merev anyag-darabra *(S* rúd), amelyet mértékegységként fogunk használni. Ha *A* és *B* valamely merev test két pontja, akkor összekötő egyenesük a geometria törvényei szerint megszerkeszthető ; erre az egyenesre az *A* pontból kiindulóan annyiszor rakjuk fel az *S* rudat, míg B-be jutunk. A felrakások ismétléseinek száma: az *AB* hossz mérőszáma. Ezen alapszik mindenféle hosszmérés.**

Bármely esemény vagy tárgy helyének térbeli leírása azon alapszik, hogy megadjuk egy merev testnek (melyre a leírást vonatkoztatjuk) azt a pontját, amellyel ez az esemény egybeesik. Ez nemcsak tudományos meghatározásoknál, hanem a mindennapi életben is így történik. Mert boncolgassuk csak a

---

fizikai tárgyakat rendelünk, s vonatkozásaikat fizikai mérésekkel ellenőrizhetjük. Ilyen alapon tervezett Gauss nagyszabású kísérletet annak eldöntésére, vajon a mi földi terünkben a három szög szögeinek összege tényleg 180°-nak adódik-e? Világos, hogy a geometria csak akkor állítható a földmérés és a csillagászat szolgálatába, ha kiegészítjük a természetes mértannal.

* Ezzel az egyenes vonalhoz is egy természeti tárgyat rendeltünk. Egy merev test három pontja *A, B, C,* akkor van egy egyenesen, ha adott *A* és C pontok mellett a B-t úgy választjuk meg, hogy *AB* és *BC* távolságok összege a lehető legkisebb legyen. Elégedjünk meg itt ezzel a hézagos megjegyzéssel.

*** Eközben persze feltesszük, hogy a mérés eredménye egész szám. Ettől a nehézségtől beosztott mérőrúd alkalmazásával szabadulhatunk, amelynek bevezetése elvileg új módszert nem jelent.

következő helymeghatározást: "Budapesten az Engels-téren".[***] Itt a föld felülete az a merev test, amelyre a helymeghatározást vonatkoztatjuk; ezen van az "Engels-tér Budapesten", amely tulajdonképpen egy névvel ellátott, megjelölt pont, amellyel az esemény térbelileg egybeesik.[*]

A helymeghatározásnak ez az egyszerű módja csak merev testek felületén levő helyeket ismer, és ahhoz van kötve, hogy ezen a felületen megkülönböztethető pontok legyenek. Lássuk, miként szabadul az emberi szellem ettől a két korlátozástól, anélkül, hogy ezáltal a helymeghatározás lényege változást szenvedne. Ha pl. az Engels-tér felett egy felhő lebeg, ennek a földfelületre vonatkoztatott helye oly módon rögzíthető, hogy a téren a felhőig nyúló merőleges póznát állítunk fel. Hosszát a mértékegységgel megmérjük. Most megadjuk még a pózna talppontjának helyét, és tökéletes helymeghatározást végeztünk. Ezen a példán látható, miképpen történt a hely fogalmának finomodása.

a) Azt a merev testet, amelyre a helymeghatározást vonatkoztatjuk, megtoldjuk annyira, hogy elérje a lokalizálandó tárgyat.

b) A hely jellemzésére megnevezett jelzőpontok helyett számokat használunk (jelen esetben a mérőrúddal megmért póznahosszt).

c) Felhőmagasságról beszélünk akkor is, ha a felhőig érő póznát egyáltalán fel sem állítjuk. Ilyenkor a föld felszínének különböző helyeiről a fény terjedési tulajdonságainak figyelembevételével végzett optikai felvételek segítségével állapítjuk meg, milyen hosszúnak kellene lennie a póznának, hogy a felhőig érjen.

Láthatjuk ebből, hogy a helymeghatározások szempontjából nagyon előnyös, ha mérőszámok alkalmazásával megszabadulhatunk a merev testeken (amelyekre a helymeghatározásokat vonatkoztatjuk) levő jelzőpontoktól. A mérő fizika ezt a Cartesius-féle koordináta-rendszer alkalmazásával éri el.

Ez nem egyéb, mint három egymásra merőleges és egy merev testté egyesített sík fal. Bármi felé történésnek a koordinátarendszerre vonatkoztatott helye annak a három merőlegesnek, azaz koordinátának (x, y, z) a hosszával jellemezhető, amelyet az említett történés helyéről a három sík falra bocsátunk. (Lásd a 2. ábrát a 20. oldalon.) Ennek a három merőlegesnek a hosszát merev rudakkal végzendő oly műveletek sorával határozhatjuk meg, amelyeket az euklideszi geometria törvényei és módszerei írnak elő.[4]

A gyakorlatban a koordinátarendszert többnyire nem valóságos falak alkotják; a koordinátákat nem merev rudakkal végzett szerkesztések útján, hanem közvetve határozzuk meg. A helymeghatározások fizikai értelmét azonban mindig megelőző fejtegetéseinkkel megegyezésben kell keresnünk, nehogy a fizika és asztronómia eredményei a homályba vesszenek.[**]

[***]Itt a fordító megengedett magának annyi változtatást a szövegen, hogy Einstein "in Berlin, auf dem Potsdamer Platz" példája helyett magyar példával élhessen. *A ford.*

[*]Felesleges itt annak vizsgálata, hogy mit jelent a "térbeli egybeesés", mert ez a fogalom *annyira* világos, hogy egyes adott esetben alig lesz véleménykülönbség, vajon fennáll-e az "egybeesés", vagy sem.

[4]A legszemléletesebb Cartesius-féle koordinátarendszert szolgáltatja egy terem padlója és két egymásra merőleges fala. Valamely pontnak a távolsága a padlótól, ill. a két faltól adja meg a pont három koordinátáját. A padló és a két fal három kölcsönösen merőleges egyenesben metszi egymást. Ezek a rendszer tengelyei. Rajzlapon a koordinátarendszert a három tengellyel ábrázoljuk. A következőkben különbözőnek fogunk nevezni két koordinátarendszert, ha egymáshoz képest mozognak. Így pl. a vasúti kocsinak három, egy csúcsból kiinduló éle, másfelől a föld felszínén egy vasúti sín és a reá merőleges vízszintes, ill. függőleges rúd szolgál a két különböző koordinátarendszer tengelyeiül.

[**]Csak e könyv második részében tárgyalt általános relativitás elmélete teszi majd szükségessé ennek a felfogásnak finomabbá tételét és megváltoztatását.

Az eddigieket összefoglalva: a történések térbeli leírására valamely merev test szolgál, amelyre a jelenségeket vonatkoztatjuk. Ez a vonatkoztatás feltételezi, hogy az "egyenes darabokra" érvényesek az euklideszi geometria tételei, és hogy az "egyenes darabot" fizikailag egy merev test és az ezen levő két jel képviseli.

3. Tér és idő a klasszikus mechanikában

Ha minden súlyos aggály és beható magyarázat nélkül a mechanika feladatát így szögezem le: "A mechanikának le kell írnia, miként változtatják a testek térbeli helyüket az időben", akkor a világosság szelleme ellen elkövetett halálos bűnnel terhelem lelkiismeretemet; fedjük fel a bűnöket.

Nem világos, hogy mit értsünk itt a "hely"-en és "tér"-en. Egyenletes sebességgel haladó vasúti kocsi ablakánál állunk, és követ ejtünk le a vasúti töltésre anélkül, hogy hajítanók. Úgy látjuk (eltekintve a légellenállás hatásától), hogy a kő egyenes vonalban esik a pályatestre. Egy gyalogos, aki ezt a csínyt a gyalogútról nézi, úgy látja, hogy a kő parabolaívben esik a földre. Mármost azt kérdezzük: "ténylegesen" egyenesen, avagy parabolán helyezkednek el azok a "helyek", melyeket a leeső kő érint? Mit jelent továbbá itt a "térben" való mozgás? Válaszunk a 2. fejezetben közöltek után magától értetődik. Mellőzzük egyelőre a homályos "tér" szót, amelyen, valljuk be nyíltan, semmiféle dolgot nem gondolhatunk el; beszéljünk helyette "a gyakorlatilag merev testre vonatkoztatott mozgásról". Ily testhez (a vasúti kocsihoz vagy a földfelülethez) viszonyított helyek értelmét az előbbi fejezetben már kimerítően definiáltuk. A "vonatkoztató test" helyett a matematikai tárgyalásra alkalmas "koordinátarendszer" fogalmának bevezetésével mondhatjuk: a kő a vasúti kocsihoz rögzített koordinátarendszerhez képest egyenest ír le, a föld felületéhez rögzített rendszerhez viszonyítva pedig parabolát. Nincs tehát "önmagában vett" pályagörbe (olyan görbe, amelyen a test mozog), hanem csakis meghatározott testhez viszonyított pályagörbéről lehet beszélni.[5]

A mozgás leírása azonban csak akkor lesz *teljes,* ha megadjuk, hogyan változik a test helye, az *időben,* vagyis a pálya minden pontjára vonatkozóan meg kell adnunk, melyik időpontban jut a test oda. Ezeket az adatokat az idő olyan definíciójával kell kiegészítenünk, hogy az időértékeket ebből a definícióból következő, elvileg észlelhető mennyiségekként (mérési eredményekként) tekinthessük. Példánk esetében ennek a követelménynek - a klasszikus mechanika talaján - a következőképpen felelhetünk meg. Képzeljünk két tökéletesen egyforma órát; egyiket a vasúti kocsi ablakában álló ember kezében, másikat pedig a gyalogúton haladónál. Mindkettő megállapítja, hogy a megfelelő vonatkoztató test melyik helyén van a kő azokban a pillanatokban, mikor a kezében levő óra egyet ketyeg. Nem bocsátkozhatunk most annak a pontatlanságnak kimutatásába, amely a fénysebesség véges voltából adódik. Erről és egy másik itt fennforgó nehézségről később beszélünk részletesen.[6]

---

[5]Ezt a tényt így szokás kifejezni: a pályagörbe nem abszolút, hanem relatív fogalom. Két különböző koordinátarendszerben a pályagörbe más és más.

[6]Nagyon jellemző, hogy Einstein meg sem kísérli fogalmi definíciót adni a térről és az időről. A kettőnek csakis mérhető elemeiről beszél: Egyfelől a koordinátákról mint távolságokról másfelől az időpontokról és időtartamokról. A filozófus ezt talán hiánynak minősíti, de a fizikus feltétlenül helyesli. Planck szerint valamely fizikai mennyiség mérési módjának megadása teljesen pótolja a fogalmi definíciót (ti. a fizikus szempontjából).

4. A Galilei-féle koordinátarendszer

Mint tudjuk, a Galilei - Newton-féle mechanika tehetetlenségi-tételnek nevezett alaptörvénye így szól: az a test, amely elegendő távolságban van más testektől,[7] megmarad a nyugvás, vagy pedig az egyenes vonalú egyenletes mozgás állapotában. Ez a tétel nemcsak a testek mozgásáról jelent ki valamit, hanem a mechanikában megengedhető vonatkoztatási testekről, vagy koordinátarendszerekről is, amelyeket mechanikai leírásokban alkalmazni szabad. A látható állócsillagok olyan testek, amelyekre a tehetetlenség tétele bizonyára jó közelítéssel alkalmazható. A Földdel merev kapcsolatban levő koordinátarendszerből nézve minden állócsillag egy (csillagászati) nap alatt óriási sugarú kört ír le, ellentétben azzal, amit a tehetetlenség tétele kijelent. Ha tehát ragaszkodunk ehhez a törvényhez, akkor a mozgásokat csak olyan koordinátarendszerekre szabad vonatkoztatnunk, amelyekhez viszonyítva az állócsillagok nem végeznek körmozgást. Az ilyen mozgásállapotban levő koordinátarendszert, amelyben a tehetetlenség tétele érvényben van, "Galilei-féle koordinátarendszer "-nek hívjuk. A Galilei - Newton-féle mechanika törvényei csakis Galilei-féle koordinátarendszerben tarthatnak számot érvényességre.[8]

5. A szűkebb értelemben vett relativitás elve

Induljunk ki most is az egyenletes sebességgel gördülő vasúti kocsi példájából, hogy tárgyalásunk lehetőleg szemléletes legyen. Ennek mozgását egyenletesen haladónak hívjuk ("egyenletesnek", mert állandó sebességű és irányú, "haladónak", mert habár a kocsi a töltéshez viszonyított helyzetét változtatja, közben semmiféle forgómozgást nem végez). A levegőben egy holló repül - a vasúti töltésről nézve - egyenes vonalban egyenletes sebességgel. A holló mozgását - a mozgó vonatról nézve - igaz, más sebességűnek és irányúnak, de szintén egyenes vonalúnak és haladónak ítéljük. Elvontabban kifejezve: ha az m tömeg egy K koordinátarendszerhez viszonyítva egyenes vonalban, egyenletesen mozog, akkor egyenes vonalú egyenletes mozgást végez olyan másik K' rendszerhez viszonyítva is, amely maga is egyenletes haladó mozgásban van a K rendszerhez képest. Szemmel tartva az előző pontban mondottakat, ebből következik:

Ha a K koordinátarendszer Galilei-rendszer, minden más K' koordinátarendszer, amely a K-hoz viszonyítva egyenletes haladómozgást végez, szintén Galilei-rendszer; a K' rendszerben éppen úgy igazak a Galilei - Newton-féle mechanika törvényei, mint a K-ban.

Még tovább megyünk az általánosításban: ha a K' koordinátarendszer a K-hoz képest egyenletesen és forgás nélkül mozog, úgy a természet eseményei a K' rendszerhez viszonyítva ugyanazon általános törvények szerint folynak le, mint a K rendszerben. Ez a kijelentés a "relativitás elve" (szűkebb értelemben).[9]

---

[7] Vagyis olyan test, amelyre semmi erő sem hat. Erő ugyanis csak más testekből indul ki; ha azok nagyon távol vannak, erőhatásuk elhanyagolhatóan kicsiny.

[8] Ma inkább inerciális koordinátarendszernek szokás nevezni azt, amelyben a tehetetlenség törvénye érvényes. Az inerciarendszer fogalmi megalkotása Lángé német fizikustól ered.

[9] A relativitás elve nem cserélendő össze a relativitás elméletével. Az elmélet három axiómán épül fel, ezek egyike a relativitás elve. Ma az elvet inkább így szokás kifejezni: az összes inerciarendszerek (amelyek egymáshoz képest mind egyenes vonalú, egyenletes mozgást végeznek), teljesen egyenértékűek. Tehát a természettörvények minden ilyen rendszerben egyformán hangzanak. Az

Mindaddig, míg a fizika arról volt meggyőződve, hogy minden természeti jelenség leírható a klasszikus mechanika segítségével, nem kételkedhetett a relativitás elvének érvényességében. Az elektrodinamika és az optika újabb fejlődésével azonban mindinkább nyilvánvalóvá vált, hogy a klasszikus mechanika nem nyújt elegendő alapot a természet fizikai leírására. Ezzel egyszersmind a relativitás elvének érvényessége is vitathatóvá vált, és az sem látszott kizártnak, hogy a válasz esetleg tagadó lesz.

A relativitás elvének érvényessége mellett erősen tanúskodik ugyan két általános tény. Noha a klasszikus mechanika nem nyújt elég széles alapot minden fizikai jelenség elméleti leírásához, mégis nagyon jelentős igazságtartalommal kell rendelkeznie, mert hiszen csodálatos pontossággal adja meg az égitestek valóságos mozgását. Ezért kell, hogy a relativitás elve a mechanika terén is nagy pontossággal érvényes legyen. Márpedig a priori kevéssé valószínű, hogy egy ilyen általános érvényű elv egyik téren szigorúan igaz, másutt pedig felmondja a szolgálatot.

A másik érv, amelyhez még visszatérünk, a következő: ha a relativitás törvénye (szűkebb értelemben) nem érvényes, akkor ebből az következnék, hogy egymáshoz viszonyítva egyenletesen mozgó *K, K', K",* stb. Galilei-féle koordinátarendszerek a természeti történések leírására nem egyenértékűek. Ez pedig alig lenne másképpen elképzelhető, mint úgy, hogy a természettörvények csak akkor fogalmazhatók különösen egyszerű és természetes alakban, ha az összes Galilei-koordinátarendszerek közül egyet, amely meghatározott mozgásállapotban van, vonatkoztató rendszerül választhatnánk ki (K_0). Ezt a rendszert - előnyös volta miatt a természet leírásában - joggal nevezhetnénk "abszolút nyugvónak", a többi *K* Galilei-rendszert pedig mozgónak. Ha a vasúti töltés lenne ez a K_0 rendszer, akkor a vasúti kocsi oly *K* rendszert jelentene, amelyre vonatkozóan kevésbé egyszerű törvények lennének érvényben, mint a K_0-hoz viszonyítva. Hogy kevésbé egyszerűek, azt arra kellene visszavezetnünk, hogy a *K* kocsi a K_0-hoz képest ("valóságos") mozgásban van. A *K*-ra vonatkoztatva megfogalmazott ilyen természettörvényekben a vasúti kocsi menetsebesség-irányának és nagyságának kellene szerepelnie. Azt várhatnánk például, hogy egy orgonasíp hangja a vasúti kocsiban más és más aszerint, hogy tengelyével a menetiránnyal párhuzamosan, vagy arra merőlegesen helyezzük el. Márpedig Földünket - a Nap körül végzett mozgása miatt - *másodpercenként 30 km* sebességgel haladó kocsihoz hasonlíthatjuk. A relativitás elvének érvénytelensége esetén azt kellene várnunk, hogy a Föld pillanatnyi mozgásiránya belenyúl a természettörvényekbe, vagyis, hogy a fizikai rendszerek magatartása függ a Földhöz viszonyított térbeli helyzetüktől. A Föld ugyanis egy év leforgása alatt keringésében változtatván sebességének irányát, nem maradhat egész éven át nyugalomban a feltételezett K_0 rendszerhez viszonyítva. A földi fizikai tér ilyfajta anizotrópiáját, azaz a különböző irányok különböző fizikai értékűségét minden gondosság ellenére sem lehetett megállapítani. Ez pedig súlyosan latba eső érv a relativitás elvének javára.[10]

---

elvnek az egész fizikában rendkívül nagy a heurisztikus ereje.

[10] Az inerciarendszerek egyenértékűségét, amelyből a relativitás elve következik, az alábbi okoskodással látjuk be a legkönnyebben. Tegyük fel, hogy a mindenséget valamilyen finom anyag tölti be, pl. a régi fizika étere. Akkor abból a tényből, hogy két inerciarendszer egymáshoz képest mozog, az következik, hogy az éterhez képest különböző sebességgel mozognak. Ez már objektív különbség volna, tehát a két inerciarendszernek nem kellene egyenértékűnek lennie. A modern fizika azonban véglegesen elvetette az éter létezésének hitét. Az univerzumot nem tölti ki semmiféle folytonos anyag. Ennélfogva a két inerciarendszer a "semmi"-hez képest mozog különböző sebességgel. Ez nyilván értelmetlenség és nem jelenthet tényleges különbséget.

6. A. sebességek összetevésének tétele a klasszikus mechanikában

Fusson a már sokszor említett vasúti kocsi állandó *v* sebességgel a síneken. A kocsi belsejében egy utas megy a kocsi hosszirányában, *w* sebességgel a vonat mozgásának irányában. Vajon mekkora *W* sebességgel mozog sétája közben az utas - a vasúti töltéshez viszonyítva? Az egyetlen lehetséges felelet, úgy látszik, a következő meggondolásból adódik:

Ha emberünk egy másodpercre megállna, akkor a töltéshez viszonyítva a kocsi sebességével egyező *v* útdarabbal jutna előre. A valóságban azonban ezenkívül még a kocsihoz viszonyítva (tehát a töltéshez viszonyítva is) megteszi ebben a másodpercben azt a *w* utat, amely mozgási sebességével azonos nagyságú, így utasunk az említett másodpercben a töltéshez viszonyítva összesen a

$$W = v + w$$

útdarabot teszi meg. Később látni fogjuk, hogy ez az okfejtés, amely a sebességek összegezésének tételét a klasszikus mechanika szerint fejezi ki, nem lesz fenntartható vagyis, hogy az imént felírt törvény igazában nem állhat meg.[11] Egyelőre azonban ennek a törvénynek a helyességére fogunk építeni.

7. *A fényterjedés törvényének és a relativitás elvének látszólagos összeférhetetlensége*

A fizikában alig van egyszerűbb törvény annál, amely leírja a fény légüres térben való tovaterjedését. Minden iskolás gyermek tudja, vagy tudni véli, hogy ez a tovaterjedés egyenes vonalban és c = *300 000 km másodpercenkénti* sebességgel történik. Nagy pontossággal tudjuk azt is, hogy ez a sebesség minden színre ugyanaz; mert ha nem így volna, akkor abban az esetben, ha egy állócsillagot sötét kísérője elfed, a különböző színekre vonatkozó emissziós minimumot nem egyidejűleg figyelhetnénk meg. A kettős csillagok megfigyeléséhez kapcsolódó hasonló meggondolásokkal De-Sitter holland csillagász azt is kimutatta, hogy a fény terjedési sebessége nem függhet a fényt kibocsátó test mozgási sebességétől. Az a feltevés pedig, hogy ez a terjedési sebesség a "térben" felvett iránytól függne, önmagában valószínűtlen.[12]

Röviden, tegyük fel, hogy az iskolásgyermek joggal hisz a (vákuumban) állandó *c* fénysebesség egyszerű törvényében! Ki hinné, hogy ez az egyszerű törvény a mindent lelkiismeretesen megfontoló fizikust a legnagyobb gondolati nehézségekbe sodorta? Ezek a nehézségek a következőkből adódtak.

Előrebocsátjuk, hogy a fényterjedés folyamatát is, mint minden más folyamatot, merev testre (koordinátarendszerre) kell vonatkoztatnunk. Ilyen rendszerül most is a vasúti töltést fogjuk választani. Képzeljük el, hogy a felette levő levegőt eltávolított ük. A töltés hosszában egy fénysugarat küldünk, amelynek eleje az előzőek értelmében *c* sebességgel mozog - a töltéshez

---

[11] Az okoskodás azért nem tartható fenn, mert a későbbiek során ki fog tűnni, hogy egy távolság, ill. időtartam mérése más-más értéket ad, ha a mérést egyszer a vasúti kocsi, másszor a töltés koordinátarendszerében végezzük. A sebesség pedig a befutott távolság és a mozgás időtartamának a hányadosa. Ha tehát az utas a vasúti kocsihoz képest pl. w sebességgel mozog, akkor a töltés koordinátarendszerében más a sebessége.

[12] A fény csak kristályos testekben terjed különböző irányokban más-más sebességgel. A világűr pedig nem kristályos szerkezetű, hanem izotrop.

viszonyítva. Vasúti kocsink a síneken most is *v* sebességgel fut, még pedig a fénysugáréval megegyező irányban, de annál természetesen sokkal lassabban. Keressük a fénysugár terjedési sebességét - a vasúti kocsihoz viszonyítva. Könnyen beláthatjuk, hogy az előzőkben mondottakat itt alkalmazhatjuk; a vasúti kocsin sétáló ember játssza a fénysugár szerepét. Az utasnak a töltéshez viszonyított *W* sebessége helyét most a fénysugárnak a töltéshez viszonyított *c* sebessége veszi át; *w* pedig a fény keresett sebessége a kocsihoz képest:

$$w = c - v$$

A fénysugárnak a kocsihoz viszonyított terjedési sebessége tehát c-nél kisebbre adódik.

Ez az eredmény pedig ellentmond az 5. fejezetben kifejtett relativitás elvének. Mert eszerint a fényterjedés törvényének (vákuumban), minden más természettörvényhez hasonlóan, a vasúti kocsira mint koordinátarendszerre vonatkozóan szükségszerűen ugyanúgy kell szólnia, mint a pályatesthez viszonyítva. Ez pedig az előbbiek szerint lehetetlennek látszik. Ha - a töltéshez viszonyítva - minden fénysugár c sebességgel terjed tova, akkor éppen ezért a fényterjedés törvényének a kocsira vonatkoztatva másnak kell lennie - úgy látszik - , a relativitás elvével ellentétben.

E súlyos dilemma láttán úgy tűnik, hogy vagy a relativitás elvét, vagy pedig a vákuumban való fényterjedés egyszerű törvényét el kell ejtenünk. Az olvasó, ki eddigi okoskodásainkat figyelemmel kísérte, bizonyára azt várja, hogy a természetessége és egyszerűsége miatt szellemünknek szinte elutasíthatatlanul felkínálkozó relativitási elvet kell fenntartani, míg a fényterjedésnek vákuumban érvényes törvénye egy összetettebb és a relativitással összhangban levő törvénnyel helyettesítendő. Az elméleti fizika fejlődése azonban megmutatta, hogy ez az út járhatatlan. H.A. Lorentznek a mozgó testekben végbemenő elektrodinamikai és optikai folyamatokra vonatkozó úttörő vizsgálatai azt mutatták ugyanis, hogy az e téren szerzett tapasztalatok kényszerítő szükségszerűséggel az elektromágneses folyamatoknak olyan elméletéhez vezetnek, amelynek elkerülhetetlen következménye a vákuumban tovaterjedő fény sebességének állandósága. Ezért a vezető teoretikusok inkább hajlandók voltak a relativitás elvének elvetésére, noha egyetlenegy olyan tapasztalati tényt sem tudtak felmutatni, amely ennek a törvénynek ellentmondott volna.

Itt szólt közbe a relativitás elmélete. A tér és idő fizikai fogalmainak elemzéséből kitűnt ugyanis, hogy *a valóságban a relativitás elve és a fény terjedésének törvénye között semmiféle ellentmondás nincs,* sőt, hogy következetesen ragaszkodva ehhez a két törvényhez, logikailag kifogástalan elmélethez jutunk. Ezt az elméletet - megkülönböztetésül a később tárgyalandó általános elmélettől - "speciális relativitáselmélet"-nek hívjuk. Az alábbiakban ezt fogjuk alapvonalaiban tárgyalni.

8. A fizika időfogalmáról

A vasúti töltés két egymástól távol fekvő *A* és *B* pontján becsapott a villám a sínekbe. Azt az állítást fűzzük ehhez, hogy a két villámütés *egyidejűen* történt. Ha most azt kérdem tőled, kedves olvasóm, hogy van-e valami értelme ennek az állításnak, úgy bizonyára a meggyőződés hangján fogsz "igen"-nel válaszolni. Ha azonban arra kérlek, hogy állításod értelmét pontosabban magyarázd meg, hosszabb-rövidebb gondolkodás után arra eszmélsz, hogy nem is olyan egyszerű a felelet erre a kérdésre, mint az első pillanatban látszott.

Kis idő múltán talán a következő válasz jut eszedbe: "A fenti kijelentés értelme magában világos és nem szorul további magyarázatra; de igenis gondolkodnom kellene, ha az volna feladatom, hogy mérések útján állapítsam meg, vajon adott esetben a két jelenség egyidejűleg történt-e, vagy sem." Ez a felelet azonban nem kielégítő, mégpedig a következők miatt. Tegyük fel, hogy egy ügyes meteorológus éleselméjű meggondolások alapján arra a megállapításra juthat, hogy a villámnak mindig egyidejűleg kell az *A* és *B* pontokba csapni. Ez esetben feladatunk annak megállapítása lenne, hogy ez az elméleti eredmény megfelel-e a valóságnak? Egészen hasonlóan alakulnak a viszonyok minden oly fizikai állításnál, amelynél az "egyidejűség" fogalma szerepet játszik. Valamely fogalom a fizikus számára csak akkor létezik, ha megvan annak lehetősége, hogy adott esetben megállapíthassuk, vajon helyes-e a fogalom, vagy sem. Tehát az egyidejűségnek olyan definíciója szükséges, hogy vele egyszersmind módszer birtokába jussunk, amellyel a jelen esetben kísérletileg dönthessük el, vajon a két villámcsapás egyidejűleg történt-e, vagy sem. Mindaddig, míg ez a követelésünk nem teljesül, a fizikus (de a nemfizikus is!) csalódik ha azt hiszi, hogy az egyidejűség állításának értelmet tulajdoníthat (mindaddig, míg ez meggyőződéseddé nem vált, kedves olvasóm, ne haladj tovább).[13]

Egy ideig gondolkodván, az egyidejűség megállapítására a következő javaslattal állsz elő: mérjük meg az *AB* egyenes darabot a töltés mentén. Állítsunk az *M* felezőpontba egy megfigyelőt, ki olyan felszereléssel (pl. 90° alatt hajló két tükörrel) rendelkezik, amellyel az *A* és *B* pontokat egyszerre láthatja. Ha ez a megfigyelő a két villámcsapást egyidőben látja, akkor azok tényleg egyidejűleg történtek.

Javaslatoddal nagyon meg vagyok elégedve; ám mégsem tartom a kérdést teljesen tisztázottnak, mert úgy érzem, hogy a következő ellenvetést kell tennem: "Definíciód feltétlenül helyes lenne, ha tudnám, hogy a fény, amely az *M*-ben levő megfigyelő számára a villámcsapások tudomásulvételét közvetíti, az *AM* darabon ugyanazzal a sebességgel halad, mint a *BM* darabon. Ennek az előfeltételnek vizsgálata pedig csak akkor lenne lehetséges, ha már rendelkeznénk az időmérés módszerével. Úgy látszik tehát, mintha logikai cirkulusban mozognánk."

---

[13] Einstein határozottan kiemeli, hogy egy definíció a fizikus számára értéktelen, ha nem vagyunk olyan módszer birtokában, amellyel a definícióból eredő folyományokat kísérletileg ellenőrizhetjük, így pl. az egyidejűség fogalma csak az Einstein által vázolt tükörkísérlet révén nyer határozott értelmet. Ez a kísérlet felhasználható elvileg arra is, hogy akárhány (különböző helyeken történő) esemény egyidejűsége is pontosan értelmezhető legyen. Ha ugyanis pl. három esemény *A, B, C* helyeken történik, három derékszögű tükröt használhatunk. Az egyiket az *AB távolság* középpontjában, a másodikat *BC* és a harmadikat *AC* középpontjában gondoljuk felállítva. Az az állítás, hogy a három esemény egyidejű, azt jelenti akkor, hogy a tükrök sorban kimutatták az *A, B, a B,C* és *A, C* események egyidejűségét. Einstein felhasználja az egyidejűség vázolt fogalmát a fizikai idő definíciójára is. "Idő"-n tulajdonképpen időpontot ért. Valamely esemény ideje az esemény helyén levő óra mutatóállása. Gondoljuk el, hogy valamely koordinátarendszer terében sűrűn egymás mellett pontosan egyenlő szerkezetű órák vannak elhelyezve. Az egyenlő szerkezet és dimenzionálás biztosítéka annak, hogy egyenlő gyorsan járnak. Sűrű elhelyezésük pedig garantálja, hogy bárhol történik esemény, a helyi óra mutatóállása megadja az esemény idejét. Természetes, hogy különböző helyi idők csak akkor hasonlíthatók össze, ha az órák szinkronizálva vannak. Hogyan eszközlendő az órák összeigazítása, arra Einstein nem tér ki. Megelégszik azzal a ténnyel, hogy tükörkísérletével bármely két óra együttjárása mindig ellenőrizhető. Ha feltesszük hogy rendszeren belül a szinkronizálás megtörténtét, egységes rendszeridőre tettünk szert. Két esemény egy koordinátarendszerben akkor egyidejű, ha rendszeridejük megegyezik.

Némi további meggondolás után azonban joggal mérsz végig megvető pillantásoddal, kijelentvén: "Definíciómat mégis fenntartom, mert az valójában semmit sem tételez fel a fényről. Az egyidejűség definíciójától csak azt az *egyet* kell követelnünk, hogy minden reális esetben nyújtson módot annak tapasztalati eldöntésére, helytálló-e a meghatározandó fogalom, vagy sem. Hogy definícióm erre képes, az elvitathatatlan. Az pedig, hogy a fénynek az *AM,* illetve *BM* útdarabok befutására egyforma időre van szüksége, a valóságban nem a fény *fizikai természetéről szóló feltevés, vagy hipotézis,* hanem oly *megállapodás,* amelyet szabad belátásunk szerint tehetünk avégből, hogy az egyidejűség definíciójához jussunk."

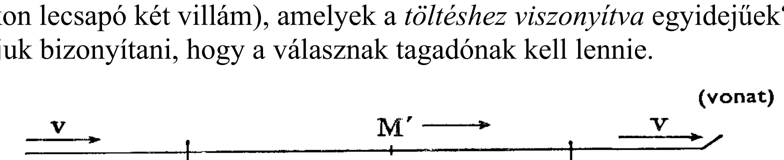
Ezzel a definícióval természetesen nemcsak annak a kijelentésnek adhatunk egzakt értelmet, hogy két esemény egyidejű, hanem tetszőleges számú eseményre értelmeztük az egyidejűséget, bármilyen is ez események helye a vonatkoztató testhez (töltéshez) viszonyítva.* Ezzel eljutottunk egyszersmind a fizikában az "idő" definíciójához. Képzeljünk ugyanis a töltésnek (koordinátarendszernek) *A, B* és *C* pontjaiban egyenlő szerkezetű órákat úgy igazítva, hogy mutatójuk (a fenti értelemben vett) egyidejű állása ugyanaz. Ekkor egy esemény "idején" annak az órának az időadatát (mutatóállását) értjük, amely az eseménnyel (térbelileg) közvetlenül szomszédos. Ilyen módon minden eseményhez egy elvileg mérhető időértéket rendelhetünk.

Ez a megállapodás egy további fizikai hipotézist is tartalmaz, amelynek helyességében tapasztalati ellenérvek híján aligha kételkedhetünk. Feltesszük ugyanis, hogy mindezek az órák "egyforma gyorsan" járnak, ha szerkezetük egyforma. Szabatos szövegezésben: ha a vonatkoztató test két különböző helyén nyugvó órákat úgy állítjuk be, hogy egyiknek *egy adott* mutató állása a másik mutatójának *ugyanazon* állásával *egyidejű* (a fenti értelemben), akkor az egyforma mutatóállások egyáltalában egyidejűek (a fenti definíció értelmében).

9. Az egyidejűség relativitása

Eddigi megfontolásainkat meghatározott testre vonatkoztattuk, amelyet "vasúti töltésnek" hívtunk. Haladjon a síneken egy nagyon hosszú vonat állandó *v* sebességgel az 1. ábrán megadott irányban. A vonaton utazók előnyösen használják majd a vonatot merev vonatkoztatási testnek (koordinátarendszernek); minden eseményt a vonathoz viszonyítanak. Minden esemény, amely a pálya mentén megy végbe, a vonat egy bizonyos pontjában is lejátszódik. Az egyidejűség definíciója a vonathoz viszonyítva is ugyanúgy adható meg, mint a vasúti töltéshez viszonyítva. Ebben az esetben azonban a következő kérdés vetődik fel:

Egyidejűek-e a *vonathoz viszonyítottan* is azok az események (pl. az *A* és *B* pontokon lecsapó két villám), amelyek a *töltéshez viszonyítva* egyidejűek? Azonnal be fogjuk bizonyítani, hogy a válasznak tagadónak kell lennie.



1. ábra

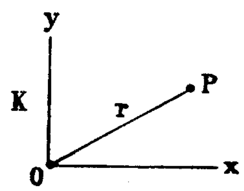
* Feltesszük továbbá, hogy a három esemény, *A, B,C* különböző helyeken olyképpen megy végbe, hogyha *A* a *B*-vel és *B* a C-vel egyidejű (a fenti meghatározás értelmében), akkor az egyidejűség kritériuma az *A - C* eseménypárra is fennáll. E feltevés a fényterjedés törvényéről szóló fizikai hipotézis, amelynek feltétlenül fenn kell állnia, ha azt akarjuk, hogy a vákuumban terjedő fény sebességének állandóságáról szóló törvény fenntartható legyen.

Ha azt mondjuk, hogy az *A* és *B* villámcsapások a töltésre vonatkoztatva egyidejűek, akkor ennek az a jelentése, hogy az *A* és *B* villámok helyéről kiindult fénysugarak az $\overline{AB}$ töltésdarab *M* felezőpontjában találkoznak. Ám az *A* és *B* eseményeknek *A* és *B* helyek felelnek meg a vonaton is. Legyen *M'* a gördülő vonat $\overline{AB}$ darabjának közepe. Ez az *M'* pont egybeesik ugyan az *M* ponttal a villámütés pillanatában (a töltésről nézve), az ábra szerint azonban a vonat *v* sebességével mozog jobb felé. Ha a vonatban az *M'* pont mellett ülő megfigyelőnek nem volna meg a vonat *v* sebessége, úgy tartósan az *M* pontban maradna, és ebben az esetben az *A* és *B* villámütésekből felvillant fénysugarak őt egyidejűleg érnék, vagyis a két fénysugár éppen nála találkoznék. Csakhogy a valóságban (a töltésről nézve) ő a B-ből jövő fénysugárnak elébe szalad, az A-ból érkezőtől viszont eltávolodik. Tehát a megfigyelő a *B* pontból jövő fénysugarat korábban fogja megpillantani, mint az A-ból jövőt. Annak a megfigyelőnek tehát, aki a vonatot használja vonatkoztató testnek, arra az eredményre kell jutnia, hogy *B* pontban a villám előbb csapott le, mint az *A* -ban. Mindebből pedig azt a fontos következtetést vonhatjuk le:

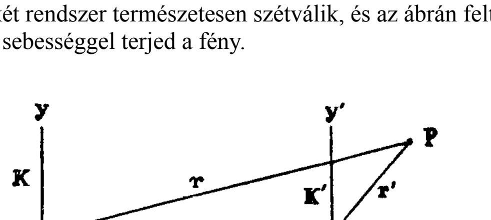
Olyan események, amelyek a töltéshez viszonyítva egyidejűek, a vonathoz viszonyítva már nem egyidejűek, és megfordítva (az egyidejűség relativitása). Minden vonatkoztató testnek (koordinátarendszernek) meg van a saját külön ideje; az időadatnak csak akkor van értelme, ha a vonatkoztató testet is megadjuk, amelyre az időadatok vonatkoznak.

A fizika a relativitás elmélete előtt hallgatólagosan mindig feltette, hogy az időadatok abszolút jelentésűek, vagyis függetlenek a vonatkoztató rendszer mozgásállapotától.[14]

[14]Hogy egy esemény időadata minden koordinátarendszerben más és más, legkönnyebben úgy látjuk be, ha vázoljuk, hogyan is szinkronizálandók egy koordinátarendszer órái. Bocsássunk ki a *K* koordinátarendszer *0* kezdőpontjából egy fényjelet akkor, mikor az ottani óra $t = 0$ időt mutat. A *P* pontban gondolt megfigyelőt előzetesen értesítjük, hogy mikor a fényjel nála felvillan,



állítsa óráját t = r/c időre. Alapfeltevésünk szerint ugyanis a fény c sebességgel terjed, az *r* távolság befutására tehát r/c időre van szüksége. Egy és ugyanazon fényjellel az összes helyi órákat összeigazíthatjuk és evvel az egységes rendszeridőt meg is valósítottuk. De ugyanazzal a fényjellel két különböző koordinátarendszer óráit is szinkronizálhatjuk. Válasszunk egy *K* és *K'* rendszert, amelynek *X* és *X'* tengelyei állandóan összeesnek, *K'* pedig az *X* tengely mentén jobbra mozog. Abban a pillanatban, mikor az *O* és *O'* kezdőpontok összeesnek, bocsássunk ki a t = t' = 0 időben egy fényjelet. Miközben ez terjed, a két rendszer természetesen szétválik, és az ábrán feltüntetett helyzetet foglalja el. Mindkét rendszerben c sebességgel terjed a fény.



Mikor *P* pontba ér, az ott levő *K*-béli órát t = r/c időre, az ugyancsak ott levő *K'*-beli órát pedig t' = r'/c' időre kell állítani. Mivel *r'* nem egyenlő r-rel, t' sem egyenlő t-vel. A rendszeridők tehát különbözőek. Egységes világidőről nem lehet beszélni.

Hogy ez a feltevés az egyidejűség kézenfekvő definíciójával össze nem egyeztethető, éppen most láttuk; ha elejtjük, megszűnik a 7. fejezetben kifejtett konfliktus a vákuumban terjedő fény törvénye és a relativitás elve között.

Ezt a konfliktust ugyanis a 6. fejezetben már közölt meggondolások idézték elő, amelyek most már tovább nem tarthatók fenn. Ott azt láttuk, hogy az utas, ki a vonathoz viszonyítva *w* útdarabot tesz meg *egy másodperc alatt,* ugyanezt az utat - a töltéshez viszonyítva is - *egy másodperc alatt* járja. Miután azonban az az idő, amelyre egy bizonyos történésnek a vonathoz viszonyítva szüksége van, az imént közölt meggondolások szerint nem lehet egyenlő ugyanennek a történésnek a töltésre vonatkoztatott tartalmával, nem állíthatjuk tehát, hogy a vasúti kocsiban járkáló utas a pályatesthez viszonyítva a *w* útdarabot oly idő alatt teszi meg, amely - a töltésről nézve - egy másodperccel egyenlő.

A 6. fejezet meggondolása egyébként, még egy olyan második feltevésen alapszik, amelyről szigorú megfontolás megvilágításában kitűnik, hogy önkényes, még ha a relativitás elméletének felállítása előtt (hallgatólagosan) állandóan alkalmazták is.

10. A térbeli távolság fogalmának relativitása

Válasszuk a vasúti töltés hosszirányában *v* sebességgel gördülő vonaton két helyet, (pl. az 1. és 100. kocsi közepét), és állapítsuk meg a távolságukat. Azt már tudjuk, hogy távolság méréséhez legelőször olyan vonatkoztató testre van szükségünk, amelyhez viszonyítva a távolságot felmérjük. Legegyszerűbb, ha maga a vonat a vonatkoztató test. A vonatban utazó megfigyelő úgy méri meg a távolságot, hogy mérőrúdját egyenes vonalban, pl. a kocsi padozatán rendre annyiszor rakja fel, amíg egyik pontból a másikig jut. Az a szám, amely megmondja, hányszor rakta fel a rudat, lesz a keresett távolság.

Egészen másképpen áll a dolog azonban, ha ezt a távolságot a pályatestről kell lemérnünk. Erre a következő módszert használjuk: jelöljük A'-vel és B'-vel a vonatnak azt a két pontját, amelyeknek távolságáról van szó. Ez a két pont *v* sebességgel mozog a pályatest hosszában. Elsősorban keressük a pályatesten azt az *A,* illetve *B* pontot, amelyek mellett az A' és B' pontok egy bizonyos *t* időpillanatban - a pályatestről nézve - éppen elhaladnak. A vasúti töltésen ez a két pont (ti. *A és B)* a 8. fejezetben közölt idődefiníció nyomán meghatározható.[15] Ezután az *A* és *B* pontok távolsága is megmérhető a mérőrúdnak a töltés hosszában történő egymásutáni lefektetésével.

A priori egyáltalában nem biztos, hogy ez az utóbbi mérés ugyanahhoz az eredményhez vezet, mint az előbbi. A vasúti töltésen mért vonathossz tehát különbözhet a vonatnak magán a vonaton mért hosszától. Ez a körülmény szolgáltatja a második ellenvetést a 6. fejezetnek látszólag oly magától értetődő

[15] Einstein nem fejti ki részletesen, hogyan található meg a kérdéses *A* és *B* pont a pályatesten, csak utal arra, hogy a 8. pont alapján ez elvileg lehetséges. A tényleges keresztülvitel a következő lehet. Egy, a töltésen levő megfigyelő merőlegesen a sínekre állítja a távcsövét. Kezében stopperóra. Az órát abban a pillanatban állítja meg, mikor A' pont képe áthalad a távcső fonálkeresztjének függőleges szálán. A vonat menetirányával szemben hosszú sor hasonló megfigyelő helyezkedik el, akik akkor állítják meg órájukat, mikor B' pont halad át fonálkeresztjükön. Most meg kell keresni azt a megfigyelőt, aki az elsővel egyező *t* időben stoppolt. A kettőnek távolsága nem más, mint az A', B' pontok egyidejű lenyomata a töltésen, vagyis az $A'B'$ távolság mérőszáma a töltésről mérve. Ez az ún. *mozgási távolság,* mert a távolság mozgott a mérőeszközhöz képest. A vonaton megejtett távolságmérés adja a *nyugalmi mérőszámot.* Világos, hogy a mozgási és nyugalmi mérőszám különböző lehet, hiszen a két mérés különbözőképpen történt.

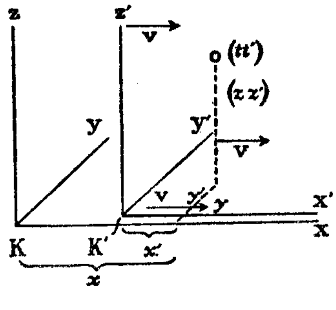
elmélkedésével szemben. Ha ugyanis a vasúti kocsiban sétáló utas az időegység alatt - *a vonaton mérve* - *w* útdarabot tesz meg, akkor nem szükségszerű, hogy ez a vonaldarab - *a pályatestről mérve* - egyezzék w-vel.

11. A Lorentz-transzformáció

Az utóbbi három fejezet megfontolásai azt mutatták, hogy a fényterjedés törvénye és a relativitás közti látszólagos ellentmondás a 7. fejezetben oly meggondolásból adódott, amely a klasszikus mechanikából két egyáltalán nem indokolt feltevést vett át. E feltevések:

1. Két esemény időköze független a vonatkoztató test mozgásállapotától.
2. A merev test két pontjának térbeli távolsága független a vonatkoztató test mozgásállapotától.

Ha elejtjük e feltevéseket, úgy a 7. fejezet dilemmája megszűnik, mert a sebességek összetételének a 6. fejezetben levezetett tétele érvénytelenné válik. Felmerül annak lehetősége, hogy a fényterjedés törvénye vákuumban összeegyeztethető a relativitás elvével. Kérdezzük: hogyan kell a 6. fejezet megfontolásait módosítanunk abból a célból, hogy e két alapvető fontosságú tapasztalati tény között fennálló látszólagos ellentmondást kiküszöböljük? Ez a kérdés egy még általánosabbhoz vezet. Mint tudjuk, a 6. fejezetben a vonathoz és a vasúti töltéshez viszonyított helyekről és időkről volt szó. Hogyan kapjuk meg egy eseménynek a vonathoz viszonyított helyét és idejét, ha ismerjük ugyanannak az eseménynek a vasúti töltésre vonatkoztatott helyét és idejét? Megfelelhetünk-e erre a kérdésre úgy, hogy a vákuumbeli fényterjedés törvénye ne ellenkezzék a relativitás elvével? Más szóval: elképzelhető-e valamely eseménynek a két vonatkoztató testhez viszonyított helye és ideje közt olyan összefüggés, hogy bármely fénysugár terjedési sebessége mind a töltéshez, mind a vonathoz viszonyítva egyformán *c* legyen? A kérdés igenlő és egészen határozott felelethez vezet, egészen határozott törvényszerűséghez, amely arra vonatkozik: hogyan alakulnak át egy esemény tér- és idő- adatai, amikor egyik vonatkoztatási testről a másikra térünk át.



2. ábra

Mielőtt részletekbe bocsátkoznánk, még közbevetőleg megjegyezzük a következőket. Mindeddig állandóan csak olyan eseményekről volt szó, amelyek a vasúti töltés mentén játszódtak le; a töltés - matematikailag - egyenes vonalként szerepelt. A 2. fejezetben megadott módon azonban a vonatkoztatásnak ezt a rendszerét gondolatban egy rúdépítménnyel oldalirányban és felfelé olyképpen folytathatjuk, hogy bárhol is menjen végbe egy esemény, ehhez a rúdépítményhez viszonyítottan lokalizálható. Ehhez hasonlóan a *v* sebességgel haladó vonatot is olyképpen megnyújtva képzeljük el, hogy minden, a még oly messzi lejátszódó események is lokalizálhatok ehhez a második építményhez vonatkoztatva is. Minden elvi hiba nélkül eltekinthetünk itt attól, hogy valóságban ezeknek az építményeknek a szilárd testek áthatolhatatlansága folytán újra meg újra le kellene rombolniuk egymást.

Minden ilyen építményben válasszunk ki képzeletben három egymásra merőleges falat, amelyeket "koordinátasíkoknak" nevezünk el ("koordinátarendszer"), így a töltésnek a *K* koordinátarendszer, a vonatnak pedig a *K'* koordinátarendszer felel meg. Bárhol is megy végbe egy esemény, a *K* rendszerben elfoglalt helyét a koordinátasíkra bocsátott *x, y, z* merőlegesekkel, idejét pedig a *t* időadattal rögzíthetjük. Ugyanez a jelenség a *K'* rendszerhez olyan megfelelő *x', y', z', t'* értékekkel rögzíthető, amelyek az előbbi *x, y, z, t* értékekkel nyilvánvalóan nem azonosak. Hogy ezeket a mennyiségeket miként kell fizikai mérések eredményeként felfognunk, fent már kimerítően tárgyaltuk.

Problémánk szabatos fogalmazásban tehát így hangzik: mekkorák valamely esemény *x', y',z', t'* értékei a *K'* rendszerben, ha ugyanennek *az* eseménynek a *K* rendszerhez viszonyított *x, y, z, t* értékei adottak? A köztük fennálló összefüggéseket úgy kell megválasztani, hogy a vákuumban való fényterjedés törvénye egy és ugyanarra a fénysugárra (éspedig minden fénysugárra) a *K'* és a *K* rendszerben egyaránt kielégíttessék.

Ha a koordinátarendszerek a 2. ábrán látható elrendezésben vannak, akkor a probléma megoldását a következő egyenletek adják:

$$x'=\frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$z'=z$$

$$y'=y$$

$$t'=\frac{t-\frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Ezt az egyenletrendszert "Lorentz-transzformáció " - nak nevezik (egyszerű levezetését a függelékben adjuk).[16]

Ha a fény terjedésének törvénye helyett a klasszikus mechanikának az idő és a hosszúságok abszolút jellegéről szóló hallgatólagos feltételeit vettük volna alapul, akkor az előbbi transzformációs egyenletek helyett az

[16] A közölt Lorentz-transzformáció kapcsolatot létesít olyan két inerciarendszer között, melyeknek *X.* és *X'* tengelyei összeesnek, *Y és Y'* tengelyei párhuzamosak, és ugyanez áll fenn a *Z* és *Z'* tengelyekre is. A kölcsönös mozgás a *XX'* irányban történik *v* sebességgel. A transzformáció arra képesít bennünket, hogy kiszámíthassuk valamely esemény helyét és idejét a *K'* rendszerben, feltéve, hogy helye és ideje a *K* rendszerben ismeretes. Matematikai fogalmazásban ezt így mondhatjuk: ha adva van *x, y, z, t,* a Lorentz-transzformáció segítségével kiszámíthatjuk *x', y', z', t'* értékeit. A Lorentz-transzformációt nem Einstein, hanem H. A. Lorentz vezette le még a relativitás felfedezése előtt. De ő még nem tudta megadni a transzformáció igazi értelmét. Nem tudta a kétféle időt - mint rendszeridőket - értelmezni, mert még az egységes világidőben hitt. A transzformáció helyes értelmezése tisztán Einstein alkotása.

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

egyenletrendszert kaptuk, volna eredményül, amelyet sokszor "Galilei-transzformáció "-nak hívunk. A Galilei-transzformáció a Lorentz-féléből olyképpen vezethető le, hogy az utóbbiban a *c* fénysebességet végtelen nagynak vesszük.

Hogy a Lorentz-transzformációval a vákuum-béli fényterjedés törvénye mind a *K,* mind a *K'* rendszerben teljesül, a következő példából láthatjuk. Küldjünk egy fényjelet a pozitív x tengely mentén. A fény az

$$x = ct$$

egyenletnek megfelelően terjed, tehát *c* sebességgel. A Lorentz-transzformáció egyenletei értelmében az *x* és *t* közti egyszerű összefüggésből következik, hogy *x'* és *t'* közt is van összefüggés. Tényleg, a Lorentz-transzformáció első és negyedik egyenlete, ha *x* helyébe a vele egyező *ct* értéket tesszük, ilyen alakúvá lesz :

$$x' = \frac{(c - v)\,t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right) t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

amelyeknek osztásából közvetlenül

$$x' = ct'$$

adódik. E szerint az egyenlet szerint megy végbe a fény terjedése, ha a *K'* rendszerre vonatkoztatjuk. Látjuk tehát, hogy a fény terjedés sebessége a *K'* rendszerben is *c*. Ugyanez áll olyan fénysugarakra is, melyek bármilyen más irányban haladnak. És ezen nincs mit csodálkoznunk, miután a Lorentz-transzformáció egyenleteit éppen e szempont alapján vezettük le.

12. Mozgó rudak és órák viselkedése

A *K'* rendszerben az *x'* tengelybe helyezek egy méterrudat olyképpen, hogy kezdete az *x'* = 0 pontban, vége pedig az *x'* = l pontban legyen. Mekkora a rúd hossza a *K* rendszerben? Hogy a kérdésre felelhessünk, csak azt kell megnéznünk, hol lesz a rúd kezdő- és végpontja a *K* rendszer egy bizonyos *t* idejében a *K* rendszerhez viszonyítva? A két megadott pontra vonatkozóan a Lorentz-transzformáció első egyenletéből a $t = 0$ időben:

$$x(rúdkezdet) = 0 * \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$x(rúdvég) = 1 * \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

a két pont távolsága = $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ *K-hoz* képest a méterrúd azonban *v* sebességgel mozog. Tehát egy hosszirányban *v* sebességgel mozgó merev méterrúd hossza csak $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ méter. Azaz a mozgó merev rúd annál rövidebb, minél gyorsabban mozog.[17] Ha pedig $v = c$, akkor $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0$ lenne, még nagyobb sebességnél pedig a gyök képzetes lesz. Ebből következik, hogy a relativitás elméletében a *c* fénysebesség oly határsebesség szerepét tölti be, amelyet valóságos test el nem érhet, sem túl nem léphet.

A *c* fénysebességnek ez a szerepe egyébként már a Lorentz-transzformáció egyenleteiből is következik, mert ezek is elvesztik értelmüket, ha *v-t* c-nél nagyobbnak választjuk.

Ha ellenben olyan egyméteres rudat választanánk, amely a *K-hoz* viszonyítva nyugszik az *x* tengelyben, akkor azt találnók, hogy hossza a *K'* rendszerből ítélve $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ ez pedig teljesen megfelel a relativitás elvének, amelyre meggondolásainkat alapoztuk.

Hogy a koordináta transzformáció egyenleteiből a mérőrudak és órák fizikai magatartásáról meg kell tudnunk valamit, a priori kézenfekvő. Mert hiszen az *x, y, z, t* mennyiségek nem egyebek, mint mérőrudakkal és órák segélyével nyert mérési eredmények. Ha a Galilei-féle transzformációt vettük volna alapul, akkor nem kaptunk volna rúdrövidülést a mozgás következtében.

[17] A rúd megrövidülésével kapcsolatban felmerül az az érdekes kérdés, történt-e a rúddal valamilyen *belső objektív* változás? Felelet: a rúddal nem történt semmi. A bizonyítás nagyon egyszerű. Feküdjék a rúd nyugalomban a töltésen. Hossza ott lemérve legyen 1 méter. Most vonat halad el mellette *v* sebességgel. A vonatról mérve hossza $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ Ha egy párhuzamos vágányon ugyanakkor egy másik vonat halad el mellette nagyobb *V* sebességgel, onnan mérve a hossza $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ -nek adódik, vagyis kisebbnek. Ha tehát a rúd megrövidülése objektív valóság volna, egyszerre két különböző hosszúsággal kellene rendelkeznie, ami képtelenség. A helyes értelmezés a következő: a rúddal ténylegesen nem történik semmi, de hosszának mérőszáma különbözőnek adódik aszerint, hogy a (vonaton levő) mérőszalag más és más sebességgel mozog hozzá képest. Feltétlenül el kell vetnünk azt a tévedést, mintha a rúd nyugalmi hossza az igazi hosszúság volna. A vonaton levő megfigyelő számára a rúd hossza az általa megállapított mérőszám.

Vegyünk most vizsgálat alá egy másodperces órát, mely állandóan a *K'* rendszer kezdőpontjában ($x' = 0$) nyugszik. Az óra a $t' = 0$ és a $t'=1$ időpillanatokban ketyeg egyet. A Lorentz-transzformáció első és negyedik egyenlete értelmében e két óraütésnek

$$t=0$$

és

$$t=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

időadatok felelnek meg. A *K* rendszerből nézve az óra *v* sebességgel mozog; ebben a rendszerben az óra két ütése között tehát nem egy másodperc, hanem $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ másodperc telik el, azaz valamivel több idő. Az óra - mozgásának következtében - lassabban jár, mint a nyugvás állapotában.[18] A *c* fénysebesség itt is az elérhetetlen határsebesség szerepét játssza.

13. A sebességek összetevésének tétele — Fizeau kísérlete

Miután a gyakorlatban óráinkat és mérőrúdjainkat csakis akkora sebességgel mozgathatjuk, amely a fényéhez képest rendkívül kicsiny, az előbbi fejezetek eredményeit aligha tudjuk a valósággal közvetlenül összehasonlítani. Miután pedig ezek az eredmények az olvasó előtt nagyon különösnek tűnnek, az elméletből olyan egyéb következtetést fogok levonni, amely az eddig tárgyaltakból is egyszerűen levezethető, és amelyet a kísérletek is fényesen igazolnak.

A 6. fejezetben az egyirányú sebességek összetevésének tételét vezettük le úgy, amint a klasszikus mechanika feltételezéseiből adódik. Ez a Galilei-féle transzformációból is egyszerűen következik (11. fejezet). A kocsiban járkáló utas helyett vegyünk egy pontot, amely a *K'* koordinátarendszerhez viszonyítva az

$$x'=wt'$$

egyenlet szerint mozog. A Galilei-féle transzformáció első és negyedik egyenletéből az *x'* és *t'* kifejezhető az *x* és *t* értékeivel; behelyettesítés után az

$$x=(v+w)t$$

egyenletet kapjuk. Ez az egyenlet pedig a pont *K* rendszerben végzett mozgásának törvényét (az utasét a vasúti töltéshez viszonyítva) fejezi ki. Ha ezt a sebességet W-vel jelöljük, akkor mint a 6. fejezetben már láttuk

[18] Itt ugyanazt kell elmondanunk az időtartamokról, mint amit a 17. jegyzetben a hosszúságról mondtunk. Az időtartam mérőszáma más és más, ha a mérés az órához viszonyított különböző sebességű koordinátarendszerben történik. Itt is az áll, hogy nincs "valódi", de van *nyugalmi* és *mozgási* időtartam.

$$W = v + w \qquad (A)$$

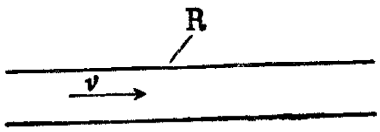
Ugyanezt a megfontolást azonban a relativitás elve alapján is megtehetjük. Ekkor az

$$x' = wt'$$

egyenletben x' és t' értékét a Lorentz-transzformáció első és negyedik egyenleteinek felhasználásával kell kifejeznünk az x és t segítségével. Ez esetben az *(A)* egyenlet helyett a

$$W = \frac{v + w}{1 + \frac{v^2}{c^2}} \qquad (B)$$

egyenletet kapjuk: ez az egyirányú sebességek összetevés-törvénye, a relativitás elmélete szerint. Az a kérdés most már, hogy a két tétel közül melyik állja meg a helyét a tapasztalással szemben. Erről a kérdésről rendkívül fontos kísérlet világosít fel bennünket, amelyet a zseniális Fizeau több mint fél évszázaddal ezelőtt végzett el, és melyet azóta a kísérleti fizikusok legjobbjai közül többen megismételtek, úgyhogy eredménye kétségbevonhatatlan. A kísérlet a következő kérdést tárgyalja: nyugvó folyadékban a fény egy bizonyos w sebességgel terjed; mekkora sebességgel terjed a nyíl irányában az ábrán látható R csőben (1. 3. ábra), ha abban az előbb említett folyadék maga is v sebességgel áramlik?



3. ábra

A relativitás elve értelmében mindenesetre fel kell tennünk, hogy a *folyadékhoz viszonyítottan* a fényterjedés mindig ugyanazzal a w sebességgel történik, akár mozgásban van a folyadék más testekhez viszonyítva, akár nem. Ismerjük tehát a fénynek a folyadékhoz viszonyított sebességét, továbbá az utóbbinak a csőhöz viszonyított sebességét, keressük a fénynek a csőre vonatkoztatott sebességét.

Világos, hogy itt ismét a 6. fejezet feladatával van dolgunk. Most a cső játssza a vasúti töltés, illetve a K koordinátarendszer szerepét, a folyadék pedig a vasúti kocsi, illetve a K' rendszerét, végül a fény a kocsiban járkáló utas, illetve az e fejezetben tárgyalt mozgó pont szerepét. Ha tehát W-vel jelöljük a fénynek a csőhöz viszonyított sebességét, akkor ezt az *(A),* illetve a *(B)* egyenlet adja meg, aszerint, hogy a Galilei-, vagy a Lorentz-transzformáció felel meg a valóságnak.

A kísérlet a relativitás elméletéből levezetett *(B)* egyenlet mellett dönt, mégpedig nagy pontossággal*. A *v* áramlási sebességnek a fény terjedésre gyakorolt hatását a *(B)* formula *Zeeman* újabb kitűnő mérései szerint 1%-ot megközelítő pontossággal állítja elő.

Kiemelendő ugyan, hogy ennek a tüneménynek az elméletét jóval a relativitás elméletének felállítása előtt H. A. Lorentz kizárólag elektrodinamikái úton kidolgozta, az anyag elektromágneses szerkezetéről szóló bizonyos hipotézisek felhasználásával. Ez a körülmény azonban semmi esetre sem csökkenti ennek a kísérletnek, mint experimentum crucisnak[20] bizonyító erejét, a relativitás elmélete javára. Mert a Maxwell - Lorentz-féle elektrodinamika, amelyen az eredeti elmélet nyugszik, egyáltalán nincsen ellentétben a relativitás elméletével. Sőt, az utóbbi az elektrodinamikából alakult ki, olyan régebbi egymástól független feltevéseknek meglepően egyszerű összefoglalásaként és általánosításaként, amelyeken az elektrodinamika felépült.

14. A relativitás elméletének heurisztikus értéke

Eddig követett gondolatmenetünket röviden így foglalhatjuk össze: a tapasztalat arra a meggyőződésre vezetett, hogy egyfelől érvényes a (szűkebb értelemben vett) relativitás-elv; másfelől: a fény terjedési sebessége vákuumban c állandóval veendő egyenlőnek. Ennek a két követelménynek az egyesítéséből adódott a természeti történést alkotó események *x, y, z* derékszögű koordinátáira és *t* idejére érvényes koordináta-transzformáció törvénye. És nem a Galilei-féle, hanem (eltérően a klasszikus mechanikától) a Lorentz-transzformációhoz jutottunk.

Ebben a gondolatmenetben a fényterjedés törvénye játszott nagyon fontos szerepet, amelynek elfogadását tényleges tudásunk indokolja. Most azonban, miután a Lorentz-transzformáció birtokában vagyunk, ezt a relativitás elvével egyesíthetjük, és az elméletet a következő állításba foglalhatjuk:

---

*Fizeau azt találta, hogy

$$W = w + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

ahol $n = \frac{c}{w}$ a folyadék törésmutatója. Másfelől: a *(B)* egyenletben, tekintve, hogy a $\frac{wv}{c^2}$ az l-hez viszonyítva kicsiny:

$$W = (v + w)\left(1 - \frac{vw}{c^2}\right)$$

és hasonló közelítéssel írható:

$$w + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

ami egyezik Fizeau eredményeivel. [19]

[19]Az $1 - \frac{1}{n^2}$ kifejezést németül *Mitführungskoeffizientnek* nevezik. Magyar neve nincs. Ezért ajánlatos latinosán *korrepciós együtthatónak* nevezni. Régen Fizeau eredményét úgy magyarázták, hogy a *v* sebességgel áramló víz magával ragadja az étert, de nem a teljes *v* sebességgel, hanem annak csak $1 - \frac{1}{n^2}$ részével.

[20] *Experimentum cruoisnak* szokás nevezni az olyan kísérletet, amely valamely fizikai jelenségnek két különböző magyarázata között dönteni képes.

Minden általános természettörvénynek olyannak kell lennie, hogy pontosan azonosan szóló törvénybe menjen át, midőn az eredeti *K* koordinátarendszer *x, y, z, t* tér- és időváltozói helyébe a *K'* rendszer *x', y', z', t'* új tér- és időváltozóit vezetjük be, oly módon, hogy a két rendszer változói között fennálló matematikai összefüggéseket a Lorentz-transzformáció fejezze ki. Röviden: az általános természettörvények a Lorentz-transzformációval szemben kovariánsok.

Oly határozott matematikai kikötés ez, amelyet a relativitás elve minden természettörvénynek előír; ezzel a relativitás elve az általános természettörvények kutatásának nagyon értékes heurisztikus segédeszközévé válik. Ha sikerülne oly természettörvényt találni, amely ennek a feltételnek nem felelne meg, akkor ez a körülmény az elmélet két alapfeltevése közül legalább az egyiket megdöntené.

Lássuk már most, hogy eddig milyen általános eredmények fakadtak a relativitás elméletéből.

15. Az elmélet általános eredményei

Az eddigiekből látható, hogy a (speciális) relativitás elmélete az elektrodinamikából és az optikából fejlődött ki. Ezen a téren nem sokat változtatott az elmélet kijelentésein, azonban jelentősen egyszerűsítette az elmélet szerkezetét, azaz a törvények levezetését és - ami még fontosabb - alaposan csökkentette azoknak az egymástól független alapföltevéseknek a számát, melyeken az elmélet felépül.[21] A Maxwell - Lorentz-féle elméletet annyira áttekinthetővé tette, hogy ez a fizikusok közt még abban az esetben is általánosan elterjedt volna, ha a tapasztalat kevésbé meggyőzően szólt volna mellette.

A klasszikus mechanikát előbb módosítani kellett, hogy a relativitás elméletének követeléseivel összhangban legyen. Ez a módosítás azonban csak gyors mozgások törvényeire vonatkozik, amelyekben az anyag *v* sebessége a fényéhez képest nem túlságos kicsiny.

Ilyen gyors mozgást csak az elektronok és az ionok esetében tapasztalunk. Egyéb mozgásoknál a klasszikus mechanika törvényeitől való eltérések sokkal csekélyebbek, semhogy a gyakorlatban észrevehetőkké válnának. A csillagok mozgásáról csak az általános relativitás keretében lesz szó. A relativitás elméletének értelmében az *m* tömegű anyagi pont mozgási energiáját többé nem az ismeretes

$$m\frac{v^2}{2}$$

hanem a

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

kifejezés adja meg. Ha a *v* sebesség a *c* fénysebesség értéke felé közeledik, akkor ez a kifejezés végtelen naggyá válik. Tehát a sebességnek mindig

[21] Az elektrodinamika a Lorentz-transzformációval szemben kovariáns, azért a relativitás elmélete nem változtathat rajta. Nem úgy áll azonban a dolog a mechanikával. A klasszikus mechanika nem kovariáns. Éppen ezért új mozgásegyenleteket kellett megalkotni. Ma azonban a relativisztikus elektrodinamikát és mechanikát még kvantálásnak is alá kell vetnünk.

kisebbnek kell maradnia a *c* fénysebességnél, bármekkora energiát fordítsunk is a sebesség növelésére. Fejtsük sorba a mozgási energia kifejezését:

$$mc^2 + m\frac{v^2}{2} + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \ldots$$

A harmadik tag, a klasszikus mechanikában egyedül számba vett második mellett mindig elhanyagolható, ha $\frac{v^2}{c^2}$ az 1-hez viszonyítva kicsiny. Az első tag mc^2 nem tartalmazza a v sebességet, tehát számításba sem jöhet akkor, ha csak arról van szó, hogyan változik a tömegpont energiája a sebességgel. Ennek elvi jelentőségéről csak alább szólunk.

A speciális relativitás elméletének egyik legfontosabb általános érvényű eredménye a tömeg fogalmára vonatkozik. A relativisztikus fizikát megelőzően két alapvető fontosságú megmaradási tételt ismertünk, mégpedig az energia megmaradásának és a tömeg megmaradásának tételét; ez a két alaptörvény egymástól teljesen függetlennek látszott. A relativitás elmélete eggyé forrasztotta őket. Lássuk most, hogyan történt ez, és hogyan kell értelmeznünk.[22]

A relativitás elve megköveteli, hogy az energia megmaradásának tétele ne csak egy K koordinátarendszerre vonatkoztatva legyen érvényes, hanem minden olyan K' koordinátarendszerre is, mely a K-hoz viszonyítva egyenletes haladómozgást végez (röviden: minden Galilei-rendszerre). Szemben a klasszikus mechanika felfogásával, az ilyen rendszerek közti átmenetre a Lorentz-transzformáció mérvadó. Ilyen előzményekből, Maxwell elektrodinamikájának alapegyenleteivel kapcsolatban, aránylag egyszerű megfontolások alapján kényszerű szükségszerűséggel következik : ha egy v sebességgel repülő test sugárzás útján E_0 energiát vesz fel* anélkül, hogy sebessége ezalatt megváltozna, energiája az

$$\frac{E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

[22] A tömegmegmaradás törvényét Lavoisier, az energiamegmaradásét Róbert Mayer fedezte fel. Ma a két törvény egyben olvad össze. Minden számítást elkerülve kiemeljük a relativitás elméletnek azon eredményét, amelynek alapján ez az összeolvadás létrejött. A test tömegének mérőszámát grammokban adjuk meg. A relativitás elmélete mármost arra az eredményre vezet, hogyha a testbe energiát vezetünk be, pl. azáltal, hogy felmelegítéssel hőt közlünk vele, akkor nemcsak energiatartalma, hanem egyszersmind tömege is megnövekszik. Számszerűleg így áll a dolog: ha a test tömege eredetileg *m* gramm volt, a bevezetett energia pedig *E* erg, akkor a megnövekedett tömeg $m+\frac{E}{c^2}$ gramm. Ebből nyilvánvaló, hogy *E* erg energia $\frac{E}{c^2}$ gramm tömeggel azonos. Ha pl. valamely test tömege *5* gramm, az azt jelenti, hogy $5c^2$ erg energia foglal helyet benne. Ez óriási nagy érték, mert hiszen c^2 kilencszáz trilliót jelent. Mikor a testből energia távozik, egyszersmind tömege is kisebbedik. Érdemes megjegyezni, hogy Napunk annyi energiát sugároz ki másodpercenként, hogy tömege ugyancsak másodpercenként *4 millió* tonnával csökken. Energia átszámítható tömeggé és fordítva. Ha ennélfogva valamilyen anyagi rendszer tömege megmarad, energiatartalma sem szenvedhet változást. A tömegmegmaradás maga után vonja az energiamegmaradást. Einstein a tömeg és energia arányos voltának felismerését a relativitáselmélet legértékesebb eredményének tekintette.

* E_0 a testtel együtt mozgó koordinátarendszerből mért felvett energia.

értékkel megnövekszik.

A test összenergiája tehát - tekintettel a mozgási energiára vonatkozó előbbi kifejezésre:

$$\frac{\left(m+\frac{E_0}{c^2}\right)}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

A test energiája tehát ugyanakkora, mint egy $\left(m+\frac{E_0}{c^2}\right)$ tömegű és v sebességű testé. Kimondhatjuk tehát: ha egy test E_0 energiát vesz fel, akkor tehetetlen tömege $\frac{E_0}{c^2}$ értékkel nő. A test tehetetlen tömege tehát nem állandó, hanem energiaváltozásával együtt változik, így a test tehetetlen tömegét egyenesen energiamennyisége mértékének tekinthetjük. Valamely rendszer tömegmegmaradásának tétele eggyé válik az energia megmaradásának tételével, és csak akkor érvényes, ha a rendszer nem vesz fel és nem ad le energiát. Ha az energiára vonatkozó kifejezést ebbe az alakba írjuk:

$$\frac{mc^2+E_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

akkor ebből azt láthatjuk, hogy az mc^2 alak, amely már előbb is feltűnt, nem egyéb, mint az az energia, ami már akkor is a test birtokában volt (vele együtt mozgó koordinátarendszerből nézve), mielőtt az E_0 energiát felvette.

E tételnek közvetlen összehasonlítása a tapasztalattal egyelőre meghiúsul, mert nem tudunk a testtel akkora energiát közölni, hogy az mint a tehetetlen tömeg észrevehető változása jelentkezzék.[23] $\frac{E_0}{c^2}$ elenyészően kicsiny az energiaváltozás bekövetkezése előtti m tömeggel szemben. Ezen a körülményen múlik az, hogy a tömeg megmaradásának tétele önálló érvényességgel sikerrel volt felállítható.

Még egy utolsó elvi természetű megjegyzést. Az elektromágneses távolhatást Faraday - Maxwell véges sebességgel tovaterjedő intermediár folyamatokkal értelmezte. Ennek sikere vezette a fizikusokat arra a meggyőződésre, hogy nincs olyan típusú, közvetlenül végbemenő pillanatnyi távolhatás, amilyent Newton gravitációs törvénye fejez ki. A relativitás elmélete értelmében a pillanatnyi, illetve végtelen nagy terjedési sebességű távolhatás helyébe mindig a fénysebességgel terjedő távolhatás lép. összefügg ez azzal az elvi szereppel, amelyet ebben az elméletben a c sebesség játszik. A második

[23] A modern kozmikus sugárzási folyamatokban manapság azonban már olyan nagy energiájú részecskéket is tanulmányozunk, amelyeknél a tehetetlen tömeg a nyugalmi tömeg ezerszeresét is túllépi. Az elmélet által megadott összefüggést a tapasztalat nagy pontossággal igazolja,

részben kitűnik majd, miképpen módosul ez az eredmény az általános relativitás elméletében.

16. A speciális relativitáselmélet és a tapasztalat[24]

Arra a kérdésre, hogy mennyiben támogatja a tapasztalat a relativitás elméletét, a Fizeau alapkísérletének tárgyalásánál már említett ok miatt nem felelhetünk egyszerű módon. A speciális relativitás az elektromágneses jelenségek Maxwell - Lorentz-féle elméletéből kristályosodott ki. Tehát a relativitás elméletét mindazon tapasztalati tények támogatják, amelyek az elektromágnesség elméletét igazolják. Külön megemlítem, mint rendkívül fontos körülményt, hogy a relativitás elmélete kivált egyszerű módon és a tapasztalatnak megfelelően tudja levezetni azokat a befolyásokat, melyeket az állócsillagoknak a Földre küldött fénye szenved a Föld hozzájuk viszonyítva végzett relatív mozgása következtében. Ez a hatás abban áll, hogy az állócsillagok látszólagos helye az év folyamán változik (aberráció), a Föld Nap körüli mozgásának következtében, és hogy a róluk hozzánk eljutó fény színe megváltozik, ha a Földdel szemben végzett mozgásuknak radiális összetevője van. Ez utóbbi hatás az állócsillagokról érkező fény színképvonalainak a földi fényforrás ugyanazon színképvonalaihoz mért kismérvű eltolódásában nyilvánul (Doppler elve). A Maxwell - Lorentz-elmélet javára szóló kísérleti érvek, amelyek egyszersmind a relativitáselmélet javára is szólnak, sokkalta számosabbak, semhogy azokat itt tárgyalhatnánk. E kísérleti tények annyira szűk határok közé szorítják az elméleti lehetőségeket, hogy a tapasztalattal szemben más, mint a Maxwell - Lorentz-elmélet, nem állhatott meg.

Az ez ideig megállapított kísérleti tényeknek azonban van két olyan csoportja, amelyeket a Maxwell - Lorentz-féle elmélet csakis segédhipotézisek segítségével tud leírni, amelyek önmagukban, a relativitás elmélete nélkül, idegenszerűnek látszanak. Ismeretes, hogy a katódsugarak és a radioaktív anyagokból kilövellt úgynevezett ß-sugarak igen csekély tehetetlenségű és nagy sebességű negatív elektromos testecskékből (elektronokból) állanak. Ezeknek a testecskéknek a mozgástörvényeit nagyon szabatosan tanulmányozhatjuk, oly módon, hogy megvizsgáljuk a szóban forgó sugaraknak elektromos és mágneses terek hatására bekövetkező elhajlását.

Az elektronok elméleti tárgyalásában nagy nehézséget okoz az, hogy az elektrodinamika egymagában nem tud számot adni természetükről. Mert az *egynemű* elektromos tömegek egymást taszítván, az elektront alkotó negatív töltésű elektromos tömegeket kölcsönhatásuk szétvetné - ha közöttük egyéb másfajta, eddig teljesen ismeretlen erőhatás nem állna fenn.[*] Tegyük fel, hogy az

[24] A fejezet áttekintését a nem szakember számára nehézzé teszi, hogy a szerző a régi elméleteket is ismerteti. Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy a tapasztalat két területen igazolja a relativitáselméletet. Az első a mechanika. Mikor Kaufmann kezdeményezésére megfigyelték rendkívül gyors elektronok mozgását, azt tapasztalták, hogy a mechanika régi törvényei hamis leírást adnak. Csak mikor a relativitás elmélete alapján tekintetbe vették, hogy az elektronok nagy mozgási energiája folytán tömegük is tetemesen növekszik, sikerült a tapasztalattal teljes megegyezést elérni. A gyors testek mozgása tehát igazi experimentum cruois. Hasonló jellegű Michelson optikai kísérlete. A régi elmélet szerint a fény csak a nyugvó éterben terjed minden irányban egyforma sebességgel. Az éterhez képest mozgó inerciarendszerben a fény sebessége különböző irányokban más és más. Michelson rendkívül érzékeny optikai eszközével ezt a különbséget ki tudta volna mutatni, ha egyáltalán léteznék. De a kísérlet mindig negatív eredménnyel végződött. A fénysebesség állandóságának Einstein-féle elve tehát szilárd tapasztalati alapon nyugszik.

[*] Az általános relativitás elméletében kézenfekvő az a felfogás, hogy az elektron elektromos tömegét a gravitációs erők tartják együtt.

elektront alkotó elektromos tömegek relatív távolságai az elektron mozgása alatt változatlanok maradnak (merev kapcsolat, a klasszikus mechanika értelmében), úgy az elektronoknak oly mozgástörvénye adódik, amely nem egyezik a tapasztalással.

H. A. Lorentz volt az első, aki — tisztán formális nézőpontok alapján - azt a feltevést vezette be, hogy az elektron a mozgása folyamán a mozgás irányában $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ kifejezéssel arányosan összehúzódik. Ez a feltevés, amelyet elektrodinamikái úton semmivel sem lehet igazolni, azt a mozgástörvényt szolgáltatta, amit a tapasztalat az utóbbi években nagy szabatossággal igazolt.

A relativitás elmélete ugyanezt a mozgástörvényt szolgáltatta anélkül, hogy kiindulásul az elektron természetéről és szerkezetéről bármily különleges feltevéssel kellett volna élnie. Ugyanez a helyzet (mint azt a 13. fejezetben láttuk) Fizeau kísérletével, amelynek eredményét a relativitás elmélete megadta anélkül, hogy a folyadék fizikai természetéről bármily feltevést is be kellett volna vezetnie.

A már említett jelenségek második csoportja arra vonatkozik, hogy a Földnek a világűrben végzett mozgása észrevehető-e a Földön végzett kísérleteinkben? Az 5. fejezetben említettük már, hogy minden ilyenfajta fáradozás negatív eredménnyel végződött. A relativitás elméletének felállítása előtt a tudomány nehezen tudott állást foglalni ezzel a negatív lelettel szemben. A tényállás a következő volt :

A teret és időt illető átvett előítéletek kétségtelenné tették, hogy a Galilei-transzformáció mérvadó, amikor egyik vonatkoztató testről a másikra térünk át. Feltéve már most, hogy a Maxwell - Lorentz-féle egyenletek egy *K* rendszerben érvényesek, akkor úgy találjuk, hogy nem érvényesek egy másik, a *K-hoz* képest egyenletesen mozgó *K'* rendszerben - ha a *K* és *K'* rendszerek koordinátái között a Galilei-féle transzformáció összefüggései állanak fenn. Ezek alapján úgy látszik, hogy az összes Galilei-rendszerek között van egy meghatározott mozgásállapotú *(K),* mely fizikailag kitüntetett szerepet játszik. Fizikailag ezt az eredményt úgy értelmezték, hogy a *K* rendszert egy hipotetikus fényéterhez viszonyítva nyugvásban levőnek tekintették, míg az összes, a *K-hoz* képest mozgó *K'* rendszert az éterhez képest mozgónak. *K'* az éterhez viszonyított ilyen mozgásának ("éterszél" *K'*-vel szemben) tulajdonították a *K'-höz* viszonyítva érvényes bonyolult törvényeket. Természetesen fel kellett tenni, hogy a Földdel szemben is fellép ilyen "éterszél", és a fizikusok sokáig fáradoztak ennek kimutatásán.

Ebből a célból dolgozott ki Michelson egy olyan módszert, amely, úgy látszott, nem mondhat csütörtököt. Képzeljünk egy merev testre oly módon felszerelt két tükröt, hogy tükrös lapjukkal egymás felé néznek. Egy fénysugárnak jól meghatározott *T* időre van szüksége ahhoz, hogy egyik tükörből a másikhoz és onnan visszajusson, abban az esetben, ha ez az egész rendszer nyugszik a fényéterrel szemben. Ugyancsak e folyamatra vonatkozóan azonban (számítás útján) más *T'* időt kapunk eredményül, ha a test a tükörrel együtt az éterhez képest mozog. Sőt, mi több: a számítás azt mutatja, hogy ez a *T'* idő az éterrel szemben adott *v* sebesség mellett más értékű, aszerint, hogy a test a tükrök síkjára merőlegesen, vagy pedig azzal párhuzamosan mozog. Bármily parányi is e két időtartam közötti különbség, a Michelson és Morley végezte interferencia-észlelésekkel e különbségnek egész határozottan megfigyelhetőnek kellett volna mutatkoznia. A kísérlet azonban, nagy zavarba ejtve a fizikusokat, eredménytelenül végződött. Lorentz és Fitzgerald azzal a feltevéssel mentette ki az elméletet a zavarból, hogy az éterrel szemben végzett mozgás eredményeképpen a test a mozgás irányába összehúzódik; ennek az összehúzódásnak kellett eltüntetnie az előbb említett időkülönbözetet. A 12. fejezetben mondottakkal összehasonlítva láthatjuk, hogy ez a megoldás a relativitáselmélet szempontjából is helyes volt. A tényállásnak a relativitáselmélet szerinti felfogása azonban összehasonlíthatatlanul kielégítőbb. Mert eszerint nincs a többiek között kitüntetett szerepet játszó olyan koordinátarendszer, amely az éter fogalmának bevezetésére okot adna; és így nincs "éterszél" sem; olyan kísérlet sincs, melyből ennek létezése következnék. A mozgó testek összehúzódása itt minden különösebb hipotézis nélkül az elmélet két alapelvéből következik ; mégpedig erre az összehúzódásra nem a magában vett mozgás mérvadó, melynek nem tulajdoníthatunk értelmet, hanem mindenkor a választott vonatkoztatási testhez viszonyítva végzett mozgás, így tehát Michelson és Morley tükrös testje a Földdel együtt mozgó rendszerből nézve nem rövidül meg, de igenis megrövidül a Naphoz képest nyugvó rendszerben.

17. A Minkowski-f éle négydimenziós tér[25]

A nem-matematikuson titokzatos borzongás fut végig, valahányszor a "négydimenziós" szót hallja; olyan érzés, amely hasonlít ahhoz, amely a színpadi kísértetek láttán fog el bennünket. És mégis: nincs banálisabb állítás, mint az, hogy a mi megszokott világunk négydimenziós tér- és időbeli kontinuum.

A tér háromdimenziós kontinuum. Ez annyit jelent, hogy egy (nyugvó) pont helyzete három számmal (koordinátával) x, y, z jellemezhető, és hogy bármely ponthoz találunk olyan tetszőlegesen "szomszédos" pontokat, amelyeknek helyzete olyan x_1, y_1, z_1 koordinátaértékekkel jellemezhető, amelyek az előbbieket tetszőlegesen megközelítik. Az utóbbi tulajdonság miatt beszélünk "kontinuum "-ról; s a koordináták hármas száma miatt "háromdimenziós"-ról.

Hasonlóképpen: a fizikai történések világa (Minkows-ki szerint röviden csak "Világ") idő-térbeli értelemben négydimenziós. Mert olyan egyes eseményekből tevődik össze, amelyeknek mindegyike négy számmal jellemezhető, mégpedig a három térkoordinátával (x, y, z) és egy időkoordinátával, a t időértékkel. Ilyen értelemben a világ is kontinuum, mert minden eseményhez találhatunk olyan tetszőleges „szomszédos" eseményt (tényleg, vagy legalább gondolatban), amelynek x_1, y_1, z_1, t_1 koordinátái az eredetileg vizsgált esemény x, y, z, t koordinátáitól tetszőlegesen kicsiny értékben különböznek. Hogy nem szoktuk meg a világot ily értelemben

[25] Valamely térbeli pont három Cartesius-féle koordinátája hosszúság jellegű, mindegyiknek egysége a centiméter. Ezzel szemben az idő egészen más természetű mennyiség. Semmi rokonságot sem mutat a hosszúsággal. Éppen ezért a klasszikus fizika háromdimenziós térről és külön egydimenziós időről beszólt. Az idő egysége a másodpere. Minkowski azonban szellemesen felhasználta azt a körülményt, hogy a c fénysebességgel szorzott idő ugyancsak hosszúság jellegű. Ha pedig ezt a szorzatot még az i imaginárius egységgel is megszorozzuk, akkor az ict mennyiség ugyanazt a szerepet játssza a relativitás elméletében, mint a három térkoordináta. Ezért (az ő jelölésével élve) az $x_1; x_2, x_3$ térkoordináta mellé bevezette $x_i = ict$-t mint negyediket. Ezzel négydimenziós teret definiált. Eljárása azért igen mélyreható, mert ebben az új térben ugyancsak az euklideszi geometria érvényes. Bátran mondhatjuk, hogy Minkowski a speciális relativitás elméletét átalakította a négydimenziós euklideszi tér geometriájává. Természetesen nem szabad megfeledkeznünk arról, hogy ennek a térnek egyik dimenziója képzetes.

négydimenziós kontinuumnak tekinteni, azon múlik, hogy a relativitást megelőző fizikában az időnek más és önállóbb szerep jutott, mint a térbeli koordinátáknak. Ezért szoktuk meg, hogy az időt mint önálló kontínuumot kezeljük. A klasszikus fizikában az idő abszolút jellegű, azaz a vonatkoztatás rendszerének helyétől és *mozgásállapotától* független. Kifejezésre jut ez a Galilei-féle transzformáció utolsó egyenletében *(t' = t).*

A relativitás elméletében célszerű a "világot" négydimenziósnak tekinteni, miután ez az elmélet, a Lorentz-transzformáció negyedik

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

egyenlete értelmében, megfosztja az időt önállóságától. Mert ez egyenlet szerint két eseménynek a *K'-re* vonatkozó $\Delta t'$ időkülönbözete még abban az esetben sem tűnik el általánosságban, ha a *K* rendszerhez viszonyított Δt különbözetük meg is szűnik. Két eseménynek a *K* rendszerbeli tisztán tértávolságával a *K'* rendszerben időbeli távolság jár együtt. Nem ebben áll azonban Minkowski fontos felfedezésének jelentősége a relativitás elméletének alaki fejlődésében, hanem abban a felismerésben, hogy a relativitás elméletének négydimenziós időtérbeli kontinuuma mértékadó alaki tulajdonságaiban a legmesszebbmenő rokonságban van az euklideszi geometriai tér háromdimenziós kontinuumával (1. a függelék bővebb fejtegetéseit). Hogy ez a rokonság a maga teljességében kitűnjék, a szokásos *t* időkoordináta helyett a vele arányos $\sqrt{-1} * ct$ képzetes mennyiséget kell bevezetnünk. Ezzel a (speciális relativitás elméletének követeléseit kielégítő természettörvények olyan matematikai alakot nyernek, amelyben az időkoordináta ugyanolyan szerepet játszik, mint a három térkoordináta. Ez a négy koordináta alakilag tökéletesen megfelel az euklideszi geometria három térkoordinátájának. A nem-matematikusnak is be kell látnia, hogy ezzel a tisztán alaki felismeréssel az elmélet rendkívüli áttekinthetőséghez jutott.

Ez a vázlat csak homályos képet nyújthat Minkowski fontos gondolatáról, amely nélkül az általános relativitás elmélete nem bontakozhatott volna ki. Mivel azonban sem a speciális, sem az általános relativitáselmélet alapgondolatának megértéséhez nem szükséges, hogy az olvasó ezt a matematikában járatlanoknak kétségtelenül nehezen hozzáférhető kérdést mélyebben megértse, abbahagyom ennek tárgyalását, és csak a könyv utolsó fejezetében térek rá vissza.

MÁSODIK RÉSZ

AZ ÁLTALÁNOS RELATIVITÁS ELMÉLETE[26]

18. A speciális és az általános relativitás elve

Az az alaptétel, amely összes eddigi fejtegetéseinknek tengelye volt, a speciális relativitás elve, azaz minden egyenletes mozgás fizikai relativitásának elve volt. Elemezzük tartalmát még egyszer szabatosan!

Az, hogy minden mozgást fogalma szerint csak relatívnak gondolhatunk el, mindig világos volt. A vasúti töltésről és a vasúti kocsiról szóló sokat használt példánkban pl. az ott végbemenő mozgás tényét egyforma jogosultsággal a következő két alakban önthetjük szavakba :

a) a kocsi mozog a vasúti töltéshez képest

b) a vasúti töltés mozog a kocsihoz képest.

Az *a)* eset állításában a vasúti töltést, a *b)* esetben pedig a kocsit használtuk fel vonatkoztatási rendszerül. Ha csak a mozgás megállapításáról, illetve leírásáról van szó, akkor elvben közömbös, hogy melyik rendszerre vonatkoztatjuk a mozgást. Ez, mint mondottuk, magától értetődő, és nem tévesztendő össze azzal a sokkal messzebbre mutató állítással, amelyet a "relativitás elvének" hívtunk, és amelyet eddigi vizsgálatainkban alapul vettünk.

A relativitás elve nemcsak azt állítja, hogy minden jelenség leírására éppen úgy használható vonatkoztatási rendszerül a kocsi, mint a vasúti töltés (mert ez is magától értetődő). A relativitás elve ennél sokkal többet mond. Ha az általános természettörvényeket, amint a tapasztalatból adódnak,

a) a vasúti töltésre, mint koordinátarendszerre

b) a kocsira, mint koordinátarendszerre fogalmazzuk meg, akkor a természettörvények (pl. a mechanika törvényei, vagy a vákuumban történő fényterjedés törvénye) mindkét esetben egészen egyformán hangzanak. Ezt így is kifejezhetjük: természeti folyamatok fizikai leírásában a K, K' vonatkoztatási rendszerek közül egyik sem különb a másiknál. Ez az utóbbi állítás nem a priori szükségképpen helyes, úgy, mint az első. Ez nem foglaltatik a "mozgás", ül. a "vonatkoztatási rendszer" fogalmában, és nem is vezethető le belőlük, mert helyes, vagy helytelen voltáról csak a tapasztalat dönthet.

Eddig azonban egyáltalán nem állítottuk azt, hogy *mindenféle K* vonatkoztatási rendszer egyenértékű a természettörvények megformulázásában. Sőt, gondolatmenetünk a következő volt: legelőbb abból a feltevésből indultunk ki, hogy van egy olyan mozgásállapotú K koordinátarendszer, amelyre vonatkozóan érvényes. Galilei következő alaptörvénye: egy magára hagyott és a többiektől

[26] A speciális relativitás elmélete tisztán inerciarendszerekkel foglalkozik, vagyis olyan koordinátarendszerekkel, melyekben érvényes a tehetetlenség elve. A példának választott vasúti töltés és a hozzá képest egyenletesen mozgó vasúti kocsi tényleg ilyen. A speciális relativitás elmélete kijelenti, hogy az összes inerciarendszerek egyenértékűek a természetleírás szempontjából. Vannak azonban olyan koordinátarendszerek is, amelyek nem inerciarendszerek. Az egyre gyorsabban haladó vasúton, vagy a tengely körül forgó körhintán a padlóra helyezett golyó nem marad nyugalomban, hanem mintegy magától megindul. Ha pedig meglökjük, nem egyenes vonalú egyenletes mozgást végez. Az ilyen koordinátarendszereket gyorsuló rendszereknek nevezzük. Ezekkel foglalkozik az általános relativitás elmélete.

elegendő távolságban levő tömegpont egyenes vonalban és egyenletesen mozog. A *K* (Galilei-féle) koordinátarendszerhez viszonyítva a természettörvényeknek a lehető legegyszerűbb alakúaknak kell lenniük. Ebben az értelemben azonban a *K* rendszeren kívül mindazon *K'* koordinátarendszereknek ki kell válniuk a többiek közül és *K-val* egyenértékűeknek kell lenniük a természettörvények megfogalmazása szempontjából, amelyek a *K* -hoz viszonyítva *egyenes vonalú, egyenletes és forgásmentes mozgást* végeznek; mindezeket a rendszereket Galilei-féle rendszereknek tekintjük. Csakis ilyen rendszerekben tekintettük érvényesnek a relativitás elvét, másokban (másféle mozgásokat végző rendszerekben) azonban nem. Ebben az értelemben beszéltünk a *speciális* relativitás elvéről, illetve a speciális relativitás elméletéről.

Ezzel szemben az "általános relativitás elve" alatt azt az állítást értjük, mely szerint minden, *K, K'* stb. vonatkoztató test egyenértékű a természetleírás (az általános természettörvények megfogalmazása) szempontjából, bármilyen mozgásállapotban is legyen[27]. Mindjárt hozzátesszük azonban, hogy ezt később elvontabb alakban kell megfogalmaznunk, aminek okát szintén csak később fogjuk feltárni.

Annak, hogy a speciális relativitás elvének bevezetése bevált, minden általánosításra törekvő szellemre csábítóan kell hatnia, hogy megtegye az általános relativitás elve felé vivő lépést. Csakhogy egyszerű és látszólag egészen megbízható megfontolás alapján ez a kísérlet kilátástalannak tűnik. Képzelje el az olvasó, hogy a már oly sokszor említett egyenletesen haladó vasúti kocsiban ül. Mindaddig, amíg a kocsi egyenletesen halad, az utas a kocsi haladásáról mit sem vesz észre. Innen van az is, hogy a bennülő ezt a körülményt minden belső ellenkezés nélkül arra magyarázhatja, hogy a kocsi nyugszik és a vasúti töltés mozog. Ez az értelmezés egyébként a speciális relativitás elve szerint fizikai szempontból is egészen jogosult.

Ha azonban a kocsi mozgása egyenetlenné válik, azáltal, hogy a kocsit erőteljesen fékezik, a bennülő ennek megfelelően erőteljes lökést érez a menetirányban. A kocsi gyorsuló mozgása megnyilvánul a testek hozzá viszonyított mechanikai viselkedésében; mechanikai viselkedésük más, mint előbb. Éppen ezért kizártnak látszik, hogy az egyenetlenül haladó vasúti kocsihoz viszonyítva is ugyanazok a mechanikai törvények érvényesek, mint a nyugvó, illetve az egyenletesen mozgó vasúti kocsi esetében. Mindenesetre világos, hogy az egyenetlenül haladó kocsi rendszerében Galilei alaptörvénye nem érvényes. Ezért mindenekelőtt arra kényszerülünk, hogy az egyenetlen mozgásoknak az általános relativitás elve ellenére, abszolút fizikai realitást tulajdonítsunk. A következőkben azonban csakhamar be fogjuk látni, hogy ez a következtetés nem helytálló.

19. A gravitációs tér

Arra a kérdésre: "Miért esik a földre az a kő, melyet, miután felemeltünk, szabadon engedünk" — rendszerint *ezzel* felelnek: "Mert a föld vonzza". A modern fizika némiképp másként szövegezi a feleletet, a következők miatt. Az elektromágneses jelenségek beható tanulmányozása folytán arra a felfogásra jutottak, hogy nincs közvetlen távolhatás. Ha pl. a mágnes magához

[27] Einstein semmiképp sem tudott beletörődni abba, hogy csak az inerciarendszerek egyenértékűek. Meg volt győződve, hogy az összes természettörvények olyan alakban formulázhatók meg, amelyben egyformán érvényesek bármilyen, tehát gyorsuló koordinátarendszerekre is. A gondolat rendkívül merésznek, szinte reménytelennek tetszik. Hiszen az egyenletesen mozgó vasúti kocsiban azt sem érezzük, hogy mozgunk, de ha egyre gyorsabban kezd járni, tisztán érezzük, hogy valamilyen erő a hátunkat támasztó falhoz nyom bennünket. Ez pedig objektív fizikai különbség az inerciarendszerhez képest. Hogyan álljon fenn akkor általános egyenértékűség? Ennek kiderítése Einstein legnagyobb alkotása.

vonzza a vasat, akkor nem elégedhetünk meg azzal a felfogással, amely szerint a mágnes az üres téren át közvetlenül hat a vasra, hanem Faraday nyomán úgy képzeljük, hogy a mágnes az őt környező térben fizikailag reális valamit idéz elő, amit "mágneses erőtér"-nek nevezünk. Ez a mágneses erőtér a maga részéről ismét a vasdarabra hat, aminek következtében ez arra törekszik, hogy a mágnes felé mozogjon. Ennek a magában véve önkényes közbülső fogalomnak a jogosultságát nem óhajtjuk most fejtegetni. Csak annyit jegyezhetünk meg, hogy segítségével az elektromágneses jelenségek, különösen pedig az elektromágneses hullámok terjedése, sokkal kielégítőbb módon írhatók le elméletileg, mint nélküle. Hasonlóan fogjuk fel a gravitáció hatásait is.

A földnek a kőre gyakorolt hatása közvetett. Gravitációs teret hoz létre a környezetében, ez hat a kőre és okozza annak esését. A testekre gyakorolt hatás erőssége a tapasztalás szerint jól meghatározott törvény szerint csökken a távolság növekedtével. Ez a mi felfogásunk szerint ezt jelenti: annak a törvénynek, amely a gravitációs tér térbeli tulajdonságait megszabja, egészen határozottnak kell lennie, hogy helyesen állítsa elő a gravitációs hatásnak a hatást okozó test távolodásával együtt járó csökkenését. Úgy képzelhetjük el, hogy a test (pl. a föld) a maga közvetlen közelében létesíti az erőteret, nagyobb távolságban a tér irányát és nagyságát az a törvény határozza meg, amelynek a gravitációs tér térbeli tulajdonságai engedelmeskednek.

A gravitációs térnek az elektromos és mágneses térrel szemben nagyon nevezetes tulajdonsága van, amely a következőkben alapvető fontosságú lesz. A testek, melyek kizárólag a nehézségi erőtér hatása alatt mozognak, olyan gyorsulásra tesznek szert, *amely sem a test anyagától, sem fizikai állapotától nem függ*. Egy darab ólom és egy darab fa pl. a nehézségi erőtérben (légüres térben) egyformán esik a földre, akár zérus, akár más egyenlő kezdősebességgel ejtjük. Ez a rendkívül pontosan érvényesülő törvény a következők mérlegelése alapján még másképpen is szövegezhető.

Newton mozgástörvénye szerint[28]

$$(erő)=(tehetetlen\,tömeg)*(gyorsulás)$$

ahol a "tehetetlen tömeg" a gyorsuló test jellegzetes állandója. Ha pedig a gyorsulást előidéző erő a nehézkedés, akkor másrészt

$$(erő)=(súlyos\,tömeg)*(a\,nehézségi\,erőtér\,intenzitása)$$

ahol a "súlyos tömeg" ugyancsak a testre jellemző állandó. A két összefüggésből következik:

$$(gyorsulás)=\frac{(súlyos\,tömeg)}{(tehetetlen\,tömeg)}*(a\,nehézségi\,erőtér\,intenzitása)$$

[28] Minden test ellenállást fejt ki a gyorsulással szemben, amelyet erő alkalmazásával kell legyőzni. A mozgástörvény azt fejezi ki, hogy az alkalmazandó erő annál nagyobb, minél nagyobb gyorsulást akarunk előidézni és minél nagyobb a test tehetetlen tömege, amely a gyorsulásnak ellenáll. A tehetetlen tömeg mérőszámát úgy határozzuk meg, hogy megmérjük a ható erőt és az általa létesített gyorsulást, és a kettőt elosztjuk egymással. A testre ható gravitációs erő viszont arányos a test súlyos tömegével és a gravitációs erőtér intenzitásával, vagyis a tömegegységre ható erővel. A súlyos tömeget mérlegen mérjük grammokban. A súlyos és tehetetlen tömeg egyenlőségét rendkívül pontos eljárással először Eötvös Loránd határozta meg. Az ő mérése az általános relativitás elméletének egyik tartó pillérévé vált.

Ha most a tapasztalatnak megfelelően azt akarjuk, hogy adott nehézségi térben a gyorsulás, függetlenül a testek természetétől és állapotától, mindig ugyanakkora legyen, akkor a súlyos és a tehetetlen tömegek viszonyának minden testre ugyancsak azonosnak kell lennie. Tehát e viszony az egységek alkalmas megválasztásával 1-gyé is tehető; ebben az esetben a következő tétel érvényes: a test *súlyos és tehetetlen* tömege egyenlő egymással.

Az eddigi mechanika ezt a fontos tételt *regisztrálta,* de nem *értelmezte.* Kielégítő értelmezése csakis akkor lehetséges, ha belátjuk, hogy a testeknek *ugyanaz* a kvalitása a körülmények szerint egyszer " tehetetlenség "-ként, máskor pedig "súly"-ként nyilvánul meg. Hogy mennyiben áll fenn ez a valóságban, és hogy ez a kérdés hogyan függ össze az általános relativitás követelményével, azt a következő fejezetben fogjuk látni.

20. A tehetetlen és súlyos tömeg egyenlősége az általános relativitás posztulátuma mellett szól

Képzeljük el az üres világtér egy tágas részét, oly messzi a csillagoktól és egyéb jelentékeny tömegektől, hogy nagy pontossággal *azzal* az esettel álljunk szemben, amelyre érvényes Galilei alaptörvénye, így a világ e darabjának kiválaszthatunk egy olyan Galilei-féle vonatkoztatási testet, amelyhez viszonyítva a nyugvásban levő pontok nyugvásban, a mozgásban levők pedig állandó egyenes vonalú egyenletes mozgásban maradjanak. A vonatkoztatás ilyen rendszeréül képzeljünk el egy szoba formájú tágas szekrényt, és benne egy mindenféle műszerrel felszerelt megfigyelőt. Számára súly természetesen nem létezik. Kötelekkel kell a padlóhoz kötnie magát, nehogy a padlózatot érő leggyöngébb lökésre a szoba mennyezete felé szálljon.

A külső oldalon a szekrény mennyezetének közepén levő kampóra erősítsünk rá egy kötelet, amelyet állandó erővel húz valamilyen hozzánk hasonló lény. Ekkor a szekrény a megfigyelővel együtt egyenletes gyorsulással elkezd "felfelé" repülni. Sebessége az idő múltán fantasztikussá növekszik - ha mindezt egy másik vonatkoztatási testről ítéljük meg, amelyet senki sem húz kötéllel.

De miképpen fogja megítélni ezt a folyamatot a szekrényben levő megfigyelő? A szekrény gyorsulását a padlózat ellennyomás útján adja át neki. Tehát ezt a nyomást a lábaival kell felfognia, ha nem akar testének egész hosszával a padlóra terülni, így azután éppen úgy áll a szekrényben, mint más ember a földön levő ház szobájában. Ha elenged egy testet, amelyet előbb kezében tartott, akkor ez nem veszi fel a szekrény gyorsulását, hanem gyorsuló mozgással közeledik a szekrény padlózatához. A megfigyelő még arról is meg fog győződni, hogy *a test gyorsulása a padlózattal szemben mindig ugyanakkora, bármilyen testtel végzi is kísérletét?*[29]

A szekrényben tartózkodó megfigyelő tehát a nehézségi erőtérre vonatkozó, az utóbbi fejezetben említett ismereteire támaszkodva arra az eredményre jut, hogy ő a szekrénnyel együtt időben állandó nehézségi erőtérben van. Egy pillanatig mindenesetre csodálkozni fog azon, hogy a szekrény ebben az erőtérben nem zuhan; mikor azonban észreveszi a szekrénymennyezet közepén levő kampót és az arra

---

[29] Ha a testek tehetetlen tömege nem volna egyenlő a súlyos tömeggel, a szekrényben levő megfigyelő rögtön dönteni tudna, vajon gravitációs erőtér van alatta, vagy szekrénye állandó gyorsulással felfelé mozog? Egymás után, egy a mennyezetre erősített rugóra függesztené a szekrényben található testeket. Gravitációs erőtér esetében a rugó megnyúlásai a testek súlyos tömegeivel, gyorsuló mozgás esetén pedig tehetetlen tömegeivel volnának arányosak. Einstein meggondolásainak eredménye így foglalható össze: egy inerciarendszerhez képest gyorsuló koordinátarendszer egyenértékű egy olyannal, mely az inerciarendszerhez képest nyugalomban van, de benne gravitációs erőtér uralkodik. Ez az ekvivalencia elve. Érvényességének lényeges feltétele a súlyos és tehetetlen tömeg azonossága.

erősített feszes kötelet, arra következtet, hogy a nehézségi erőtérben felfüggesztve nyugszik.

Szabad-e mosolyognunk a megfigyelőn, és mondhatjuk-e, hogy felfogása téves? Ha következetesek akarunk maradni, azt hiszem nem; ellenkezőleg: el kell ismernünk, hogy ez a felfogásmód nem ütközik sem a józan ész, sem a mechanika törvényeibe. Annak ellenére, hogy a szekrény az előbb említett "Galilei-féle tér"-hez képest gyorsuló mozgásban van, mégis nyugvónak tekinthetjük. Tehát van okunk arra, hogy a relativitás elvét az egymáshoz képest gyorsuló rendszerekre is kiterjesszük, és így hatalmas érvre akadtunk az általánosított relativitás követelménye mellett.

Figyeljünk arra, hogy ezt a felfogásmódot a nehézségi erőtérnek az az alapvető tulajdonsága tette lehetővé, hogy minden testnek egyforma gyorsulást ad; vagy ami ugyanezt jelenti: hogy a tehetetlen és a súlyos tömegek egymással egyenlők. Ha ez a természettörvény nem állna fenn, akkor a gyorsuló szekrényben levő megfigyelő a környezetében levő testek viselkedését sem magyarázhatná gravitációs tér feltételezésével, és semmiféle tapasztalat alapján sem volna arra jogosult, hogy a maga rendszerét nyugvásban levőnek tekintse.

A szekrényben levő megfigyelő a szekrénymennyezet belső oldalára egy kötelet erősít, ennek szabad végére pedig egy testet. Utóbbi hatására a kötél ebben a kifeszített állapotban "függőlegesen" lóg. Mi az oka a kötél feszülésének? A szekrényben levő megfigyelő azt mondja: "A felfüggesztett testre egy lefelé irányuló erő hat, amely a kötélfeszültséggel tart egyensúlyt ; a kötélfeszültség nagyságára a felfüggesztett test *súlyos tömege* mérvadó." Másfelől, a térben szabadon lebegő megfigyelő ezt az állapotot így ítéli meg: "A kötél kénytelen a szekrény gyorsuló mozgásában részt venni, és ezt átviszi a ráerősített testre. A kötélfeszültség akkora, hogy utóbbi gyorsulását éppen előidézi. A kötélben fellépő feszültség nagyságára a test *tehetetlen tömege* mérvadó." Látjuk ebből a példából, hogy a relativitás elvének kiterjesztése *szükségképpen* maga után vonja a súlyos és tehetetlen tömegek egyenlőségének tételét. Ezzel e tétel fizikai értelmezését nyertük.

A gyorsuló mozgást végző szekrény példájából látjuk, hogy egy általánosított relativitási elméletnek a gravitáció törvényeiről fontos eredményeket kell szolgáltatnia. Valóban az általános relativitás gondolatainak következetes nyomon követése szolgáltatta azokat a törvényeket, amelyeknek a gravitációs tér eleget tesz. Már itt figyelmeztetem az olvasót, óvakodjék egy — ezekből a meggondolásokból könnyen lehetséges félreértéstől. A szekrényben levő megfigyelő számára ugyanis annak ellenére létezik gravitációs tér, hogy az előbb választott koordinátarendszerből nézve ilyen nem volt jelen. Mármost könnyen azt lehetne hinni, hogy a gravitációs tér létezése csak *látszólagos,* és ahogy bármilyen is a gravitációs tér, mindig választható egy másik olyan vonatkoztató test, amelyre nézve nincs gravitációs tér. Ez azonban semmi esetre sem áll minden gravitációs térre, hanem csakis az egészen különleges felépítésűekre. így pl. lehetetlen úgy megválasztani egy vonatkoztatási rendszert, hogy belőle nézve a Föld nehézségi erőtere (teljes egészében) eltűnjék,

Most már látjuk, miért nincs bizonyító ereje az általános relativitás elve ellen a 18. fejezet végén felhozott érvnek. Igaz ugyan, hogy a fékezett vasúti kocsiban tartózkodó megfigyelő a fékezés következtében előreirányuló lökést érez, és hogy a kocsimozgás egyenlőtlenségét (gyorsulását) veszi észre. Azonban ki kényszeríti őt arra, hogy ezt a lökést a kocsi "igazi" gyorsulására vezesse vissza? Ezt az élményt így is értelmezheti: "Az én vonatkoztató testem (a kocsi) állandóan nyugvásban van. Rajta azonban (a fékezés tartama alatt) egy előreirányuló, időben változó nehézségi erőtér uralkodik. Ez utóbbi hatására a vasúti töltés a földdel együtt olyan egyenlőtlen mozgást végez, hogy eredeti, hátrafelé irányuló sebessége mindjobban csökken. Ez a nehézségi tér eredményezi a megfigyelőre ható lökést."

21. Mennyiben nem kielégítőek a klasszikus mechanika és a speciális relativitáselmélet alapjai ?

Mint már annyiszor említettük, a klasszikus mechanika a következő tételből indul ki: azok az anyagi pontok, amelyek a többiektől elegendő távolságban vannak, egyenes vonalú egyenletes mozgást végeznek, vagy nyugalomban maradnak. Azt is kiemeltük már többször, hogy ez az alaptörvény csak olyan különleges mozgásállapotú *K* rendszerekre érvényes, amelyek egymáshoz képest egyenletes haladó mozgást végeznek. Egyéb rendszerekre vonatkozóan ez a törvény nem érvényes. A klasszikus mechanikában is, mint a speciális relativitáselméletben, ennek megfelelően megkülönböztettük az olyan *K* rendszereket, amelyekhez viszonyítva a természettörvények érvényesek, azoktól, melyekhez viszonyítva ezek nem érvényesek.

A dolgok ilyen alakulásával azonban a következetesen gondolkodó ember meg nem elégedhet. Azt fogja kérdezni; "Hogyan lehetséges az, hogy bizonyos vonatkoztatási testek (illetve mozgásállapotaik) a többiek (illetve mozgásállapotaik) között kitüntetett szerepet játszanak? *Mi az oka ennek a kiváltságnak?* Hogy világosan megmutassam, mire gondolok ennél a kérdésnél, hasonlattal élek.[30]

Gázfőző van előttem. Rajta egymás mellett két főzőedény, amelyek az összetévesztésig hasonlók egymáshoz. Mindkettő félig vízzel töltve. Azt veszem észre, hogy az egyik állandóan gőzölög, a másik nem. Csodálkozom még akkor is, ha még sohasem láttam gázfőzőt, sem főzőedényt. Ha ezután az első edény alatt egy kékesen világító valamit látok, a másik alatt pedig nem, akkor csodálkozásom megszűnik még akkor is, ha sohasem láttam még gázlángot. Mert csak azt mondhatom, hogy ez a kékesen világító valami okozza az egyik edény gőzölgését, vagy legalábbis lehetséges, hogy ez okozza: Ha pedig amellett, hogy egyik edény alatt sem látom a kékesen világító valamit, az egyik edény mégis szünet nélkül gőzölög, a másik meg nem, akkor csodálkozom és elégületlen vagyok, míg végül is észreveszek valamilyen körülményt, amelyet a két edény különböző viselkedéséért felelőssé tehetek.

Ehhez hasonlóan a klasszikus mechanikában (illetve a speciális relativitáselméletben) hiába keresem azt a reális valamit, amire a testeknek a *K* és *K'* rendszerekkel szemben tanúsított különböző viselkedését visszavezethetném[*]. Ezt az ellenvetést már Newton is látta, de hiába igyekezett élét venni. Legvilágosabban E. Mach ismerte fel, és emiatt követelte a mechanika új alapokra való fektetését. Az ellenvetést csakis olyan fizika kerülheti ki, amely megfelel az általános relativitás elvének. Mert az ilyen elmélet egyenletei mindenféle vonatkoztató testre érvényesek, bármilyen is a mozgásállapotuk.

---

[30] Einstein fogalmazása itt nem egészen szabatos. Precízen így kérdezzünk: mi az oka annak, hogy egyes koordinátarendszerekben érvényes a tehetetlenség elve, másokban nem? Newton erre így felel: a tehetetlenség elve mindazon koordinátarendszerekben érvényes, melyek az abszolút térben nyugalomban vannak. Ezt a megokolást azonban a fizikus nem fogadhatja el, mert semmiféle kísérlettel nem dönthető el, hogy valamely adott koordinátarendszer a térben nyugalomban van-e vagy sem. Einstein az általános relativitás megoldásával tárgytalanná tette a kérdést. Ő olyan alakba tudta önteni a természettörvényeket, melyben minden vonatkoztató rendszerben érvényesek. Kitüntetett koordinátarendszerek az általános relativitás elméletében nincsenek.

[*] Ez az ellenvetés akkor esik különösen latba, ha a vonatkoztatási rendszer mozgásállapota olyan, hogy fenntartásához semmiféle külső befolyásra nincs szüksége, pl. abban az esetben, mikor a vonatkoztatási rendszer egyenletesen forog.

22. Az általános relativitáselmélet néhány folyománya

A 20. fejezet megfontolásai azt mutatják, hogy az általános relativitás elve képesít bennünket arra, hogy kizárólag elméleti úton a gravitációs teret jellemző tulajdonságokat vezessünk le. Tegyük fel ugyanis, hogy ismerjük valamely természeti történés időtérbeli lefolyását úgy, amint az a Galilei-féle térben egy *K* Galilei-féle rendszerre vonatkoztatva végbemegy. Ebben az esetben tisztán elméleti műveletek, azaz csupán számítások útján megtudhatjuk, hogyan játszódik le ez az ismert természeti történés a *K-hoz* képest gyorsuló mozgást végző *K'* rendszerhez viszonyítva.[31] Miután azonban ehhez az új *K'* vonatkoztató testhez viszonyítva gravitációs tér áll fenn, megállapíthatjuk, miképpen befolyásolja a gravitációs tér a vizsgálódásunk tárgyává tett jelenséget.

Így pl. azt tapasztaljuk, hogy egy olyan test, amely a *K* rendszerhez viszonyítva egyenes vonalú egyenletes mozgást végez (Galilei tételének megfelelően), a gyorsulást végző *K'-höz* (a szekrényhez) képest gyorsuló, általában görbe vonalú mozgást ír le. Ez a gyorsulás, illetve görbülés a *K'* rendszerhez képest fennálló gravitációs tér - a mozgó testre gyakorolt - hatásának felel meg. Hogy a gravitációs tér a testek mozgását ilyen módon befolyásolja, ismeretes, és így ez a meggondolás elvileg újat nem nyújt.

Alapvető fontosságú új eredményhez jutunk azonban, ha megfelelő meggondolásainkat a fényre alkalmazzuk. A fény a *K* Galilei-féle rendszerhez viszonyítva egyenes vonalban *c* sebességgel terjed tova. A gyorsuló szekrényhez, mint *K'* rendszerhez viszonyítva azonban, mint könnyen levezethető, a *fénysugár pályája nem egyenes többé. Ebből az következik, hogy a fénysugár gravitációs terekben általában görbe vonalban terjed*[32]. Ez az eredmény két okból nagy fontosságú.

Először, mert a tapasztalattal összehasonlítható. Ámbár tüzetes megfontolások arra az eredményre vezetnek, hogy a fénysugaraknak az általános relativitáselméletből adódó elgörbülése a gyakorlatban rendelkezésünkre álló gravitációs terekben igen csekély, mégis, azoknak a fénysugaraknak az esetében, amelyek a Nap közelében haladnak el, az eltérésnek már 1,7 ívmásodpercet kell kitennie. Ennek oly módon kellene megnyilvánulnia, hogy a Nap közelében mutatkozó és csak teljes napfogyatkozáskor megfigyelhető állócsillagoknak ezzel az értékkel a Naptól eltolódva kell látszaniuk, szemben azzal a helyzetükkel, amelyet az égen — hozzánk képest — akkor foglalnak el, amikor a Nap az égnek más helyén van. Rendkívül fontos feladat annak eldöntése, vajon ez a következtetés egyezik-e a tapasztalással, vagy sem: remélhetjük, hogy ezt a feladatot a fizikusok mihamarább megoldják[*].

---

[31] Einstein példája az egyenletesen gyorsuló szekrényről nem általános. E példa kétségtelenül a lehető legegyszerűbb, mert szemléletesen mutatja, hogy az egyenletesen gyorsuló szekrényben gravitációs erőtér lép fel. De pl. a forgó körhinta ugyancsak gyorsuló rendszer, és érdemes rámutatni, hogy ebben is erőtér lép fel, amelyet köztudomás szerint centrifugális erőtérnek nevezünk. Itt már jóval nehezebb belátni, hogy ez az erőtér is helyettesíthető gravitációs erőtérrel. A bonyolultabb gyorsulást végző rendszerekben általában még összetettebb erőterek lépnek fel, amelyeket összefoglaló néven inerciaerőknek nevezünk. Kérdés, vajon ezek mindegyike helyettesíthető-e gravitációs erővel? A felelet igenlő, mert az inerciális és gravitációs erők lényeges tulajdonságai azonosak. Mindkét fajta erő szigorúan arányos a hatásuknak kitett test tömegével. Másodszor mindkét fajta erő kitranszformálható (eltüntethető, ha egy másik alkalmas koordinátarendszerre térünk át), így pl. a szabadon eső liftnek, vagy az űrhajós kabinjának koordinátarendszerében nyoma sincs a gravitációs erőnek. Hasonlóan kitranszformálható a centrifugális erő, ha a körhintán lefolyó mozgásokat a földhöz rögzített koordinátarendszerben írjuk le. Inerciaerő és gravitációs erő tehát bátran nevezhető egyfélének.

[32] Gondoljunk el egy kis lyukat az ablakunkat eltakaró függönyön. Az alacsonyan járó Nap sugárkévét küld át rajta, mely az átellenes falon fényfoltot rajzol ki. A fénykéve pontosan egyenes. De ha a szobánk gyorsuló mozgást végezne felfelé, a fényfolt egyre lejjebb és lejjebb jelentkeznék, a fénykéve meggörbültnek látszanék. Mivel a szoba gyorsulásos mozgása egyenértékű egy lenti gravitációs erőtérrel, a jelenség úgy értelmezhető, hogy ilyen erőtérben a fénysugár meggörbül.

[*] Az elmélet megkövetelte fényeltérítés létezését a *Royal Society* felszerelésével az Eddington és Crommelin csillagászok vezette két expedíció az 1919. május 30-án végbement napfogyatkozáskor

Másodszor: ez a követelmény azt mutatja, hogy az általános relativitáselmélet szerint a vákuumban terjedő fény sebességének állandóságáról szóló már annyiszor említett törvény, amely egyike a speciális relativitáselmélet két alapvető feltevésének, nem tarthat igényt korlátlan érvényességre.[33] A fénysugarak ugyanis csak akkor görbülhetnek el, ha a fényterjedés sebessége más és más a különböző helyeken. Azt hihetnénk már most, hogy e követelmény folytán a speciális relativitás elmélete — és vele együtt a relativitás elmélete általában - megdőlt. Ez azonban nem áll. Csak annyit jelent, hogy a speciális relativitás elmélete nem lehet korlátlanul érvényes; eredményei csak annyiban helytállóak, amennyiben a gravitációs tereknek a jelenségekre (pl. a fényre) gyakorolt befolyásától eltekinthetünk.

Mivel a relativitás elméletének ellenfelei gyakran állították, hogy a speciális relativitáselméletet az általános relativitáselmélet halomra dönti, a valódi tényállást egy hasonlattal akarom megvilágítani. Az elektrodinamika bevezetését megelőzően az elektrosztatika törvényeit úgy tekintették, mintha azok általában az elektromosság törvényei volnának. Ma már tudjuk, hogy az elektrosztatika az elektromos tér törvényeit csakis abban a soha szigorúan meg nem valósítható esetben szolgáltatja, ha az elektromos tömegek egymáshoz és a koordinátarendszerhez képest szigorúan nyugalomban vannak. Vajon halomra döntötték-e azért az elektrosztatikát Maxwell elektrodinamikái téregyenletei? Semmiképpen sem! Az elektrodinamika az elektrosztatikát határesetként foglalja magában; az utóbbi törvényei közvetlenül az előbbi törvényeihez vezetnek, ha az erőtér az időben változatlan. A fizikai elmélet legszebb sorsa, ha maga mutat utat olyan többet felölelő elmélet bevezetéséhez, melyben ő maga csak mint határeset él tovább.

A fényterjedés imént tárgyalt példájából láttuk, hogy az általános relativitás elvével elméleti úton le tudjuk vezetni a gravitációs tér hatását olyan jelenségek lefolyására, amelyeknek törvényei nem-gravitációs térben már ismeretesek. A legkecsegtetőbb feladat azonban, amelynek kulcsát a relativitás elve adja kezünkbe, azoknak a törvényeknek a megállapítása, melyeknek a gravitációs tér maga hódol. A tényállás itt a következő:

Ismerünk olyan téridő-tartományokat, amelyek a vonatkoztatási rendszer alkalmas megválasztásával (közelítően) "galileikusan" viselkednek, azaz melyekben gravitációs tér nincsen. Ha az ilyen téridő-tartományt egy tetszőlegesen mozgó K' testre vonatkoztatjuk, akkor K'-höz viszonyítva időben és térben változó gravitációs tér áll fenn (ez a 20. fejezet általánosításából következik). Az utóbbi minéműsége természetesen attól függ, hogyan választjuk a K' mozgásállapotát. A gravitációs tér általános törvényét az általános relativitáselmélet szerint minden így nyerhető gravitációs térnek ki kell elégítenie. Ámbár minden gravitációs tér semmi esetre sem állítható így elő, mégis remélhető, hogy ezekből a különleges fajtájú gravitációs terekből a gravitáció általános törvényét levezethetjük.[34] Ez a remény a leggyönyörűbb valósággá vált! De hogy a cél világos meglátásától tényleges eléréséhez jussunk,

fotográfiai felvételekkel megállapította (1. bővebben az utolsó előtti fejezetben).

[33] Az általános relativitáselméletben, ahol bármilyen koordinátarendszert felhasználhatunk, az sem érvényes, hogy a testek nem mozoghatnak c-nél nagyobb sebességgel. Pl. a Földet használva vonatkoztatási rendszerül, azt tapasztaljuk, hogy a legtávolabbi ködök is egy nap alatt megkerülik a Földet. Ezt az óriási kört pedig csak úgy írhatják le 24 óra alatt, ha a c fénysebességnél gyorsabban mozognak. Csak inerciarendszerben nem észlelhetünk c-nél nagyobb sebességet.

[34] Einstein e helyen arra gondol, hogy a térben jelen levő tömegek által létrejövő gravitációs terek nem kaphatók meg a gyorsulásos mozgásból eredő gravitációs terekből. A következő fejezetek előkészítik azt a szükséges általánosítást, amelynek bevezetése nélkül teljesen átfogó gravitációs elmélet nem alkotható meg.

előbb komoly nehézséget kell legyőznünk, melyet fel kell tárnom az olvasó előtt, mert mélyen a dolog lényegében gyökeredzik. A téridő-kontinuum fogalmának ismételt elmélyítése szükséges.

23. Az órák és mérőrudak viselkedése forgó vonatkoztatási testen

Eddig szándékosan nem beszéltem a tér- és időbeli adatok fizikai értelmezéséről az általános relativitás keretében. Ezáltal bizonyos pongyolaság hibájába estem, amelyről nagyon jól tudjuk a speciális relativitás elméletéből, hogy egyáltalában nem lényegtelen és nem is megbocsátható. Most már nem térhetünk ki e hézag pótlása elől; már előre megjegyzem azonban, hogy ez az olvasó türelmét és absztraháló képességét alaposan próbára fogja tenni.

Most is egy sokszor felhasznált, egészen különleges esetből indulunk ki. Válasszunk olyan téridő-tartományt, amelyben alkalmasan választott mozgásállapotú *K* testhez viszonyítva nincsen gravitációs tér; a vizsgálat tárgyává tett téridő-tartományban a *K* rendszer Galilei-féle vonatkoztatási test, és erre vonatkozóan érvényesek a speciális relativitás elméletének eredményei. Ugyanezt a téridő-tartományt viszonyítsuk most képzeletben egy másik *K'* testhez, amely a *K-hoz* képest egyenletesen forog. Hogy gondolatainkat meghatározott esethez fűzzük, képzeljünk *K'* helyébe olyan kör alakú síkkorongot, amely középpontja körül saját síkjában egyenletesen forog. A *K'* korongon ennek középpontján kívül ülő megfigyelő oly erőt észlel, amely sugárirányban kifelé hat, és amelyet az eredeti *K* rendszerhez viszonyítva nyugvó megfigyelő a tehetetlenség (centrifugális erő) hatása képpen értelmez. A korongon ülő megfigyelő azonban hadd fogja fel saját korongját "nyugvó rendszerként"; erre az általános relativitás elve értelmében joga van. Ehhez és egyáltalában a koronghoz képest nyugvó testekre ható erőt gravitációs tér hatásaként könyveli el. Igaz, hogy ennek az erőtérnek térbeli eloszlása Newton gravitációs elmélete alapján nem lenne lehetséges*. De ez a megfigyelőt nem zavarja, miután ő az általános relativitást vallja; joggal reméli, hogy fel lehet állítani a gravitációnak olyan általános érvényű törvényét, amely nemcsak az égitestek mozgását, hanem az általa észlelt erőteret is helyesen magyarázza.

Ez a megfigyelő a maga korongján órákkal és mérőrudakkal kísérleteket *végez* azzal a szándékkal, hogy észlelései alapján a *K'* korongra vonatkoztatott idő- és térbeli adatok jelentésére vonatkozó szabatos definíciókhoz jusson. Milyen tapasztalatokat szerez?[35]

Két egyenlő szerkezetű óra közül állítsuk az egyiket a korong középpontjába, a másikat pedig kerületére úgy, hogy a koronghoz képest nyugalomban legyenek. Kérdés, vajon a két óra a nem forgó Galilei-féle *K* testről nézve egyformán jár-e? Míg erről a testről nézve a középpontban levő órának nincs sebessége, addig a kerületi óra a forgás következtében a *K-hoz* viszonyítva mozgásban van. A 12. fejezet eredményei értelmében ennél fogva az utóbbi óra a K-ból nézve állandóan lassabban jár, mint a korong középpontjában levő. Nyilvánvalóan a korong középpontjában, az ott felállított óra mellett ülő megfigyelőnek is ugyanerre az eredményre kell jutnia. Tehát a korongon és általában minden gravitációs térben az óra gyorsabban, vagy lassabban jár a hely szerint, ahol a (nyugvó) óra fel van állítva. Az időnek a vonatkoztatási

* Az erőtér, a korong középpontjában eltűnik, az ettől mért távolsággal pedig arányosan növekszik.

[35] Egyszerűbb fogalmazásban arról van szó, hogy egy *K* inerciarendszerben egyenletesen forgó *K'* tárcsát gondolunk el. A rajta levő megfigyelő törekvése arra irányul, hogy a tárcsára vonatkozó idő- és téradatokra pontos definíciót állapítson meg.

rendszerhez képest nyugvó órákkal való ésszerű definíciója tehát nem lehetséges. Hasonló nehézség mutatkozik, ha megkíséreljük itt az egyidejűség korábbi meghatározásának alkalmazását, aminek részleteibe most nem akarok bocsátkozni.

Egyelőre azonban a térbeli koordináták definiálása elé is áthidalhatatlan nehézségek torlódnak. Ha ugyanis a koronggal együtt forgó megfigyelő a maga egységnyi hosszú mérőrúdját (a korong sugarához mérten kicsiny rudacskát) a korong kerületének érintője irányában fekteti, akkor ugyanaz a mérőrúd, a Galilei-rendszerből nézve, rövidebb az egységnél, mert a 12. fejezet értelmében a mozgó testek a mozgás irányában megrövidülnek. Ha pedig ezzel szemben mérőrúdját a korong sugarának irányába teszi, akkor ez a K-ból nézve nem rövidül meg. Ha tehát a megfigyelő mérőrúdjával előbb a korong kerületének hosszát, azután pedig a korong átmérőjét méri meg és elosztja a két mérési eredményt, akkor a kettő hányadosaképpen nem az ismert $\pi = 3{,}14...$ számot kapja, hanem ennél nagyobbat,[**] ellenben a K-hoz képest nyugvó korongon a művelet eredménye természetesen pontosan π. Ezzel már bebizonyítottuk, hogy az euklideszi geometria törvényei a forgó korongon, és így általában a gravitációs térben, nem lehetnek pontosan érvényesek; legalábbis akkor nem, ha a rúd hosszát mindenütt és minden irányban l-nek vesszük.[36] Ezzel az egyenes vonal fogalma is elveszti jelentését, így nem vagyunk abban a helyzetben, hogy a koronghoz viszonyított x, y, z koordinátákat a speciális relativitás által használt módszer szerint pontosan definiáljuk. Pedig mindaddig, míg az események ideje és koordinátái nincsenek megállapítva, a természettörvényeknek sincs pontos értelmük, melyekben ezek a koordinátaidők előfordulnak.

Ezzel, minden az általános relativitásra vonatkozó meggondolásunk kérdésesnek látszik. Valóban szubtilis kerülő úton juthatunk az általános relativitás posztulátumának pontos alkalmazásához. Erre készítenek elő a következő megfontolások.

24. Euklideszi és nem-euklideszi kontinuum

Márványasztal lapja előtt állok. Egyik pontjától tetszőleges másik pontjába úgy juthatunk, hogy (igen sokszor) egymás után mindig egy-egy szomszédos pontba megyek át, vagy — más szóval — hogy pontról pontra "ugrás" nélkül haladok. Hogy itt mit értünk a "szomszédos" és az "ugrás" szón, azt az olvasó bizonyára elég határozottan érzi (ha ugyan nem túlságosan követelődző). Ezt fejezzük ki akkor, amikor azt mondjuk, hogy ez a felület kontinuum.

Képzeljünk el nagyszámú, az asztallap méreteihez képest kicsiny, egyenlő hosszú pálcikát. Ezen azt értjük, hogy közülük bármely kettő két vége mindig fedésbe hozható. Helyezzünk el most négyet a pálcikák közül az asztallapra úgy, hogy végeik négyszöget alkossanak, amelynek átlói egyenlő hosszúak (négyzet). Az átlók egyenlőségének ellenőrzésére egy próbapálcikát használunk. E négyzet mellé ugyanilyen négyzeteket fektetünk oly módon, hogy az előbbivel egy pálcikájuk közös legyen, és így tovább. Végül is az egész

[**] Az egész megfontolásban a *K* Galilei-féle (nem forgó) rendszert koordináta-testként használtuk, miután csak a *K-hoz* viszonyítva tehetjük fel a speciális relativitáselmélet eredményeinek érvényességét. *(K'-höz* viszonyítva gravitációs tér áll fenn.)

[36] A rúd gyorsítása feszültségeket kelt a belsejében, amelyek a hosszát megváltoztatják. De mivel a hosszváltozást kiszámíthatjuk, a rúd észlelt hosszát korrigálhatjuk, és ilyen értelemben a rudat merevnek tekinthetjük. Csak a Lorentz-kontrakciót kell tekintetbe vennünk.

asztallapot behálóztuk ilyen négyzetekkel, olyképpen, hogy minden négyzetoldal két négyzethez és minden négyzetszögpont négy négyzethez tartozik.

Igazán nagy csoda, ha ez anélkül sikerül, hogy a legnagyobb nehézségekbe ne ütköznénk. Mert gondoljunk csali a következőkre. Ha egy szögpontban már három négyzet ér össze, akkor már a negyedik két oldala is le van fektetve. Ezzel tökéletesen meg van szabva az is, hová fektetendő ez utóbbi további két oldala. Nem tologathatom többé a négyszöget abból a célból, hogy átlói egyenlőkké váljanak. Ha e követelmény magától teljesül, akkor ez az asztalnak vagy a pálcikáknak különös kegye, ami felett csak hálásan csodálkozhatunk! Sok hasonló csodát kell megélnünk, ha azt akarjuk, hogy ez a szerkesztés sikerüljön.

Ha minden simán ment, akkor azt mondjuk, hogy az asztallap pontjai euklideszi kontinuumot alkotnak a használt pálcikákra, mint vonaldarabokra vonatkoztatva. Ha egy négyzetszögpontot "kezdőpontnak" választok ki, akkor minden más négyzetszögpont erre a kezdőpontra vonatkozóan két számmal jellemezhető. Csak azt kell megadnom, hogy a kezdőponttól hány pálcika mentén kell elhaladnom "jobbra" és hány mellett "felfelé", amíg a szóban forgó négyzetszögpontba jutok. Ez a két szám az utóbbi szögpont. "Cartesuis-féle koordinátája", a lefektetett pálcikákkal meghatározott Cartesius-féle koordináta-rendszerben.

Hogy olyan esetek is vannak, amelyekben ez a kísérlet balul végződik, be fogjuk látni gondolatban végzett kísérletünk következő módosításából. Tegyük fel, hogy a pálcikák a hőmérsékletváltozás törvénye szerint "kiterjednek." Az asztallapot közepén melegítjük, a kerületen azonban nem; emellett bármelyik két pálcika az asztallap bármely helyén még mindig fedésbe hozható. Csakhogy ezután a négyzetek szerkesztése körül szükségképpen rendetlenség fog mutatkozni, mivel az asztallap belső részén a pálcikák kiterjednek, a külső részen levők hossza ellenben nem változik.

Az asztallap tehát egység-szakaszként definiált egyenes pálcikáinkra vonatkozóan nem euklideszi kontinuum többé, és nem is vagyunk többé abban a helyzetben, hogy velük közvetlenül Cartesius-féle koordinátákat definiáljunk, mivel a fenti szerkesztés többé nem végezhető el[37]. Mivel azonban olyan tárgyak is vannak, amelyeket az asztal hőmérséklete a pálcikáktól eltérő módon (vagy egyáltalában nem) befolyásol, természetes módon sikerül fenntartani azt a felfogást, amely szerint az asztallap mégis "euklideszi kontinuum"; ez a mérések, illetve az egyes darabok összehasonlításának finomabb megállapításával kielégítően sikerül.

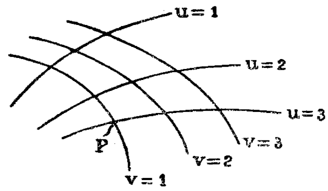
Ha azonban bármilyen fajta, azaz bármily anyagú pálcika egyforma módon erezné meg a hőmérsékletet az asztallap különbözően melegített helyein,

[37] Einstein a kiterjedt márványlap példájával mutatja meg a különbséget az euklideszi és a nem-euklideszi kontinuumok között. Ezt a különbséget kevésbé terjengős és szemléletesebb módon is kimutathatjuk. Maradjunk Einstein példájához ragaszkodva a kétdimenziós kontinuumoknál, a felületeknél. Válasszuk ki pl. a síkot és a gömbfelületet. A síklapon egyeneseket rajzolhatunk. Két egymásra merőleges egyenessel Cartesius-féle koordináta-rendszert adhatunk meg. A lapon az euklideszi geometria törvényei érvényesek, pl. a síkháromszög szögeinek összege 180 fok. Ezzel szemben a gömb felületén egyenes nem rajzolható. Cartesius-féle koordináta-rendszer & gömbön nem létezik, három főkörrel határolt gömbháromszög szögeinek összege mindig nagyobb 180 foknál. A sík euklideszi, a gömbfelület nem euklideszi kontinuum. Ami a háromdimenziós teret illeti, Kant meg volt győződve arról, hogy csak euklideszi lehet. Bolyai és Lobacsevszkij érdeme annak kimutatása, hogy nem-euklideszi terek is létezhetnek. Szerencsés körülménynek mondható, hogy a matematikusok már jóval Einstein fellépte előtt megalkották nemcsak a három-, hanem az akárhány dimenziós nem-euklideszi terek elméletét. Einstein kész eszközökkel dolgozhatott.

és ha a hőmérséklet hatásának észrevevésére nem volna egyéb eszközünk, mint a pálcikák geometriai magatartása a fentiekhez hasonló kísérletekben, akkor célszerű lehetne az asztal két pontjának távolságát egységnyinek venni, ha egyik pálcikánk két vége azokat éppen födni képes; mert hogyan definiálhatnók másképpen a távolságokat a legszembeszökőbb önkény nélkül? Ebben az esetben azonban a Cartesius-féle koordináta-módszert el kell hagynunk, és olyan másikkal kell helyettesítenünk, amely nem tételezi fel az euklideszi geometria érvényességét a merev testekre. Az olvasó észreveheti, hogy az itt leírt helyzet megfelel annak, amelyet az általános relativitás követelménye hozott létre (23. pont).*

25. A Gauss-féle koordináták[38]

Ez az analitikai geometrikus tárgyalásmód Gauss szerint a következőképpen nyerhető. Képzeljük el, hogy az asztallapra tetszőleges görbesereget rajzoltunk; a görbéket alább *u-görbéknek* fogjuk nevezni (4. ábra); jelöljük ezek mindegyikét egy-egy számmal. Az ábrán a görbéket az u = l, u = 2, u. = 3 jellel láttuk el. Az u = l és u = 2 görbék közé azonban még végtelen sok görbét kell felrajzolva gondolnunk, melyek az l és 2 közötti összes valós számoknak felelnek meg. Ekkor az *u-görbéknek* olyan rendszerét nyerjük, amelyek az egész asztallapot végtelen sűrűn behálózzák.



4. ábra

Egyetlenegy u-görbe se metssze a másikat, és az asztallap minden pontján egy és csak egy görbe menjen keresztül, így az asztallap felületének minden pontjához teljesen meghatározott w-érték tartozik. Éppen így rajzoljunk a felületre egy másik, w-vel jelölt görberendszert, amely ugyanilyen feltételeknek tesz eleget : megfelelő módon számokkal van ellátva, és ugyancsak tetszőleges alakú lehet. Így az asztallap minden pontjához egy u- és egy v- érték tartozik, és ezeket az asztallap koordinátáinak hívjuk (Gauss-féle koordináták). Például az ábra P pontjának koordinátái: u = 3; v = 1. A felület két szomszédos P és P' pontjának a következő koordináták felelnek meg :

* Problémánk a matematikus számára a következő alakot ölti: legyen adva valamely háromdimenziós euklideszi térben egy felület, pl. ellipszoid. Ezen a felületen éppen így létezik egy kétdimenziós geometria, mint a síkban. Gauss tűzte ki magának e kétdimenziós geometria elvi tárgyalásának problémáját, fel nem használva azt, hogy e felület háromdimenziós euklideszi kontinuumhoz tartozik. Képzeljük mármost, hogy ezen a felületen olyan szerkesztéseket végzünk merev pálcikákkal, mint előbb az asztallapon tettük, akkor ezekre a sík euklideszi geometriájától eltérő törvények lesznek érvényesek. A felület a pálcikákra vonatkozóan euklidikus kontinuum, s a felületen Cartesius-féle koordináták nem definiálhatók. Gauss megmutatta, hogy milyen alapelvek szerint tárgyalhatok a felület geometriai tulajdonságai, és ezzel megmutatta az utat a Riemann-féle több-dimenziós nem-euklideszi kontinuumok tárgyalásához. Innen magyarázható, hogy a matematika már régen megoldotta azokat az alaki problémákat, amelyekhez, az általános relativitás posztulátuma vezetett.

[38] Miután Einstein a forgó tárcsa példáján megmutatta, hogy gyorsuló rendszerekben általában nem érvényes az euklideszi geometria, tehát Cartesius-féle koordinátákkal nem dolgozhat, kénytelen általános Gauss-féle koordinátákhoz folyamodni.

$$P(u;v)$$
$$P'(u+du;v+dv)$$

ahol *du* és *dv* nagyon kicsiny számokat jelentenek. *A P és P'* távolságnak egy pálcikával megmért hossza legyen az ugyancsak nagyon kicsiny *ds* szám. Gauss szerint.

$$ds^2 = g_{11}du^2 + 2g_{12}dudv + g_{22}dv^2$$

ahol g_{11}, g_{12}, g_{22} olyan mennyiségeket jelentenek, amelyek egészen meghatározott módon függnek *u-tól* és *v-től.* A g_{11}, g_{12} és g_{22} mennyiségek szabják meg a pálcikák viselkedését az *u-* és w-görbesereghez és így az asztallap felületéhez viszonyítva is. Abban az esetben, amikor a vizsgált felület pontjai a mérőpálcikákhoz viszonyítva euklideszi kontinuumot alkotnak (és csakis ebben az esetben) lehetséges az *u-* és v-görbéket úgy felrajzolni és számokkal úgy ellátni, hogy egyszerűen:

$$ds^2 = du^2 + dv^2$$

Ebben az esetben az *u-* és *v*-görbék egyenes vonalak az euklideszi geometria értelmében. Ekkor a Gauss-féle koordináták egyszerűen Cartesius-koordináták. Ebből láthatjuk, hogy a Gauss-féle koordináták nem egyebek: a vizsgált felület pontjaihoz két szám rendelése oly módon, hogy a térben szomszédos pontokhoz egymástól nagyon kevéssel különböző számok tartoznak.

E megfontolások egyelőre kétdimenziós kontinuumra érvényesek. Gauss módszere azonban három, négy, sőt több dimenziós kontinuumra is alkalmazható. Ha pl. négydimenziós kontinuumról lenne szó, akkor a következő ábrázolás adódik. A kontinuum minden pontjához önkényesen négy számot : x_1 , x_2, x_3, x_4-et rendelünk ; ezek a "koordináták". Szomszédos pontoknak szomszédos koordinátaértékek felelnek meg. Ha szomszédos *P* és *P'* pontokhoz a mérésekkel még megállapítható, fizikailag jól definiált *ds* távolságot rendeljük, akkor

$$ds^2 = g_{11}dx^2 + 2g_{12}dx_1dx_2 + ... + g_{44}dx_4^2$$

ahol g_{11} stb. mennyiségek értéke a kontinuumban elfoglalt hellyel változik[39]. Csak abban az esetben, amikor a kontinuum euklideszi, lehetséges az $x_1 \ldots x_4$ koordinátákat a kontinuum pontjaihoz úgy hozzárendelni, hogy egyszerűen

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

Ekkor a négydimenziós kontinuumban olyan összefüggések érvényesek, amelyek hasonlók a háromdimenziós euklideszi kontinuumban érvényes összefüggésekhez.

---

[39] Az egyenlet bal oldalán szereplő ds^2*-t ívelemnégyzetnek* szokás nevezni. A jobb oldali g_{11}, g_{12} stb. mennyiségeket a *fundamentális tenzor komponenseinek* nevezzük.

A ds^2 ábrázolásának itt megadott Gauss-féle módja különben nem mindig lehetséges, hanem csakis akkor, ha a szóban forgó kontinuumnak elég kis része euklideszi kontinuumnak tekinthető. Nyilván ez az eset áll fenn az asztallap és a hellyel változó hőfok esetében. Mert az asztallapnak elegendően kis részén a hőfok gyakorlatilag állandó, tehát a pálcikák geometriai viselkedése majdnem olyan, mint az euklideszi geometria szabályai megkövetelik. Az előbbi fejezet négyzet-szerkesztésének felborulása csak akkor válik nyilvánvalóvá, ha az előző fejezet szerkesztését az asztallap nagyobb részére terjesszük ki.

Összefoglalva: Gauss módszert talált fel olyan tetszőleges kontinuumok matematikai tárgyalására, amelyekben mértékviszonyok ("szomszédos pontok távolsága") vannak definiálva. A kontinuum minden pontjához annyi számot rendelünk (Gauss-féle koordináták), ahány dimenziós a kontinuum. Ez a hozzárendelés úgy történik, hogy a hozzárendelés egyértelműsége megmaradjon, és hogy a szomszédos pontoknak végtelenül kevéssé különböző számok (Gauss-féle koordináták) feleljenek meg. A Gauss-koordinátarendszer a Cartesius-koordinátarendszer logikus általánosítása. Nem-euklideszi kontinuumra is alkalmazható; igaz, csakis akkor, ha a vizsgált kontinuum kis része a definiált mértékre ("távolságra") vonatkozóan annál jobb közelítéssel euklideszi módon viselkedik, minél kisebb a kontinuum tekintetbe vett része.

26. A speciális relativitáselmélet tér-idő-kontinuuma mint euklideszi kontinuum

Most már abban a helyzetben vagyunk, hogy Minkowskinak a 17. fejezetben csak futólag említett gondolatát pontosabban kifejthetjük. A speciális relativitáselmélet értelmében a tér-időbeli négydimenziós kontinuum leírása számára kiválnak bizonyos koordinátarendszerek, amelyeket "Galilei-féle koordinátarend szernek" neveztünk. Ezekben x, y, z, t az a négy koordináta, mely az eseményeket vagy — másképpen kifejezve — a négydimenziós kontinuum egyes pontjait meghatározza. Fizikailag egyszerű módon vannak definiálva, amint ezt könyvecském első részben már kimerítően tárgyaltuk. Ha egyik Galilei-féle rendszerből az előbbihez képest egyenletesen mozgó másikra térünk át, a Lorentz-transzformáció egyenletei érvényesek, amelyek a speciális relativitáselmélet levezetéséhez az alapot szolgáltatták, és amelyek összessége nem más: a fényterjedés törvényének egyetemes érvényű kifejezése minden Galilei-féle rendszerben.

Minkowski azt találta, hogy a Lorentz-transzformáció eleget tesz a következő egyszerű feltételeknek. Vizsgáljunk két olyan szomszédos eseményt, amelynek egymáshoz viszonyított kölcsönös helyzetét a négydimenziós kontinuumban a dx dy, dz térbeli koordináta-különbözetek és a dt időkülönbözet határozza meg, a K Galilei-féle rendszerhez viszonyítva. A két eseménynek egy második Galilei-rendszerhez viszonyított hasonló különbözetei legyenek dx', dy', dz', dt'. Ekkor mindig teljesül a következő kikötés*:

$$dx^2+dy^2+dz^2-c^2\,dt^2=dx'^2+dy'^2+dz'^2-c^2\,dt'^2$$

*L. a Függeléket. Az ott magukra a koordinátákra levezetett (11a) és (12) összefüggések a koordináta-*különbségekre* is érvényesek, tehát a koordináta differenciálokra (végtelen kicsiny különbözetekre) is.

Ennek a feltételnek következménye a Lorentz-transzformáció érvényessége. Ezt így is kifejezhetjük: a négydimenziós tér-időkontinuum két szomszédos pontjához tartozó

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2\,dt^2$$

mennyiség minden Galilei-féle vonatkoztató-testre nézve azonos értékű. Ha $x, y, z, \sqrt{-1}\,ct$ helyébe x_1, x_2, x_3, x_4 értékeket tesszük, akkor azt kapjuk eredményül, hogy

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

a vonatkoztatási rendszertől független. A *ds* mennyiséget a két esemény, vagy négydimenziós pont "távolságának" nevezzük.

Ha tehát a valós *t* időérték helyett bevezetjük a képzetes $\sqrt{-1}\,ct$ értéket, akkor a speciális relativitáselmélet értelmében a tér-időbeli kontinuumot négydimenziós "euklideszi" kontinuumként foghatjuk fel, amint ez az utolsó fejezet megfontolásaiból következik.[40]

[40]Minkowski észrevette, hogy ha a 39. -40. oldalon szereplő Lorentz-transzformációt koordináta-differenciálokban írjuk fel

$$dx' = \frac{dx - v\,dt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$dy' = dy$$

$$dz' = dy$$

$$dt' = \frac{dt - \frac{v}{c^2}dx}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

és az egyenleteket négyzetre emelve összeadjuk, a következőt kapjuk:

$$dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 - c^2\,dt'^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2\,dt^2$$

Az egyenlet kimondja, hogy a fény minden inerciarendszerben c sebességgel halad. Legyen mármost $x = x_1$, $y = x_2$, $z = x_3$, $ict = x_4$, akkor az egyenlet így hangzik

$$dx'^2_1 + dx'^2_2 + dx'^2_3 + dx'^2_4 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

A bal oldali kifejezés az ívelem négyzete a *K'* rendszerben. A jobb oldali a *K* rendszerben. Az ívelem két térben és időben szomszédos esemény *intervalluma* vagy *négyes távolsága.* Az intervallum tehát minden inerciarendszerben ugyanaz. Egyszersmind látjuk, hogy ds^2 kifejezésében a g_{11}, g_{22}, g_{33}, g_{44} 1-gyei egyenlő: a speciális relativitás téridőbeli kontinuuma euklideszi.

27. Az általános relativitáselmélet tér-idő kontinuuma nem-euklideszi kontínuum

Könyvecském első részében olyan tér- és idő-koordinátákat alkalmazhattunk, amelyeket fizikailag egyszerűen, közvetlen módon értelmezhetünk és melyek a 26. fejezet szerint Cartesius-féle négydimenziós koordinátáknak foghatók fel. Ez a fénysebesség állandóságának elve alapján volt lehetséges, amelyet viszont a 21. fejezet szerint az általános relativitás elméletében nem tarthatunk fenn; sőt arra az eredményre jutottunk, hogy az utóbbi elmélet szerint a fénysebességnek mindig függnie kell a koordinátáktól, ha gravitációs tér van jelen. Azt találtuk továbbá a 23. fejezet egy különleges példájában, hogy a gravitációs tér fennállása lehetetlenné teszi a koordináták és az idő olyan definícióját, amely a speciális relativitáselméletben célhoz vezetett.

Ezekből következően oda jutunk, hogy az általános relativitás elvének értelmében a tér-időbeli kontinuumot nem foghatjuk fel euklidészinek, hanem itt az az általános eset áll fenn, amelyet a helyenként változó hőfokú asztallap kétdimenziós kontinuumával kapcsolatban már megismertünk. Amint ott lehetetlen volt egyforma pálcikákból Cartesius-féle koordinátarendszert szerkesztenünk, éppen úgy itt is lehetetlen merev testekből és órákból oly módon rendszert (vonatkoztatási testet) építenünk, hogy az egymáshoz képest szilárdan elhelyezett mérőrudak és órák közvetlenül a helyet és időt mutassák. Ez a 23. fejezetben felmerült nehézség lényege.

A 25. és 26. fejezetek fejtegetései megmutatják azonban azt az utat, amelyen ezek a nehézségek legyőzhetők. A négydimenziós idő-térbeli kontinuumot önkényesen Gauss-koordinátákra vonatkoztatjuk. A kontinuum minden pontjához (eseményhez) négy oly számot (koordinátát) rendelünk (x_1, x_2, x_3, x_4), amelyeknek nincsen semmiféle közvetlen fizikai értelmük, hanem csakis arra szolgálnak, hogy velük a kontinuum pontjait meghatározott, de önkényes módon megszámozzuk. Még csak az sem szükséges, hogy x_1, x_2, x_3*-at* "térbeli" koordinátákként, x_4-et pedig "időbeli" koordinátaként fogjuk fel.

Az olvasó azt gondolhatná, hogy a világnak ilyenfajta leírása egyáltalában nem kielégítő[41]. Mert mit jelentsen az, hogy egy eseménynek a meghatározott x_1, x_2, x_3, x_4 koordinátákat tulajdonítom, ha maguk a koordináták semmit sem jelentenek? Mélyebb megfontolás után azonban be kell látnunk, hogy ez az ellenvetésünk alaptalan. Vizsgáljunk pl. egy tetszőlegesen mozgó anyagi pontot. Ha csak egy pillanatig létezne, akkor tér-időbelileg egyetlen x_1, x_2, x_3, x_4 értékrendszerrel lenne jellemezhető. Tartós létezése tehát olyan értékrendszerek végtelen nagy számával jellemezhető, amelyeknek koordinátaértékei folytonos módon sorakoznak egymás mellé; a tömegpontoknak tehát a négydimenziós kontinuumban (egydimenziós) vonal

[41] A Gauss-féle koordináták hátránya, hogy nem szemléletesek. A Cartesius-féle koordinátákat könnyen el tudjuk képzelni mint a kérdéses pontból a koordinátasíkokra bocsátott merőlegeseket. A használatos polárkoordináták ugyancsak könnyen elképzelhetők. Még ha a 4. ábrán látható koordinátavonalakat vékony drótok alakjában meg is adnók, számozásuk önkényessége kizár minden levonható szabályosságot. A számozást különben a valóságban meg sem adhatjuk, mert a koordinátavonalak végtelenül sűrűén gondolandók el. Einstein nagyon csattanósan teszi fel a kérdést: mit jelent az, hogy egy eseménynek négy koordinátája x_1, x_2, x_3, x_4, ha ezek a koordináták semmit sem jelentenek? Nyomban megadja azonban a feleletet. A tetszőlegesen mozgó anyagi pontnak végtelen sok folytonosan egymáshoz sorakozó koordinátanégyes, vagyis vonal felel meg. Ha két vonal pontjainak van egy közös koordinátanégyese, az azt jelenti, hogy a két vonal a megfelelő pontban találkozik. Einstein példán megmutatja, hogy minden leírás felbontható olyan kijelentésekre, amelyek két esemény találkozására vonatkoznak. Ezzel kimutatja, hogy a Gauss-féle koordináták természetleírásra alkalmasak.

felel meg. Sok mozgó pontnak ugyanannyi ilyen vonal felel meg kontinuumunkban. Az egyetlen az e pontokat érintő állítások között, amely fizikai valóságra tarthat igényt, valóban az, ami ezeknek a pontoknak a találkozására vonatkozik. Ez a találkozás matematikai ábrázolásunkban úgy nyilvánul, hogy a koordinátaért ékeknek egy bizonyos x_1, x_2, x_3, x_4 rendszere közös rendszere árinak a két vonalnak, melyek az illető pontok mozgását ábrázolják. Hogy az ilyen találkozások a valóságban az egyetlen tér-idő jellegű megállapítások, amelyeket fizikai kijelentésekben találhatunk, azt az olvasó beható meggondolások titán bizonyára kétkedés nélkül elismeri.

Amikor előbb egy anyagi pont mozgását valamilyen rendszerhez viszonyítva leírtuk, nem tettünk egyebet, mint megadtuk a pont egybeesését a vonatkoztató lest meghatározott pontjaival. A hozzátartozó időadatok is felbonthatók a test órákkal való találkozásának megállapítására, az óramutatóknak a számlap bizonyos pontjaival való találkozásának megállapítása révén. Nem más a lényeg a mérőrudakkal végzett térbeli mérések esetében sem.

Általában: minden fizikai leírás olyan állításokra bontható, amelyeknek mindegyike két *A* és *B* esemény tér-időbeli egybeesésére (koincidenciájára) vonatkozik. Minden ilyen állítás Gauss-féle koordinátákban a négy x_1, x_2, x_3, x_4 koordináta egyezésével fejezhető ki. A tér-időbeli kontinuum Gauss-féle koordinátákkal történő leírása teljesen pótolja a vonatkoztató test segítségével történő leírást anélkül, hogy az utóbbi leírási mód hiányosságaiban osztozna; nincs kötve a leírandó kontinuum euklideszi jellegéhez.

28. Az általános relativitás elvének szabatos megfogalmazása

Most már abban a helyzetben vagyunk, hogy az általános relativitás elvének a 18. fejezetben említett ideiglenes megfogalmazását szabatossal helyettesíthetjük. Akkori szövegezésünk ez volt: "Minden *K, K'*, stb. vonatkoztató test egyenértékű a természetleírás (az általános természettörvények megfogalmazása) szempontjából, bármilyen mozgásállapotban is legyen"; most már ezt nem tartjuk fenn, mivel idő-térbeli leírásainkban a merev vonatkoztatási test alkalmazása (a speciális relativitáselmélet értelmében) az általános elméletben nem lehetséges. A vonatkoztató test helyébe a Gauss-féle koordinátarendszernek kell lépnie[42]. Az általános relativitás alapelvének megfelel ez az állítás: *"Az általános természettörvények megfogalmazására minden Gauss-féle koordinátarendszer elvileg egyenértékű."*

Az általános relativitás elve még más olyan alakban is kifejezhető, amely, a speciális relativitás elvének természetes általánosításaként, még világosabban érthetőbbé teszi. A speciális relativitás elmélete szerint az általános természettörvényeket kifejező egyenletek ugyanolyan alakú egyenletekbe mennek át, ha a (Galilei-féle) *K* vonatkoztató test, x, y, z, t tér-idő változói helyett a Lorentz-transzformáció alkalmazásával egy új *K'* vonatkoztató test x', y', z', t' tér-idő változóit vezetjük be. Az általános relativitás elmélete értelmében azonban az kell, hogy az egyenletek a Gauss-féle x_1, x_2, x_3, x_4 változók *tetszőleges szubsztitúciójával* ugyanolyan alakú egyenletekbe menjenek át; mert mindenféle (tehát nemcsak Lorentz-féle) koordinátatranszformáció annak felel meg, hogy az egyik Gauss-féle koordinátarendszer átmegy egy másikba.

[42] Ha a *K, K'* vonatkoztató test helyett elejétől kezdve a *K, K'* koordinátarendszer kifejezést használjuk, a szövegben levő helyesbítés fölösleges.

Ha nem akarunk lemondani a megszokott háromdimenziós szemléletről, akkor az általános relativitáselmélet alapgondolatainak kifejlődését a következőképpen is jellemezhetjük: a speciális relativitáselmélet Galilei-féle terekre vonatkozik, azaz olyanokra, melyekben nincs gravitációs tér. Vonatkoztató testként itt Galilei-féle testet használunk, azaz olyan mozgásállapotú merev testet, amelyhez viszonyítva az "elszigetelt" anyagi pont egyenes vonalú egyenletes mozgásáról szóló Galilei-törvény érvényes.

Bizonyos megfontolások alapján közelfekvő az a gondolat, hogy az ilyen. Galilei-féle teret *nem*-Galilei-féle testre is vonatkoztassuk. Ehhez viszonyítva azután különleges fajtájú gravitációs tér lép fel (20. és 23. fejezet)[43].

Euklideszi tulajdonságú merev testek azonban gravitációs terekben nem léteznek; a merev vonatkoztató test fikciója tehát felmondja a szolgálatot az általános relativitás elméletében. A gravitációs terek az órák járását is befolyásolják olyképpen, hogy az időnek órák közvetlen használatán alapuló definíciója távolról sem annyira nyilvánvaló, mint a speciális relativitáselméletben.

Ezért olyan nem-merev vonatkoztató testeket alkalmazunk, melyek nemcsak hogy a maguk egészében tetszőlegesen mozognak, hanem mozgásuk közben alakjukat is tetszőlegesen változtathatják. Az időt órákkal definiáljuk, melyek járásának törvénye tetszőleges, bármily szabálytalan is lehet; ezeket nem-merev test egy-egy pontjához gondoljuk rögzítve, és csak azt az egyetlen kikötést kell teljesítenünk, hogy a szomszédos órák egyidejűén észlelhető adatai végtelen keveset különbözzenek egymástól. Ez a nem-merev vonatkoztató test, melyet méltán "vonatkoztató molluszkumnak" nevezhetünk, lényegileg egyenértékű a Gauss-féle négydimenziós koordinátarendszerrel[44]. Ami a "molluszkumot" a Gauss-féle koordinátarendszerrel szemben bizonyos mértékben szemléletessé teszi, nem egyéb, mint a térkoordináták és az időkoordináta különállásának (tulajdonképpen helytelen) alaki fenntartása. A molluszkum minden pontját térpontként kezeljük, minden hozzá képest nyugvó anyagi pontot általában nyugvónak tekintünk, mindaddig, míg a komplementrendszert vonatkoztató testként kezeljük. Az általános relativitás elve megköveteli, hogy e molluszkumok mindegyike egyenlő joggal és egyenlő sikerrel legyen koordináta rendszerként felhasználható az általános természettörvények megfogalmazásában; a törvények a molluszkum választásától egészen függetlenek legyenek.

A természettörvényekre rótt ily messzemenő korlátozásban rejlik az a kutató-erő, amely az általános relativitás elvének sajátja.

29. A gravitáció problémájának megoldása az általános relativitás elve alapján

Ha az olvasó összes eddigi okoskodásainkat figyelemmel kísérte, akkor a gravitáció problémájának megoldásához vezető módszerek megértésének mi sem áll már útjában,

A Galilei-féle tér vizsgálatából indulunk ki, azaz amelyben a *K* Galilei-féle testhez viszonyítva nincs gravitációs tér. Ez esetben a mérőrudak, az órák és

[43] A szöveg jelentése a következő: az inerciarendszerekben felírt mozgástörvényeket pl. gyorsuló koordinátarendszerekben is felírhatjuk. Ilyenkor azt tapasztaljuk, hogy inerciaerők lépnek fel, amelyeket Einstein felfogása szerint gravitációs erőknek tekinthetünk.

[44] Molluszk-koordinátarendszert nyerünk, ha pl. egy puhány határa rajzoljuk a 4. ábra koordináta-vonalait. Miközben a puhány testét vonaglásszerűen változtatja, a koordinátavonalak is egyre változnak.

az "elszigetelt" tömegpontok *K-hoz* viszonyított viselkedése a speciális relativitás elméletéből ismeretes. Az "elszigetelt" tömegpontok egyenes vonalban és egyenletesen mozognak.

Vonatkoztassuk mármost ezt a teret egy Gauss-féle koordinátarendszerre, illetőleg "molluszkum"-ra, mint *K'* testre, *K'*-re vonatkozóan egy (különleges fajta) *G* gravitációs tér áll fenn. Pusztán számítás útján megtudhatjuk, hogyan viselkednek a *K'* rendszerre vonatkozóan a mérőrudak és órák, valamint a szabadon mozgó anyagi pontok. Viselkedésüket a *G* gravitációs térnek az órákra, mérőrudakra és anyagi pontokra való hatásaként értelmezzük. Ezután vezessük be azt a feltevést, hogy a gravitációs térnek a mérőrudakra, órákra meg a szabadon mozgó pontokra gyakorolt hatása még akkor is azonos törvények szerint megy végbe, ha az uralkodó gravitációs tér *nem* vezethető le puszta koordináta-transzformációval a Galilei-féle különleges esetből[45].

Ezután a Galilei-féle különleges esetből tisztán koordináta-transzformáció útján levezetett *G* gravitációs tér idő-térbeli viselkedését vizsgáljuk, hogy olyan törvénybe foglaljuk, mely mindig érvényes, bárhogyan is választjuk a leírásra szolgáló vonatkoztató testet (molluszkumot).

Ez a törvény azonban még nem a gravitációs tér *általános* törvénye, miután az imént vizsgált *G* gravitációs tér különleges fajtájú. Hogy a gravitáció általános tértörvényéhez juthassunk, szükséges még az előbbi törvény általánosítása, amelyhez minden önkénytől menten eljuthatunk a következő követelmények szemmel tartásával:

a) a keresett általánosításnak ki kell elégítenie az általános relativitás követelményét;

b) ha a vizsgálat tárgyává tett térben anyag van, akkor ennek erőteret keltő hatására kizárólag csakis *az* utóbbi tehetetlen tömege, azaz a 15. fejezet értelmében csakis energiája mérvadó;

c) a gravitációs térnek és az anyagnak együttesen ki kell elégíteniük az energia (és az impulzus) megmaradásának tételét.

Végül az általános relativitás elve lehetővé teszi annak megismerését, hogy milyen hatása van a gravitációs térnek olyan jelenségek lefolyására, melyek gravitációs tér híján ismert törvények szerint mennek végbe, azaz amelyek a speciális relativitás elméletének keretébe már be vannak illesztve. Eközben elvileg olyan módszer szerint járunk el, mint az előbb, a mérőrudak, órák és szabadon mozgó tömegpontok esetében már megmagyaráztuk.

A gravitációnak az általános relativitás elvéből így levezetett törvénye nemcsak szépségével tűnik ki, nem csak a 21. fejezetben már említett, s a klasszikus mechanikától elválaszthatatlan fogyatékosságot szünteti meg, nemcsak a tehetetlen és súlyos tömegek tapasztalati törvényét értelmezi, hanem ezenkívül a csillagászatnak két lényegében különböző tapasztalati eredményét is megmagyarázza, amelyekkel a klasszikus mechanika nem boldogult. Ez eredmények közül a másodikat, ti. a fénysugaraknak a Nap gravitációs tere okozta elgörbülését már említettük[46], az első a Merkúr bolygó pályájára vonatkozik.

---

[45] A számítás úgy történik, hogy az inerciarendszerben Cartesius-féle koordinátákkal kifejezett törvényeket általános koordinátákba transzformáljuk át. Ekkor alaki különbségek lépnek fel, amelyeket az inerciaerők, ül. gravitációs erők hatásának *tulajdonítunk.* Megállapodunk abban, hogy a tömegektől eredő gravitációs tér ugyanilyen alakú változásokat létesítene az inerciarendszerekben érvényes természettörvényeken. Az így nyert törvények azonban általánosító eljárással még átalakítandók úgy, hogy a szövegben *a) b) c)* pontok alatt fölállított követelményeknek eleget tegyenek.

Ha ugyanis az általános relativitás elméletének egyenleteit arra a különleges esetre vonatkoztatjuk, amelyben a gravitációs tér gyenge és az összes tömegek a fénysebességhez mérten kis sebességekkel mozognak a koordinátarendszerhez viszonyítva, akkor az általános relativitás elmélete első közelítésként a *newtoni* elmélethez vezet; ezt itt tehát minden különösebb feltevés nélkül kapjuk, míg Newtonnak azt a feltevést kellett bevezetnie, hogy két pontnak egymásra gyakorolt vonzóereje a távolság négyzetével fordítva arányos. Ha a számítás pontosságát növeljük, eltérések mutatkoznak a newtoni elmélettől, amelyek mindenesetre olyan kicsinyek, hogy majd mindegyikük még az észlelhetőség határa alatt marad.

Az eltérések közül egyet mégis külön szemügyre fogunk venni. Newton elmélete szerint a bolygók a Nap körül olyan ellipszisen mozognak, amelynek helyzete az állócsillagokhoz képest örökké ugyanaz lenne, ha a többi bolygónak a vizsgált bolygóra gyakorolt hatásától és az állócsillagok saját mozgásától eltekinthetnénk. Ettől a két hatástól eltekintve, a bolygók pályájának az állócsillagokhoz viszonyítva mozdulatlan ellipszisnek kellene lennie, ha Newton elmélete pontosan helyes. Valamennyi bolygónál, a Naphoz legközelebb fekvő Merkúrt kivéve, ezt a kiváló pontossággal ellenőrizhető következményt olyan precizitással lehetett igazolni, amekkorát csak az észlelés ma elérhető élessége megenged. A Merkúr bolygóról azonban Leverrier óta tudjuk, hogy az előbbi értelemben korrigált pályájának ellipszise az állócsillagokhoz viszonyítva nem mozdulatlan, hanem, ha roppant lassan is, pályájának síkjában elfordul, forgásának megfelelő értelemben. A pályaellipszis elfordulásának mértéke évszázadonként 43 ívmásodpercnek adódott, mely érték néhány ívmásodpercre biztos. A klasszikus mechanika ezt a jelenséget csak úgy tudta megmagyarázni, hogy kizárólag emiatt alkalmazott s kevéssé valószínű feltevéseket vezetett be[47].

Az általános relativitás elméletéből következik, hogy minden bolygó pályaellipszisének a fent megadott módon szükségképpen forognia kell; hogy - a Merkúron kívül - ez az elfordulás valamennyi bolygónál kisebb annál, semhogy a megfigyelések ma elérhető pontossága mellett kimutatható volna; és hogy e pályaellipszis-elforgásnak a Merkúr esetében évszázadonként 43 ívmásodpercre kell rúgnia úgy, amint azt megfigyelték.

---

[46] A fénygörbülés jelensége szerint egy, a Nap közvetlen közelében elhaladó fénysugárnak 1,75 ívmásodpercnyi irányváltozást kell szenvednie. Az erre vonatkozó mérések ma már számosak. Az elsőt Eddington és Dyson végezte 1919-ben Principe afrikai szigeten, ül. a brazíliai Sobralban. Az általuk talált értékek l ,61" + 0,30", ill. 1,98" + 0,13". Campbell és Trumpler 1928-ban l,82"+ 0,15", ill. l,72"+ 0,11" értékeket mértek, van Biesbroeck pedig Khartoumban 1953-ban 1,70"+ 0,10" értéket mért. Newton-féle elmélet szerint is meghatározott pályagörbülés adódik olyan tömegpontra, mely a végtelenből *c* fénysebességgel indul el és a Nap-felület közelében halad el. De az eltérés csak fele az Einstein-félének. A mérések szerint szóba sem jöhet. A fénysugár - mint foton - tehát egészen más tulajdonságokat mutat, mini, az anyagi pont.

[47] A múlt század végén S. Newcomb 5412 Merkúr-megfigyelésből, amelyek az 1750-től 1892-ig terjedő időközre vonatkoztak, a nagytengely, vagy a perihélium elforgására 575,07 ívmásodpercet talált évszázadonként. Az elmélet viszont a zavarszámítás alapján csak 533,87 ívmásodpercet tudott megmagyarázni. A 41,20 ívmásodpercnyi különbséget különböző feltevésekkel igyekeztek eltüntetni. Gondoltak a Nap esetleges belapulásának hatására, egy, a Merkúr-pályán belül keringő bolygóra és az állatövi anyag hatására. A húszas években kételkedtek a megállapított 41,20" helyes voltában. 1939-ben felvetették az 1765-től 1937-ig terjedő összes Merkúr megfigyelések újrafeldolgozását. 10 482 megfigyelésről volt szó. Ezt az óriási munkát az. Amerikai Egyesült Államokban, a washingtoni Naval Observatoryn végezték négy éven át. A nyert érték: 42,84 ívmásodpercnyi perihéliumforgás évszázadonként. A relativitás elmélete által követelt pontos érték 42,91 ívmásodperc. A különbség mindössze 0,07 ívmásodperc. Ma már a csillagászati tapasztalat a Vénusz, a Föld és a Mars perihéliumsebességét is ismeri. A megfelelő értékek rendre 8,6, 3,8, ill. 1,35 ívmásodperc évszázadonként.

Ezenkívül ez ideig még egy olyan következtetés vonható le az általános relativitáselméletből, amely tapasztalati úton ellenőrizhető; ez pedig a nagy csillagokról hozzánk jutott fény színképvonalainak eltolódása, a. Földön megfelelő módon (azaz ugyanazon molekulafajtával) keltett fényéhez viszonyítva. Nem kételkedem abban, hogy a tapasztalat rövidesen igazolni fogja az elmélet eme következtetését is[*].

[*] L. a 35. fejezet.

HARMADIK RÉSZ

A VILÁGEGYETEM EGÉSZÉRE VONATKOZÓ MEGFONTOLÁSOK[48]

30. A newtoni elmélet kozmológiai nehézségei

A klasszikus égi mechanikához a 21. fejezetben már említetten kívül még egy további elvi nehézség is tapad. Ezt tudtommal legelőször Seeliger csillagász tárgyalta kimerítően. Ha azon a kérdésen elmélkedünk, hogy miképpen gondoljuk el a világot, mint összességet, úgy a legkézenfekvőbb felelet a következő: a világ térben (és időben) végtelen. Mindenfelé van csillag úgy, hogy az anyag sűrűsége, ha részletenként nagyon különböző is, nagy átlagban mégis mindenütt ugyanakkora. Más szóval: bármilyen messze utaznánk is a világtérben, mindenfelé az állócsillagoknak egyforma fajtájú és egyforma sűrűségű laza sokaságát találnánk.

Ez a felfogás összeegyeztethetetlen a newtoni elmélettel. Sőt, ez utóbbi azt követeli, hogy a világnak valami közepe-féléje legyen, amelyben a csillagok sűrűsége maximális, és amelytől távolodva a csillagok sűrűsége csökken, hogy messze künn végtelen üresség lépjen helyébe. A csillagok világa véges sziget lenne a tér végtelen óceánjában*.

Ez a kép magában alig kielégítő, annál kevésbé, mert vele arra a következtetésre jutunk, hogy a csillagoknak szakadatlanul kilövellt fénye, valamint a csillagrendszer egyes csillagai a végtelenbe vándorolnak, anélkül, hogy valaha visszatérnének, és hogy egyéb természeti tárgyakkal még egyszer kölcsönhatásba kerülnének, így a végesben összeverődött anyag világának lassan, de biztosan el kellene fogynia.

Hogy ezt a következtetést elkerülhessük, Seeliger a newtoni elméletet oda módosította, hogy két tömeg egymásra gyakorolt vonzóerejét nagy távolságokban az $\frac{1}{r^2}$ törvénynél nagyobb mértékben csökkenőnek vette. Ezáltal az anyag középsűrűsége mindenhol, még a végtelenben is állandó lehet anélkül, hogy végtelen erősségű gravitációs terek jönnének létre, így megszabadultunk attól a nem rokonszenves képtől, amely szerint az anyagi

[48] Einstein ebben a fejezetbon megmutatja, hogy a Newton-féle törvény, amely szerint a tömegek egymást a köztük levő távolság négyzetével fordítva arányosan vonzzák, egy ki nem elégítő univerzumra vezet. A világegyetem végtelen volna, de az összes égitestek hatalmas anyagi sziget alakjában gyűlnének össze, melyen kívül a végtelenbe nyúló tér teljesen üres volna. Ez a kép ellenkeznék azzal a modern felfogással, hogy a világegyetem szerkezete mindenütt egyforma. Nem hiszünk abban, hogy a mi csillagászati tapasztalatunk számára hozzáférhető rész különleges szerkezetű lenne. Az az elgondolás, hogy a centrális anyagi szigeten kívül határtalan üresség tátong, csak a teológiai felfogásnak kedvezne.

* *Indoklás.* A newtoni elmélet szerint az *m* tömegben bizonyos számú "erővonal" végződik, amelyek a végtelenből jönnek és melyeknek száma arányos az *m* tömeggel. Ha a tömeg g_0 sűrűsége a világban átlag állandó, akkor egy F térfogatú gömb átlagban $g_0 V$ tömeget zár magába. Tehát a gömb belsejébe hatoló erővonalak száma a $g_0 V$ mennyiséggel arányos. A gömb felületegységén át tehát $g_0 \frac{V}{F}$ azaz $g_0 R$-rel arányos számú erővonal haladna keresztül, A térerősség, tehát a felületen növekvő *R* gömbsugár esetében végtelenné válna, ami lehetetlenség.

világnak szükségszerűen valami középpont-féléje van. Persze azt, hogy az imént vázolt elvi bajokból így megszabadulunk, megfizetjük a Newton-féle törvénynek sem a tapasztalat re vén, sem elméleti úton nem indokolható módosításával és összebonyolításával. Akárhány más törvény is képes ugyanerre anélkül, hogy okkal tarthatnék egyiket különbnek a másiknál, mert egyik sem alapszik általánosabb elméleti elveken; éppen oly kevéssé, mint Newton törvénye.

31. Véges és mégsem határos világ lehetősége[49]

A világ szerkezetéről folytatott spekulációk azonban egész más irányban is mozogtak. A nem-euklideszi geometria fejlődése ugyanis annak felismerésére vezetett, hogy a tér *végtelenségében* anélkül kételkedhetünk, hogy ezzel a gondolkodás törvényeivel, vagy a tapasztalattal összeütközésbe kerülnénk (Riemann, Helmholtz). Ezeket a dolgokat Helmholtz és Poincaré felülmúlhatatlan világossággal már tisztázták; én itt csak röviden érinthetem.

Képzeljünk el mindenekelőtt egy kétdimenziós történést. Mozogjanak szabadon, a síkban, lapos lények lapos szerszámokkal, különösen pedig lapos, merev mérőrudakkal. A síkon kívül ne létezzék számukra semmi; ami a síkjukban történik, amit saját magukon és lapos tárgyaikon észlelnek, kauzálisán zárt egésszé zárul. Kiemeljük, hogy a síkbeli euklideszi geometria szerkesztései a pálcikákkal megvalósíthatók (pl. a 24. fejezetben vizsgált hálózatszerkesztés az asztallapon). Az ilyen lények világa a mienkkel ellentétben térbelileg kétdimenziós, de éppen úgy, mint a miénk, végtelen kiterjedésű. Végtelen sok egyenlő pálcikanégyzet fér el rajta, azaz térfogata (területe) végtelen. Van értelme, ha ezek a lények azt állítják, hogy az ő világuk "sík", tudniillik az az értelme, hogy a pálcikáikkal a sík euklideszi geometriájának szerkesztései keresztül vihet ők, miközben az egyes pálcika, helyzetétől függetlenül, mindig ugyanazt a hosszúságot képviseli.

Megint kétdimenziós történést gondolunk el, de most nem síkon, hanem gömbfelületen. A lapos lények mérőrúdjaikkal és egyéb tárgyaikkal pontosan benne fekszenek e felületben és azt el nem hagyhatják; sőt észlelésük egész világa is kizáróan erre a gömbfelületre terjed ki. Vajon felfoghatják ezek a lények az ő világuk geometriáját, mint kétdimenziós euklideszi geometriát, pálcikáit pedig mint az "egyenes darab " megvalósítását ? Nem tehetik. Mert ha megkísérlik az egyenes megvalósítását, azt a görbét nyerik eredményül, amit mi, "háromdimenziósok" a "legnagyobb kör"-nek nevezünk; tehát magában zárt, meghatározott véges hosszúságú vonalat kapnak, amelyet pálcikával kimérhetnek. Ugyanígy: ennek a világnak a felülete is véges és egy pálcikanégyzettel összehasonlítható. Annak a nagy élménynek, amelyet az ilyen megfontolásokba való elmélyedés kivált, magva a következő felismerés: *az ilyen lények világa véges és még sincs határa.*

[49] Az általános relativitás elmélete új lehetőségeket tár fel a világegyetem struktúrájára vonatkozólag. Mint már említettük, ennek az elméletnek területén nem az euklideszi, hanem a Riemann-féle geometria az illetékes. Ez a geometria pedig megenged oly tereket is, amelyek végesek, de még nincs határuk. Ha szemléletesek akarunk maradni, legjobb a kétdimenziós terekre, a felületekre visszanyúlni. Szembeállítjuk az euklideszi végtelen síkot a nem-euklideszi gömbfelülettel. A sík végtelen kiterjedésű, határa nincs. Ezzel szemben a gömbfelület kiterjedése véges, de határa szintén nincs. Lapos lények, amelyek a felülethez kötve vannak és csak annak mentén mozoghatnak, szakadatlanul vándorolhatnak a felületen, sehol sem akadnak meg, sehol sem érkeznek határhoz. Ilyen véges és határ nélküli terek három dimenzióban is elgondolhatok, és ennélfogva ellentmondás nélkül feltehető, hogy a mi világegyetemünk is ilyen. Hogy tényleg ilyen-e, még manapság is nyílt vita tárgya. A döntésre mérvadó mennyiség a világegyetem anyagának közepes sűrűsége. Ennek számértéke pedig csak feltevésekkel és becslésekkel közelíthető meg. Világegyetemünk szerkezetének problémája tehát még a jövő kérdése.

A gömb lényeinek azonban nem kell beutazniuk világukat, hogy belássák: nem-euklideszi világban laknak. Erről világuk bármely nem túl kicsiny részében meggyőződhetnek. Egy pontból minden irányban egyenlő hosszú "egyenes darabokat" (háromdimenzióban köríveknek ítélt vonalakat) húznak. E vonalak szabad végeinek összekötő vonalát "körnek" fogják nevezni. Valamely pálcikával megmért körkerületnek és ugyanezzel a pálcikával megmért körátmérőnek viszonya a sík euklideszi geometriája szerint egyenlő a π állandóval, amely független a kör átmérőjétől. A gömbfelület lényei ezt a viszonyt gömbfelületükön:

$$\pi \frac{\sin\left(\frac{r}{R}\right)}{\left(\frac{r}{R}\right)}$$

értékűnek találják, amely a π-nél kisebb, mégpedig annál kisebb, minél nagyobb a kör sugara a "gömbi világ" sugarához mérten. Ebből az összefüggésből a gömb lényei meghatározhatják világuk R sugarát, még akkor is, ha a gömbnek aránylag csak kis része áll méréseik rendelkezésére. Ha azonban ez a gömbrész túlságosan kicsiny, úgy nem tudják már megállapítani, hogy gömbi világon vannak, nem pedig euklideszi síkon; a gömbfelület kicsiny része nagyon kevéssé különbözik a sík hasonló kicsiny részétől.

Ha tehát a gömbi lények olyan bolygón tartózkodnak, amelynek naprendszere a gömbi világnak csak elenyésző kicsiny részét foglalja el, akkor nincs módjukban eldönteni, vajon véges, vagy végtelen világban élnek, mert a világnak *az* a darabja, amely tapasztalásuk számára hozzáférhető, mindkét esetben gyakorlatilag sík, illetve euklideszi. A szemlélet közvetlenül mutatja, hogy gömbi lényeink számára a körkerület a sugárral egy ideig a "világkerület" mértékéig növekszik, hogy azután még tovább növekvő sugár mellett fokozatosan ismét zérusig csökkenjen. A körrel bezárt felület eközben mindjobban növekszik, míg végül az egész gömb világ összfelületével lesz egyenlő.

Az olvasó alighanem csodálkozni fog azon, hogy miért helyeztük lényeinket éppen gömbre és nem más zárt felületre. Ennek azonban megvan a jogosultsága. A gömb ugyanis a többi zárt felület közül azzal a tulajdonsággal válik ki, hogy minden pontja egyenlő értékű. A kör u kerületének és r sugarának viszonya függ ugyan r-től, de adott r-rel a gömbvilág minden pontjára nézve ugyanakkora; a gömb világ "állandó görbületű felület".

Az ilyen kétdimenziós gömbvilágnak háromdimenziós párja a szférikus tér, amelyet Reimann fedezett fel. Ennek pontjai szintén mind egyenlő értékűek. Véges térfogata van, amelyet R "sugara" szab meg ($2\pi^2R^3$). Elképzelhető a szférikus tér? Teret elképzelni annyit jelent, mint elképzelni "térbeli" tapasztalataink összességét, azaz oly tapasztalatok összességét, melyeket a "merev" testek mozgásánál szerezhetünk. Ilyen értelemben a szférikus tér elképzelhető.

Egy pontból kiindulva húzzunk minden irányban egyeneseket (feszítsünk ki zsinórokat) és mindegyikre rakjunk fel az r egyenes darabot mérőrúddal. Ezeknek az egyenes daraboknak a végpontjai gömbön helyezkednek el. *F* felületét egy mérőrúdnégyzettel külön megmérhetjük. Ha ez a gömbi világ euklideszi, akkor $F = 4\pi r^2$, ha pedig szférikus, akkor *F* mindig kisebb $4\pi r^2$-nél. Az *F* felület, növekvő r-rel, nullától a "világsugár" megszabta maximumig nő, hogy még tovább növekvő *r* esetében fokozatosan ismét nullává legyen. A kiindulási pontból elinduló sugárirányú egyenesek ezalatt egy ideig mindjobban távolodnak egymástól, míg később ismét közelednek egymáshoz, hogy végül a kiindulás pontjának "ellenpontjában" ismét összefussanak; így ezek az egész szférikus teret átjárják. Könnyen meggyőződhetünk arról, hogy a háromdimenziós szférikus tér tökéletes mása a kétdimenziósnak (gömbfelületnek). Véges (azaz véges térfogatú), és még sincs határa.

Megemlítendő, hogy a szférikus térnek még egy változata van: az "elliptikus tér". Olyan szférikus térként foghatjuk fel, melyben az "ellenpontok" azonosak (nem megkülönböztethetők). Az elliptikus világ tehát bizonyos értelemben centrikusan szimmetrikus szférikus világnak tekinthető.

A mondottakból láthatjuk, hogy határ nélküli zárt terek elképzelhetők. Ezek közül egyszerűségével kitűnik a szférikus (illetve az elliptikus) tér, miután minden pontja egyenértékű. A mondottakból a fizikusok és csillagászok számára az a rendkívül érdekes kérdés vetődik fel, hogy vajon az a világ, amelyben mi élünk, végtelen, vagy pedig a szférikus világ módján véges-e? Tapasztalásaink a legtávolabbról sem elegendők a kérdés eldöntésére. Az általános relativitás elmélete azonban meglehetős biztonsággal teszi lehetővé e kérdés megoldását úgy, hogy emellett a 30. fejezetben kifejtett nehézség is eloszlik.

32. A tér szerkezete az általános relativitáselmélet szerint

Az általános relativitáselmélet értelmében a tér geometriai tulajdonságai nem önállóak, hanem az anyag szabja meg őket. Ezért a világ geometriai szerkezetére csak akkor következtethetünk, ha vizsgálatainkban az anyag ismert állapotából indulunk ki. Tapasztalatból tudjuk, hogy megfelelően választott koordinátarendszer mellett a csillagok sebessége kicsiny, a fényterjedés sebességéhez képest, így a világ mineműségéről a legdurvább megközelítésben nagyjából úgy alkothatunk képet, hogy benne az anyagot nyugvónak tekintjük.

Korábbi megfontolásainkból tudjuk már, hogy a mérőrudak és órák viselkedését a gravitációs terek befolyásolják, azaz az anyag eloszlása. Ebből máris következik : szó sem lehet arról, hogy az euklideszi geometria a mi világunkban pontosan érvényes. Az azonban elgondolható, hogy a mi világunk csak kevéssé különbözik egy euklideszi világtól. Ez a felfogás annál is közelfekvőbb, mivel a számítások azt mutatják, hogy még a mi Napunkkal egyforma nagyságú tömegek is csak egészen minimálisan befolyásolják a környező tér metrikáját. Azt képzelhetjük, hogy a mi világunk geometriai szempontból hasonlóan viselkedik, mint egy olyan, egyes részleteiben szabálytalanul görbült felület, amely a síktól sehol sem tér el jelentős mértékben; éppen úgy, mint a tó gyenge hullámoktól fodrosodé felülete.

Az ilyenfajta világot találóan „kvázi-euklidészinek" nevezhetnek. Ez a világ a térben végtelen lenne. A számítás szerint azonban kvázi-euklideszi világban az anyag átlagsűrűsége zérus lenne. Ez a világ tehát nem lenne mindenféle anyaggal benépesíthető; azt a bennünket ki nem elégítő alakot öltene, amelyet a 30. fejezetben vázoltunk.

Ha azonban azt akarjuk, hogy a világban az anyag középsűrűsége, ha mégoly kevéssé is, de zérustól különbözzék, akkor a világ nem kvázi-euklidészi.

Sőt, a számítás azt mutatja, hogy egyenletesen eloszló anyag mellett szükségszerűen szférikusnak (illetve elliptikusnak) kell lennie. Mivel azonban a valóságban az anyag részleteiben egyenlőtlenül van elosztva, a tényleges világ részleteiben eltér a szférikustól: kvázi-szférikus. De szükségképpen végesnek kell lennie. Sőt, az elmélet egyszerű összefüggést ad a világ térbeli kiterjedése és a benne levő anyag középsűrűsége között[*]

---

[*]A világ *K* "sugarára" ugyanis a következő egyenlet adódik :

$$R^2 = \frac{2}{\chi \varrho}$$

A CGS-rendszer alkalmazása esetén:

$$\frac{2}{\chi} = 1.08 * 10^{27}$$

ϱ az anyag középsűrűsége.

NEGYEDIK RÉSZ

AZ ÁLTALÁNOS RELATIVITÁSELMÉLET TAPASZTALATI IGAZOLÁSA

A sematikus ismeretelméleti szemlélet valamely tapasztalati tudomány kialakulási processzusát indukciófolyamatok folytonos sorozataként gondolja el. Az elméletek nagyszámú egyes tapasztalatoknak olyan tapasztalati törvényekbe való foglalásaként jelentkeznek, amelyekből összehasonlítás útján az általános törvények származnak. Ebből a szempontból úgy tűnik, hogy a tudomány fejlődése a tiszta empíria műve, hasonlóan a lajstromozás munkájához.

Ez a felfogás azonban egyáltalában nem meríti ki az igazi folyamatot, amennyiben elhallgatja azt a fontos szerepet, melyet az egzakt tudományok fejlődésében az intuíció és a deduktív gondolkodás játszik. Amint ugyanis valamely tudomány kilábolt legkezdetlegesebb állapotából, az elméleti fejlődést többé nem pusztán elrendező tevékenység hozza létre. Sőt, a kutatók a tapasztalati tények által keltett oly gondolatok rendszerét fejlesztik ki, amely logikailag csekély számú alapfeltevésen, az úgynevezett axiómákon épül fel. A gondolatok ilyen rendszerét nevezzük elméletnek. Az elmélet abból meríti létjogosultságát, hogy nagyobb számú tapasztalati tényt kapcsot össze-, ebben rejlik "igazsága".

A tapasztalati tényeknek ugyanarra a komplexumára azonban egymástól jelentékenyen különböző elméletek adódhatnak. Az elméleteknek a tapasztalat számára hozzáférhető következményekben való egymás közti egyezése oly messzemenő lehet, hogy nehezen találhatunk a tapasztalat számára hozzáférhető olyan következményeket, amelyekben a két elmélet különbözik egymástól. Ilyen általános érdekű esettel állunk szemben pl. a biológia területén egyrészt Darwin elméletében, amely szerint a fajok kifejlődését a létért folytatott küzdelem okozta kiválogatás eredményezi, másrészt a fejlődéselmélet ama változatában, amely szerzett tulajdonságok átöröklésének hipotézisén alapszik.

A következményeknek hasonló messzemenő egyezése áll fenn egyfelől a newtoni mechanikában, másfelől az általános relativitás elméletében. Ez a megegyezés oly mérvű, hogy eddig az általános relativitáselméletnek csak kevés olyan következményére juthattunk, amely a tapasztalat számára hozzáférhető, és amelyhez már a korábbi fizika is el nem jutott volna - ámbár mélyen járó különbség van a két elmélet alapfeltevései közt. Ezeket a fontos következményeket akarjuk most még egyszer szemügyre venni, és röviden megbeszélni a róluk eddig összegyűjtött tapasztalati tényeket.

33. A Merkúr perihéliummozgása

A newtoni mechanika és a newtoni gravitációs törvény értelmében a Nap körül egymagában keringő bolygó a Nap (illetve pontosabban a Nap és a bolygó közös súlypontja) körül ellipszist írna le. A Nap (illetve a közös súlypont) eközben a pályaellipszis egyik gyújtópontjában van, oly módon, hogy a Nap és a bolygó távolsága egy bolygóév folyamán minimumból maximumig növekszik, majd ismét minimumig csökken. Ha a vonzás newtoni törvénye helyett egy attól némiképpen eltérőt vezetünk be számításainkba, akkor azt találjuk, hogy a mozgásnak e törvény szerint még mindig úgy kell végbemennie, hogy a Nap-bolygó-távolság periodikusan ide-oda ingadozik ; azonban egy ilyen periódus (perihéliumtól — Napközeitől — perihéliumig) alatt a Nap-bolygó egyenes által leírt szög nem lenne 360°. A pályavonal így nem zárt vonal lenne, hanem idők folyamán a pálya síkjának egy gyűrű alakú részét töltené ki (a legkisebb és legnagyobb bolygótávolsághoz tartozó körök között).

A newtoni elmélettől kissé eltérő általános relativitás-elmélet szerint szintén mutatkozik ilyenfajta eltérés a Kepler — Newton-féle pályamozgástól, amennyiben a Napot és a bolygót összekötő sugár két egymás után következő perihélium között nem írja le az egy teljes körülforgásának megfelelő szöget (azaz 2π-t, a fizikában szokásos abszolút szögmértékben kifejezve), hanem ettől

$$\frac{24\pi^3 a^2}{T^2 c^2 (1-e^2)}$$

értékkel eltérő szöget. A fenti kifejezésben *a* az ellipszis nagytengelyének fele, *e* az ellipszis excentricitása, *c* a fény sebessége, *T* pedig a körülfordulás tartama. Ezt még így is kifejezhetjük: az általános relativitáselmélet értelmében az ellipszis nagytengelye a pálya mozgásának irányában forog a Nap körül. Ez az elfordulás az elmélet szerint a Merkúr bolygó esetében 100 évenként 43 ívmásodpercet tesz ki. Naprendszerünk többi bolygójánál ez az eltérés azonban oly kicsiny, hogy nem észlelhető.

A csillagászok tényleg azt találták, hogy Newton elmélete nem elégséges arra, hogy segítségével a Merkúr mozgását az észlelések mai pontosságának megfelelően kiszámítsuk. Amikor a többi bolygónak a Merkúrra gyakorolt zavaró hatását számításba vették, kiderült (Leverrier 1859 és Newcomb 1895), hogy magyarázatlanul marad a Merkúr-pálya perihéliummozgásának akkora hányada, amely az előbb említett századonként 43 másodperctől észrevehetően nem különbözik. Ennek az általános relativitáselmélet kijelentéseivel megegyező tapasztalati eredménynek a bizonytalansága néhány másodpercre rúg.

34. A gravitációs tér okozta fényeltérítés

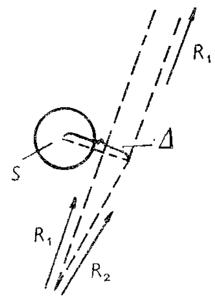
A 22. fejezetben már kimutattuk, hogy a fénysugárnak az általános relativitáselmélet szerint gravitációs tér hatására el kell görbülnie, hasonlóan a gravitációs térben elhajlított test pályájának elgörbüléséhez. Az elmélet szerint valamely égitest mellett elhaladó fénysugár az égitest felé hajlik; az eltérés a szöge olyan fénysugáron, amely a Nap mellett a Nap-rádiusz Δ-szorosának távolságában halad el:

$$\alpha = \frac{1{,}7\, másodperc}{\Delta}$$

Hozzátesszük, hogy az elmélet szerint az elhajlást felerészben a Napnak (newtoni)-vonzóereje, felerészben pedig a térnek a Naptól eredő geometriai módosulása ("görbültsége") okozza.

Ez az eredmény kísérleti úton ellenőrizhető, ha csillagfotográfiákat készítünk teljes napfogyatkozáskor. A teljes napfogyatkozást azért kell bevárni, mert a napfény által besugárzott légkör minden más időben oly erős fényű, hogy a Nap közelében levő csillagok láthatatlanok. A várt jelenség könnyen érthető az

5. ábrából. Ha a Nap nem volna helyén, akkor a gyakorlatilag végtelen messze levő csillagot az R_1 irányban látnánk. A Nap elhajlító hatása folytán azonban az R_2 irányban látjuk, azaz, a Nap középpontjától a valóságosnál valamivel nagyobb távolságban.



5. ábra

Ennek bebizonyítása a gyakorlatban a következő módon történik. A Nap környezetében levő csillagokat napfogyatkozáskor lefényképezzük. Ezután egy második fotográfiai felvételt készítünk ugyanezekről a csillagokról akkor, mikor a Nap már az égboltnak egy másik helyére került (azaz néhány hónappal előbb, vagy később).

A napfogyatkozáskor felvett csillagképeknek (a Nap középpontjától) sugárirányban el kell tolódniuk a másik összehasonlító felvételhez viszonyítva, éspedig akkora értékkel, amely megfelel az a szögnek.

E fontos eredmény kísérleti kimutatását az *Astronomicol Royal Societynek* köszönhetjük. Nem törődve a háborúval és a háború teremtette pszichózis nehézségeivel, legkiválóbb csillagászait (Eddington, Cromrneíin, Dyson) küldte ki, és két expedíciót szerelt fel avégből, hogy az 1919. május 29-i napfogyatkozáskor Sobral-ban (Brazília) és Principe-szigetén (Nyugat-Afrika) fényképfelvételeket készítsenek. A napfogyatkozás fényképfelvételeinek várható relatív eltérései az összehasonlító felvételektől csak néhány századmillimétert tettek ki. Nem csekélység, amit a felvételektől és azok felmérésének pontosságától megkövetelünk.

A mérések eredményei teljesen kielégítő módon igazolták az elméletet. A csillagok észlelt és számított eltéréseinek derékszögű összetevőit (ívmásodpercekben) a következő táblázat mutatja:

A csillag száma	I. koordináta		II. koordináta	
	Észlelt	Számított	Észlelt	Számított
11	-0,19	-0,22	+0,16	+0,02
5	-0,29	-0,31	-0,46	-0,43
4	-0,11	-0,10	+0,83	+0,74
3	-0,20	-0,12	+1,00	+0,87
6	-0,10	-0,04	+0,57	+0,40
10	-0,08	+0,09	+0,35	+0,32
2	+0,95	+0,85	+0,27	-0,09

35. A színképvonalak eltolódása a vörös felé[50]

A 23. fejezetben megmutattuk, hogy egy *K* Galilei-féle rendszerhez képest forgó *K'* rendszerben a teljesen egyforma szerkezetű órák járásának sebessége függ a helytől. Nézzük, hogyan függ mennyiségileg. Annak az órának, amely a korong középpontjától *r* távolságra van, a *K-hoz* viszonyítva

$$v=\omega r$$

sebessége van, ha ω a korongnak *(K'-nek)* forgássebessége a *K* rendszerhez képest. Jelölje v_0 az óra időegységre jutó ketyegéseinek számát a *K*-hoz viszonyítva (ez az óra járásának sebessége), amikor az óra nyugszik; akkor a *K*-hoz képest *v* sebességgel mozgó, a koronghoz képest nyugvó óra *v* járási sebessége a 12. fejezet szerint:

$$v=v_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

vagy elegendő pontossággal

$$v=v_0\left(1-\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

vagy pedig

$$v=v_0\left(1-\frac{\omega^2 r^2}{2c^2}\right)$$

Jelöljük +Φ-vel a centrifugális erő potenciáljának különbségét az óra helye és a korong középpontja között. Ez annak a munkának negatív értéke, amelyet a tömegegységgel közölni kell, hogy a centrifugális erő ellenében az óra helyéből a mozgó korong középpontjába jusson,

$$\Phi=-\frac{\omega^2 r^2}{2}$$

[50] Az általános relativitáselmélet harmadik követelménye, amoly mérésnek vethető alá, a vöröseltolódás. A jelenség abban áll, hogy az erős gravitációs térben nyugvó óra lassabban jár, mint a gyengébb térben levő. A természet bőven gondoskodott azonos szerkezetű órákról az összes égitesteken. Az atomokra gondolunk. Az atommag körül keringő elektron játssza a mutatószerepét. Ahány teljes keringést végez ez a mutató 1 másodperc alatt, annyi az atom által kibocsátott színképvonal frekvenciája, amelytől a színe függ. Ha összehasonlítjuk a Napon, ill. a Földön nyugvó hidrogénatom színképvonalait, az elmélet szerint azt kell tapasztalnunk, hogy a színképben a Napról érkező színképvonal a kisebb frekvenciájú vörös szín felé tolódott el. A végzett mérések azonban nagyon bizonytalanok. A vöröseltolódás ugyanis a Doppler-hatással összegeződik, a Napon észlelt eltolódások nem bizonyító erejűek. A Szirius kísérő csillagán végzett megfigyelések viszont jó egyezésben vannak a számításokkal. Legújabban váratlan és igen figyelemreméltó módon három harwelli kutató: Cranshaw, Whitehead és Schiffer az atomsugárzások rezonanciaabszorpcióját kihasználó Mössbauer-féle módszer alapján idegen égitest segítsége nélkül, laboratóriumi kísérlettel mutatta ki a gravitációs vöröseltolódás jelenségét. Mindössze 10 méter magasságkülönbségben fellépő gravitációs potenciálkülönbséget használtak fel a mérésre. A mért és számított érték jól megegyezik.

úgy, hogy tehát

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2} \right)$$

Ebből látható, hogy két egyenlő szerkezetű óra, amely a korong középpontjától különböző távolságra van, különböző gyorsan jár. Ez az eredmény olyan megfigyelőre nézve is érvényes, aki a koronggal együtt forog.

Miután pedig - a korongra nézve - gravitációs tér áll fenn, melynek potenciálja Φ, a nyert eredmény gravitációs terekre általában érvényes lesz. Miután pedig a színképvonalakat kibocsátó atom óraként fogható fel, érvényes a következő tétel:

Az atom olyan frekvenciát bocsát M, amely annak a gravitációs térnek a potenciáljától függ, amelyben van.

Annak az atomnak a frekvenciája, mely egy égitesten van, valamivel kisebb ugyanazon elem olyan atomjának frekvenciájánál, amely a szabad világtérben (vagy pedig egy kisebb világtest felületén) van.

Miután $\Phi = -\frac{KM}{r}$ ahol K Newton gravitációs állandóját, M a tömeget, r az égitest sugarát jelenti, kell, hogy a csillagok felületén keletkezett színképvonalak a földi színképvonalakkal szemben a

$$\frac{\nu - \nu_0}{\nu} = -\frac{KM}{c^2 r}$$

értékkel eltolódjanak a vörös felé.

A Nap esetében a várt eltolódás a vörös felé a hullámhossz két milliomod részével egyenlő. Az állócsillagoknál nem lehetséges megbízható számítás, miután sem *M* tömegük, sem *r* sugaruk nem ismeretes.

Az, hogy ez az effektus tényleg létezik-e, még nyílt kérdés, melynek megoldásán a csillagászok nagy szorgalommal dolgoznak.

A Napnál igen nagy nehézségekbe ütközik a tünemény megállapítása, rendkívül kicsinysége miatt. Míg Grebe és Bachem (Bonn) saját mérései, valamint Evershed és Schwarzschild ciánsávon végzett mérései alapján az effektus létezését biztosra veszik, addig mások, így kivált S. John, ugyancsak mérések alapján, az ellenkező véleményt vallják.

Az állócsillagokra vonatkozó statisztikus vizsgálatokban biztosan megállapítottak átlagos vonaleltolódást a színkép nagyobb hullámhosszúságú része felé. Az anyag eddigi feldolgozásából azonban még nem lehetett eldönteni, vajon ezek az eltolódások tényleg a gravitáció hatására vezethetők-e vissza? Az észlelési anyag összeállítását adja és a minket itt érdeklő kérdés szempontjából behatóan bírálja E. Freundlich "Az általános relativitáselmélet vizsgálata" c. értekezésében *(Die Naturwissenschaften,* 1919, 35. füzet, 520. old.).

A következő évek mindenesetre meg fogják hozni a döntést. Ha a színképvonalakban a gravitációs potenciál okozta eltolódása a vörös felé nem létezne, akkor az általános relativitás elve, nem lenne fenntartható[51]. Másfelől azonban a vonaleltolódások tanulmányozása az égitestek tömegére vonatkozó fontos következtetésekre fog vezetni, ha bizonyossá válik, hogy eredetük a gravitációs potenciálra vezethető vissza.

[51] Ma már nem kell tartanunk attól, hogy a tapasztalat valamikor meg fogja cáfolni az általános relativitáselméletet. Minél pontosabbakká válnak a mérések, annál inkább megerősítik az elméletet. Joggal mondhatta Einstein: *Az általános relativitás elmélete egészen másnemű, mint többi alkotásom. Életem legmagasabb beteljesedését látom abban, hogy ezt az elméletet megalkothattam*

FÜGGELÉK

A LORENTZ TRANSZFORMÁCIÓ EGYSZERŰ LEVEZETÉSE

(Kiegészítés a 11. fejezethez)

A koordináta-rendszereknek a 2. ábrán jellemzett viszonylagos helyzete mellett a két rendszer *X* tengelye állandóan egybeesik. A problémát megoszthatjuk, amennyiben előbb csupán olyan eseményeket fogunk vizsgálni, amelyek az *X* tengelyre lokalizálhatok. Az ilyen eseményeket a *K* rendszerre vonatkoztatva az *x* abszcissza és a *t* idő, a *K'-re* vonatkoztatva pedig az *x'* abszcissza és a *t'* idő jellemzi. Keressük az *x'-t* és *t'*-t, ha *x* és *t* adott.

Egy olyan fényjel, amely a pozitív *X* tengely irányában halad előre, az

$$x = ct$$

vagyis az

$$x - ct = 0 \tag{1}$$

egyenlet szerint terjed tovább. Miután azt akarjuk, hogy a fényjel a *K'-höz* képest is *c* sebességgel terjedjen, a *K'-höz* viszonyított terjedést is az analóg

$$x' - ct' = 0 \tag{2}$$

egyenlet írja le. Azok a tér-idő-pontok (események), amelyek az (1) egyenletnek eleget tesznek, kell, hogy a (2)-t is kielégítsék. Ez nyilván bekövetkezik, ha

$$x' - ct' = \lambda(x - ct) \tag{3}$$

ahol λ állandót jelent; a (3) egyenlet értelmében *x - ct* eltűnése egyszersmind *x' - ct'* eltűnését vonja maga után.

A negatív *X* tengely irányában tovaterjedő fénysugárra hasonló megfontolás az

$$x' + ct' = \mu(x + ct) \tag{4}$$

összefüggést szolgáltatja.

Adjuk össze, illetve vonjuk ki egymásból a (3) és (4) egyenleteket és kényelmi szempontból vezessük be a λ és μ*,* állandók helyett az

$$a = \frac{\lambda + \mu}{2}$$

$$b = \frac{\lambda - \mu}{2}$$

állandókat. Ezzel az

$$x' = ax - bct$$

$$ct' = act - bx$$

(5)

egyenletekre jutunk. Feladatunkat így meg is oldottuk volna, ha az *a* és *b* állandókat ismernők; ezek a következő megoldásokból adódnak.

A *K′* rendszer kezdőpontjára vonatkozóan állandóan $x' = 0$, tehát az (5) egyenletek elsejéből:

$$x = \frac{bc}{a} t$$

Jelöljük *v*-vel azt a sebességet, amellyel a *K′* rendszer kezdőpontja a *K*-hoz képest mozog. Ebben az esetben tehát

$$v = \frac{bc}{a}$$

(6)

A *v* sebességre ugyanilyen értéket kapunk az (5) egyenletből, ha a *K′* rendszer egy másik pontjának sebességét a *K*-hoz képest, vagy a *K* rendszer egy pontjának (a negatív *X* tengely felé irányuló) a *K′*-höz viszonyított sebességét számítjuk ki. Tehát a *v* sebességet röviden a két rendszer relatív sebességének tekinthetjük.

A relativitás elve értelmében, világos továbbá, hogy a *K′* rendszerhez viszonyítva nyugvó egységnyi hosszú mérőrúdnak a *K*-ból mért hossza pontosan ugyanakkora kell legyen, mint a *K*-hoz viszonyítva nyugvó egységnyi hosszúságú mérőrúdnak a *K′* rendszerből mért hossza. Hogy megtudjuk, miként látjuk az *X′ tengely* pontjait a *K* rendszerből, nem kell egyebet tennünk, mint "pillanatfelvételt" készítenünk a *K′* rendszerből a *K* rendszerről; ez annyit jelent, hogy a *t (K*-beli idő) helyébe határozott értéket, pl. $t = 0$, kell behelyettesítenünk. Ez esetben az (5) alatti első egyenletből

$$x' = ax$$

adódik.

Az *X′* tengely két olyan pontja, amelyek a K-ban mérve, $x' = 1$ távolságban vannak egymástól, pillanatfelvételünkön

$$\Delta x = \frac{1}{a}$$

(7)

távolságra vannak egymástól.

Ha azonban e pillanatfelvétel a *K′*-ből készült ($t'=0$), akkor az (5) egyenletből a *t* kiküszöbölésével, tekintettel a (6) egyenletre

$$x' = a\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)x$$

Ebből arra a következtetésre jutunk, hogy az X tengelynek (a *K*-hoz viszonyítva) egységnyi távolságban levő két pontja pillanatfelvételünkön

$$\Delta x' = a\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \tag{7a}$$

távolságban vannak egymástól.

Miután pedig a mondottak szerint a két pillanatfelvételnek egyenlőnek kell lennie, kell, hogy a (7) *Δx-e* egyenlő legyen a (7a) *Δx*'-ével, úgy hogy

$$a^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \tag{7b}$$

A (6) és (7b) alatti egyenletek meghatározzák az a és *b* állandókat. Ha az (5) alatti egyenletbe behelyettesítjük ezeknek értékeit, akkor a 11. fejezet első és negyedik egyenletét kapjuk:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{8}$$

Ezzel megkaptuk a Lorentz-transzformációt az *X* tengelyen történő eseményekre. Ez kielégíti az

$$x'^2 - c^2 t'^2 = x^2 - c^2 t \tag{8a}$$

követelményt.

Ennek az eredménynek általánosítása olyan eseményekre, amelyek az *X* tengelyen kívül mennek végbe, úgy adódik, hogy a (8) alatti egyenletekhez az

$$\begin{aligned} y' &= y \\ z' &= z \end{aligned} \tag{9}$$

összefüggéseket csatoljuk, így kielégítjük a vákuum-fénysebesség állandóságának követelését tetszőleges irányú fénysugarakra, mind a *K,* mind a *K'* rendszerben; ezt a következő módon láthatjuk be:

Induljon ki a *K* rendszer kezdőpontjából a $t = 0$ időben egy fénysugár. Ennek terjedése az

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct$$

egyenlet szerint történik, vagy pedig, amint az egyenlet, négyzetre emelésével adódik, az

$$x^2+y^2+z^2-c^2t^2=0 \tag{10}$$

egyenlet szerint.

A fényterjedés törvénye a relativitás követelményének megfelelően azt kívánja, hogy ugyanazon fényjel terjedése - a *K'*-ből nézve - a megfelelő

$$r'=ct'$$

egyenlet szerint, vagyis az

$$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=0 \tag{10a}$$

egyenlet szerint menjen végbe. Hogy pedig a (10a) egyenlet a (10) egyenletnek következménye legyen, kell, hogy

$$x^2+y^2+z^2-c^2t^2=\sigma\left(x'^2+y'^2+z^2-c^2t'^2\right) \tag{11}$$

legyen.

Miután az *X* tengely pontjaira a (8a) egyenletnek kell érvényben lennie, kell, hogy $\sigma=1$ legyen. Hogy a Lorentz-transzformáció a (11) egyenletet a $\sigma=1$ választással tényleg kielégíti, könnyen belátható; ugyanis a (11), a (8a) és (9) egyenleteknek következménye; így következménye az a (8) és (9) egyenletnek is. Ezzel a Lorentz-transzformációt levezettük.

A (8) és (9) egyenletekkel ábrázolt Lorentz-transzformáció még általánosításra szorul. Az nyilvánvalóan lényegtelen, hogy a *K és K'* rendszerek tengelyeit e levezetésben térbelileg egymással párhuzamosnak választottuk. Az is lényegtelen, hogy a *K'* rendszer haladó sebességét *K-val* szemben az *X* tengely irányában választottuk. A Lorentz-transzformációt ebben az általános értelemben - mint egyszerű megfontolásból láthatjuk - kétféle transzformációból rakhatjuk össze, mégpedig egy speciális értelemben vett Lorentz-transzformációból és egy pusztán térbeli transzformációból, amely annak felel meg, hogy az egyik derékszögű koordinátarendszert egy másik derékszögűvel helyettesítjük, amelynek tengelyei más irányúak.

Matematikailag az általánosított Lorentz-transzformációt így jellemezhetjük:

Az *x', y', z', t'* értékeit az *x, y, z, t* olyan lineáris homogén függvényeivel fejezi ki, hogy az

$$x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2=x^2+y^2+z^2-c^2t^2 \tag{11a}$$

összefüggés azonosan teljesül. Ez pedig azt jelenti, hogy ha a bal oldalon *x'* stb. értékei helyébe ezeknek *x, y, z, t*-vel kifejezett értékeit helyettesítjük, akkor a (11a) egyenlet bal oldala megegyezik a jobb oldallal.

MINKOWSKI NÉGYDIMENZIÓS VILÁGA

(A 17. fejezet kiegészítése)

Az általánosított Lorentz-féle koordináta-transzformáció még egyszerűbben jellemezhető, ha *t* helyébe időváltozóként a képzetes $\sqrt{-1}\,ct$ értéket vezetjük be.
Ha ennek megfelelően írjuk

$$x_1 = x$$
$$x_2 = y$$
$$x_3 = z$$
$$x_4 = \sqrt{-1}\,ct$$

és hasonló módon *a K'* rendszerre vonatkozóan, akkor a transzformációval azonosan kielégített kikötés így hangzik:

$$x'^2_1 + x'^2_2 + x'^2_3 + x'^2_4 = x^2_1 + x^2_2 + x^2_3 + x^2_4 \tag{12}$$

Ilyen alakúvá lesz ugyanis a (l la) alatti egyenlet, ha a "koordinátákat" a jelzett módon választjuk.

A (12)-ből láthatjuk, hogy az x_4 képzetes időkoordináta a transzformációs feltételekben pontosan ugyanolyan szerepet játszik, mint az x_1, x_2, x_3 térkoordináták. Ezen alapszik az, hogy a relativitás elmélete értelmében az x_4 "idő" a természettörvényekben ugyanolyan alakban szerepel, mint az x_1, x_2, x_3 térkoordináták.

Az x_1, x_2, x_3, x_4 "koordináták"-kal leírt négydimenziós kontínuumot Minkowski "világnak" nevezte, a ponteseményt pedig "világpontnak". A fizika többé nem történés a háromdimenziós térben, hanem úgyszólván *létezés* a négydimenziós "világban".

Ez a négydimenziós "világ" mélyenjáró hasonlatosságot mutat az (euklideszi) analitikai geometria háromdimenziós "terével". Ha ugyanis utóbbiban egy olyan új Cartesius-féle koordinátarendszert (x'_1, x'_2, x'_3) vezetünk be, amelynek kezdőpontja az előbbiével egyezik, akkor az x'_1, x'_2, x'_3 koordináták lineáris homogén függvényei az x_1, x_2, x_3 értékeinek, melyek az

$$x'^2_1 + x'^2_2 + x'^2_3 = x^2_1 + x^2_2 + x^2_3$$

egyenletet identikusán kielégítik. Az analógia a (12) egyenlettel tökéletes. Minkowski világát alakilag négydimenziós euklideszi térnek (képzetes koordinátával) tekinthetjük. A Lorentz-transzformáció a koordinátarendszer "forgatásának" felel meg a négydimenziós "világban".

UTÓSZÓ

ALBERT EINSTEIN

(1879-1955)

Gazdag szépirodalmi fordítás irodalmunkban honosodott meg az utóbbi években az a dicséretes gyakorlat, hogy a mű előtt vagy után néhány oldalas kis tanulmány ismerteti a szerző életét, egyéniségét, munkásságát: az alkotói életút ismerete gyakran érthetőbbé teszi, új megvilágításba helyezi magát a művet is... A tudós tollából származó szakkönyv vagy ismeretterjesztő munka végéről rendszerint hiányzik az ilyesfajta ismertetés. Ez érthető is. A természettudós gondolatvilága és életműve távolról sincs oly szoros és elsődleges kapcsolatban az életkörülményekkel és egyéniséggel, mint az író esetében. A természet kutatójánál e tényezők hatásának felségterülete véget ér — s véget is kell érjen — a tudományszak és problematika kiválasztásánál. A természettudós alakja tehát az életmű mögé zsugorodik vissza, s az alkotás szempontjából lényegében érdektelen is. így alakul ki az a visszás helyzet, hogy gyakran a természettudományok művelői sem ismerik (túl a puszta neveken és tudományos vívmányokon) saját tudományszakuk előtörténetének főszereplőit, a szélesebb körű érdeklődő közönségről nem is szólva. Holott a hétköznap emberét rendszerint igen is érdekli, emberi vonatkozásaiban is, azok élete, akiknek munkásságát teljes mélységig ugyan aligha érti, de akikről tudja, hogy — olykor forradalmi módon — megváltoztatták a tudományt s rajta keresztül a szemléletet, esetleg a valóságot és világot is. Különösen olyan méretű alkotó esetében, mint Einstein, kiről ma már köztudomású, hogy korunk fizikai gondolkodásának egyik leghatásosabb forradalmasítója.

Ez az érdeklődés jelen esetben annál is indokoltabb, mert Einstein nemcsak tudósnak: embernek is markáns egyéniség. Nyilván vele kapcsolatban is érvényes, amit imént az életmű, illetve személyiség és életút összefüggéséről elmondtunk: mégis meg kell értenünk a mű mögé húzódó alkotó alakjára irányuló érdeklődést. A következő lapok rövid összefoglalása lényegében nem is akar többet: összeszedni és a fizikától talán távolabb álló olvasó keze ügyébe helyezni néhány adatot Albert Einstein életének, egyéniségének és életművének történetéhez.

ÉLETE

Albert Einstein 1879. március 14-én született a németországi Ulmban. Nem túlságosan tehetős családból: apja, az életvidám és optimista alaptermészetű Hermáim Einstein (akit kockafeje, széles homloka és szigorú csíptetője után inkább saját ellentétének: porosz bürokratának nézhetne az ember) matematikus hajlandóságairól volt kénytelen lemondani pár éve, anyagi okok miatt, s lett a kézműves és kiskereskedő ősök hagyományaihoz híven, kereskedőember. Einstein anyja, született Pauline Koch, a vagyonosabb kereskedőrétegből származott: az ő apja már megengedhette magának, hogy zenei képességekkel megáldott leányát taníttassa.

Az újszülöttön természetesen semmi különös sem látszott (csak a rossz életrajzi regények hőseinek bölcsője fölött lebeg a zsenialitás glóriája), hacsak az nem, hogy a kis Albert koponyája olyannyira nyújtott volt, hogy Pauline mama már-már fiziológiai rendellenességre gyanakodott. Később, a tipegő Albert Einstein sem árulkodott kivételes képességekről. Ellenkezőleg: rendkívül nehezen kapott rá a szóra, s beszédén még évek múltán is érződött valami gátlásosság. (A nyelvekhez különben sem volt érzéke: Leopold Infeld, aki élete utolsó harmadában egy ideig közeli munkatársa volt, írja róla, hogy például az angol nyelv az Amerikában töltött évtizedek alatt sem idegződött második anyanyelvévé.) Öt-hat éves korára nehezen szólásra bírható, zárkózott kisfiúvá cseperedett. Pedig vérmérsékletétől mi sem állt távolabb, mint a melankólia. Lobbanékony, szangvinikus gyermek lehetett: hegedűtanárnőjét — anyja kívánságára hatéves korában kezdett hangszert tanulni — egy ízben széklábbal traktálta; két évvel fiatalabb húgát, Maját, akit egyébként élete végéig gyöngéden szeretett, egyszer valami kugligolyóbissal vágta fejbe...

Közben a család Münchenbe költözött, ahol Hermann Einstein kisebb magánvállalkozással próbálkozott. Albert itt ismerkedett meg az iskolával. Az ismeretség nem túl nagy lelkesedést váltott ki belőle; a poroszos katonásai fegyelemre nevelő gimnázium pedig, ahová tízéves korában beíratták, ha lehet, még kevésbé. ("Az elemi iskolai tanítók őrmestereknek, a gimnáziumi tanárok hadnagyoknak tűntek az én szememben" — vallotta később Einstein... A lelkesedés hiánya egyébként kétoldalú lehetett: "Einstein — közölte vele egy ízben valamelyik nyelvtanárja —, magából soha nem lesz semmi!") A gimnáziumban azonban már félreérthetetlenül megnyilvánult érdeklődésének és képességeinek sajátos irányzódása: a matematikában, amire apai nagybátyja irányította volt a figyelmét, messze túlszárnyalta társai tudását.

Tizennégy éves müncheni tartózkodás után, 1894-ben az Einstein család Olaszországba, Milánóba költözött. Valamivel később Albert is követte őket. Igaz, engedély és hozzájárulás nélkül: egyszerűen otthagyta a gimnáziumot... Néhány hónapos, csatangolásokkal teli vakáció következett, majd Zürichbe utazott, hogy hajlamainak és időközben beérett elhatározásának megfelelően, beiratkozzék az ottani műszaki főiskola tanárképző tagozatára. Mivel gimnáziumi tanulmányait nem fejezte be, fölvételi vizsgát kellett tennie. Nem csinált nagy gondot belőle, nekiment a vizsgának, és persze elhasalt : a humaniórákból és a leíró természettudományi tantárgyakból könnyűnek találtatott, így aztán mégiscsak sort kellett kerítenie a gimnázium utolsó osztályaira. A kitűnő szellemű és kitűnően felszerelt aaraui kantoniskolába iratkozott be, ahol feloldódtak az iskolák irányában érzett eddigi ellenszenvei, s ahol érdeklődése véglegesen a fizika felé fordult...

Az eddigiekből világos, hogy Albert Einstein semmiféle vonatkozásban nem volt "csodagyerek": természete talán kissé visszahúzódóbb, matematikai érdeklődése talán élénkebb volt az átlagosnál; de okossága semmiképpen sem volt feltűnő. (Csak érdekességképpen említjük meg, hogy Minkowski — akinek életművében a relativitáselméletnek később oly döntő szerep jutott, s aki oly döntő szerepet játszott a relativitáselmélet fejlődésében —, még a politechnikai főiskolán tanárkodó Minkowski sem látott különleges képességeket tanítványában, Einsteinben.) A gyermeklélektan búvára olykor mégis meghökkent volna, ha közel férkőzik a gyermek Albert Einstein gondolataihoz: ötéves korában megbűvölten figyelte az apjától kapott kompasz tűjét, a jelenség mögött valami titkos és lenyűgöző hatalom működését sejtette: kell valaminek lennie az *üres térben,* mely mindig azonos irányba állítja a mutatót. Vagy mit szólt volna a pedagógus, ha rájön, hogy a gimnazista Albert Einstein azon töpreng: utolérhető-e a fény? S mi lesz azzal az emberrel, aki eléri a suhanó nyalábot?

*

Albert Einstein, eredeti tervének megfelelően, 1896-ban minden további vizsga nélkül bejutott a zürichi Szövetségi Műszaki Főiskolára. A hivatalos oktatást itt sem találta túlságosan gondolatébresztőnek, beleértve Minkowski matematikaóráit is, bevette hát magát a laboratóriumokba*, maradék idejében pedig Boltzmann, Maxwell, Helmholtz, Hertz és Kirchhoff munkáit forgatta. Munkastílusára egyébként élete végéig inkább ez volt a jellemző: egyéni tanulás, magányos megküzdés a problémákkal. . . 1900-ban. diplomát szerzett. Itt már a vizsgaeredmények is mutatósak voltak, ám ennek ellenére sem sikerült elnyernie az előzetesen beígért asszisztensi állások egyikét sem. Nem is tudott komoly munkakörben elhelyezkedni, amíg — két átházitanítóskodott év után — meg nem kapta a svájci állampolgárságot, melyért még 1900-ban folyamodott.

1902-ben a berni Szövetségi Szabadalmi Hivatal ügy vivője lett, feladata a benyújtott találmányok előzetes felülbírálása volt... Nehéz elképzelni Einsteint tisztviselőnek : kevés emberbe szorult a tisztviselőfajta jellegzetes alkati pedantériájától való ösztönös viszolygásból annyi, mint éppen belé. . . Mindenesetre tény, hogy hagyták őt tovább tanulni s gondolkodni, s ez az állampolgári kötelmek és kispolgári életszemlélet dolgában korlátoltságig pedáns berni polgároktól elismerésre méltó teljesítmény.

A következő évben, 1903-ban megházasodott. Egy volt egyetemi kolléganőjét vette feleségül. Mileva Maric görögkeleti vallású szerb parasztcsalád leánya volt, négy évvel idősebb Einsteinnél. Házasságukból két gyermek született, Hans Albert 1904-ben, és Eduárd, 1910 júliusában. (Hans Albert tanulmányai elvégzése után Svájcban dolgozott, egészen 1937-ig, amikor ugyancsak az Egyesült Államokba emigrált, *s* a kaliforniai Berkley-egyetem hidrodinamika tanára lett. A fiatalabbik fiú apja művészetek iránt érzett vonzalmát örökölte.) E házasságban két ellentétes alkatú ember került össze. Einstein, akinek életében a családi és egyéb emberi kötöttségek csak nagyon másodlagos szerepet játszottak, egyrészről magába vonuló, szinte kizárólag hivatásának szolgáló ember, ugyanakkor valami harsány kedélyű életvidámság képviselője volt. Mileva neurotikus, kedélyhullámzásokra hajlamos alkat ... A két ellentétes adottságú partner életközössége nem is bizonyult tartósnak. Mikor pár évvel később (1913-ban) tudományos pályája Berlinbe szólította Einsteint, felesége, aki Zürich után nehezen tudott volna másutt még egyszer akklimatizálódni és gyökeret eresztem, a gyermekekkel Svájcban maradt. Pár évvel később a házasságot hivatalosan is fölbontották. Einstein azonban végig nagyra becsülte első feleségét, aki átküszködte vele az első igazán nehéz éveket. És szemmel tartotta gyermekeinek sorsát is ...

Visszatérve a kilencszázas évek elejére: sem a Szabadalmi Hivatal, sem a házasság és a családi örömök nem törték meg Einstein munkalendületét. 1905-ben befejezte fizikusi tanulmányait, és doktori címet szerzett a zürichi egyetemen. S ami mindennél sokkalta fontosabb: nyilvánosságra hozta első, valóban "einsteini" jelentőségű dolgozatait. Egy év leforgása alatt négy tanulmánya jelent meg az *Annalen der Physik-ben.* Bár az einsteini életmű lexikális összefoglalására később térünk vissza, nem mellőzhetjük itt sem e négy tanulmány fölemlítését, melyek

*Kitűnő oktatóim voltak (például Hurwitz és Minkowszki), úgyhogy tulajdonképpen mélyreható matematikai képzettséget szerezhettem volna. Időm javát azonban fizikai laboratóriumban töltöttem, lenyűgözött a tapasztalattal való közvetlen érintkezés." Ez a mozzanat talán meglepőnek hat. Einstein életműve — néhány nem túl jelentős apróságot nem számítva — a kísérletezéstől távol, a matematikai fizika terein született; ez a tény lehet felelős a köztudatban kialakult Einstein-képért (ha ilyen egyáltalán van), amely egy elszánt "papírosfizikust" ábrázol, s amely kép csupán egy dologról nem ad számot, arról tudniillik, hogy Einstein — mitől fizikus? íme, a hiányzó vonás: a laboratóriumban töltött esztendők s a tapasztalattal való közvetlen találkozás lenyűgöző élménye.

elhatároló módon befolyásolták a modern fizika fejlődését, így ez az év nemcsak Einstein, de a fizika történetében is fordulópont.

Négy tanulmány — négy korszakalkotó gondolat. Soroljuk fel őket. Az első a speciális relativitáselmélet alapgondolatait ismertette. A második a tömeg-energia egyenértékűségének tételét (ez lényegében az atomenergia-felszabadítás lehetőségének is elvi alapja). A harmadik a Brown-mozgás elméletével foglalkozott. A negyedik a fotoelektromos emisszió jelenségének elméleti magyarázata és levezetése. A négy tanulmány három témakört érint: a relativitást, a statisztikus mechanikát és a kvantumelméletet, pontosabban a sugárzások kvantumos elméletét.

Van ebben valami jelképes: Albert Einstein egész munkásságának területét kijelölte első jelentkezésekor. Érdeklődése ugyanis hosszú élete során végig hű maradt ehhez a három — külön-külön is hatalmas és több emberéletre szóló — témakörhöz.

*

Mai szemmel végignézve, mi sem tűnne természetesebbnek, mint ha a fizikát forradalmasító fiatal berni hivatalnok egyik napról a másikra híres és befutott emberré lett volna, az 1905-ös világra szóló cikkek megjelenése után. Persze távolról sem így történt. Évek teltek el, amíg a szaktudomány művelőinek többsége felfigyelt Einstein gondolataira, s akkor is idő kellett, amíg megemésztették a talán túlságosan is újszerű állításokat. Einstein pedig ezalatt maradt, mi volt, kistisztviselő a Szabadalmi Hivatalban, aki szabad idejében szívesen áldozott egyetlen szenvedélyének, a muzsikának, aki délutánonként kávéházba járogatott (feljegyezték, hogy ez jelentette számára a kikapcsolódást), s elvitatkozgatott a barátaival saját elképesztőnek tűnő gondolatairól... és makacsul dolgozott — vagy ami az ő esetében ezzel egyenértékű: makacsul gondolkodott tovább. Mégpedig egy új gondolatkör problémáin. Ennek az új gondolatkörnek — tíz év múltán, mikorra gondolatai egységes elméletté érnek — az "általános relativitás elmélete" címet fogja adni.

A berni Szabadalmi Hivataltól csak 1909-ben vált meg Einstein. A következő éveket különböző egyetemek katedráin töltötte. 1909: a zürichi egyetem. 1910: az akkori Osztrák- Magyar Monarchia Prágájának nemei nyelvű egyetemén tanárkodott. 1912 őszén visszatért Svájcba s újból Zürichbe. A Szövetségi Műszaki Főiskola tanára lett, ahol pár éve maga is tamilt. De itt sem töltött el huzamosabb időt. Alig egy évre rá — Max Planck és Walter Nerst javaslatára és sürgetésére — felkérték, legyen a berlini Vilmos Császár Intézet igazgatója, a Porosz Tudományos Akadémia tagja (ezekkel a stallumokkal szinte mellékesen együtt járt a berlini egyetem egyik katedrája is). Einstein a meghívást elfogadta, s habár ez a családjától való végleges elszakadást jelentette, élete következő két évtizedére Berlinbe költözött. Elhatározását kétségkívül megkönnyítette, hogy nem vadidegenként kellett Berlinbe utaznia: a birodalmi fővárosban élt apai nagybátyja és Elza unokahúga, akire még a müncheni gyermekévekből jó barátsággal emlékezett. A rokoni ház Einstein második otthona lett az első berlini években; s az élet vidám, anyáskodó és otthont teremtő asszonyi tehetséggel ugyancsak megáldott Elza Einstein pedig Albert Einstein második felesége, miután 1919-ben Mileva asszonytól hivatalosan is elvált. Ezzel a házassággal az addig valami sajátos bohém agglegényéletet élő Einstein beevezett a polgári életforma nyugodalmas vizeire — már amennyire az ő polgári konvenciókra teljességgel érzéketlen egyéniségével ez egyáltalán lehetséges volt.

Az első berlini évek egyébként termékenyek voltak Einstein számára. Az elmúlt évtized intellektuális vívódásai és számos idevágó és más irányú részlettanulmány után (közben ugyanis a statisztikus mechanikához és a sugár elmélethez sem lett hűtlen), az *Annalen der Physik*-ben megjelent a második nagy einsteini gondolatépítményt ismertető tanulmány: *"Grundlagen der allgemeinen Relativitatstheorie",* 1916-ban, az első világháború második évében.

A porosz hatalmi téboly és militarista ostobaság e világméretű hekatombákat követelő "mesterművével" Einstein természetszerűen az első pillanattól kezdve szembehelyezkedett. (Természetszerűen, írom, s ezt szinte szó szerint kell érteni: Einstein korai gyermekéveitől fizikai módon irtózott a katonai szellemtől. Annak idején München utcáin, szülei társaságában óhatatlanul találkozott katonai díszfelvonulásokkal. De míg a hasonló korúak élvezik az ilyen parádékat, s az akkori német fiúcskák is együtt marsoltak a masírozókkal, a kis Einstein rémült ordításba tört ki a menet láttán : iszonyodott. Később az iskola militarista drill-szelleme csak elmélyítette ezt az ellenszenvet, s így végül, az eszmélődés éveiben a humanista magatartás és a pacifizmus eszméi könnyen tudatosultak benne egy atyai jóbarát hatására. Olyannyira, hogy a katonásairól élete végéig ilyesféle hangnemben tudott csupán beszélni: "Ezzel kapcsolatban rátérek a nyájállapot legrosszabb szüleményére: az általam gyűlölt katonaságra! Ha valaki élvezettel képes zenére sorban és rendben masírozni, azt máris megvetem; az illető csak tévedésből kapott nagyagyat, mert neki a hátgerinc egymagában is elegendő volna. A civilizáció e szégyenfoltját mielőbb el kellene tüntetni. Micsoda izzóan gyűlölöm a parancsra való hősiességet, az értelmetlen erőszakoskodást és a gyalázatos hazafiaskodást, micsoda közönségesnek és megvetendőnek látom a háborút; inkább darabokra vágatnám magam, semhogy ilyen aljas tevékenységben részt vegyek! De hiszek annyira az emberiségben, hogy szerintem ez a kísértet már régen eltűnt volna, ha a népek egészséges ösztönét üzleti és politikai érdekből az iskolán és sajtón keresztül nem korrumpálnák rendszeresen." Ahogy hírneve növekedett, úgy vállalta egyre intenzívebben a közéleti szereplést is, amire a szociális kérdések iránti élénk érdeklődése is predesztinálta. Csak önmagához volt következetes, amikor a háború kitörésekor a leghatározottabban síkraszállt — a háború ellen. A harci lázban lihegő Vilmos császári Németország fővárosában! Még svájci állampolgársággal a zsebben sem kis erkölcsi bátorság szükségeltetett e lépéshez, amely föltétlenül egyik oka lehetett annak, hogy Einstein népszerűsége Németországban — legalábbis a "német szellem" hivatalos és önkéntes képviselői körében — a múló évekkel egyre inkább csökkent. A másik ok ugyanis kézenfekvő módon adódott Einstein származásából. Zsidó család gyermeke volt. Sosem tagadta meg származását, sőt (talán az egyre erősödő faji ellenszenv reakciójaként) nagyon is nyíltan vállalta, amikor az antiszemitizmus és a faji mítosz maszlagjával kezdték etetni a kiábrándult német kispolgárt, hogy berúgván, könnyebben felejtse a vereség kudarcát, a túltengő nemzeti öntudat kapta pofonokat és nem utolsósorban a háború utáni évek gazdasági és társadalmi nyomorúságát. A háború utáni évtizedben Einstein saját személyén mérhette le a fokozódó antiszemita gyűlölet nyomását (pedig hol volt még akkoriban Hitler!). A "német szellem" különböző rendű és rangú bajnokai szervezett hadjáratokat indítottak ellene: támadták személyét, közéleti magatartását, sőt — ami a legmeglepőbb — faji alapon fizikai elméleteit is. A hecckampány 1923-ban érte el egyik csúcspontját, amikor ellenfelei — persze névtelen levelekben — a Szovjetunióval rokonszenvező s e rokonszenvért életével fizető Rathenau külügyminiszter sorsával fenyegették Einsteint, a Szovjetunióból való visszatérése után...*

Megint csak Einstein emberi helytállására jellemző, hogy csupán akkor fordított hátat szülőhazájának, amikor a gyűlölet és fanatizmus már működési lehetőségeinek és fizikai létének megsemmisítésével fenyegetett.

A világháború utáni években Einstein mind nyomatékosabban és elhatározottabban vállalta a közéleti szereplést. A húszas évek elején a Népszövetség szellemi kooperációs bizottságába jelölték. A következő években beutazta a világot: Hollandia, Csehszlovákia, Ausztria, Amerikai Egyesült Államok, Anglia (1921), Izrael, Spanyolország, Svédország, Szovjetunió (1923), majd 1925-ben Dél-Amerika. Mindenütt előadásokat tartott, a tudomány és a tudósok összefogásának szükségességét hirdetve, nyíltan vagy közvetve. Annál is inkább tehette ezt, mert éppen az ő művével kapcsolatban bizonyosodott be, milyen termékeny a tudósok nemzetközi összműködése. A világháború után az antantállamokban, is megismerték az általános relativitáselméletet, melynek egyik kísérleti igazolására éppen az 1919-es napfogyatkozás ígért lehetőséget. (A fény pályájának erős gravitációs térben való "elgörbülését" Einstein az általános relativitás teljes elméletének publikálását megelőzően, már 1912-ben jelezte egy tanulmányában. 1914-ben mód lett volna a kérdés eldöntésére, de a napfogyatkozás megfigyelésére Oroszországba utazott német tudósexpedíció tagjai váratlanul hadifogságban találták magukat. Közben ugyanis kitört a hadiállapot.) 1919-ben az angol Királyi Csillagászati Társaság szervezett expedíciókat az egyenlítő vidékére, s ezek az expedíciók szolgáltatták az első kísérleti bizonyítékokat az einsteini általános relativitás mellett...

Az eredmények nyomán a figyelem újra Einstein felé fordult. Személye és eszméi most már a tudományos világon túl az utca emberének érdeklődését is felkeltették. Angliában különösen: a *Times* még a nagy csillagászati megfigyelés évében felkérte őt arra, hogy foglalja össze a lap olvasóinak röviden és népszerűén a relativitáselmélettel kapcsolatos vélekedéseit. Einstein, aki sosem zárkózott el a fizika vívmányainak — és ezen belül saját gondolatainak — a hétköznapok nyelvére való lefordításától és jó értelemben vett népszerűsítésétől, engedett a kérésnek. A cikket ezzel a meglepő fordulattal fejezte be:

"… Íme, én is szolgálok a relativitás elvének néminemű alkalmazásával, amely talán mulattatni fogja az olvasót: bár ma Németországban "német tudósnak" neveznek, Angliában pedig "svájci zsidónak", nem kevésbé igaz az sem, hogy ha egy napon "bête noire" (általános üldözés tárgya) lennék, a németek szemében lennék "svájci zsidó", és az angolokéban "német tudós."

Ma, negyven év távlatából, a történelmi iszonyat pokoljárásán túl, megrendüléssel olvassuk e sorokat. Ennyire a jövőbe látott volna, a történelmi jövőbe, a fizika nagy látnoka? Visszafelé tekintve a múltba, sem jellemezhetnénk jobban végzetét, mint ő tette, előre. . .

A pillanatnyi tréfa köntösébe öltöztetett jóslat ugyanis fájdalmas pontossággal igazolást nyert. A húszas években egyre nehezebbé vált Németország politikai helyzete s benne Einsteiné is. Pedig 1922-ben neki ítélték oda a 1921-es fizikai Nobel-díjat ("A fotoelektromos törvényért és elméleti fizikai munkásságáért"), neve, tudományos tettei és utazásai révén személye is világszerte ismertté vált — egyszóval minden ok meg lett volna sárra, hogy

*Meg kell említeni, hogy Einstein egyik életrajzírója magát a szovjetunióbeli utazást is kétségbe vonja: az erről megjelent német újságtudósítások Ph. Frank szerint az Einstein elleni hangulatkeltés céljára szolgáló, ellenfeleitől kiagyalt és céltudatosan terjesztett koholmányok.

hazája büszke legyen szülöttjére. A hivatalos Németország azonban — s ebben talán az egyre sodróbb tempóban erősödő fasizmus jelét láthatjuk — mind kevésbé méltányolta, s végül teljességgel megtagadta Einsteint. Úgy hisszük, történelmi szerencse, hogy az ötvenhárom éves professzor éppen Kaliforniában tartózkodott, amikor a barnaingesek — a történelem ez idáig legnagyobb tragédiájának előjátékaként — 1932-ben átvették az uralmat, így csak könyveit égették el a kövezeten, csak nevét vakarták le szülővárosának arról az utcájáról, melyet 1922-ben róla neveztek el... A hatalomátvétel hírére Einstein visszatért — ha Németországba nem is — Európába, amerikai emigrációjának előkészítésére. Miután éles hangú levélváltás során lemondott porosz tudományos akadémiai tagságáról, 1933-ban második feleségével együtt az Amerikai Egyesült Államokba emigrált. Még ez év telén kinevezték a princetoni Advanced Study tanárává. Pár évre rá amerikai állampolgár lett... Igaz — s a történelmi hűség kedvéért el kell mondanunk —, nem telt el másfél évtized, és Németország megkereste megtagadott fiát: 1945-ben Ulm (ahol a háború porig pusztította az egykori szülőházát) újból utcát nevezett el Einsteinről, s a városka díszpolgárává választotta őt. Einstein azonban, aki egyébként vajmi keveset törődött a formalitásokkal, ez alkalommal, úgy látszik, komolyan vette a dolgot, s határozottan elutasította magától e gesztusokat...

Albert Einstein "naplemente előtt"-i évei, a princetoni évek sem nélkülözik a szellemi feszítettséget, a munka feszültségét, mely e mindig a legnehezebb, a fizika legel vonatkoztatottabb régiói felé törekvő fizikus férfikorát is jellemezte. A húszas években, berlini professzorsága idején Einstein érdeklődése elsősorban az az években erős fejlődésnek indult kvantummechanika felé fordult. Ám már a húszas évek legvégén, s még inkább most, Princetonban, munkássága korábbi eredményeinek továbbfejlesztését tekintette fő feladatának: tovább építette az általános relativitás gondolatkörét, s új, általánosított térelmélet felé igyekezett kitágítani az elmélet horizontját, miközben tovább folytatta a kvantumelmélet értelmezésével kapcsolatos kritikai munkásságát is.

Élete, legalábbis ami a külső adottságokat és létfeltételeket illeti, végső, nyugodt medrébe ért. (Magánéletét egyetlen súlyos megrázkódtatás érte: feleségének 1936-ban bekövetkezett halála.) Munkásságát ostoba előítéletek, gátló körülmények nem akadályozták többé. Az Advanced Study biztosította számára azt, amire leginkább szüksége volt munkájához: a lehető legkevesebb kötöttséget. Változatlan hévvel hódolt egyetlen igazi szenvedélyének, a muzsikának, nyaranta a Long Islandon üdült, s űzte kedvenc szórakozását, a vitorlázást... Ám közben nem csökkent érdeklődése az emberiség ügyeinek — sajnos, újra tragikus fordulatot vett — alakulása iránt. S különösen nem az üldözöttek és az elüldözöttek sorsa iránt. Számos szociális és karitatív intézménnyel működött együtt, hogy megkönnyítse a náci Németországból menekültek nehéz sorsát, s ez annál is bonyolultabb feladat volt, mert a menekülők száma nőttön nőtt, az amerikai gazdasági élet ugyanakkor a teljes összeomlással fenyegető krízissel küszködött. Még arra is vállalkozott, hogy személyesen adjon hegedűkoncertet a menekültek javára. (A hangversenynek egyébként szép sikere volt: hatezer dollár jött össze.) Évszázadunk egyik legnagyobb fizikusa, akinek tekintete ezekben az évtizedekben a világmindenség törvényeit fürkészte, egyetlen pillanatra sem szűnt meg éles szemmel figyelni az univerzumhoz képest oly parányi földgolyó ezekben az években mindinkább katasztrófával fenyegető történetére. És egy alkalommal tevőleg is belenyúlt e történelem alakulásába.

1939-ben Ottó Hahn német fizikus és munkatársnője, Lise Meitner nyilvánosságra hozta a kor legnagyobb horderejű fölfedezését, a maghasadás jelenségét. Az új felfedezés menten a világ fizikusai érdeklődésének középpontjába került, s nem véletlenül: amikor Enrico Fermi, a fasiszta Itáliából szökött olasz tudós megmutatta, hogy az energia felszabadulással járó maghasadási reakció láncszerűvé válhat, a hozzáértők előtt nyilvánvaló lett e felfedezések katonai jelentősége is. Fermi és az Amerikában élő magyar Szilárd Leó figyelmeztetett elsőnek ez utóbbi tényre. A szaktudós felismerése azonban a dolog természete folytán ez esetben kevés: a világpolitika amerikai intézőit, politikusokat, katonai és gazdasági szakembereket is rá kellett döbbenteni e felfedezések iszonyú horderejére. Ki lehetett volna alkalmasabb erre az amerikai tudományos világ akkori legnagyobb élő tekintélyénél, Einsteinnél? Szilárd Leó és (az ugyancsak magyar származású) Wigner Jenő kérte föl Einsteint, forduljon közvetlenül az Amerikai Egyesült Államok elnökéhez, Franklin D. Roosevelthez, s mutasson rá, milyen következményekkel járhat, ha Németország készíti el korábban az atombombát. Einstein természetesen engedett a kérésnek, s így végül is az ő híres levele eredményezte a Manhattan-tervet. . . és távolabbról a bombát, mellyel az Egyesült Államok oly iszonyú felkiáltójelet tett a második világháború végére.

Az atomenergia ügyében tett s felelősségtől áthatott kezdeti állásfoglalás kétségkívül Einstein nevéhez fűződik. Az atombomba előállítása azonban nem. (Ami a kérdés elvi alapját illeti, hogy tudniillik a tömegdefektus árán energia szabadítható fel, e több évtizeddel korábbi korszakalkotó elméleti fizikai felismerés talán még annyira sem hozható kapcsolatba a bombával, mint mondjuk, a ferde hajítás elméletének kidolgozása a kifejezetten háborús célokra szolgáló tüzérségi ballisztikával.) Így aztán inkább élénk fantáziájú írók, mintsem a tények rovására írandók azok a próbálkozások, melyek lelkiismereti konfliktus kirobbanását sejdítik korunk legnagyobb fizikusának életében, az atombombák felrobbanásának pillanatában. S hogy később számtalanszor felemelte tiltakozó szavát a nukleáris fegyverek ellen, ezt nem valami homályos lelkiismeret furdalásra, hanem a tudomány emberének mélyen átérzett felelősségtudatára és felelősségvállalására kell visszavezetni. . .

1945-ben hivatalosan nyugalomba vonult. Ezt úgy kell értenünk, hogy megvált az Advanced Studyban viselt tanári állásától. A gondolkodást, a problémák felvetésére és megoldására törő szellemi összeszedettséget ugyanis nem lehet nyugdíjazni — különösen nem az ő esetében, akinek mindez életeleme volt... Ezek az évek az Einstein-féle általános térelmélet végső kiforrásának évei. Alig vitatható, hogy az utóbbi években a fizika fejlődése más irányba fordult: a nukleáris fizika, a kozmikus sugárzás, az elemi részek problematikája épp elég közvetlen és *ad hoc* megoldandó s talán évtizedekre szóló problémát kínált a fizika kísérleti és elméleti kutatóinak. Nem időszerűtlen a sürgős tisztázásra váró kérdések tömkelegében szinte elgondolhatatlan nehézségű matematikai problémákkal járó elvi kutatásokat folytatni, melyek eredményeinek kísérleti ellenőrzésére — a fizikus munkájának *mindig* a kísérlet a végső igazolója — manapság alig-alig kerülhet sor? Einstein maga is érezte tudományos elszigetelődését (ami azonban legkevésbé sem jelentette kivételes tekintélyének csökkenését, hiszen ha valamikor, ezekben az években valóban özönlöttek hozzá az emberek, s titkárnőjének, az erélyes Helene Dukasnak elég gondjába került a létfeltételül szolgáló háborítatlanság biztosítása) ; maga is érezte ezt a tudományos magára maradottságot : "A fizikusok vén bolondnak tartanak — tudósít megrendültén a többször is elejtett megjegyzéséről Infeld, a munkatárs — , én azonban bizonyos vagyok benne, hogy a fizika további fejlődése más, a mostanitól eltérő irányban fog haladni." S ezzel folytatta tovább a munkát, amelyet, úgy hitte, el kell végeznie... S 1949-ben nyilvánosságra hozta új, általános térelméletét.

Élete utolsó évtizedében a szakadatlan munka mellett — mert hisz a negyvenkilences nagy publikáció sem jelenthette a gondolkodásra lett agy nyugalomba vonulását — továbbra is számottevő energiával foglalkozott az emberiség új történelmi helyzetének problémáival. Tevékenységét közkeletű megjelöléssel "békeharc "-nak nevezhetnénk. A közvetlen politika területére lépni mindig is vonakodott, az idézett Roosevelt-levél esetét leszámítva, nem is szánta erre rá magát, nem érezvén hivatásának a politikát; de sohasem mulasztotta el kifejteni nézeteit az emberiség jövőjének és békéjének érdekében. Mindig nyomatékosan tiltakozott az atomzsarolás politikája ellen, s ez a háború utáni évek hivatalos Amerikájában nem számított éppen népszerű vállalkozásnak; ugyanakkor úgy vélte, hogy a visszaélések kizárása céljából még korlátozottan sem tehetők közkinccsé az "atomtitkok", s az sem jelentene megoldást, ha ezeket nemzetközi szervek (például Egyesült Nemzetek) kezébe tennék le. Az egyetlen járható út, véleménye szerint, olyan szerteágazó szerződésrendszer kialakítása, mely az adott helyzet, azaz az akkori atommonopólium mellett is lehetetlenné teszi a háborút, atommal is, anélkül is... Elgondolásai a hivatásos politikus szemében esetleg naivnak vagy éppen elhibázottaknak tűnhetnek (különben időközben, az emberiség szerencséjére, az imperialista hatalmak atommonopóliuma meg is szűnt); a magatartás erkölcsi értékét, az emberiség békéjének ügye melletti kiállás hasznosságát és jelentőségét ez azonban aligha befolyásolja.

*

Ha szellemének frissességét és termékenységét nem is csökkentette a múló idő, az ötvenes években mind gyakrabban kellett Einsteinnek szembenéznie az immár több mint hét évtizedet megélt szervezet elhasználódási tüneteivel. 1955 tavaszán szív- és érsebész szakorvosok konzíliuma gyülekezett össze a világhírű tudós betegágyánál. Műtéti beavatkozásra lett volna szükség, az operáció gondolatát azonban Einstein kereken és határozottan elutasította. 1955 áprilisában állapota oly válságos volt, hogy otthonából kórházba kellett őt szállítani. A kórházi ápolás második napján azonban (április 15-én) már papírt és íróeszközt kért telefonon a titkárnőjétől: dolgozni akart, és dolgozott is. Három napra rá azonban a túlságosan igénybe vett érrendszer fölmondta a szolgálatot. Az artéria átszakadt, Albert Einstein 1955. április 18-án hajnalban meghalt.

EGYÉNISÉGE

Az életrajzi jegyzetek összeállítójának végcélja, legnehezebb s egyben leghálásabb feladata az alkotó emberi egyéniségének körvonalazása, az életút és az életmű összefüggései alapján. A természettudós vonatkozásában ez lehetetlen feladat: maga Einstein is, amikor önéletrajzot ír, a *The library of living philosophers* neki szánt vaskos kötetében, az *"autobiographical notes",* az önéletrajzi jegyzetek soraiban inkább gondolatvilágának, mint egyéniségének történetét vázolja... így Einstein emberi portréjához — saját szép számú nyilatkozatain, levelein stb. túl — főképp a visszaemlékezésekben és életrajzokban, mindenekelőtt Leopold Infeldnek, a tanítványnak és később hűséges munkatársnak őszinte emberi megrendüléssel és néhol íróhoz méltó tollal megírt könyvében lelhet az ember adatokat és adalékokat.

Pedig iménti kategorikus megállapításunk alól talán épp Einstein az egyik lehetséges kivétel: az ő esetében a természettudományi életmű is elárul egyet s mást az egyéniségéről. Miről elmélkedik Einstein első munkáiban? Méterrudakról, órákról, távolságmérésről, egyidejűségről... — egyszóval, olyan fogalmakról, melyekkel nemcsak minden fizikus, de a hétköznap embere is naponta találkozik, s amelyeknek jelentése — úgy tetszett — oly kézenfekvő, hogy nem érdemes velük az időt tölteni. Einstein nem röstellte a fáradságot, és szétboncolta ezeket a hallatlanul egyszerűnek és kézenfekvőnek hitt fogalmakat. Ügy hisszük, egyik legalapvetőbb emberi tulajdonsága nyilvánult meg ebben: soha semmit nem fogadott el késznek, kézenfekvőnek. Még akkor sem, ha a kritika tárgyául szolgáló fogalomalkotást az emberiség köztapasztalata szentesítette elfogadottá. Soha nem ismert el semmiféle dogmát — vagy ami ezzel körülbelül egyet jelent: rendkívül kritikus volt minden tekintéllyel szemben. Hadd idézzem itt fel fiatalkorának egyik epizódját: a müncheni gimnáziumot csak félig jószántából hagyta ott. Elhatározásának másik felét hivatalos indíték szolgáltatta. Egyik tanára ugyanis kereken kijelentette, hogy jobb lenne, ha elhagyná az iskolát. Az ifjú Albert Einstein meglepődve megjegyezte, hogy tudomása szerint semmi okot nem szolgáltatott erre a felszólításra, mire a tanár valami olyasmit mondott, hogy Einstein a puszta jelenlétével aláássa a tanári tekintélyt, s bomlasztja a fegyelmet.

Ez az eleve-anti-dogmatizmus, mely természetszerűen kapcsolódik a mindent kifürkészni akarás elemi nyugtalanságához ("Most már úgyszólván minden megoldódott, miért gyötri magát újabb problémákkal?" — kérdezte tőle egy ízben Planck, akit ugyancsak nem lehet dogmatizmussal vagy szellemi tunyasággal vádolni) — ha van einsteini magatartás, hát ennek a két mozzanatnak az ötvöződése.

A másik alapvető jellemvonás, melyet az életmű minden kortársi feljegyzésnél és emlékiratnál inkább kivall, a hallatlan makacsság. Einstein rászánta életét a fizika egyik legelvontabb gondolatkörére, mely alapelemeiben közfeltűnést keltve forradalmasította a fizikát, de továbbhaladva — hogy úgy mondjuk — "népszerűtlen" tájakra vezette őt, hallatlan matematikai nehézségek szakadékai és pillanatnyilag érdektelennek és öncélúnak tűnő problémák jégcsúcsai közé. Közben fordult a világ, s a fizika "divatja" más — talán nem kevésbé nehéz, de közvetlenebb izgalmakkal telített kutatásokra hívta legjobbjait. Einstein — bár az elszigetelődés megérzésével — kitartott eredeti célkitűzései mellett. A példátlan nehézségek ellenére is, melyek legyőzésére egyetlen eszköze volt: a szakadatlan, szinte embertelen elkötelezettségekkel járó *munka,* mely alól semmi külső esemény nem adott fölmentést. Még az egyéni élet tragikus megrázkódtatásai sem. (Hadd idézzem Infeld említett könyvének egyik megrendítő visszaemlékezését: "Akkoriban már minden reményt feladták Einsteinné életben maradására, hiába részesült a világ lehető legjobb gondozásában. Einstein megőrizte nyugalmát felesége haldoklásának napjaiban is, és szüntelenül dolgozott. A szomorú eset bekövetkezése után hamarosan ismét megjelent a Fine Hallban. Szobájában kerestem fel. Nagyon megkínzott ember benyomását keltette, arcbőre a szokottnál is sárgább volt. Megszorítottam a kezét, de képtelen voltam a rokonszenv vagy együttérzés lapos szavainak kimondására. A munkánkban jelentkező egyik komoly nehézségről kezdtünk vitatkozni, mintha mi sem történt volna... Nem volt erő, amely képes lett volna arra, hogy visszatartsa a munkától, míg az életnek csak egyetlen szikrája is szunnyadt benne.)

Mindent ennek a munkának rendelt alá. Családi élete — a szó mindennapi értelmében — alig volt, társasági életet nem élt. Életszemlélete ezen a ponton alapvetően eltért a mindennapi emberétől: munkájának anyagi alapfeltételei és személyi következményei alig érdekelték. Kenyérkereső foglalkozásként valami elvonult állást érzett volna legalkalmasabbnak. (A harmincas évek közepén, amikor a Németországból a nácizmus elől emigrált tudósok elhelyezéséről volt szó, egész komolyan javasolta, hogy adjanak a fizikusoknak toronyőri állást a világítótornyokban. Véleménye szerint ugyanis egy fizikus számára ez a legalkalmatosabb foglalkozás: itt senki sem zavarhatja őt...) Ami pedig a dicsőséget illeti, nos hát, ezzel végképp nem törődött: a Nobel-díj érem egyéb oklevelek társaságában kacatként hányódott valamelyik fiókja mélyén. Ebből azonban nem szabad valami ostoba szerénységre vagy gyanúsítható álszerénységre következtetni: Einstein nagyon is tudatában volt munkája jelentőségének. (Infeld egy alkalommal mellesleg megjegyezte, hogy a speciális relativitáselmélet valószínűleg Einstein nélkül is megszületett volna, hiszen megérett rá az idő. "Ez igaz — válaszolta Einstein —, de ez nem áll az általános relativitáselméletre. Nem hiszem, hogy máig is rájöttek válna.") Nyilván nem az elért eredményeknek, de az elismerés külső jegyeinek szólt ez a nemtörődömség, melyeket Einstein magában a konvencionális lét egyéb kellékeivel helyezett egy szintre. Azokkal pedig valóban nem sokat törődött. Még akkor sem, ha tulajdon személyéről volt szó: a fodrászollót ritkán látott lobogó sörény, a több mint viseltes és hiányos öltözék, melyekről olykor a legexponáltabb gombok hiányoztak — mindez nem valami puritanizmusról tanúskodott, inkább mélységes érdektelenségről. Kortársai ezt az érdektelenséget a polgári életforma és szokások ellen való lázadásként könyvelték el. Mindegy azonban, minek minősítjük: ez a mindenfajta külsőségtől, ceremóniától és konvenciótól való viszolygás egyik igen lényeges jegye Einstein egyéniségének.

Ám ha valaki — s az eddigiek alapján talán nem is indokolatlanul — emberkerülő vagy éppen egoista lénynek tartja Einsteint, kénytelen lesz meglepődni embertársaihoz fűződő viszonya láttán. Einstein ugyanis, habár szíve szerint a világítótorony magányát kedvelte volna, mindenkin segített, aki hozzá fordult. Talán túlzásba is vitte a dolgot (Infeld szerint az ajánlóleveleit végül már inkább értékes autogrammokként s nem komoly javaslatokként becsülték). Mindebben az a legmeglepőbb, hogy nem érzelmi alapon tette, amit tett: *az* ő emberbaráti gesztusaitól mi sem állt távolabb, mint az olcsó érzelgősség. S ugyanez az *észelvű humanizmus* irányította (elvi) állásfoglalásait a közélet kérdéseiben, ez vezette az emberiség dolgai iránt táplált élénk érdeklődésében, egészen haláláig — a szó szoros értelmében: halála napján még órákig tartó beszélgetést folytatott egy nemzetgazdász barátjával, jurisztikai kérdésekről.

Összegezve: jelleme végül is érdekes és egyedülálló kettősséget mutat. Egyrészt makacs individualista, aki szabadulni igyekszik minden köteléktől; ugyanakkor a társadalmi egyenlőség és emberi testvériség hívő harcosa. Ennek a kettősségnek önmaga is tudatában volt: "A társadalmi igazságosság és társadalmi elkötelezettség iránti szenvedélyes érzésem mindig furcsa ellentétben állt azzal, hogy kifejezetten hiányzott belőlem az emberekkel és az emberi közösségekkel való kapcsolat iránti igény. Igazi »különc« vagyok, aki sohasem tartozott egész szívvel államához, hazájához, baráti köréhez, sőt még szűkebb családjához sem, hanem mindezekkel a kötelékkel szemben sohasem szűnő idegenséget és magány utáni vágyat érzett, amely érzés korom előrehaladásával csak fokozódott. Élesen, de sajnálkozás nélkül érzem a kölcsönös megértés, a más emberekkel való együttérzés korlátait. Az ilyen ember elveszíti ugyan ártatlanságának és gondtalanságának egy részét, viszont cserébe messzemenően független embertársai véleményétől, szokásaitól és ítéleteitől, s nem jön kísértésbe, hogy egyensúlyát ilyen kevéssé szilárd alapokra építse... "

Az emberi egyéniség végső próbája az "élet nagy kérdéseivel" s köztük elsősorban az elmúlással való szembenézés. "Az élet... tetszik nekem. Ha azonban közölnék velem, hogy három óra múlva meg kell halnom, ez igen kis hatást gyakorolna rám. Megfontolnám, miként hasznosíthatnám legjobban hátralevő három órámat. Aztán elrendezném papírjaimat, és nyugodtan lefeküdnék, hogy meghaljak" — mondta egy alkalommal, s kis híján így is történt. Némi különbség azonban mégiscsak volt. A fenti szituációnak megfelelő pillanatban megkérdezte orvosait: várhatóan milyen, hosszú szenvedéssel járó vagy gyors halálra számíthat? A feleletet tudomásul vette, s nyugodtan folytatta a munkát... Úgy vélem, itt villan rés zárt, robusztus, egy tömbből faragott egyéniségén. E nemcsak tudósnak, de embernek is hatalmas ember talán nem is annyira érdektelen volt.

Inkább fegyelmezett.

ÉLETMŰVE

Albert Einstein hetvenedik születésnapjára egy amerikai kiadó vaskos tanulmánykötetet jelentetett meg, melyben Einstein "Önéletrajzi jegyzetei" mellett, melyekben maga összefoglalja működésének eredményeit és gondolatainak fejlődéstörténetét, korunk fizikájának kiemelkedő alakjai szenteltek egy-egy tanulmányt az einsteini életmű részterületeinek, majd befejezésül az ünnepelt válaszolt az egyes esszékben fölvetett problémákra és kritikai megjegyzésekre. A kötet végén terjedelmes bibliográfia foglalja össze Einstein működésének nyomtatásban megjelent, "kézzelfogható" produktumait. A tömérdek nyilatkozatot, levelet, beszédet stb. leszámítva, kereken 450 tanulmánycímet sorol föl az összeállítás, ezen belül 309 szakcikket és tanulmányt (a többi száztízben társadalmi, politikai, nevelési stb. problémákhoz szólt hozzá a szerző). 309 szakcikk és tanulmány — hatalmas szám, még ötven évre elosztva is rendkívüli munkabírásról és szorgalomról tanúskodik: Einstein átlagban két havonként jelentetett meg egy szakközleményt, ami — elméleti fizikáról lévén szó — hihetetlen teljesítmény.

A bibliográfia után összefoglalták Einstein főbb munkáit, időrendi keletkezésük sorrendjében. Az itt felsorolt huszonnyolc tanulmány több mint fele természetszerűen az einsteini érdeklődési kör középpontjában álló — s egyben tudományos horderejét tekintve is legnagyobb horderejű — speciális és általános relativitáselmélettel, illetőleg különböző térelméleti kérdésekkel foglalkozik. Einstein idevonatkozó legalapvetőbb gondolataival a nehézségektől vissza nem rettent olvasó éppen e könyvben ismerkedhetett meg a legilletékesebb interpretátor közvetítésével, így a relativitáselméletek szakproblematikájának újraismétlése itt fölösleges lenne (ahol kiegészítésre volt szükség – e könyvecske végül is több mint negyven évvel ezelőtt íródott — a mellékelt jegyzetek megtették). Ami pedig az általános térelméletet illeti, részben a matematikai segédeszközök nélkülözhetetlen volta áll a népszerűsítő ismertetés útjába, részben az a tény, hogy az einsteini életmű e részletének felmérésével még a fizika is adós önmagának. Nem mellőzhetjük viszont Einstein más vonatkozású munkásságának — bár csak vázlatos és semmiképpen sem teljességre igényt tartó — rövid megemlítését; a sugárzáselmélet és a statisztikus mechanika terén végzett munkája ugyan dimenzióiban és horderejében nem mérhető a relativitáselmélethez, de a modern fizika világképének kialakításában mégis elhatározó szerepet játszott.

Sugárzáselmélet

Einstein sugárzásokra s ezen belül a fény természetére vonatkozó vizsgálatainak felidézésekor ott kell kezdenünk, ahol Plancknál abbahagytuk. Plancknál, aki a fekete test sugárzásának vizsgálata során szerzett *kísérteti* eredmények nyomán — egész addigi világszemléletén és begyökeredzett nézetein szinte erőszakot téve, de hűen fizikus önmagához — *kénytelen volt* arra következtetni, hogy az addig *folytonosnak* tekintett energia kisugárzása az általa vizsgált viszonyok között nem történhet *tetszőlegesen kicsiny* adagokban, hanem csakis bár kicsiny, de jól meghatározott, *véges* adagokban. Az energia tehát — legalábbis bizonyos körülmények között — *nem folytonos,* hanem diszkrét, s az elemi "energiacsomag" valamely ν frekvenciájú sugárzásban :

$$h * \nu$$

(a h az azóta központi jelentőségűnek bizonyult un. Planck-féle állandó).

1900: Planck bejelentésének éve — s egyben a fiatal Einstein pályakezdésének éve is. A fizika világában forradalmi merészségű Planck-föltevés rendkívüli mértékben fölkeltette Einstein érdeklődését, s maga is az elektromágneses sugárzások természetének kutatására vetette magát. Első eredményei (a kis sugárzássűrűségű terekre vonatkozó megfontolások során nyerte őket) meggyőzték arról, hogy az elektromágneses sugárzás ezen körülmények között úgy viselkedik, mintha *maga is egymástól független energiakvantumokból állna.* (Tehát nem csupán a kibocsátásnak, de az elnyelésnek is "csomagokban" kell történnie!) Ez vezette Einsteint azon jelenségek vizsgálatához, ahol — úgy sejtette — e kvantumos természet *közvetlen* módon is megnyilvánul; a fotoelektromos hatás, a fotoionizáció, fotolumineszcencia jelenségeihez, amelyeket a kísérleti fizika ez időben már jól ismert, de az elmélet még adós volt értelmezésükkel.

Einstein újszerű feltételezései megoldották az elmélet belső nehézségeit. A fotoelektromos hatással foglalkozó gondolatai mellett érdemes kissé hosszasabban elidőznünk. Nemcsak azért, mert Einstein végül is ezekért kapott Nobel-díjat; inkább, mert itt közvetlenül érzékelni tudjuk, miben áll e gondolatok újszerűsége, s mert a gondolatmenet egyszerűségében sem tanúskodik kevésbé az alkotó zsenialitásáról, mint a relativitáselméletek rendkívül bonyolult matematikai dzsungelekbe rejtőzködő s megmászhatatlannak tűnő gondolati csúcsai.

Lássuk először a tényállást.

A múlt század végén megfigyelték, hogy ultraibolya sugarak negatív töltésű fémlapból negatív töltéshordozókat szabadítanak ki (Hallwachs, Sztoletov). A jelenség kivizsgálására viszonylag egyszerű kísérleti berendezés szolgál: légritka üvegburába egymástól elszigetelt elektródokat helyeznek el, amelyek kivezetései elektromos telep sarkaihoz kapcsolódnak. Normál viszonyok között az elektródok között áram nem folyik (összeköttetés nincs közöttük, a légritka tér gyakorlatilag tökéletesen szigetel); a körbe kapcsolt mérőműszer nyugalomban marad. Ha azonban fényt bocsátunk a búrára, a fenti hatás szerint negatív töltések lépnek ki a negatív pólussal összekötött elektródáról, s a pozitív csúcsra repülve visszafolynak az áramforrásba: elektromos áram lép föl, amelyet a galvanométer jelez... E berendezés segítségével Lénárd Fülöp alaposan kísérleti törvényszerűségeit, s szinte tálcán nyújtotta Einsteinnek, aki magyarázatukért ugyancsak Nobel-díjat kapott. (Einstein életébe azonban nem csupán itt s nem is ilyen irányba nyúlt bele Lénárd Fülöp, amint erről az olvasó később még bővebben értesül majd.) De térjünk vissza a fény elektromos jelenséghez. Lénárd mérései a következő törvényszerűségeket állapították meg:

1. A katódból kilépő töltéshordozók elektronok.
2. A kiváltott elektronok száma a katódra eső fény *erősségével (intenzitásával)* egyenes arányos.
3. Az elektronok maximális sebessége a fény *színétől* (a fizika megfogalmazásában: a fény *frekvenciájától)* függ. A maximális sebesség nő, ha a rezgésszám növekszik; ha viszont csökkentjük a rezgésszámot *(azaz* a fény színét a vörös felé változtatjuk), egy adott rezgésszám alatt megszűnik a fotoeffektus.

A klasszikus elméleti fizika tehetetlen volt e jelenséggel szemben. Miért? A klasszikus elektrodinamika tanítása szerint a fény folytonos transzverzális hullámokban terjed. Természetesen e hullámok is szállítanak magukkal energiát, de ez az energia a hullám amplitúdójával (a hullámhegy magasságával), vagy más szóval, a fény erősségével (intenzitásával) áll kapcsolatban, nem pedig a fény színével (rezgésszámával). Ha tehát azt kívánjuk, hogy a kísérleti eszköz elektródjából kilépő elektronok nagyobb energiájúak legyenek (ami egyenértékű követelés azzal, hogy nagyobb v sebességűek legyenek, mivel a mozgási energia $E=\frac{1}{2}mv^2$, ahol m az elektron tömege), akkor növelnünk kell a megvilágító fényhullám amplitúdóját, vagy más szóval, növelnünk kell a megvilágítás erősségét. Ezzel szemben mit mutat a tapasztalás? Ha növeljük a megvilágító fény erősségét, a kilépő elektronok *száma* növekszik, s azt nem lehet elérni, hogy *kevesebb* elektron lépjen ki *nagyobb* sebességgel. Illetőleg ezt is el lehet érni, de nem a fényerősség, hanem a fény rezgésszámának (színének) megváltoztatásával.

A dilemmát Einstein oldotta meg Planck hipotézisének továbbgondolásával. Tegyük föl, hogy a fénynyalábban nem hullámok, hanem fényrészecskék terjednek, amelyek *energiája* $h*v$ (azaz a fény frekvenciájával arányos, azaz annak színétől függ). Ha egy ilyen $h*v$ energiájú fényrészecske telibe talál egy atomot, átadja annak energiáját; ez az energia egyrészt fedezi azt az energiaszükségletet, ami ahhoz kell, hogy az elektron egyáltalán kiszabadulhasson az atom kötéséből; másrészt — a maradék — fedezi a kirepülő elektron mozgási sebességéhez szükséges energiát. S mivel az energia megmaradásának tétele itt is érvényes:

$$h*v=A+\frac{1}{2}mv^2$$

(ahol A az elektron kiszakításához szükséges energia).

Egyszeriben minden magyarázatot nyert. Ha a fény intenzitását növeljük — azaz több $h*v$ energiájú fényrészecskét bocsátunk a katódra —, a megnövekedett számú fénycsomagok nyilván több atomot fognak eltalálni, tehát *több* elektron fog kilépni. Egyúttal az is értelmet nyert, miért növelhető a kilépő elektronok sebessége a fény színének megfelelő irányú befolyásolásával. Ha $h*v$-*t* növeljük, növekednie kell a másik oldalon a v^2-nek is (az A, a kilépési munka ugyanis egy adott fém esetében állandó érték). Végezetül az is nyilvánvaló, hogy csökkentve a fény frekvenciáját, egyszer eljutunk egy olyan határértékhez, ahol nem repül ki több elektron: ha $h*v = A$, azaz a fényrészecske energiája éppen csak az elektron kilépési munkáját fedezi, az elektronok $v = 0$ sebességgel hagyják el a katódot; ha pedig $h*v$ ennél is kisebb érték, az elektronok egyáltalán ki sem léphetnek.

A fényelektromos jelenség kristálytiszta és egyszerű magyarázatot nyert tehát az einsteini feltevéssel, melynek lényegét érdekes lesz még egyszer összefoglalni. A fény atomos természetű: a fényrészecskék — melyeket Einstein *fotonnak* keresztelt el — $h*v$ energiával és $h*\frac{v}{c}$ nagyságú impulzussal rendelkeznek (ez utóbbi létezése a röntgensugarak anyaggal való kölcsönhatása során fellépő, un. Compton effektus elméleti magyarázatánál nyert fényes igazolást).

Igen ám — kérdezhetné erre valaki —, de mi a helyzet a fény interferenciájával, a fényelhajlással, egyszóval azokkal a jelenségekkel, melyek a fény hullámtermészete mellett szólnak? A fotonelmélet ezeket a jelenségeket természetszerűleg nem tudja magyarázni. Össze kell tehát egyeztetni a fény hullám- és korpuszkulaelméletét, hogy általános és minden igényt kielégítő fényelméletet nyerjünk. Einstein — a fény fotontermészetére vonatkozó további igazoló vizsgálatok mellett — megkísérelte egy ilyen általános fényelmélet kialakítását. Ez az un. *tűsugárzás-elmélet,* amely szerint a fényrészecskék tulajdonképpen apró, erősen irányzódott jellegű sugáradagok: tűsugarak, s ezekben koncentrálódik a $h*v$ energia (ami pl. a fényelektromos jelenség során átadódik az atomnak, mellyel a tűszerű sugárnyaláb összeütközik, s fedezi a kilépő elektron kilépési munkáját és mozgási energiáját). Ugyanakkor a tűszerű hullámvonulaton belül a fény továbbra is hullámtermészetű, s természetszerűen érvényesek a régi fizika törvényei, a Maxwell-egyenletek, és ha például e tűszerű hullámvonulatot kétfelé bontjuk és újra egyesítjük, létrejön az interferencia ismert jelensége. Az elmélet azonban minden tetszetőssége ellenére sem bizonyult helytállónak. (A perdöntő ellenbizonyítékot a. magyar Selényi Pál egyik kísérlete szolgáltatta, aki egymáshoz; viszonyítva nagy — közel 180°-os — térszögben kilépő nyalábok egyesítésével is hozott létre fényinterferenciát: eszerint a foton az őt kibocsátó atomot nem a tűsugárzás-elméletben megjósolt, szorosra fogott és irányított alakzatban, hanem gömbhullámokban hagyja el.) Einsteinnek ez a feltételezése tehát nem bizonyult helytállónak; a fény korpuszkulatermészetére vonatkozó megállapításai azonban fényesen beigazolódtak, s ezek révén gyökeresen befolyásolta a sugárzásra vonatkozó ismereteink és a sugárzási elméletek fejlődését. És végső soron az anyag természetére vonatkozó tudásunk további alakulását is (messze túl a sugárzásokon): a fény kettős természetének beigazolódása jelentős lökést adott Louis de Broglie-nak a korpuszkuláris anyag hullámtermészetére vonatkozó feltételezés kialakításában. Einstein rokonszenvvel fordult de Broglie (övéivel nagyon is rokon) gondolataihoz, s elsőként javasolta 1924-ben, hogy kíséreljék meg diffrakciós és interferencia jelenségek kísérleti létrehozását molekulanyalábok segítségével.

Einstein munkássága a statisztikus mechanika területén

A statisztikus mechanika abból az alapfeltevésből indul ki, hogy a fizikai megismerés tárgyául szolgáló anyag apró, közvetlen észlelésünk számára érzékelhetetlen, első közelítésben "elemi"-nek tekintett részecskékből épül föl, s a továbbiakban e részecskék tulajdonságaiból igyekszik megmagyarázni az anyag "nagybani" — makroszkopikus — tulajdonságait; így a kinetikus elmélet a gázok hőmérsékletét, edényfalra gyakorolt nyomását a gázt alkotó molekulák mozgásával, pontosabban átlagos mozgási sebességével, illetve mozgási energiájával igyekszik összekapcsolni stb. Az elemi részecskék, egyedenként rendkívül kicsinyek, ám rendkívül nagyszámúak lévén, külön-külön nem érdeklik a kutatót; annál is kevésbé, mert egyenként nem hozzáférhetők tapasztalata számára. *Átlagos* viselkedésük határozza meg a belőlük felépülő anyag tulajdonságait, tehát csupán mint statisztika alanyai érdekesek. (Innen az elnevezésben a "statisztikus" jelző.)

A statisztikus mechanika a múlt század végén Boltzmann osztrák fizikus működése nyomán emelkedett fejlődése első csúcsára.

A fiatal Einstein már munkássága legkezdetén eljegyezte magát e tudományággal, s ennek fejlődésére is rendkívüli hatást gyakorolt. "Közleményei e tárgyban — jellemzi Einstein munkásságát Max Born két csoportra oszthatók: egy sereg korai cikke a klasszikus statisztikus mechanikával foglalkozik, míg a többi a kvantumelmélethez kapcsolódik... Tisztábban látta, mint bárki más előtte, a fizika törvényeinek statisztikus hátterét, s úttörő volt a kvantumjelenségek őserdejének meghódításáért folytatott küzdelemben." Einstein statisztikus mechanikai működésének ismertetésében érdemes lesz nekünk is Born célszerű felosztását követni.

Einstein első tanulmányai 1902-ből a statisztikus mechanika általános megalapozásának kérdéseit érintik (s ebben a vonatkozásban sem teljesen újszerűek, mert — bár függetlenül — azt az utat járja bennük végig, amit Gibbs követett egyik közleményében egy évvel előtte). Nem állt meg azonban az elmélet kiküzdött eredményeinél: menten alkalmazni próbálta azokat olyan jelenségkörökre, melyektől a molekulák reális létének — s így a kinetikus elmélet helyességének — igazolását lehetett várni. Már az első próbálkozás hatalmas sikerrel járt: 1905-ben, az einsteini forradalom évében megszületett a Brown-mozgás elméleti magyarázata. S talán az a legérdekesebb, hogy Einstein — nem is tudott a Brown-mozgásról.

Brown angol botanikus még a múlt században (1827) figyelte meg, hogy a mikroszkóp látómezejében a folyadékcsöppre szórt virágpor szemcséi váratlan, kiszámíthatatlan irányú és nagyságú mozgásokat végeznek. A részecskék cikázása teljességgel rendszertelennek bizonyul... s a jelenség megmagyarázatlan maradt, egészen 1905-ig. A felfedezésről szóló beszámoló azonban hangozzék el a legilletékesebb helyről, Einstein szájából.

"Nem ismervén Boltzmarm és Gibbs korábbi kutatásait, amelyek előbb jelentek meg, és pillanatnyilag kimerítették a tárgyat, kifejlesztettem a statisztikus mechanika és a termodinamika ezen alapuló molekuláris-kinetikai elméletét. Legfőbb törekvésem itt az volt, hogy olyan tényeket találjak, melyek, amennyire lehetséges, szükségszerűen bizonyítják valamely meghatározott, véges térfogatú atomok létezését. Ennek közepette fedeztem fel, hogy — az atomi elméletnek megfelelően — a szuszpendált és megfigyelés alatt álló részecskéknek szükségszerűen mozgást kell végezniök; anélkül, hogy tudtam volna arról, hogy a Brown-mozgásra vonatkozó megfigyelések már rég közkeletűek. A legegyszerűbb levezetés a következő meggondoláson alapul. Ha a molekuláris-kinetikai elmélet lényegében helyes, valamely látható részecskékből álló szuszpenziónak ugyanolyan fajta — s a gáztörvényeknek eleget tevő — ozmotikus nyomásának kell lennie, mint a molekuláris oldatoknak. Ez az ozmotikus nyomás függ a molekulák tényleges nagyságától, azaz a gramm-ekvivalensben levő molekulák számától. Ha a szuszpenzió sűrűsége inhomogén, az ozmózisnyomás is inhomogén, s ez kiegyenlítő diffúzió fellépésére vezet, amely a részecskék jól ismert mozgékonysága alapján számolható. Másrészről: ezt a diffúziót a szuszpendált részecskék — eredetileg ismeretlen nagyságú — rendezetlen mozgása eredőjének is tekinthetjük, melyet a termikus agitációra vezetünk vissza. Összehasonlítva a mennyiségeket, melyeket a két meggondolás alapján kaptunk a diffúziós áramra, kvantitatíve megkaphatjuk e helyváltoztatások statisztikus törvényszerűségeit, azaz a Brown-mozgás törvényét. . . "

E törvényszerűségek — melyeket a kísérleti eredmények messzemenően igazoltak — elvi jelentőségű állomást jelentenek a legújabb fizika történetében: az első *közvetlen* bizonyítékot szolgáltatták a molekulák valóságos létezéséről, s egyúttal lehetővé tették fontos fizikai állandók pontos meghatározását.

A Brown-mozgás elméleti magyarázatát számos kisebb-nagyobb horderejű felfedezés követte. Einstein megkísérelte például az ég kék színének magyarázatát a légsűrűségben lépcsőzetesen fellépő kis ingadozások statisztikus számításával. .. Mindez a relativitáselmélet gigászi gondolatépítményei mellett persze játéknak tűnik: ilyen az, amikor a lángelmék játszanak. . .

Einstein statisztikus-elméleti munkásságának második része a modern fizika fősodrához kapcsolódik, a kvantummechanika kialakulásához. A részletek ismertetése túlságosan messzire vezetne. Ennek ellenére sem mellőzhetjük rövid összefoglalásunkban e téren végzett utolsó, de annál nagyobb horderejű munkájának, a Bose — Einstein-féle statisztikának és az egyatomos ideális gázok statisztikus elméletének megemlítését.

Az elmélet kiindulópontját Bose indiai fizikus szolgáltatta, aki statisztikai alapon kívánta vizsgálni a fényatomok, azaz fotonok viselkedését, mintha azok valamiféle szokatlan jellegű gáz (un. fotongáz) részecskéi lennének.

Alapfeltevése e statisztika kidolgozásánál : a fotongáz egyedei egymás között megkülönböztethetetlenek. Einstein továbbfejlesztette a gondolatot: ugyanezt az alapelgondolást kell alkalmazni egyes esetekben a — köznapi értelemben vett — "fogható" anyagok atomjaira is. Ily módon kézenfekvő módszert nyer a kutató az egyatomos gázok viselkedésének leírására. (Az ily módon elképzelt gáz persze különbözik a "valóságos" ideális-gáztól, miért is ebben a vonatkozásban a gáz "degeneráltságáról" szokás beszélni.)

Einstein ide vonatkozó közleményei 1924-25-ben láttak napvilágot, egy évvel a kvantummechanika születése előtt; és Schrödinger, az új tudományág egyik megteremtője maga vallotta, hogy ezek az einsteini gondolatok (de Broglie francia fizikusnak az anyag hullámtermészetére vonatkozó merész feltevései mellett) döntő lökést szolgáltattak elmélete kidolgozásához ... s ezen keresztül a kvantummechanika további s hihetetlen lendülettel előretörő fejlődéséhez, ahol a statisztika és a valószínűség fogalomköre végképp birtokba vette a fizikai elméletek világát. Einstein azonban, aki egyike volt e gondolatlavina megindítóinak, ezt a fejlődést már nem nézte jó szemmel. Ez azonban külön bekezdést érdemel.

Einstein kritikai munkássága a kvantummechanika fejlődésében

Ismét történelmi visszapillantással kell kezdenünk. Az 1926-os év körülbelül olyan sarokpontot jelent a modern fizika fejlődésében, mint az 1900-as és 1905-ös: új, nagy jelentőségű fordulat következett az atomvilág építőköveiül szolgáló részecskék elméleti fizikájának fejlődésében. E fejlődést egyik oldalról Heisenberg — matrixmechanika —, másik oldalról Schrödinger — hullámmechanika — neve fémjelzi. (A két elméletről később kiderült, hogy egy és ugyanazon fizikai valóság egyenértékű leíróeszközei.)

Az új fizika regényének — vagy inkább drámájának — hőse Schrödinger differenciálegyenlete, illetőleg ennek megoldása, az oly gyakran emlegetett *Ψ-hullámfüggvény,* amely az atomon túli világ *részecskéinek* viselkedését hivatott leírni. Még a fizika világába csak kirándulásra érkezett érdeklődő is meghökken: részecske —hullámegyenlete? Ám nem szabad meglepődni : ahogy az egykor hullámnak hitt fényről kiderült, hogy olykor részecskeként viselkedik, úgy az eddig anyagcsomagnak hitt részecskéről is sikerült *kísérletileg is* kimutatni, hogy olykor hullámtermészetű: Davisson és Germer amerikai fizikusok elektronnyalábbal ugyanolyan interferenciaképet állítottak elő, amilyet — egész eddig úgy hitték — csak fénnyel lehetséges. Ha tudomásul vettük az anyag hullámtermészetét, már meg sem lep, hogy a hullámfüggvény *sikerrel* írja le a valóságot: midőn az elméleti fizikus számításai végén a matematikai szimbólumok rendszeréből kifejti a fizikai mondanivalót, örömmel állapíthatja meg, hogy a számított eredmények és a kísérletek adatai találkoznak. (Ami a fizikai elméletek helyességének tűzpróbája.) Csupán egy kérdés megválaszolása van még hátra: minek a rezgőmozgását írja le ez a hullámfüggvény? Mi a jelentése a Ψ-nek?

A hullámfüggvény értelmezésének problémája váratlanul fogós kérdésnek bizonyult, s egyúttal komoly szakadások okozójának a modern fizika berkeiben. Az új elméletek kidolgozói, különösen Heisenberg és a "veterán" Niels Bohr (másfél évtizede, a kilencszáztízes évek elején ő alkotta meg az utolsó *szemléletes* atommodellt) által elvégzett analízis teljességgel új és eddig járatlan utakra vezette a fejlődő elméletet. Eszerint az atomon túli részecskék fizikáját és az általunk ismert klasszikus fizikát áthidalhatatlan árok választja el egymástól. A mikrofizika törvényeinek teljes értékű leírására szokásos módszereink és fogalmaink nem alkalmasak. Annál nehezebb helyzetben vagyunk — figyelmeztet ez az álláspont —, mert végül is minden mikrofizikai jelenségről a klasszikus fizika nyelvén kell számot adni. Ezzel kapcsolatban tudomásul kell vennünk, hogy a mikrovilág vizsgálatára használt kísérleti eszközök döntő módon befolyásolják megszerzett ismereteinket. E kísérleti eszközöket két osztályba sorolhatjuk; az elsőbe a hely- és időadatok, a másodikba az impulzus- és energiaadatok megállapítására szolgáló berendezések tartoznak, s e két berendezésfajta egyidejű alkalmazása *elvi oltok miatt* nem lehetséges, így a szubatomáris részecskékről szerzett tudásunk eleve két egymást kiegészítő ismeretkomplexumra esik szét. Hasonlóképpen: ami a korpuszkula-, illetve hullámtermészetet illeti, hol egyiket, hol másikat tapasztaljuk, attól függően, hogy milyen vonatkozásban, *milyen kísérleti eszközökkel* kerülünk kapcsolatba az atomon túli valósággal. A korpuszkula- és a hullámtermészet ilyen értelemben egy és ugyanazon fizikai valóság egymást kiegészítő, de összebékíthetetlen, egy, a szemléletünk számára barátságos képbe nem egyesíthető megnyilvánulásai (Bohr-féle komplementaritási elv)... Maga a mikrorészecske valójában hétköznapi szemléletünk hatókörén kívül eső vonásokat mutat, és ezen objektív, de nem szemléltethető mozgástörvények szabatos rendszerét nyújtja a kvantummechanika, amikor a mikrorészecske leírására koordináták és sebességük helyett a Ψ-hullámfüggvényt használja.

Az új fizika előfutárai, akik maguk még teljességgel a klasszikus fizika talaján álltak, némi meghökkenéssel figyelték az új gondolatok fejlődését, s nem mindenben azonosultak az új nézetekkel (de Broglie sem, sőt a hullámegyenlet megteremtője, Schrödinger sem tudott egyetérteni az új értelmezéssel). Einstein pedig, aki ez esetben főként a kritikus szerepkörének betöltésével járult hozzá a fejlődéshez és a gondolatok lassú tisztázódásához, többször is feltette a kérdést: vajon a fizikai realitás teljes értékű leírásának tekinthető-e a kvantummechanika? S 1927-től kezdve majd negyed századon át kongresszusról kongresszusra, tanulmányról tanulmányra folytatta megszakítás nélküli nyilvános vitáját Niels Bohrral a kvantummechanika értelmezéséről.

"Fizikai rendszernek — idézünk Einstein utolsó, a Schilpp-féle kötetben megjelent állásfoglalásából — elsősorban a határozott bomlási idővel rendelkező radioaktív atomot tartjuk, amelyet gyakorlatilag pontosan a koordináta-rendszer egy pontjához rögzítettünk. A radioaktív folyamat egy (viszonylag könnyű) részecske kibocsátásában áll. Egyszerűség kedvéért itt a bomlási folyamat után hátramaradt atom mozgását elhanyagoljuk. Ezután úgy járhatunk el, hogy — Gamow nyomán — az atom maradványát egy atomi nagyságrendű térrel pótoljuk, melyet egy zárt potenciális energiafal vesz körül, mely a $t = 0$ időpontban magába zárja a kibocsátandó részecskét. Az így sematizált radioaktív folyamat most köztudomásúan — az elemi kvantummechanika értelmében — háromdimenziós Ψ-függvénnyel írható le, mely a $t = 0$ időpontban csak a potenciálfalon belül különbözik zérustól, de amely a pozitív időértékek esetében a külső térbe is kiterjed. Ez a Ψ-függvény jelenti annak valószínűségét, hogy az anyagi részecske valamely kiválasztott időpillanatban tényleg a tér egy meghatározott helyén tartózkodik (azaz helyzetének mérésével ott tényleg megtalálható). Másrészről viszont a Ψ-függvény nem tartalmaz semmiféle állítást a radioaktív atom *szétesésének időpontjára vonatkozólag.*

Most feltesszük a kérdést: Vajon tekinthetjük-e ezt az elméleti leírást egyetlen egyéni atombomlás *teljes* leírásának? A válasz kézenfekvő: nem. Először is: mindenekelőtt hajlunk a feltevésre, hogy az egyedi atom meghatározott idő alatt bomlik el; ilyen meghatározott időérték azonban a Ψ-függvény révén történő leírásban nem szerepel. Ha tehát az atomegyednek határozott bomlási ideje van, akkor ... a Ψ-függvény segítségével történő leírását hiányosnak kell minősítenünk. Ebben az esetben a Ψ-függvényt nem valamely egyes rendszer, hanem egy eszményi rendszerösszesség leírásának kell tekintenünk. Ebben az esetben viszont arra a meggyőződésre jutunk, hogy végre is valamilyen egyes rendszer teljes leírására a statisztikai kvantumelmélet fogalomvilágában nincs tér. "

Igen ám — feleli erre a kvantummechanika híve —, valójában az atomegyeddel kapcsolatos *ilyen* igénynek egyszerűen nincs értelme; mindenekelőtt azért, mert az atomegyed kívül fekszik mindennapi értelemben vett tapasztalásunk és mérésünk lehetőségein. "De tegyük fel, hogy nyakon tudunk csípni egy adott atomot. A szóban forgó atombomlás "meghatározott időpontjáról" ez esetben is csak akkor beszélhetünk jogosan, ha e bomlási időt magunk *empirikusan* mérni tudjuk. Ehhez viszont azt kell, hogy a szóban forgó atomot kapcsolatba hozzuk a megfelelő mérőműszerrel. Ez viszont eleve magával hozza a vizsgált egyedi atom nagyon is határozott megzavarását: milyen jogon következtetünk arra, hogyan viselkedne vizsgált atomunk akkor, ha mentes lenne műszerünk zavaró hatásától? ... Vagy nézzünk egy másik példát, egy elektront, s figyeljük meg egymás utáni két időpontban, mondjuk, a következőképpen: az elsőben bocsássuk át egy mágneses téren, utána bocsássuk rá egy megfelelő fémkristályra. Mit tapasztalunk? Első esetben a mágneses tér módosította pályáját, s közben ő maga is módosította a mágneses mezőt, azaz elektromosan töltött anyagi pontként viselkedett; utóbb viszont interferenciaképet rajzolt a fémkristály mögötti ernyőn, tehát hullámtermészetűnek mutatkozott volna — mondjuk — a két megfigyelési időpont között? Honnan tudjuk, hogyan viselkedett egyáltalán ?... Ez utóbbi kérdéseket már mi éleztük ki a kvantummechanika híveinek nevében, hogy mélyebben megértsük Einstein válaszának jogosultságát:

"Ami nekem az effajta érvelésben nem tetszik, az a lényegében pozitivista magatartás, amely végül is Berkeley elvéhez lyukad ki: *esse est percipi*..." S leszögezi az álláspontját: "A statisztikai kvantummechanika keretében valamely egyéni rendszer teljes leírása nem is létezik... Ezzel aztán azt is elismerjük, hogy ez a séma nem szolgálhat alapul az elméleti fizikának. Feltételezve, hogy a teljes leírásra irányuló erőfeszítések sikerre vezetnek, a statisztikai kvantummechanika a jövő fizikájában megközelítően hasonló pozíciót foglalna el, mint aminőt ma a statisztikus mechanika a klasszikus fizikában. Meglehetősen határozottan meg vagyok győződve arról, hogy az elméleti fizika fejlődése ezt a típust fogja követni; de az út odáig hosszú és rögös lesz ... "

A tudomány fejlődése e téren *nem* Einsteint követte. Két dolgot azonban le kell szögeznünk.

Először: az elméleti fizika fejlődésében az utóbbi években fellépett egy olyan irányzat is, amely az atomon túli valóság fizikáját az einsteini állásponthoz közeledve igyekszik megfogalmazni és leírni. E megváltozott helyzetet jelzi Infeld, amikor ezt írja: "Napjainkban Einsteinnek a kvantummechanika ellen tett kifogásai semmit sem veszítettek erejükből. Most

— úgy vélem — kevésbé állna elkülönülten nézeteivel, mint amilyen magányos 1936-ban volt." És ez igaz is. Aminthogy az is igaz persze, hogy az Einstein utáni (s részben az ő nyomán elindult) újabb bírálók kritikái a legkevésbé sem rendíthették meg a statisztikus-valószínűségi értelmezésű kvantummechanika immáron lezárt és befejezett épületét.

És másodszor: Einstein szigorú és mindenre figyelő, éles kritikája föltétlenül hozzájárult a nézetek tisztázásához. (Maga Niels Bohr így ír erről: ". . .a közelmúlt években több ízben alkalmam volt találkozni Einsteinnel, a folytatólagos vitákból... mindig új impulzusokat nyertem...") így Einstein a termékeny indító gondolatok mellett kritikájával is örökre beírta nevét a kvantumfizika történetébe.

TUDOMÁNYOS EGYÉNISÉG ÉS VILÁGNÉZET

Nem fejezhetjük be az einsteini életmű e rövid vázlatát anélkül, hogy ne próbálnék meg összegezni korunk egyik — minden vitán felül — legnagyobb fizikusának a fizikáról alkotott legáltalánosabb nézeteit és követeléseit. Ez a problémakör Einstein filozófiai alapállásának kérdéséhez fog elvezetni bennünket, ami nem is meglepő, ha meggondoljuk, hogy az einsteini gondolatvilág — noha fizikai problémákra korlátozódik — valahol a filozófia határmezsgyéjén helyezkedik el.

Ám lássuk a fizikus *ars poetica-ját.* Milyen követeléseket támaszt Einstein a fizikai elméletekkel szemben? (A következőkben újból egyik legutolsó, a Schilpp-féle kötetben megjelent állásfoglalását idézzük.)

"Az első szempont kézenfekvő: az elméletnek nem szabad ellentmondania a tapasztalati tényeknek. Amennyire nyilvánvalónak tűnhet, hogy ezt a kérdést említjük elsőnek, annyira körültekintően kell eljárnunk alkalmazásában, mivel gyakran — ha ugyan nem mindig — fönnáll a lehetősége annak, hogy az általános elmélethez megalapozása során mesterséges hozzátoldások tapadnak, a teória tényekre való jobb alkalmazhatóságának elősegítésére.

A második szempont nem a megfigyelés tárgyául szolgáló anyaggal, hanem magának az elméletnek a premisszáival kapcsolatos, és röviden — bár nem túl konkrét módon — a premisszák "természetessége"— vagy "logikai egyszerűsége"-ként jellemezhetnek... Ez a szempont, melynek pontos megfogalmazása komoly nehézségekkel jár, fontos szerepet játszott az elméletek szelekciójában és értékelésében a legrégibb időktől... A második szempontot röviden az elmélet "belső tökéletessége"-ként jellemezhetnők, míg az első szempont a "külső igazolás"-ra vonatkozik.

Horgonyozzunk le egy pillanatra az utóbbi, második helyen említett kritérium mellett. A fizikai elmélet belső, logikai egyszerűségére és harmóniájára s egyszersmind minél szélesebb érvényességi hatósugarára vonatkozó kívánalmát Einstein legszigorúbban igyekezett érvényre juttatni saját munkásságában. Ez a törekvés, mellyel a jelenségek mind nagyobb s nagyobb körét igyekezett logikailag minél egyszerűbb egységes elmélet keretében összefogni és összefoglalni, nyilvánvalóan csak egyetlen alapvető meggyőződésre vezethető vissza: a valóság teljes egységébe vetett meggyőződésre, melyet makacsul és következetesen vallott akkor is, amikor úgy látszott, nyilvánvaló: a mikrovilág jelenségeit a makrorealitás fogalmaival leírni nem lehet, s a fizikai valóság különböző részeit leíró tudományszakok véglegesen elszakadnak egymástól. "Szilárd meggyőződésem — írja róla Leopold Infeld, a munkatárs —, hogy Einstein élete utolsó pillanatáig hitt abban, hogy vannak olyan alapvető törvények, melyek egyaránt szabályozzák a csillagoknak, a bolygóknak csakúgy, mint az atomok belsejének mozgását."

Mindebből — gondolhatnánk — akár a filozófus is tanulhatna: hogyan kell érteni a világ "anyagi egységé"- re vonatkozó megállapításokat — föltéve persze, hogy Einstein is "anyagi"-nak gondolta a világot. De valóban, materialista módon gondolta vagy ellenkezőleg?

A szakemberek, fizikusok és filozófusok véleménye erősen megoszlik e kérdésben. A legkülönbözőbb, olykor szélsőséges és persze egymásnak ellentmondó vélekedések születnek, s ennek alapja az a tény, *hogy Einstein —* túl azon, hogy hosszú élete folyamán szemlélete természetszerűen fejlődött és alakult — *a filozófiát, illetően nem volt következetes megnyilatkozásaiban és fogalmazásaiban.* Bonyolítja a helyzetet, hogy ilyen esetekben az egyéni eltökéltség s az ebből fakadó állásfoglalások nem föltétlenül futnak szinkronban a tényleges eredményekkel (jelen esetben a tudományos munka során elfoglalt gyakorlati állásponttal). Einstein példának okáért egy ízben kijelentette, hogy panteistának tartja magát — s fizikusi munkásságának tetemes hányadában vitathatatlanul materialista álláspontból szemléli a világot. Ugyanakkor antipozitivistának vallotta magát — s komoly és elmélyült tanulmányozást igényelhet olykor annak kielemzése, hogy egy-egy definíciójának csak fogalmazása pozitivista, vagy lényegében is az ?... Így aztán nem meglepő, hogy Einstein filozófiai alapállásával kapcsolatban csinos idézetcsokrokat lehet összeállítani, egymásnak ellentmondó és egymást kizáró vélekedések alátámasztására. Ezért mindenesetre óvakodnunk kell attól, hogy Einstein egy-egy korszakából vagy munkásságának egyes mozzanataiból kiindulva, egész szemléletére vonatkozó generális megállapításokat vonjunk le. Az einsteini életmű egészének és összességének perspektíváiból kiragadott mozzanatokkal ugyanis egyoldalú és megtévesztő képet rajzolhatunk, egyik oldalon egy idealistáét, a másikon — esetleg nem is sokkal több erőfeszítéssel materialistáét.

Ha az einsteini szemlélet egészét illetően kialakult nézetek ismertetésére nem is térhetünk ki, e szemlélet kialakulásának egyik mozzanatával mégis részletesebben kell foglalkoznunk, a relativitáselmélettel kapcsolatban. Einstein intellektuális fejlődésében volt egy fontos találkozási pont kora polgári filozófiai irányzatainak egyikével. A következő bekezdéseknek ezt a címet adhatnánk: Einstein és a pozitivizmus.

Az einsteini pályakezdés éveiben, a tizenkilencedik és a huszadik század mezsgyéjén rendkívül befolyásoló szerepet játszott Ernst Mach, a századforduló évtizedeinek fizikus-filozófusa és az ő égisze alatt virágzó pozitivista iskola. E fizikus-filozófus iskola vélekedései közül most csak a minket érintő legfontosabbakat idézzük emlékezetbe: Mach szerint, aki a megismerésben csak a közvetlen empíriának enged szerepet, a világ érzetek komplexuma, s a tér, illetőleg idő sem más: érzetsorok rendszere.

Nem vitás — s ezt maga Einstein sem mulasztotta el hangsúlyozni — , Mach nézetei mély hatást gyakoroltak az einsteini gondolatvilág kezdeti fejlődésére. Elsősorban Mach szkepticizmusa és a meggyökeresedett, dogmatizált fogalmakkal szemben táplált kritikai hajlandósága, így nem meglepő, hogy e hatás nyomai szembeötlőek, olykor filológiai módszerekkel kimutatható módon is, egy-egy einsteini megfogalmazásban, fogalomalkotásban, különösen a korai években.

A machi pozitivizmus egészét azonban valószínűleg már legkorábbi korszakában sem igenelte. Erre utal például az a tény, hogy amint említettük statisztikus fizikai kutatásaiban elsősorban olyan kérdésekkel kezdett foglalkozni, melyeknél a molekulák reális létének közvetlen bizonyítékát várta, amikor Mach, az empirikus, mereven elutasította az atomizmusnak még a feltevését is. Fejlődésének további szakaszaiban egyre határozottabban elszakadt és szembe is fordult a machizmussal.

Mindehhez három adalékot. Először egy kortársi Vallomás: Ph. Frank, Einstein polgári szemléletű életírója, egy 1929-es fizikus-konferencia felidézése során elmondja, hogy valamelyik résztvevő " ... kifejtette, hogy Einstein elutasítja Machnak és követőinek pozitivista teóriáit, s hogy a fizikai törvényeket többnek tekinti a megfigyelések kombinációinál. Hozzátette még, hogy Einstein Planck szemléletével ért egyet abban, hogy a fizikai törvények térben és időben olyan realitást írnak le, amely tőlünk független". Eszerint. fizikus körökben már az időben nyilvánvaló volt, hogy Einstein — legalábbis eltökéltségében — antipozitivista... De talán nem is kellett volna ily messzire mennünk illusztráló példáért: emlékezzünk csak vissza, hogy Einstein főleg azért nézte kritikus szemmel a kvantummechanika fejlődését, mert a statisztikus-valószínűségi szemlélet hívei nézőpontjukat *végső* bázisnak tekintették. Einstein álláspontja szerint azonban a fizikus nem állhat meg a tapasztalati tények összegezésénél, de még rendszerezésénél sem. Ha valaki, hát Einstein tisztában volt a statisztikus leírás létjogosultságával. De azt nem ismerhette el, hogy itt *elvben is* véget ér a fizikus hatásköre. A további (statisztikán túli) összefüggésekről való elvi lemondás — Einstein véleménye szerint — a kvantummechanikát az empirikus leírások közé utalja, s ezzel a megítélése szerint "lényegében pozitivista" magatartással (melynek ismeretelméleti szubjektivizmusára és agnosztikus veszélyeire helyesen mutatott rá) nem azonosíthatta magát.

És végezetül: habár ez legfeljebb a szubjektív szándékok, nem pedig a tényleges helyzet szempontjából perdöntő, érdemes meghallgatni magát Einsteint is, aki élete végén így írt Machhoz fűző viszonyáról: "Ezt a (mechanikába, mint minden fizikai jelenség végső magyarázatába vetett — *M.L.)* dogmatikus hitet a mechanikatörténetéről szóló könyvében Ernst Mach ingatta meg; könyve épp ebben a tekintetben diákkoromban nagy hatással volt rám. Mach igazi nagyságát csalhatatlan kételyében és függetlenségében látom; fiatalabb éveimben azonban Mach ismeretelméleti felfogása is nagyon befolyásolt. Ezt ma már lényegében tarthatatlannak találom."

Összegezve: le kell szögeznünk, hogy a machizmus hatással volt Einstein fejlődésére, s különösen a korai években, azokban az években, amikor a relativitáselmélet fogalomalkotásai megszülettek. Hogy ez a hatás milyen erős volt, milyen mélységig éreztette nyomát a tér és idő analízisén, megmaradt-e a megfogalmazások felszínén, vagy esetleg a lényeget is érintette — ezt természetesen csak a részletes és alapos analízis döntheti el. Ugyanakkor az is tény, hogy Einstein eltökéltségében és szellemi alapállásának egészében soha nem volt machista (s ha netán nem egyértelmű fogalmazásokkal találkoznánk műveiben, tévedés lenne azokat egyszerűen eleve "machisták"-nak tekinteni, szerzőjük *vélt* általános szemlélete alapján). Nem volt és nem is lehetett machista, mert fizikusi gyakorlatában csakúgy, mint *expressis verbis* is feltétlenül, szünet nélkül és rendíthetetlen határozottsággal *vallotta és hangsúlyozta a tudattól független világ* létezését.

*

De miért érdekes mindez — kérdezheti az olvasó. Einstein világnézete Einstein magánügye; minket pedig a fizikája érdekel ... Ha Einstein egész életében a fizika valamelyik korlátozott és szűk részletkérdésével foglalkozott volna csupán, valóban kevéssé jelentős lenne magánvéleménye a világ minéműségéről, s eddigi problémázgatásunk valóban az egyéni belügyekbe való indokolatlan s talán ízlést bántó beavatkozásnak tűnhetne. Ám Einstein munkássága a fizikai világképet gyökereiben érinti, s kérdéses, hogy a magánember Einstein világnézeti korlátai befolyás nélkül múltak-e el a fizikus-életmű fölött. Einstein világszemlélete természetesen csak ilyen vonatkozásban tart számot kutatásra (s ha az olvasó visszalapoz, maga is meggyőződhet, hogy kizárólag a fizikával kapcsolatban vizsgáltuk nézeteit); ilyen vonatkozásban azonban nemcsak lehet, de kell is foglalkozni e kérdésekkel. S ezt leginkább Einstein fő műve, a relativitáselmélet illusztrálja, mellyel kapcsolatban szemléleti gyökerekből eredező valós problémák jelentkeznek az elmélet értelmezésében, s ezeket röviden érintenünk is kell.

A tényállás a következő. A relativitáselmélet — mint minden fizikai elmélet — több önmaga matematikai csontvázánál. A teóriához ugyanis, a hátteréül szolgáló tények szövevényén kívül, szorosan hozzátartoznak azok a definíciók, megfogalmazások, amelyek révén a matematikai szimbólumok és összefüggések értelmezést nyernek — s ezek révén az elmélet egésze is. Nos, ami a relativitást illeti, itt az a — a fizika gyakorlatában viszonylag ritkán előforduló — helyzet, hogy az elmélet eredeti einsteini konstrukciója és megfogalmazása lehetőséget nyújt a teória egészének különféle *értelmezésére.* (Az einsteini világszemlélet körvonalazását célzó tanulmányok épp azért születnek, hogy e világkép egészének jellegéből kiindulva döntsék el, hogy maga Einstein idealista vagy materialista módon értelmezte-e saját elméletét. Hogy ez az eljárás — éppen Einstein esetében — mennyire jogosult, azzal itt most nem foglalkozunk.) Erről szólván, még egyszer külön is fölhívjuk a figyelmet arra, hogy itt — részben az elmélet szerkezetéből és előadásából származó —*interpretációs problémákról* tájékoztatjuk az olvasót, melyek nem érintik az elmélet matematikai vázát; és főleg nem az elmélet révén nyert konkrét fizikai (kísérleti) eredményeket (tömeg-energia egyenértékűsége, különböző relativisztikus effektusok stb.); ezek *tények,* melyeket ügyetlen fizikus sem vitathat, és nem is vitat.

Különféle értelmezésekről szólván, a dialektikus materializmus talaján álló gondolkodó számára természetesen az jelenti a problémát, hogy a relativitáselmélettel kapcsolatban számos idealisztikus interpretáció is született; aminek következtében egyik oldalról egyes idealista filozófiai irányzatok megkísérelhetik az elmélet — és alkotója — kisajátítását; másfelől, a dialektikus materializmus oldaláról, egyes tudósok gyanakvással szemlélik e gondolati építményt, sőt "machista elmélet" vagy "reakciós einsteinizmus" megjelöléssel, illetve részben vagy egészében elutasítják azt.

A kérdés lényege természetesen ez: az értelmezéssel kapcsolatos torzításokért mennyiben felelős maga az elmélet, annak felépítése, szerkezete, fogalomalkotásai, előadása; kimutatható-e valami szükségszerű kapcsolat az idealisztikus értelmezések és a fenti tényezők között (vagy más szóval: Einstein világnézeti bizonytalansága mennyire játszik bele az általa alkotott elmélet felépítésébe és fizikai teljesítőképességébe); és végül: indokolt-e az elmélet egészének elvetését s valami más jellegű elmélettel való pótlását indítványozó álláspont?

*

A relativitáselméletet előadó tanulmányok olvastán az első mozzanat, ami szembetűnik, hogy a szerzők — s közöttük maga Einstein is — az egész gondolati építmény megalapozását, a térbeli távolságok és az időtartamok fogalmának elemzését a *vonatkoztatási rendszer bevezetésével* kezdik, s elképzelt megfigyelők szerepeltetésével folytatják le. Adva van két — egymáshoz képest egyenes vonalú, egyenletes mozgást végző — koordináta-rendszer, bennük egy-egy megfigyelő; az egyes megfigyelők a saját rendszerükben nyugalomban vannak, de egymáshoz képest saját rendszerükkel egyetemben természetesen ugyancsak elmozdulnak. Miután e mozgás tényét tudomásul vettük, és fontosságát is tudatosítottuk önmagunkban, végül is nem lep meg, hogy mondjuk, egy távolság mérőszámául más és más értéket kap a mellette nagy sebességgel elsuhanó, illetőleg a hozzá képest nyugalomban levő megfigyelő...

E szemléletünknek mégis oly szokatlan eredmény tudomásulvétele és megemésztése mindenesetre hosszas töprengést igényel, s eközben fölvetődhet bennünk a kérdés: vajon nem elvi mérési hiba okozza-e a mérőszámokban mutatkozó eltérést? Vagy esetleg nem is elvi, de gyakorlati hiba: mondjuk esetleg épp a megfigyelő megfigyelő-volta, azaz az emberi megfigyeléssel együtt járó — s gyakorta igencsak rejtett — szubjektív mozzanatok valamelyike?

Nem tagadhatjuk, hogy a "megfigyelő" gyakori emlegetése némi szubjektív színt kölcsönöz ennek az amúgy is gyanakvást ébresztő gondolati kísérletnek. Hasonlóképpen a koordináta-rendszer választási önkényességének visszatérő hangsúlyozása (ez az általános relativitáselmélet megalapozása során különösen elmélyül)... Csak fokozza még e hatást az elmélet elnevezése: megszoktuk, hogy hétköznapjaink relativizmusa alanyiságunkhoz kötődik (ami az egyiknek "jó", nem föltétlenül az a másiknak: a békának "előnyös", hogy megeszi a legyet, a légynek nem stb.)... Mindezek a hatások összegeződvén, előfordulhat, hogy az elemzés megindította kétely gondolatmenetünket abba az irányba löki tovább, hogy úgy képzeljük: a térbeli távolságok és az időtartamok mérőszáma valamiképpen a megfigyelő szubjektumán múlik (akárcsak a koordináta-rendszer önkényes választása) — s továbbmenve: maga a tér is, az idő is a szubjektum teremtette valami. (Talán a megfigyelő bizonyos érzetkomplexumainak rendje, miként ezt Mach állította; vagy esetleg a megfigyelő elméjének *a priori* formái: üres tudati dobozok, melyekbe besorolja a világ eseményeit, akárcsak az irodai kartotékokat a megfelelő rekeszekbe, hogy rendet teremtsen közöttük — miként ezt Kant tanította.)

Mondanunk sem kell, a gondolatmenet ilyen irányú *hibás* folytatása éppenséggel *nem szükségszerű* következménye a — *félreértett* — premisszáknak. Ami az elnevezést illeti, a relativitásnak semmi köze a köznapi élet relativizmusához. Ami pedig a lényeges motívumokat — ezekkel kapcsolatban ki kell sarkítanunk néhány esetleg elsikkadó mozzanatot.

Nem szabad szem elől tévesztenünk, hogy a megfigyelők, akiknek szerepe az, hogy valamiképpen foghatóbbá tegyék az önmagában nagyon is elvont gondolatmenetet, jelen esetben pontos és egyforma mérőrudakkal, illetve órákkal látják el megfigyelői szerepkörüket: tevékenységük e műszerek rendeltetésszerű alkalmazásában merül ki, esetleges szemhibák vagy indulati elemek kizárásával. (Tulajdonképpen talán jobb lenne, ha emberi megfigyelők helyett inkább valami elektronikus szuperautomatát képzelnénk, mely képes a mérési feladatok ellátására, s egyúttal garantáltan mentes mindazon fogyatékosságoktól, melyek emberi megfigyelő esetében lehetségesek.) E megfigyelők tehát csupán pedagógiai szerepet töltenek be a relativitáselmélet előadásánál — szemben a *koordináta-rendszerrel,* mely *lényeges* és *alkati* eleme a gondolatmenetnek, amint erre alább visszatérünk —, s a fizikai mondanivaló megfogalmazásánál teljességgel eltűnnek: *fontos mozzanat* (s ha nem gondolnánk rá, P.G. Kard szovjet tudós nyomatékosan fölhívja erre a figyelmünket), hogy *a relativitás elvének megfogalmazásában semmiféle szubjektív vagy szubjektivista árnyalatú mozzanatnak nincs helye.* S ezt a tényt nemcsak Einstein összes megfogalmazásaival kapcsolatban kell tudomásul vennünk; a relativitáselmélet legnevesebb továbbfejlesztőinek (mint von Laue, aki rendszerré építette az einsteini gondolatokat) és fizikus-interpretátorainak (mint Pauli stb.) megfogalmazásában sem találunk szubjektív motívumokat a relativitás elvének megfogalmazásában.

A relativitás elve einsteini megfogalmazásának tisztaságát azért kell nagyon nyomatékosan hangsúlyozni, mert ez lehet az a trambulin, ahonnan a relativitáselmélet idealista-szubjektivista interpretációi elrugaszkodhatnak. (Persze, nem a "megfigyelők"-re, hanem az önkényesen választható koordinátarendszerre s a vonatkoztatás mozzanatának a gondolatmenetben játszott szerepére támaszkodva). Innen rugaszkodhatnak el, hogy azután a tér és idő objektív voltának tagadásánál fejesel jenek bele — a szubjektív idealista filozófiába.

A materialista tudósok tetemes többségének véleménye szerint ez az elrugaszkodás logikailag hibás, épp a relativitás elvének egyértelműsége miatt. Nem vitatható, hogy a koordináta-rendszer és a vonatkoztatás lényeges mozzanatai Einstein okfejtésének; ámde ez — vallja ez az álláspont — önmagában nem ad semmiféle alapot pozitivista következtetések levonására. Még akkor sem, ha ez a kiindulás — amint ezt *A. D.* Alekszandrov meglepő és figyelemre méltó észrevétele állítja — fejtetőre állítja a dolgok logikáját.

"Mint ismeretes, a relativitáselmélet kifejtésének olyan változatai is lehetségesek, amelyek a fénysebesség állandóságának törvénye helyett valamilyen más törvényt vesznek alapul. Azonban minden esetben így vagy úgy, az alapvető az inerciális vonatkoztatási (koordináta) rendszer és a kiinduló szempont a relativitás szempontja — nem a tér-idő abszolút szerkezete (geometriája), nem a valóság »önmagában«, hanem a valóság, viszonylagos megjelenéseiben. A nem-relatív is a viszonylagoson keresztül mint a koordináta-transzformáció invariánsa határozható meg.

Ez a módszer ahhoz hasonló, mint amikor egy tárgy formáját különböző vetületei segítségével reprodukáljuk. Felesleges lesz talán rámutatnunk arra, hogy ez a megközelítés teljesen jogos, miután ténylegesen a helyes elméletet adja. Önmagában pedig nem vezet »a tárgyaknak a viszonyokban való feloldódásához«, és kiindulópontja: a vonatkoztatási rendszerek, valamint a tárgyak és a folyamatok megjelenései a vonatkoztatási rendszerekhez való viszonyukban egy cseppet Bem kevésbé reálisak, mint maguk a testek és a folyamatok — mint ahogy reálisak a tárgyak árnyékai, melyek egyben azok vetületeit adják.

Ennek ellenére e módszernek megvannak a maga nehézségei és hiányosságai.

Először is, ez a vizsgálat nem felel meg kellő módon a tárgy objektív logikájának — hiszen, e logikának megfelelően, elsődlegesnek és a tér-időnek mint az anyag objektív létezési formájának, magának a tárgynak és tulajdonságainak kellene lennie, ezek viszonylagos megjelenése valamilyen módon másodlagosként lép fel...

Másodszor, az elméletnek a viszonylagosból kiinduló felépítése, ugyanakkor, amikor a tárgy logikájának nem felel meg, megfelel a megfigyelés, a mérés, az objektum tanulmányozása logikájának... Ezért az elmélet azon megközelítése, amely abból indul ki, amit a fizikus vonatkoztatási rendszerében mér vagy megfigyel, bizonyos értelemben sokkal egyszerűbb és a fizikushoz közelebb álló...

Ez a megközelítés azonban nagy veszélyt is rejt magában, amelyet az idealizmus ki is használ. Ezen az alapon könnyen keletkezik olyan elképzelés, hogy a viszonylagos a megfigyeléssel vagy a méréssel kapcsolatos, hogy a megfigyelő nézőpontjától függ, s végül, hogy nem objektív, hanem szubjektív...

A relativitáselmélet idealista értelmezésének fő vonása az objektív viszonylagosnak szubjektívval való helyettesítése... "

Hogy az "objektív viszonylagosnak" a "szubjektívvel" való összekeverése esetleg Einsteinre való hivatkozással történik, annak a fentieken túl — ha alapja nem is, de indítéka lehet az is, hogy ő maga a részletkérdések során is beleesik olykor a kétes fogalmazások hibájába. Egyes írásaiban például, miközben kidobja a léghajóból a klasszikus fizika newtoni "abszolút tér és idő"-fogalmát (mivel, úgymond, a fizikusnak nem áll módjában, hogy óráját hozzáigazítsa az "abszolút időhöz"), nem foglal egyértelmű és határozott kijelentésekkel állást a tér és idő abszolút volta — azaz objektív volta — mellett. (Hadd figyelmeztessünk: az abszolút tér léte — és a tér abszolút léte: ez két merőben különböző mozzanat!) Bonyolítja az értelmezés nehézségét, hogy Einstein, amíg — fizikusi feladatkörének megfelelően — időmérési, illetve óraegyeztetési eljárást definiál, állandóan az idő definiálásáról beszél (s ezt — a filozófia számára lefoglalt terminus miatt — arra lehet érteni, hogy eljárását filozófiai fogalomalkotásnak tekinti; holott csupán pongyola szóhasználattal állunk szemben)... — Mindezen mozzanatokból megint csak tévesen vonná le az olvasó azt a következtetést, hogy Einstein nem tartotta objektív tényezőknek a teret és időt. Igaz, határozott kijelentéssel állást nem foglal a tér és idő objektív volta mellett — de az ellenkezője mellett sem. És ahogy — fizikusként — kezeli e fogalmakat, az érzésünk szerint kevés kétséget hagy felfogásának lényegét illetően.

Az iménti s csak nagyon vázlatosan érintett problémák felelősek azért, hogy a relativitáselmélet einsteini gondolatrendszerének megítélésében nem teljesen egyértelmű az álláspont a dialektikus materializmus talaján álló szakemberek soraiban. A lényeget tekintve két csoportba oszthatjuk a nézeteket.

A marxista szaktudósok egyik csoportja, s a megnyilatkozásokból ítélve többségük ebbe a csoportba sorolható, esetleg több-kevesebb kritikai megjegyzéssel élve ugyan, de lényegében elfogadja a relativitáselmélet einsteini felfogását. Ennek az álláspontnak az alapja az a felismerés, hogy a relativitáselméletnek semmi köze a relativizmushoz: éles különbséget kell vonni a relativitáselmélet és a körülötte keletkezett szubjektivista interpretációk között, melyek kapcsolata a teória lényegi mozzanataival — e vélemények vallói szerint — nem szükségképp. Éppen ellenkezőleg: a relativitás elve, az elmélet egyik alappillére, ment minden szubjektivizmustól. Meglehet, az elmélet megfogalmazása során Einstein ólt a machista terminológiával — gondolatainak azonban csak köntöse machista, lényege nem. Kritikával lehet illetni az elmélet felépítését (miként Alekszandrov tette), de míg " ... A kérdés ilyen megközelítése imponál a pozitivizmusnak", "természetesen, e felfogásban önmagában semmiféle pozitivizmus nincs", így azután — bár egyesek szerint "szükséges nemcsak az elmélet filozófiai értelmezésének, hanem fizikai tartalmának és alapjainak mélyebb értelmezése is" (Alekszandrov) — elutasítani nem lehet az einsteini relativitáselméletet, annál is kevésbé, mert a fizika fejlődése az elmúlt évtizedekben perdöntő bizonyítékokat szolgáltatott mellette: kísérleti tényeket, melyek értelmezése a relativitáselmélet nélkül elképzelhetetlen.

E felfogással szemben gyökeresen más nézetet vall a dialektikus materializmus talaján álló fizikusok és filozófusok egy — bár az előbbinél lényegesen kisebb — csoportja. E szakemberek, ilyen vagy olyan okok miatt, nem ismerik fel, vagy nem ismerik el, hogy a relativitáselmélet eredeti einsteini megfogalmazása és az elmélethez tapadó idealisztikus interpretációk lényegükben függetlenek egymástól. Találkozunk olyan nézettel, mely szerint a relativitás elve már önmagában is lényegében pozitivista. (Ha Einstein gondolatait részleteiben analizáljuk — mondják e felfogás képviselői —, kiderül, hogy Einstein kiindulási alapjául Mach által megfogalmazott filozófiai fogalmak szolgálnak. Az einsteini időfogalom szoros rokonságot mutat Mach-éval; márpedig, ez a tény, Mach idealista tér- és időkoncepciója — melyet annak idején maga Lenin boncolt ízekre és utasított vissza — valóban mélységesen ellentétben áll a materializmus felfogásával.) Ha pedig a relativitáselmélet egyik alappilléréül szolgáló relativitási elv — ha esetleg latens módon is — de lényegében pozitivista, le kell vonni az elmélet egészét érintő konzekvenciákat. Mert igaz ugyan, hogy az elmélet ért el sikereket, s ez oly módon volt lehetséges, hogy felismert egy lényeges fizikai törvényt; de ezt a fizikai törvényt eltorzítja, s ennyiben esetleg a továbbfejlődés gátjává válik; ezért kézenfekvő a gondolatrendszer elutasításának javaslata, annál is inkább, mert e gondolatrendszer számos eszmei és szemléleti tévedést hordoz, így többek között elszakítja a teret és időt az anyagtól.

Az utolsó helyen említett mozzanatot azért is emeltük ki külön, mert itt érzékelhetjük, mily diametrálisan ellentmond egymásnak a relativitáselmélet imént ismertetett két megítélése. Az első megítélés szerint ugyanis Einstein tér- és időkoncepciója nemhogy elszakítja, de — a fizika történetében először — összeköti a teret és időt az anyaggal (gondoljunk csak például arra, hogy az általános relativitáselmélet szerint a fizikai tér struktúráját a benne elhelyezkedő tömegek szabják meg stb.), s ilyen értelemben Einstein munkásságában a dialektikus materializmus tér- és időértelmezésének első csíráit kell üdvözölni. E felfogás illusztrálására lássunk egy idézetet a neves szovjet fizikustól, Vavilovtól (véleményét Ph.A. Frank könyve nyomán idézzük: ".. a »mechanikus« materializmus elvetése után egy vezető orosz fizikus, Vavilov kimutatta, hogy a relativitáselmélet teljességgel össszeegyeztethető a materializmussal, ha e szót Marx, Engels és Lenin szerint értelmezzük. Az 1939-ben megjelent cikkben Vavilov világosan kimondja:

"... Einstein elméletében a téridő magának az anyagnak elválaszthatatlan tulajdonsága. Ez Einstein általános relativitáselméletének alapvető gondolata. Az idealista felfogást a térről-időről (mely szerint ezek gondolati kategóriák) kiseperték... Előttünk állnak a tér és idő dialektikus materialista értelmezésének első — bár még távolról sem tökéletes — körvonalai... "

Ám hangsúlyozzuk ki újból: a relativitáselmélet filozófiai alapon történő "elvetését" indítványozó javaslatok napjainkra szinte maradéktalanul elenyésztek. Olyannyira, hogy erről az egész kérdésről, mint történeti érdekűről, talán inkább már múlt időben kellett volna beszélnünk.

AZ ELMÉLET ÉS AMI UTÁNA KÖVETKEZIK

Az olvasót a fizika kétségtelenül fáradságos vidékei után most végezetül ismét a történelem lankásabb tájaira kalauzoljuk. Az einsteini életműnek ugyanis, s elsősorban legközpontibb és legnagyobb jelentőségű összetevőjének, a relativitáselméletnek — a tényekkel, eszmékkel és elméletekkel folytatott kimerítő intellektuális küzdelmen, belső fejlődéstörténeten túlmenően — külső története is van. Mégpedig nem is egysíkú története.

Tekintsünk először az emberi életnek arra a területére, ahová a relativitáselmélet lényegénél fogva tartozik: a tudományos világra. A huszonhat éves Albert Einstein első forradalmasító gondolatait ez a világ is csak lassan, lépésről lépésre tette magáévá. Részben, mert először föl sem figyeltek ezekre a gondolatokra. S részben azért, mert e gondolatoknak — éppen újszerűségüknél fogva — meg kellett küzdeniük a régi eszmék és régi gondolkodásmód ellenállásával. Mindenesetre megkönnyítette a küzdelmet, hogy a fizikus világ néhány elismert tekintélye határozottan kiállt az új eszmék mellett: a híres Madame Curie (a tiszta rádium leválasztásáért folytatott harc hőse) és Henry Poincaré (a nagy matematikus, aki maga is közel járt a relativitás elvének a kimondásához) tudóshoz méltó elfogulatlansággal, határozottan síkraszállt az új gondolatok térhódításának elősegítéséért. S legfőképpen Minkowski, aki — túl azon, hogy a téridő geometriai kidolgozásával jelentősen továbbfejlesztette magát az elméletet — a relativitáselmélet megismertetésében is komoly szerepet játszott.

Négy év telt el, amíg a fizikusok világa igazán fölfigyelt a speciális relativitáselmélet gondolatára. A következő évtized a gondolatok továbbfejlesztésének — és a vitáknak az időszaka. Mégpedig a gyakran késhegyre menő, a személyeskedéstől sem visszarettenő vitáké.

S míg 1916-ra megszületett, három évvel később pedig ragyogó kísérleti igazolást nyert az általános relativitáselmélet is, a speciális elmélet állításai is kiállták a viták tüzet: a múló idővel egyre nyilvánvalóbbá lett, hogy belső ellentmondásokat hiába is keresnénk az elméletben. (E folyamat azonban még 1921-ben is messze volt attól, hogy lezártnak tekinthessék. Amit kézenfekvőén mutat az a tény is, hogy Einstein a fotoelektromos hatás elméletének kidolgozásáért kapta meg a tudományos világ legnagyobb kitüntetését, a Nobel-díjat, s nem a relativitáselméletért... A tudományos közélet, mint látszik, az óvatosnál is óvatosabb, ha teória elismeréséről van szó.) Közben azonban — talán éppen az általános elmélet nyilvánvaló és a tudományos világ határain túlnyúló sikere miatt — újabb vitapartnerek kerekedtek, s egyre gyakrabban a fizika hivatottainak körén *kívül.* Ezekről írta von Laue 1921-ben: "A relativitáselméletnek ma sok rajongója és sok gyalázója van. A leghangosabbaknak mindkét táborban van egy közös vonásuk: vajmi keveset értenek belőle". . . Ez azonban már a relativitáselmélet *másik* történetéhez tartozik.

*

A relativitáselméletnek ugyanis van egy második története is. Kevés tudományos elmélet borzolta fel annyira a köznap emberének érdeklődését s váltott ki oly széles körű érdeklődést a kívülállók táborában, mint Einstein műve.

Ennek a szokatlan s olykor kétes értékű érdeklődésnek ébresztői részben azok a polgári bölcselőcskék, akik egy kukkot sem értve a lényegből, s összekevervén a fizikai relativitást a hétköznapi élet relativizmusával, megkísérelték "átültetni" az elmélet eredményeit. A másik, öntudatlan és akarata ellenére népszerűsítő tényező a tudományosak és áltudományosak azon csoportja, akik — bármennyire meghökkentő, ami most következik — faj mitológiai alapon emeltek kifogásokat a relativitás elmélete ellen. Itt érdemes egy pillanatra elidőzni.

Mint már említettük, Einstein a kilencszáztízes évek közepén Berlinben, a Második Birodalom fővárosában — vagy, ami ezzel egyet jelent, a "német szellem" fellegvárában — működött. Hadd hangsúlyozzuk: ez a "német szellem" korántsem azonos Geothe, Heine, Hölderlin, Hegel, Kari Marx, Max Plánok vagy éppen Einstein szellemével; de még csak Immánuel Kant szellemével sem, akire pedig oly gyakran hivatkozik. Hivatkozik, lévén legjellemzőbb vonása a korlátoltság. Az egykönyvű kispolgár korlátoltsága ez, aki jól-rosszul bebiflázván egyet s mást Kantból, *a priorit,* kategóriát meg kategorikus imperatívuszt, meghökkentőn tapasztalta, hogy Einstein nézetei, már amennyit megértett belőlük, nem azonosak Kantéival. Mit szól ehhez Kant? — kérdezték Einsteint, s mikor kiderült, hogy Einstein erre legkevésbé sem kíváncsi, menten kiderítették, hogy gondolatai idegenek a "német szellemtől". Zsidó szellemi dugáru, amely megfertőzi a germán gondolkodást, sőt: "bolsevizmus a fizikában!" — ordítozták, akik jól emlékeztek Einstein háborúellenes magatartására és szociális kérdések iránti fogékonyságára.

A relativitáselmélet faji alapon történő elutasítása — nincs az emberiségnek olyan mértéke, mely erre az ostobaságra alkalmazható lenne. S ezt bárki érzékelheti, aki csak egyetlen fizikakönyvet is kézbe fogott már életében. A fizikai elméletek helyességének kritériumaihoz ugyanis, a dolog természete folytán, semmi köze sincs annak, hogy ki állította föl az elméletet. Ha az elmélet mentes a belső ellentmondásoktól, és helyesen írja le a valóságot, akkor Kamcsatkában vagy a Tűzföldön csakúgy érvényes, mint bárhol egyebütt e bolygón, beleszámítva a "német szellem" felsőbbrendű faj lakta hazáját is. (Egész addig, amíg nem fedeznek fel olyan tényeket, amelyeket már nem tud magyarázni, vagy föl nem állítanak egy, a valóság szélesebb körére érvényes, mélyebbre hatoló elméletet.) Annál megdöbbentőbb, hogy ehhez az ostobasághoz egy valóban kiváló fizikus, Lénárd Fülöp is odaadta a nevét. A fényelektromos jelenség kísérleti felderítője rendkívüli rokonszenvvel viseltetett a "német szellem" irányában. A germán faji mítosz e bajnokának hihetetlen lelkesedése valószínűleg arra vezethető vissza, hogy származásával "valami nem volt rendben", lévén pozsonyi születésű, akinek ereiben netán némi magyar vér is csörgedezett. A neofita hitbuzgalom később nyílt elmezavarrá fejlődött, s Lénárd, aki kifejezetten fasiszta lett Hitler oldalán, szenvedélyes és szinte személyes gyűlölettel gyűlölte Einsteint, a "zsidót". Amikor Hitler hatalomra jutott, Lénárd mindent elkövetett, hogy ha már Einsteint magát nem tudta, legalább a gondolatait kiirtsa Németországból: a náci Harmadik Birodalomban a relativitás fizikai elmélete indexre került. "Remélem — ezt már a hitleri hatalomátvétel után mondotta ugyan egy kutatóintézet felavatásán, de hűen korábbi önmagához is —, ez az intézet harcálláspontja lesz a tudományban megnyilvánuló ázsiai szellem ellen irányuló harcnak. Führerünk már kiküszöbölte ezt a szellemet a politikából és a nemzeti gazdaságból, ahol marxizmus néven ismeretes. A természettudományban azonban, különös tekintettel Einsteinre, még létezik. Fel kell ismernünk: méltatlan egy germánhoz, hogy egy zsidó szellemi követője legyen. A természettudomány... teljességgel árja eredetű, s a németeknek ma meg kell találniuk a saját útjukat az ismeretlenbe. Heil Hitler!"

Ebből a szellemből fakadtak a nyilvános sajtótámadások, provokatív gyűlések a húszas évek eleji Németországban a relativitás, közvetve Einstein személye ellen. És mit tett Einstein? Angyali naivitással eljárt a gyűlésekre, s a szünetben vidáman köszöngetett az ismerősöknek! Az acsarkodás és a támadások azonban elvétették a célt: széles körben megismerték a relativitáselmélet alkotójának nevét, és érdeklődni kezdtek gondolatai iránt.

A hivatalosak és a hívatlan félhivatalosak világa után a köznap embere is megismerkedett az elmélettel Európa-szerte. Az egyetemi tanárok után most a kisvárosi gimnáziumok paptanárai cáfolták meg egyszer s mindenkorra a teóriát a helyi szellemi orgánumok önképzőköri színvonalú hasábjain. Az eredmény most sem maradt el: a relativitás elmélete szalontársalgási téma lett. S a szalonok után a vicclapok, kabarétréfák és kuplék témája is...

A történelem ez apró fintorai azonban nyilván nem érinthették a nagy alkotást, korunk fizikájának az emberi megismerés és munka nagyszerűségét hirdető monumentumát.

BEFEJEZÉS

Hátra lenne még az einsteini életmű méltatása, kivívott helyének megjelölése a fizika és az emberi szellem értékrendjében. A jegyzetíró legkínosabb feladata. Amit ugyanis itt elmondhat, az ma már valójában közhelyszámba megy.

Planck mondotta Einsteinről, még 1910-ben: "Ha Einstein elmélete beigazolódik, ahogy én várom, a huszadik század Kopernikuszaként fogják emlegetni." Nagy szó — és mégis kevés Einstein helyének kimérésére. Még Novobátzky professzor ítéletét sem érezhetjük túlzónak, aki — Einstein halála után — Börne sorait idézte: "Meghalt egy férfi és a század le fogja hunyni pilláit, mielőtt hasonló nagyságot látott volna."

Ez valószínűleg így lesz. Gyakran szokták a kor fizikájának két alappillérekként emlegetni e fizika két sajátosan huszadik századi ágazatát, a relativitáselméletet és a kvantummechanikát. Az első Einsteinnek szinte egyedüli alkotása, a második megszületését és fejlődését Einstein döntő és elhatározó módon befolyásolta. A relativitás elméletének szerepe is túlnyúlik önmagán: az elméleti fizikus munkájának egyik általános zsinórmértékéül szolgál (bármily térre irányuljon is a kutatás): eredményét csak akkor tekintheti általános természettörvénynek, ha az "összefér" a relativitáselmélet normáival (szaknyelven: ha a Lorentz-transzformációval szemben kovariáns).

S a gazdag részeredményeken túl is van Einsteintől még egy nagy öröksége a modern kor fizikájának: egy új nézőpont. A fizika geometrizálásának gondolata.

*

A munkában és eredményekben egyaránt gazdag élet s a fizika fejlődésére gyakorolt sokrétű hatás láttán meg kell állapítanunk, hogy a tudomány csak önmagához volt következetes, amikor az ércnél maradandóbb einsteini életmű mellé saját közegében, saját anyagából formált emléket is állított, s a 99-es rendszámú — mesterségesen előállított — transzurán elemet nevéről *Einsteiniumnak* nevezte el. (1964)

Maróti Lajos

JEGYZETEK AZ UTÓSZÓHOZ

Az alábbiakban az idézetek lelőhelyével és egyéb utalásokkal együtt feltüntetem a publikációk helyét és időpontját. Ahol a forrásmunka címét eredetiben, a megjelenés nyelvén idézem, és nem hivatkozom külön a fordítóra, az idézetet saját fordításomban adom. E tanulmány magva Einstein *A speciális és általános relativitás elmélete* c. könyvének 1945 utáni első magyar kiadásához (Gondolat, Budapest, 1963) írott utószó — erre akartam utalni azzal, hogy változatlanul megtartottam a bevezetést.

1. Az epizódot emlékezetem szerint Carl Seelig — számomra ma már hozzáférhetetlen — Einstein-életrajza említi meg (Albert Einstein, *Lében und Werk eines Genies unserer Zeit*). (Európa Verlag A. G., Zürich, 1960.)
2. E tanulmány megírásánál egyik alapvető forrásmunka volt az emlékkötet, melyet Einstein hetvenedik születésnapjára állítottak össze a modern fizika akkor élt legnagyobb reprezentánsainak közreműködésével. P.A. Schilpp: *Albert Einstein: Philosopher — Scientist (The library of living Philosophers,* Tudor Publishing Comp., New York, 1949), s melyet maga az ünnepelt látott el előszóval *("Autobiographical Notes",* életrajzi jegyzetek), s amelynek végén reflexióit foglalta össze a kötet dolgozataival kapcsolatban. Tanulmányom megírásakor az eredeti (angol nyelvű) Schilpp-kötetből idéztem; később az "önéletrajzi jegyzetek" megjelent magyarul is (Albert Einstein: *Válogatott tanulmányok.)* (Gondolat, Budapest, 1971.) — néhány idézet már ebből való, így a mostani is.
3. Albert Einstein: *Mein Weltbild* (Quericlo Verlag, Amsterdam, 1934.) 15. old.
4. Times-cikk később bekerült Einstein írásainak *My View of the World c.* gyűjteményébe, s ennek nyomán számos egyéb gyűjteménybe; e mostani magyar idézet Picon: *Korunk szellemi körképe* (Occidental Press, Washington, 1965.) c. antológiájából való, 395. old.
5. Leopold Infeld: *Einstein* (Gondolat, Budapest, 1959.), 221. old.
6. Infeld, i. m. 59. old.
7. Infeld, i. m. 183-184. old.
8. Infeld, i. m. 58. old.
9. Mein Weltbild, i. k. 13. old.
10. Max Born tanulmánya a Schilpp-féle Einstein-emlékkötetben
11. Einstein: " *Autobiographical Notes"* a Schillp-kötetben
12. Einstein: " *Autobiographical Notes"* a Schillp-kötetben
13. Einstein: " *Autobiographical Notes"* a Schillp-kötetben
14. Einstein: " *Autobiographical Notes"* a Schillp-kötetben
15. Infeld, i. m.
16. Einstein: *"Autobiographical Notes",* a Schillp-kötetben.
17. A. D Alekszandrov: "A relativitáselmélet filozófiai tartalma és jelentősége" c. tanulmányból. *A modern természettudomány filozófiai problémái*! (Akadémiai, Budapest, 1962.) 125-127. old.
18. Philipp Frank: *Einstein, his Life and Times* (Jonathan Cape, London, II. kiadás, 1949)