

Jegyezze meg, fiatal barátom, hogy a fizikában nem a matematika nehéz, hanem a fizika.

I. M. Frank, Nobel-díjas

Előszó

Ez a könyv bevezetés kíván lenni a relativitáselmélet fogalomrendszerébe és alapvető matematikai módszereibe. Az elmélet – mint ismeretes – két diszciplínára tagolódik: a speciális és az általános relativitáselméletre. Mindkettőnek a központi problémája az, hogy milyen viszonyban áll a tér és az idő a benne mozgó anyaggal. A speciális relativitáselmélet az egyidejűség fogalmának a tisztázásán keresztül arra a következtetésre jut, hogy a fény sebessége minden egyenletesen mozgó testhez képest ugyanakkora. Egy másik fontos eredménye a tömeg és az energia kapcsolatának a felismerése. Az általános relativitáselmélet azt mutatja meg, hogy a térnek és az időnek (pontosabban a téridőnek) olyan pozitív geometriai-fizikai tulajdonságai vannak, mint a deformálhatóság, és a gravitáció ennek a tulajdonságnak a látható megnyilvánulása.

A speciális relativitáselmélet a fizikának azokon a területein megkerülhetetlen, amelyek nagy sebességű mozgásokkal és a részecskék átalakulásaival foglalkoznak. Elsősorban az atomfizika és az elemi részecskék fizikája tartozik ide, amelyeknek az elmélete két tartópilléren nyugszik: a kvantumelméleten és a speciális relativitáselméleten. Jelenlegi ismereteink szerint a téridő deformációja ebben a jelenségkörben nem játszik szerepet. Ezekben a területeken lehet – és érdemes is – korlátozódni az általános relativitáselméletnek azokra az aspektusaira, amelyeket a speciális relativitáselmélet foglal magába.

Ez az egyik oka annak, hogy a relativitáselmélet ismertetését célszerű a speciális relativitáselmélettel elkezdeni. A másik ok az, hogy az általános relativitáselmélet a speciális relativitáselméletet követően, ennek bázisán jött létre, és az elmélet elsajátítását megkönnyíti, ha ezt a történeti sorrendet megtartjuk. A könyv első két része ezért kizárólag a speciális relativitáselmélettel foglalkozik, és annak, akit az elméletnek csak ez a vonatkozása érdekel, elég ezt a két részt áttanulmányoznia. Ha még az általános relativitáselmélet alapjairól is szeretne legalább tájékozódni, elolvashatja a harmadik részt, amely megkísérli a matematikai apparátus felhasználása nélkül bemutatni az elmélet alapgondolatát, a gravitáció geometrizálását.

A speciális relativitáselmélet egyáltalán nem igényel különleges matematikai ismereteket. A differenciál- és integrálszámítás alapjai elegendők hozzá.

Az általános relativitáselmülethez azonban szükség van olyan matematikára is, amely ezen a szinten túlmegy, és az egyetemi matematikai alapkursusok sem tartalmazzák. A Riemann-geometriáról van szó, amelyet a negyedik részben elég részletesen megtárgyalunk ahhoz, hogy az általános relativitáselméletet az is megérthesse, akinek nincsenek ezen a területen előzetes ismeretei.

A Riemann-geometriát a klasszikus differenciálgeometria módszerével tárgyaljuk, amely az általános relativitáselmélet kialakulása idején már rendelkezésre állt. Azóta megszületett a modern differenciálgeometria is, amely a klasszikustól új matematikai technikák, főleg a differenciális formák és a nyalábok szisztematikus alkalmazásában különbözik.

A modern differenciálgeometria az olyan sokaságok vizsgálatánál nélkülözhetetlen, amelyek topológiai tulajdonságai egy bizonyos globális értelemben bonyolultak. A kétdimenziós felületek közül például azok tartoznak ide, amelyek „fogantyúkkal és lyukakkal” rendelkeznek, és ennek következtében nem lehet rajtuk minden zárt görbét folytonos módon ponttá összehúzni. A gömbön és a végtelen síkon nincsenek ilyen képződmények, ezért ezek a felületek ebből a szempontból egyszerűek.

Jelenlegi ismereteink szerint az a téridő, amelyben élünk, és amely a fizikai történések egyedüli színtere, ebben a globális topológiai értelemben egyszerű. Ezért az általános relativitáselmületnek, amely a téridő geometriájának a tudománya, nem az a legfőbb dolga, hogy a topológiailag bonyolult hipotetikus téridők kezelésére alkalmas technikákat dolgozzon ki. A feladata enélkül is éppen elég nehéz. Azt kell ugyanis megértenie, hogyan lehet „kitalálni” például a Napot körülvevő tér valódi geometriáját (görbültségét), és hogyan lehet a testek – bolygók és űrhajók – haladó és forgó mozgása, valamint a fény terjedése alapján meggyőződni róla, hogy igaz-e az, amit kitaláltunk. A modern differenciálgeometria természetesen ennek a sajátosan fizikai problematikának a kifejtésében is nyújt előnyöket, de ezek az előnyök nem olyan mértékűek, amelyek indokolnák, hogy egy bevezető kurzusban a matematikai előkészítő részt még a differenciális formák és a nyalábok elméletével is megterheljük.

A könyvben fontos szerep jut a feladatoknak, amely mind megoldott feladat. A feladatok zöme az alapszövegbe illeszkedő állításra vagy tételre vonatkozik. Azzal, hogy ezeket feladat formájában kérdésként fogalmazzuk meg, bátorítani akarjuk az olvasót, hogy próbálja maga megtalálni a választ. Biztos, hogy a felvetett problémát még akkor is jobban megéri, ha végül meg kell néznie a megoldást. A feladatok nem mellékes gyakorlatok. A gondolatmenet szerves részét képezik, amelyekre később éppúgy történik hivatkozás, mint a szöveg bármely más részére.

A jegyzetek a könyv végén olyan ismereteket tartalmaznak, amelyek – a feladatoktól eltérően – nem nélkülözhetetlenek a megértéshez. Elsősorban a történeti jellegű információk kerültek ide.

A könyv azoknak a kurzusoknak az anyagára épül, amelyeket néhány év óta tartok az általános relativitáselméletről a Budapesti Műszaki Egyetemen mérnök-fizikus hallgatók számára. Ezúton mondok köszönetet műegyetemi barátaimnak – Kálmán Péternek, Orosz Lászlónak és Zawadowsi Alfrédnek – a támogatásukért, és természetesen a hallgatóknak, akik az előadásokat látogatták.

Hraskó Péter

A második kiadásról

Az átdolgozással elsősorban az volt a célom, hogy ott, ahol képes vagyok rá, világosabbá és teljesebbé tegyem az érvelést. Elég sok helyen volt erre szükség és lehetőség. Néhány kérdéskört, ahol erre sor került, nem én, hanem az „élet” jelölt ki. Amikor az első változaton dolgoztam, még nem realizáltam, milyen mélységűek azok a félreértések, amelyekkel a relativitáselmélet kapcsán gyakran még a hozzáértőknél is találkozni lehet. Magam is osztoztam néhányukban. Itt elsősorban a tömeg-energia reláció érvényességi körének pontos meghatározására és származtatási módjára gondolok. Ebben az új változatban a levezetés több módját is ismertetem a formális lagrange-i megközelítéssel kezdve Einstein gondolat kísérletén keresztül az általános relativitáselmélet által lehetővé tett fundamentális térelméleti bizonyításig.

A másik kérdéskör a relativisztikus precesszió jelensége, amelyet az első kiadás megjelenése után néhány évvel a NASA GP-B kísérlete állított egy időre a figyelem középpontjába. Amikor a könyvön dolgoztam, még nem tudtam erről a készülő kísérletről, a geodetikus precessziót és a forgó csillag körül létrejövő „dreget”, amelynek mérését célozta ez a kísérlet, azonban tárgyaltam a könyvben. Ebben az új változatban a pörgettyű relativisztikus mozgását leíró egyenlet új formáját használva, a tárgyalást egyszerűbbé és ugyanakkor általánosabbá tettem. Magát a „relativisztikus precesszió” elnevezést is azért kezdtem használni, mert az új tárgyalásban a speciális relativitáselmélet körébe tartozó Thomas-precesszió és az általános relativitáselméletben fellépő geodetikus precesszió egyetlen formula két speciális eseteként jelenik meg.

Az első fejezetbe beiktattam egy új szakaszt a testekhez rögzített koordináta-rendszerekről. Ez a fogalom alkalmas keretet nyújt például annak az állandóan vissza-visszatérő kérdésnek a megvitatására, hogy a Lorentz-kontrakció „állapot-e vagy folyamat”, valamint a deszinkronizáció kevésbé ismert jelenségének a megvilágítására.

A könyv komoly hiányosságának tartottam, hogy egyáltalán nem esett benne szó a kozmológiáról. Ezt a hiányt most egy új fejezettel pótoltam. A jegyzetek közül egyeseket kihagytam, de újakat is beiktattam közéjük. A feladatok között is vannak újak.

Hraskó Péter