

ZÁKLADY SPECIÁLNÍ TEORIE RELATIVITY

**ČESKOSLOVENSKÁ
AKADEMIE
VĚD**

**VĚDECKÝ REDAKTOR
PROF. RNDr. MIROSLAV BRDIČKA**

VÁCLAV VOTRUBA

**ZÁKLADY
SPECIÁLNÍ
TEORIE
RELATIVITY**

SCHVÁLENO VÝNOSEM MINISTERSTVA
ŠKOLSTVÍ ČSR (ČJ. 14.509/75-31 ZE DNE
16. ČERVNA 1975) JAKO CELOSTÁTNÍ UČEB-
NICE PRO MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
A PŘÍRODOVĚDECKÉ FAKULTY

**ACADEMIA
PRAHA 1977**

PŘEDMLUVA

Tato kniha je určena především posluchačům fyziky na vysokých školách univerzitního i technického směru, má jim sloužit jako učebnice; nicméně doufám, že bude přístupná i studentům a pracovníkům z příbuzných vědních oborů a že nalezne čtenáře také v širším kruhu zájemců o Einsteinovu teorii.

Potřeba české učebnice, která by podávala podrobný fyzikální i matematický výklad teorie relativity, je pocítována už dlouho. Takovou knihu připravovali profesoři Závíška a Hlavatý už před válkou. Rozvoj fyziky a rostoucí požadavky na výchovu fyziků-odborníků v posledním desetiletí ukázaly, že vydání samostatné učebnice teorie relativity, ať původní nebo přeložené, nelze již odkládat. Ministerstvo školství ji proto zařadilo do edičního plánu učebnic pro vysoké školy a pověřilo mne, abych ji sepsal sám nebo s něčí účastí.

Vyšel jsem ovšem ze svých přednášek, i když jsem je musel podstatně doplňovat a upravovat. Takový původ učebnice (u speciální vysokoškolské učebnice zcela obvyklý a přirozený) může být obecně její předností, ale také zdrojem (a zároveň omluvou) některých jejích nedostatků. Snad tedy bude užitečné, když na tomto místě objasním zvolenou metodu výkladu, výběr látky a její uspořádání, a uvedu důvody, které mě k tomu vedly.

Učitelská praxe mi ukázala, že je snadné vykládat teorii relativity studentům, kteří mají náklonnost k teoretickým spekulacím a jsou ochotni „věřit teorii“. Takovým studentům je např. Michelsonův pokus uspokojivým empirickým základem výchozích Einsteinových postulátů; rozbor dalších experimentů lze tedy odložit. Matematicky založeným studentům lze výklad začínat také přímo formulací postulátů. Ti všichni teorii snadno pochopí a její důsledky přijmou, ale nejasná jim zůstane problematika experimentů: jaké jiné jejich výsledky by se mohly očekávat než ty, které předpovídá teorie relativity. (Mají-li se zdůvodnit projekty důležitých pokusů a objasnit význam jejich skutečných výsledků, stejně je pak nutné vracet se k představám starších teorií.) Kromě toho takto založení a výchovaní fyzikové rádi podceňují důležitost experimentálního ověřování teorie.

Mnoho studentů však postuláty teorie relativity a jejich důsledky tak ochotně nepřijímá. Mají buď různé „filosofické potíže“, nebo jsou spíše „empiricky založení“

a těžko se dají přesvědčit, že by se např. výsledek Michelsonova pokusu nemohl vyložit bez takových radikálních změn, jakých vyžaduje teorie relativity ve vžitých a běžnou každodenní zkušeností „ověřených“ představách o vlastnostech prostoru a času. Hledají pak mezery v úsudku a různá jiná „východiska“ a nalézají jich zpravidla dostatek. Nelze je za to zatracovat. Fyzika je empirická přírodní věda a všechny její teoretické postuláty mají být zkušeností řádně zdůvodněny. Nestačí, že ten nebo onen „princip“ je přijatelný z důvodů formálních. O tom nás už historie fyziky dostatečně poučila a stále znovu poučuje.

Proto si myslím, že není dobře, když se autor učebnice teorie relativity spoléhá po Einsteinově vzoru na to, že „princip relativity je lidskému duchu blízký a sympatický“ (a že proto ani není třeba, aby byl zvlášť pečlivě zdůvodňován). Je lépe počítat s tím, že nejednoho studenta nebo čtenáře teprve v hojně míře snesená empirická fakta a pádné logické argumenty přesvědčí o tom, že Einsteinovy postuláty a jejich důsledky jsou plně oprávněné. Domnívám se také, že jenom kvantitativní rozbor dostatečně reprezentativního souboru pokusů může náležitě ozřejmit, jak je beznadějně těžké chtít vytvořit teorii, která by všechny ty pokusy uspokojivě vysvětlovala jinak, než to činí teorie relativity. Bohužel, právě neinformovanost o šířce a spolehlivosti empirických základů teorie relativity bývá nejčastějším zdrojem její neplodné kritiky a naivních návrhů „teorií“, které by ji měly nahradit, nebo pokusů, které ji mají vyvrátit.

Při výkladu v této knize proto postupuji tak, že se nejprve přidržuji hypotéz a zákonů starších, našim studentům již v hlavních rysech známých teorií (Newtonovy-Laplaceovy mechaniky a Maxwellovy-Lorentzovy elektrodynamiky), dokud empirická fakta (rozebíraná v kap. III) nevyžadují jejich změnu. Abych nemusel odkazovat na příliš mnoho jiných knih nebo těžko dostupných pramenů, jsou v prvních dvou kapitolách shrnuty základní představy i zákony a hlavní důsledky obou teorií, jsou-li k dalšímu výkladu potřebné. Při rozboru pokusů v kap. III zjistíme, že změny původní Lorentzovy elektronové teorie, které umožní vysvětlit i výsledky novějších experimentů, nejsou ve sporu s jejími principy ani nenarušují její strukturu. Proto jsou studentům bez potíží přijatelné. Tímto postupem však dojdeme až k zákonům, které se formálně zcela shodují s příslušnými zákony teorie relativity (např. i k Lorentzově transformaci), a liší se od nich pouze interpretací (výkladem). O jejich původním výkladu pak se snadno ukáže, že není ani teoreticky (logicky) nutný, ani prakticky výhodný, a že naopak je zcela přirozené nahradit jej novým výkladem ve smyslu Einsteinova principu relativity.

Upozorňuji, že postup v kap. III není historický. Vedle významných starších, „historických“ experimentů, probírám i pokusy (nebo návrhy pokusů) zcela nové a moderní, které byly vykonány nebo navrženy v době, kdy už byla teorie relativity dávno hotová, a které ve skutečnosti sloužily (nebo mají sloužit) jen k jejímu novému ověření. Je to postup induktivní, jehož cílem je dospět pokud možno „nevyhnutelně“ k zavedení základních postulátů Einsteinovy teorie (tj. tak, abychom přitom nebyli odkázáni na zvláštní teoretickou intuici a nemuseli se dovolávat toho, že jsou „sympatické“).

Další postup (od kap. IV) je už deduktivní a ukazuje, že z principu relativity a principu konstantní rychlosti světla plynou všechny konkrétní důsledky, k nimž jsme dříve dospěli induktivně, kromě řady dalších, a ovšem i jejich nové interpretace. Docela dobře se může začít i od kapitoly IV a věci vyložené v předchozích kapitolách si podle potřeby přečíst dodatečně, např. až když se na ně v textu odkazuje. Vlastní základy speciální teorie relativity jsou podrobně vyloženy v kapitolách IV až VI. Při rozboru Einsteinova pojetí prostoročasových vztahů v kap. IV se uplatňuje hledisko fyzikální, kdežto v kap. V je probrána Minkowského geometrická interpretace Lorentzovy transformace a rozvinut formální aparát teorie relativity. Kapitola VI je věnována relativisticky invariantní formulaci základních rovnic elektrodynamiky a mechaniky hmotných částic a rozboru jejich důsledků.

Poslední dvě kapitoly, VII a VIII, budují na položených základech další významné partie relativistické fyziky: V kapitole VII jsou probrány variační principy relativistické mechaniky a teorie pole, které jsou důležité zejména pro fyziku elementárních částic, kdežto kapitola VIII je věnována použití principu relativity v makroskopické fyzice.

Při výkladu vlastní teorie relativity věnuji zvláštní pozornost těm otázkám, které obvykle činí studentům nejvíce potíží a s nimiž nejčastěji přicházejí k učitelům při cvičních nebo konzultacích. Učebnice má být sepsána tak, aby ji studenti mohli číst bez učitele nebo bez jiné, často těžko dostupné literatury. Praxe tu zase ukazuje, že je poměrně snadné zvládnout matematický aparát teorie relativity a naučit se rozličným novým formulám, ale porozumět jejich fyzikálnímu smyslu a umět jich správně použít je mnohem obtížnější. A poněvadž právě tato schopnost je odborníkovi ve fyzice hlavním cílem jeho studia, je ke každé kapitole připojena řada úloh, snadných i obtížnějších. Na konci knihy je podáno i řešení všech úloh, protože některé příklady jsou nejenom vhodnou ilustrací, ale i potřebným doplněním hlavního textu. (Tam by jejich uvádění rušilo souvislost výkladu.)

V této učebnici se podrobněji nezabývám obecnou teorií relativity ani relativistickou teorií gravitace; vedou k tomu, že se značně rozšíří pojmový rámec speciální teorie a vytvoří samostatný, nový úsek v rozvoji celé teorie relativity. (Omezil jsem se jen na objasnění jejich podstaty a charakteru, pokud vůbec bylo možné je podat na několika stránkách závěru celé knihy.) Dostatečně úplný, odborný výklad těchto teorií se musí vedle toho opírat o složité zobecnění matematického aparátu speciální teorie relativity a proto zabírá tolik místa, že je lépe věnovat základům obecné teorie relativity samostatnou učebnici. Toto opatření není jen východiskem z nouze, je vhodné a účelné i z toho důvodu, že speciální teorie relativity je nezbytným nástrojem řadě prakticky důležitých oborů fyzikálních i technických, které obecnou teorií relativity nevyžadují. Ta má zatím praktické použití jen v astronomii a kosmologii. Její význam pro teoretickou fyziku se tím ovšem nikterak nezmenšuje: je zcela nepochybné, že znalost obecné teorie relativity patří k základnímu vzdělání fyzika-teoretika. Příslušnou učebnici sepsal docent RNDr. K. Kuchař, CSc., který tuto látku přednáší na matematicko-fyzikální fakultě University Karlovy.

Zbývá dodat několik upozornění a informací spíše jen technické povahy. Především je třeba poznamenat, že „Úvod“ není míněn jako historický přehled. Podává jen základní údaje o vzniku a dnešním významu teorie relativity. Podrobnější historický přehled rozvoje celé teorie relativity i obsáhlejší soupis literatury je v knize Kuchařovč. V seznamu literatury proto uvádím, kromě článků a knih přímo citovaných v textu nebo v úlohách, jenom několik nejdůležitějších učebnic speciální teorie relativity.

Každá kapitola začíná reliéfem, který čtenáře uvádí do její problematiky, nebo seznamuje s jejím úkolem a cílem. Rovnice číslují v každé kapitole zvlášť. Při citaci rovnice z téže kapitoly uvádím pouze číslo rovnice v okrouhlé závorce; při odkazu na rovnici z jiné kapitoly uvádím v okrouhlé závorce před číslem rovnice i číslo kapitoly, např. (IV 58). Podobně postupuji při číslování a citaci odstavců a úloh, např. odst. IV 3 nebo Ú II 3. Odkazy na soupis literatury uvádím v hranatých závorkách. Význam symbolů, není-li z kontextu zcela zřejmý, je před použitím vždy vysvětlen.

Nakonec bych rád poděkoval prof. M. Brdičkovi, vědeckému redaktoru tohoto spisu, za mimořádnou pečlivost a pozornost, s níž pročetl celý rukopis, a za upozornění na mnohá nedopatření věcné i formální povahy, která v něm našel. Nemalé zásluhy na této učebnici má zesnulý prof. Č. Muzikář, který byl recenzentem a rukopis obětavě četl v době, kdy už byl těžce nemocen. Svými připomínkami mi pomohl odstranit řadu nejasností. Srdečně děkuji také docentu K. Kuchařovi. Prohlédl koncept rukopisu a místy navrhl vhodnější formulace. K lepší srozumitelnosti výkladu přispěli svými náměty rovněž někteří asistenti a studenti z katedry teoretické fyziky fakulty technické a jaderné fyziky ČVUT. I jim patří můj dík. Uznáním jsem povinen a vděčností zavázán také odbornému personálu nakladatelství Academia i tiskárny Prometheus za velikou péči věnovanou technické, zvláště jazykové revizi rukopisu, i matematické sazbe knihy.

Květen 1969

V. Votruba

OBSAH

Úvod	15
I. Newtonova mechanika a Galileiho princip relativity	
1. Prostor a čas v klasické mechanice	17
1,1. Referenční soustavy, systémy souřadnic, transformace souřadnic	17
1,2. Transformace složek rychlosti a zrychlení	19
1,3. Absolutní čas, absolutní vzdálenost	22
2. Zákon setrvačnosti, inerciální systémy souřadnic	23
3. Síly v Newtonově mechanice a problém význačného systému souřadnic	26
3,1. Newtonovy pohybové rovnice	26
3,2. Zákony pravých sil a Galileiho princip relativity	27
4. Realizace inerciálního systému. Machův princip	32
4,1. Astronomická realizace inerciálního systému	32
4,2. Newtonův absolutní prostor. Machova mechanika	33
Dodatek o měření délek a času	37
Úlohy	38
II. Lorentzova elektronová teorie	
1. Základní rovnice, jejich interpretace a obecné důsledky	41
1,1. Maxwellovy-Lorentzovy rovnice a Lorentzova pohybová rovnice	41
1,2. Zákony zachování v Lorentzově teorii	44
2. Důležitá řešení Maxwellových-Lorentzových rovnic	47
2,1. Liénardovy-Wiechertovy potenciály	47
2,2. Rovnoměrný přímočarý pohyb bodového náboje	50
2,3. Klidný zdroj světla	51
2,4. Zdroj světla v rovnoměrném přímočarém pohybu	53
3. Dynamika Lorentzova elektronu	56
3,1. Vnější a vlastní síla	56
3,2. Elektromagnetická hybnost a energie elektronu v rovnoměrném translačním pohybu	58
3,3. Elektromagnetická a celková hmota elektronu	61

4. Tenzory a pseudotenzory v trojrozměrném prostoru	63
4.1. Transformační vzorce pro složky tenzorů a pseudotenzorů	63
4.2. Tenzorové integrály	68
4.3. Složkový tenzorový zápis Maxwellových-Lorentzových rovnic	70
4.4. Maxwellovy-Lorentzovy rovnice v pohybujícím se inerciálním systému	72
5. Rovnice makroskopického elektromagnetického pole	75
5.1. Látkové prostředí v klidu	75
5.2. Látkové prostředí v pohybu. Strhování světla	78
Úlohy	81
III. Pokusy o určení pohybu Země vůči éteru	
1. Vztahy mezi kinematickými parametry světelné vlny v klidném a pohybujícím se systému	83
2. Aberace stálé	86
3. Dopplerův jev a zpomalování chodu hodin vlivem jejich pohybu vůči éteru	88
3.1. Obecný vzorec pro Dopplerův jev. Vliv prvního řádu	88
3.2. Vlivy druhého řádu	90
3.3. Vlastní čas hodin v pohybu	92
4. Měření rychlosti světla v pohybujícím se systému	94
4.1. Absolutní rychlost Slunce. Maxwellův efekt	94
4.2. Klasické terestrické metody měření rychlosti světla	95
4.3. Pokus Michelsonův. Lorentzova kontrakce	97
4.4. Pokus Kennedyův-Thorndikeův	99
4.5. Pokusy o určení rychlosti světla v jednom směru	100
4.6. Jevy a pokusy dokazující nezávislost rychlosti světla na pohybu zdroje	104
5. Elektrodynamické pokusy	105
5.1. Pokus Troutonův-Nobleův a závislost sil působících v hmotné soustavě na jejím pohybu vůči éteru	105
5.2. Závislost setrvačné hmoty na rychlosti	109
6. Lorentzova transformace a její výklad	112
6.1. Lorentzův inerciální systém. Lorentzova transformace	112
6.2. Invariance základních rovnic Lorentzovy teorie vůči Lorentzovým transformacím. Einsteinův princip relativity	114
Úlohy	117
IV. Prostor a čas ve speciální teorii relativity	
1. Inerciální systémy a Lorentzova transformace	121
1.1. Konstrukce inerciálního systému a základní postuláty teorie relativity	121
1.2. Odvození Lorentzovy transformace	124
2. Vlastnosti speciální Lorentzovy transformace	129
2.1. Důležitá invariantní rovnice a invariant Lorentzovy transformace	129
2.2. Podsvětelné a nadsvětelné rychlosti	131
2.3. Speciální Lorentzova grupa. Aproximace Lorentzovy transformace při $v \ll c$	132

3. Relativnost současnosti a princip kauzality	135
3.1. Relativnost současnosti bodových událostí	135
3.2. Princip kauzality. Maximální signálová rychlost	137
3.3. Příklady „praktického použití“ nového pojmu současnosti	138
4. Dilatace času. Vlastní čas	140
4.1. Zpomalování chodu hodin v relativním pohybu	140
4.2. Vlastní frekvence oscilátoru. Vlastní čas. Pasivní a aktivní interpretace dilatace času	142
4.3. Přímý experimentální důkaz dilatace času	143
4.4. O tak zvaném „paradoxu hodin“	145
5. Transformace délek a vzdáleností	148
5.1. Relativistická kontrakce délky tyče v pohybu	148
5.2. Příklad na použití relativní délky tyče	151
5.3. Jiné příklady vzdáleností a jejich transformace	153
5.4. „Paradox“ rotujícího kotouče	155
6. Transformace rychlosti a zrychlení	158
6.1. Transformace složek rychlosti bodu v libovolném pohybu	158
6.2. Transformace složek zrychlení. Klidové zrychlení	159
7. Zobecnění speciální Lorentzovy transformace pro libovolný směr rychlosti	160
7.1. Odvození transformace a její vlastnosti	160
7.2. Použití transformace	162
8. Skládání speciálních Lorentzových transformací ve dvou kolmých směrech	163
8.1. Otočení trojhranu os při složené transformaci	163
8.2. Jednoduché odvození vzorce pro Thomasovu precesi	165
Úlohy	167
V. Minkowského čtyřrozměrný prostor	
1. Geometrická interpretace Lorentzovy transformace	170
1.1. Minkowského rovina	170
1.2. Prostorčas a Minkowského systém souřadnic	172
1.3. Názorné zobrazení Minkowského roviny do roviny Euklidovy	173
1.4. Prostorčasový interval. Světelný kužel	177
1.5. Praktické použití Minkowského zobrazení	178
2. Obecná Lorentzova transformace a obecná Lorentzova grupa	180
2.1. Obecná Lorentzova transformace a její rozklad	180
2.2. Obecná Lorentzova grupa a její podgrupy	186
2.3. Infinitezimální Lorentzovy transformace	187
3. Další důležité geometrické útvary v prostorčase	189
3.1. Světočáry	189
3.2. Plochy a nadplochy v prostorčase. Světové trubice	192
4. Vektory a tenzory v prostorčase	193
4.1. Definice a základní vlastnosti prostorčasových tenzorů	193
4.2. Čtyřrychlost a čtyřzrychlení	195
4.3. Speciální tenzory vyšších řádů	197

4,4. Prostorčasové pseudotenzory	198
4,5. Tenzorové integrály	200
4,6. Věta o integrálech po nadplochách prostorové povahy	204
5. Reprezentace Lorentzovy grupy	207
5,1. Jednoznačné reprezentace konečného stupně	207
5,2. Ekvivalence a ireducibilita reprezentací	208
5,3. Maticový zápis transformací. Infinitesimální transformace z dané reprezentace	210
5,4. Dvojnásobné reprezentace. Spinory	213
6. Reálné souřadnice v prostorčase	215
6,1. Zavedení reálných souřadnic. Metrické koeficienty	215
6,2. Transformace reálných souřadnic	216
6,3. Kontravariantní a kovariantní složky čtyřvektorů. Tenzory a jejich derivace podle souřadnic	219
Úlohy	221
VI. Relativistická elektrodynamika a mechanika hmotných částic	
1. Relativistický tenzorový zápis Maxwellových-Lorentzových rovnic	225
2. Fyzikální důsledky transformačních vzorců a jejich praktické použití	227
3. Lorentzova čtyřsila a tenzor energie a hybnosti elektromagnetického pole	232
3,1. Hustota síly a úhrnná síla	232
3,2. Tenzor energie a hybnosti elektromagnetického pole	235
3,3. Úhrnná energie a hybnost elektromagnetického pole	237
3,4. Problém stability elektronu. Kohezni síly a kohezni energie	240
4. Rovinná elektromagnetická vlna	242
4,1. Vlnový čtyřvektor	242
4,2. Aberace paprsku a Dopplerův jev	244
4,3. Planckovy-Einsteinovy vztahy	246
5. Invariantní zápis Lorentzových pohybových rovnic elektronu	247
5,1. Pohybové rovnice a rovnice energie	247
5,2. Poincaréův elektron ve vnějším poli	252
6. Založení relativistické mechaniky nezávisle na elektrodynamice	255
6,1. Pohybové rovnice	255
6,2. Lewisovo-Tolmanovo odvození závislosti setrvačné hmoty tělesa na jeho rychlosti	256
6,3. Další příklady ukazující nutnou závislost klidové setrvačné hmoty tělesa na jeho vnitřní energii	259
7. Příklady sil, jejichž působení na hmotnou částici mění její klidovou hmotu	264
7,1. Minkowského čtyřsila časového charakteru	264
7,2. Nukleon ve vnějším skalárním mezickém poli	266
8. Einsteinův zákon o ekvivalenci hmoty a energie	268
9. Relativistický tenzor momentu hybnosti	273
9,1. Tenzor momentu hybnosti volné částice a soustavy volných částic	273

9,2. Moment hybnosti soustavy interagujících částic a pole	274
9,3. Spin částice a pohybové rovnice částice se spinem	276
10. Základní rovnice elektrodynamiky a mechaniky v reálných prostorčasových souřadnicích	278
Úlohy	281

VII. Variační principy

1. Vazbové síly. Relativistická formulace d'Alembertova principu a Lagrangeových rovnic 1. druhu	284
2. Hamiltonův princip v relativistické mechanice hmotné částice	287
2,1. Skutečná a variovaná světočára. Obecné vyjádření Hamiltonova principu	287
2,2. Lagrangeovy funkce a pohybové rovnice pro důležité speciální případy částice ve vnějším poli	290
2,3. Heuristický postup při sestavení Lagrangeovy funkce	296
3. Hamiltonův princip v relativistické teorii pole	299
3,1. Variační princip pro elektromagnetické pole	299
3,2. Variační princip pro skalární mezické pole	301
4. Interakce rozptýlené nabitě hmotné substance a pole	303
4,1. Úplná Lagrangeova funkce a variační princip	303
4,2. Odvození rovnic pole i rovnic pohybu hmotného prachu z jediného variačního principu	307
4,3. Kinetický tenzor energie a hybnosti hmotného prachu	309
4,4. Různé další úpravy pohybových rovnic hmotného prachu	310
5. Pokusy o řešení problému klasické teorie elektronu	313
6. Teorie polí a jejich interakce	317
6,1. Rovnice neinteragujících, volných polí	317
6,2. Variační princip a rovnice pole. Kanonický tenzor energie a hybnosti a čtyřproud	321
6,3. Interakce polí	324
Úlohy	326

VIII. Princip relativity a fenomenologická makrofyzika

1. Princip relativity v makroskopické elektrodynamice	328
2. Invariantní tvar rovnic makroskopické elektrodynamiky	331
2,1. Základní rovnice. Transformace základních veličin	331
2,2. Invariantní definice vodivého proudu a invariantní tvar materiálových vztahů	336
3. Tenzor energie a hybnosti makroskopického elektromagnetického pole	338
4. Tenzor elastických napětí v pohybujícím se hmotném tělese	343
5. Invariantní tvar zákonů termodynamiky	348
Úlohy	351

IX. Relativita a gravitace

1. Einsteinův speciální princip relativity a teorie gravitace	353
1,1. Newtonova teorie gravitace a první pokusy o její přizpůsobení požadavkům speciální teorie relativity	353
1,2. Novější empirická data o gravitaci	361
1,3. Speciálně relativistická teorie gravitace a její potíže	362
2. Základní ideje Einsteinovy obecné teorie relativity a jeho přístupu k teorii gravitace	368
3. Prostorčas a dnešní fyzika	370
Řešení úloh	372
Seznam literatury	424
Rejstřík	428

ÚVOD

Teorie relativity vznikla počátkem tohoto století na půdě elektrodynamiky pohybujících se těles. V tomto oboru byla koncem minulého století shromážděna řada experimentálních výsledků, jejichž jednotný výklad působil tehdejší Maxwellově teorii značné obtíže. Bylo proto podniknuto několik rozsáhlých pokusů o formulaci systematické teorie elektromagnetických jevů v pohybujících se tělesech (Hertz 1890, Lorentz 1892–1904, Einstein 1905, Ritz 1908). Z nich teorie Hertzova i opožděný návrh Ritzův byly neúspěšné a nemají dnes ani historicky většího významu. Úspěšnější byla teorie Lorentzova (klasická teorie elektronová), která připravila cestu teorii Einsteinově. V konečném tvaru z r. 1904 dovedla svým způsobem již vysvětlit všechny tehdy známé elektromagnetické jevy v pohybujících se tělesech. To byla věc tak závažná, že se sotva mohlo pochybovat o tom, že její základní rovnice jsou správné. Einstein také skutečně převzal do své nové teorie celou soustavu základních rovnic Maxwellovy-Lorentzovy elektrodynamiky formálně beze změny.

Mezi Lorentzovou a Einsteinovou teorií, ačkoliv se jejich rovnice shodují, je však hluboký a zásadní rozdíl ve fyzikálním pojetí. Lorentz setrvává při starých (Newtonových) představách o absolutním čase a absolutním prostoru vyplněném nehybným éterem. Uznává existenci absolutního pohybu (vůči éteru) a pátrá po jeho stopách v elektromagnetických jevech. Zvláštní vlastnost základních rovnic elektromagnetického pole, totiž jejich formální invarianci při určitých lineárních transformacích prostorových souřadnic i času (při tzv. Lorentzových transformacích, které se liší od Galileiho transformací z Newtonovy mechaniky) pokládá sice za zajímavou z matematického hlediska (a velmi výhodnou při některých praktických výpočtech), ale nepřisuzuje jí hlubší fyzikální význam.

Naproti tomu Einstein nepředpokládá éter Lorentzova typu a neuznává existenci absolutního pohybu, nýbrž uvažuje i v rámci elektrodynamiky pouze o relativních pohybech referenčních hmotných soustav. A to jej vede k poznání hlubokého fyzikálního smyslu nezávislosti rychlosti světla na volbě inerciálního systému souřadnic: v ní zjišťuje projev nových, základních vlastností samotného prostoru a času. Rozborem fyzikálního pojmu současnosti dvou prostorově vzdálených událostí a rozborem možných způsobů délkových a časových měření konaných v laboratořích,

kteře jsou ve vzájemném pohybu, Einstein ukázal, že Newtonovy představy o absolutním prostoru a čase je nutno opustit a nahradit je novým, relativistickým pojetím.

Důsledky tohoto poznatku se nemohly ve fyzice omezit jen na elektrodynamiku, která už vlastně byla relativistickou teorií, ale musely se projevit hlubokým vlivem i na všechny ostatní oblasti fyziky. Relativistické pojetí prostoru a času vedlo především k *revizi a korekci* základních zákonů Newtonovy mechaniky, v nichž zvláště idea absolutního času zůstala (i po Machově reformulaci) pevně zakořeněna. Ukázalo se, že Newtonovy pohybové rovnice jsou aproximací rovnic relativistických a že se jich dá použít jen při rychlostech malých proti rychlosti světla. Pohybové rovnice nové, relativistické mechaniky jsou už (stejně jako Maxwellovy-Lorentzovy rovnice elektromagnetického pole) invariantní vůči Lorentzovým transformacím. Nová mechanika přivedla Einsteina též k objevu důležitého obecného vztahu mezi setrvačnou hmotou hmotných těles a jejich energií. Nakonec pak relativistické pojetí prostoru, času a pohybu umožnilo Einsteinovi vybudovat r. 1916 i zcela novou teorii gravitace a podat obdivuhodnou geometrickou interpretaci tohoto základního fyzikálního jevu. Tím bylo nepochybně dosaženo vrcholu tzv. „klasické“ (nekvantové) fyziky.

Jak již uvedeno, byla revize klasických fyzikálních pojmů, kterou provedla teorie relativity, dlouhou dobu před tím připravována a vývoj fyziky k ní nevyhnutelně směřoval. A tak není pochyby, že dnes bychom teorii relativity (alespoň tzv. speciální teorii) měli i bez Einsteina. K řadě výsledků obsažených v první Einsteinově práci z r. 1905 dospěl současně a nezávisle i Poincaré. Pro další rychlý vývoj teorie relativity byla neocenitelnou spolupráce matematiků (Minkowski, Hilbert, Weyl) a vhodný pojmový i formálně matematický aparát, který byl ve starších i novějších geometrických teoriích (Lobačevskij, Bolyai, Gauss, Riemann, Ricci a Levi-Civita) pohotov. Ostatně i zase teorie relativity působila blahodárně na rozvoj moderní diferenciální geometrie. Vzhledem k tomu, že teorie relativity hluboce zasáhla do tak základních pojmů jako jsou prostor a čas, projevil se její vliv i mimo rámec vlastní fyziky a matematiky a zasáhl např. i do filosofie.

Hlavním oborem praktického použití principů teorie relativity je ovšem dnešní atomová fyzika, zvláště *fyzika jaderná* a *fyzika elementárních částic*. V těchto oborech je relativistický popis a výklad pozorovaných jevů nezbytný a v nich se dnes teorie relativity uplatňuje i v technické praxi. Zatímco v době svého vzniku vysvětlovala jen několik subtilních fyzikálních jevů bez praktického významu, dnes je už nepostradatelná i při konstrukci a provozu mohutných strojních zařízení. Např. veliké urychlovače elektronů a protonů by se nedaly projektovat, sestavit a řídit bez předchozích výpočtů na základě relativistické mechaniky a elektrodynamiky.

Fyziku elementárních částic si nelze představit bez Einsteinova vztahu mezi hmotou a energií a dnešní teorie elementárních částic by se neobešly bez Einsteinova principu relativity, resp. postulátu invariance vůči tzv. Poincaréově grupě, který je pro ně stále i neocenitelným principem heuristickým. Podobný význam má teorie relativity také v moderní astronomii a kosmologii, v nichž je stálým zdrojem nových spekulací.

KAPITOLA I

NEWTONOVA MECHANIKA A GALILEIHO PRINCIP RELATIVITY

Newtonovou mechanikou budeme v dalším rozumět teorii, podle níž je materiální svět složen z hmotných bodů a hmotné body se pohybují podle Newtonových zákonů pod vlivem centrálních sil, jimiž na sebe vzájemně působí přímo do dálky.

Toto velmi konkrétní a jasné Laplaceovo pojetí Newtonovy mechaniky mělo základní význam pro rozvoj nejen klasické mechaniky samotné, ale i celé novodobé fyziky jakožto exaktní vědy. Newtonova mechanika v Laplaceově pojetí byla první novodobou obecnou fyzikální teorií, prvním pozoruhodným pokusem o přesnou matematickou formulaci úplné soustavy základních zákonů fyzikálního světa. Znalost jejích hlavních pojmů a zákonů je nezbytná, mají-li se náležitě pochopit novější fyzikální teorie sledující podobné cíle. Je nezbytná i k náležitému pochopení a hodnocení Einsteinovy teorie relativity.

V této kapitole si připomeneme základní pojmy, zákony, předpoklady a hypotézy Newtonovy mechaniky i některé jejích významné důsledky, z nichž nejdůležitější pro nás bude tzv. Galileiho princip relativity. Pojďme také o základních představách Machovy mechaniky, podáme jednoduchou matematickou formulaci jejích zákonů a ukážeme, že v této teorii platí obecnější princip relativity než v mechanice Newtonově.

Náš výklad v této kapitole nemá být ovšem náhradou za studium klasické analytické mechaniky podle běžného programu; může však být v jistém smyslu jeho doplněním, neboť některé otázky, důležité z hlediska našeho konečného cíle, rozvádí a objasňuje podrobněji než je v učebnicích analytické mechaniky [1] obvyklé.

1. PROSTOR A ČAS V KLASICKÉ MECHANICE

1.1. REFERENČNÍ SOUSTAVY, SYSTÉMY SOUŘADNIC, TRANSFORMACE SOUŘADNIC

Základní pojmy, s nimiž se v mechanice setkáváme hned na počátku, jsou hmotný bod a jeho poloha v daném okamžiku. Polohu bodu M lze určit např. tak, že udáme jeho kartézské (pravoúhlé) souřadnice x_1, x_2, x_3 v systému S , jehož tři (vzájemně kolmé) osy procházejí středem Země a jsou s ní pevně spojeny. *Hmotnou soustavu* (těleso), vůči níž jsou ustáleny osy používaného systému kartézských souřadnic, nazýváme *referenční* (opěrnou, vztahnou) *soustavou* (tělesem). V uvedeném příkladě je Země referenční soustavou a její střed je zvolen za počátek O systému S .