

Spis treści

Przedmowa	11
Wprowadzenie	15
1. Heurystyczne podstawy teorii względności	17
1.1. Miejsce szczególnej teorii względności w fizyce	17
1.2. Idea czasoprzestrzeni	20
1.3. Wstępna konstrukcja czasoprzestrzeni	24
1.4. Linie świata	29
1.5. Układy odniesienia	29
1.6. Pomiar czasu	31
1.7. Synchronizacja zegarów	33
1.8. Inercjalne układy odniesienia	37
1.9. Aksjomaty teorii względności	43
1.10. Zasada względności Galileusza–Einsteina	45
1.11. Transformacja Galileusza i transformacje 3-wektorów	48
1.12. Przykłady praw niezmienniczych względem transformacji Galileusza	53
1.13. Komentarze do zasady względności	59
1.14. Stosowalność zasady względności	62
1.15. Geometrie, grupy transformacji i niezmienniki	65
1.16. Uniwersalna prędkość oddziaływań c	68
1.17. Diagram Minkowskiego	72
1.18. Interwał czasoprzestrzenny	76
1.19. Wektory w czasoprzestrzeni	80
1.19.1. Wektory umiejscowione	80
1.19.2. Wektory swobodne	81
1.19.3. Wektory styczne do krzywych	82
1.20. Algebra wektorów	84
1.21. Hiperpowierzchnie w czasoprzestrzeni	87
1.21.1. Wprowadzenie	87
1.21.2. Stożek świetlny	88
1.22. Równoczesność zdarzeń	91

1.23. Skrócenie długości	101
1.24. Szczególna transformacja Lorentza	102
1.25. Dylatacja czasu i kontrakcja Lorentza	108
1.25.1. Dylatacja czasu	108
1.25.2. Kontrakcja Lorentza	111
1.26. Składanie prędkości	112
1.26.1. Ruch jednowymiarowy	114
1.26.2. Transformacja przyspieszenia	116
1.26.3. Transformacja prędkości kątovej	117
1.27. Technika diagramu Minkowskiego	117
1.27.1. Wyznaczenie jednostek na osiach obu układów	119
1.27.2. Dylatacja czasu i skrócenie Lorentza na diagramie Minkowskiego	121
1.28. Zjawisko Dopplera i aberracja światła	124
1.28.1. Aberracja światła	127
1.29. Czas własny	129
1.29.1. Druga definicja równoczesności	136
1.30. Paradoks bliźniąt	138
1.30.1. Eksperyment makroskopowy	140
1.31. Nierówność trójkąta dla wektorów czasowych	141
1.32. Relatywistyczna niezmienniczość praw fizyki	145
1.32.1. Kowariantność a niezmienniczość cechowania	152
2. Kinematyka relatywistyczna	156
2.1. Pojęcia podstawowe	156
2.1.1. Krzywe zerowe	157
2.2. Prędkość i przyspieszenie	159
2.3. Tetrada Freneta–Serreta	163
2.3.1. Baza ruchoma w czasoprzestrzeni	163
2.3.2. Płaskie krzywe czasowe	169
2.4. Ruch jednostajnie przyspieszony	170
2.4.1. Postać analityczna ruchu hiperbolicznego	170
2.4.2. Własności geometryczne ruchu hiperbolicznego	174
2.5. Nieinercjalne układy odniesienia	176
2.5.1. Własności układów nieinercjalnych	176
2.5.2. Współrzędne hiperboliczne	181
2.5.3. Współrzędne geodezyjne generowane ruchem po okręgu	183
3. Dynamika relatywistyczna	185
3.1. Wprowadzenie	185
3.2. Relatywistyczny pęd — konstrukcja heurystyczna	186
3.3. Czterowektor pędu i równania newtonowskie	188
3.3.1. Niekowariantne równania ruchu	188
3.3.2. Retardacja i równania różniczkowo-funkcyjne	193
3.4. Całkowita energia kinetyczna	197
3.5. Prawo zachowania 4-pędu	203
3.6. Relatywistyczne kowariantne równania newtonowskie	206
3.7. Moment pędu	208
3.8. Mechanika relatywistyczna w formalizmie Lagrange’a	215

3.9. Formalizm kanoniczny mechaniki relatywistycznej	223
3.9.1. Kowariantny formalizm kanoniczny	223
3.9.2. Niekowariantny formalizm kanoniczny	225
3.10. Pierwsze twierdzenie Noether	231
3.10.1. Sformułowanie twierdzenia	231
3.10.2. Ładunek w stałym polu elektrycznym i magnetycznym	235
3.11. Mechaniczny model elektrodynamiki	238
4. Wektorowa przestrzeń Minkowskiego	247
4.1. Konstrukcja wektorowej przestrzeni Minkowskiego	247
4.2. Wektory kauzalne	252
4.2.1. Definicje	252
4.2.2. Nierówności Cauchy’ego–Buniakowskiego–Schwarza	256
4.3. Podprzestrzeń wektorowej przestrzeni Minkowskiego	257
4.4. Podprzestrzeń liniowe wymiaru 2	262
4.5. Przekształcenia Lorentza przestrzeni $\mathcal{M}_4$	264
4.6. Transformacje czynne i bierne	267
5. Czasoprzestrzeń Minkowskiego	270
5.1. Własności przestrzeni afinicznej	270
5.2. Afiniczna przestrzeń Minkowskiego	272
5.3. Liniowe podprzestrzenie czasoprzestrzeni	275
5.4. Trójkąty w czasoprzestrzeni	278
5.4.1. Płaszczyzna przestrzenna S_2	278
5.4.2. Płaszczyzna czasowa T_2	278
5.4.3. Płaszczyzna zerowa N_2	282
5.4.4. Trójkąty prostokątne	283
5.5. Stożki świetlne i proste kauzalne	283
5.5.1. Własności stożków zerowych	283
5.5.2. Foliacja stożkowa	286
5.6. Tetrady nieortonormalne	288
5.6.1. Wprowadzenie	288
5.7. Fizyczny sens współrzędnych i hiperpowierzchni	293
5.8. Zmienne zerowe na płaszczyźnie Minkowskiego	297
5.9. Krzywoliniowe układy współrzędnych	298
5.10. Struktura kauzalna czasoprzestrzeni	306
5.11. Przekształcenia czasoprzestrzeni Minkowskiego — transformacje czynne	312
5.12. Transformacje bierne	314
5.13. Grupy Lorentza i Poincarégo	315
5.14. Automorfizm kauzalny i uniwersalność transformacji Lorentza	316
5.15. Transformacja Lorentza i współrzędne krzywoliniowe	321
6. Grupa Lorentza	325
6.1. Podstawowe własności macierzy Lorentza	325
6.2. Składowe grupy Lorentza	328
6.3. Dyskretne transformacje Lorentza	330
6.3.1. Inwersje podstawowe	330
6.3.2. Ogólne inwersje w czasoprzestrzeni	332

6.4. Powierzchnie tranzytywności	335
6.5. Objętość równoległościanu	336
6.6. Pseudoskalary i pseudowektory	338
6.6.1. Mechanika klasyczna	341
6.6.2. Teoria relatywistyczna	341
6.7. Wektory i wartości własne macierzy Lorentza	342
6.8. Małe grupy	346
6.9. Obroty przestrzenne	347
6.9.1. Pojęcia podstawowe	347
6.9.2. Obroty właściwe i grupa $SO(3)$	348
6.10. Boosty (pchnięcia)	354
6.10.1. Definicja i podstawowe własności	354
6.10.2. Ogólna postać boostu	358
6.11. Rozkład polarny	363
6.12. Obroty zerowe	365
6.13. Czasoprzestrzeń jako rozmaitość i pola wektorowe Killinga	371
6.13.1. Generatory transformacji Lorentza	371
6.13.2. Wyznaczenie grupy izometrii z pola Killinga	374
6.14. Wektory Killinga czasoprzestrzeni	378
6.15. Eksponencjalna postać macierzy Lorentza	382
6.16. Obrót Thomasa–Wignera	388
6.17. Grupa Lorentza i grupa $SL(2, \mathbb{C})$	393
6.17.1. Ogólna relacja obu grup	393
6.17.2. Grupa $SU(2)$ i obroty przestrzenne	399
6.17.3. Macierze hermitowskie i boosty	400
6.17.4. Drugi rozkład polarny	402
6.18. Transformacje Lorentza i homografie	403
6.19. Wartości własne a grupa $SL(2, \mathbb{C})$	410
6.20. Klasyfikacja homografii	414
6.20.1. Transformacje eliptyczne	415
6.20.2. Transformacje hiperboliczne	416
6.20.3. Transformacje paraboliczne	416
6.20.4. Transformacje loksodromiczne	417
6.21. Kanoniczna postać niezdegenerowanej transformacji Lorentza	418
6.22. Izomorfizm grupy Lorentza i grupy $SO(3, \mathbb{C})$	420
7. Pomiary w czasoprzestrzeni	423
7.1. Synchronizacja zegarów w ruchu względnym	423
7.2. Chronometria	425
7.3. Prędkości względne	427
7.4. Niewidzialność kontrakcji lorentzowskiej	428
7.4.1. Problem obserwowalności kontrakcji	428
7.4.2. Transformacje sfery niebieskiej	430
7.5. Paradoxy kinematyczne	435
7.5.1. Paradoxy ruchu jednostajnego prostoliniowego i obrotowego	435
7.5.2. Paradoxy ruchu przyspieszonego	438
7.5.3. Ruchy jednostajne w dwu wymiarach	443
7.6. Paradoxy dynamiczne bryły sztywnej	445

7.7. Paradoxy momentów siły	448
7.8. Prędkości nadświatłne w zwykłej materii	451
7.8.1. Postawienie problemu	451
7.8.2. Prędkości pakietów falowych w ośrodkach z dyspersją	452
7.8.3. Sygnały na frontach falowych	454
7.8.4. Światło w ośrodkach anomalnych	458
7.8.5. Efekt Scharnhorsta	458
7.9. Tachiony	460
7.9.1. Tachiony jako cząstki klasyczne	461
7.9.2. Tachiony jako pola fizyczne	464
7.9.3. Tachionowy antytelefon	465
Uzupełnienia	467
A. Pseudoinercjalny układ odniesienia w czasoprzestrzeni ultrastatycznej	467
B. Transformacja temperatury	473
C. Pomiar prędkości światła	475
C.1. Niezależność prędkości światła od prędkości i kierunku ruchu obserwatora względem wyróżnionego układu odniesienia	480
C.2. Niezależność prędkości światła od kierunku przy przelocie w jedną stronę	481
C.3. Niezależność prędkości światła od ruchu źródła względem eteru	482
C.4. Niezależność prędkości światła od częstości (energii)	484
D. Hiperboloidy w czasoprzestrzeni	485
D.1. Dwa rodzaje hiperboloid	485
D.2. Przestrzeń prędkości	490
E. Liniowość transformacji Lorentza	491
F. Granica nierelatywistyczna transformacji Lorentza	493
G. Tożsamość punktów czasoprzestrzeni i dyfeomorfizmy	496
H. Równoważność masy i energii a czarne dziury	505
I. Czterowektor entalpii cieczy doskonalej	506
J. Kowariantność i symetrie	509
Bibliografia	515
Skorowidz rzeczowy	520
Skorowidz nazwisk	527