

Spis treści

Przedmowa	xi
I ■ PRZESTRZEŃ I CZAS W FIZYCE NEWTONOWSKIEJ ORAZ SZCZEGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI	1
1 ■ Grawitacja	3
2 ■ Geometria jako fizyka	14
2.1 Grawitacja to geometria	14
2.2 Geometria a doświadczenie	16
2.3 Różne geometrie	19
2.4 Określenie geometrii	22
2.5 Współrzędne i element liniowy	23
2.6 Współrzędne i niezmienniczość	30
3 ■ Przestrzeń, czas i grawitacja w fizyce newtonowskiej	34
3.1 Inercjalne układy odniesienia	34
3.2 Zasada względności	40
3.3 Newtonowska teoria grawitacji	42
3.4 Masa grawitacyjna i masa bezwładna	46
3.5 Zasada wariacyjna w mechanice newtonowskiej	47
4 ■ Zasady szczególnej teorii względności	52
4.1 Dodawanie prędkości i eksperyment Michelsona–Morleya	52
4.2 Rozwiązanie problemu podane przez Einsteina i jego konsekwencje	54
4.3 Czasoprzestrzeń	57

4.4	Dylatacja czasu i paradoks bliźniąt	67
4.5	Pchnięcia Lorentza	73
4.6	Jednostki	80
5	■ Mechanika relatywistyczna	86
5.1	Czterowektory	86
5.2	Kinematyka relatywistyczna	92
5.3	Dynamika relatywistyczna	95
5.4	Zasada wariacyjna dla cząstki swobodnej	100
5.5	Promienie świetlne	102
5.6	Obserwatorzy i obserwacje	107
II	■ ZAKRZYWIONA CZASOPRZESTRZEŃ W OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI	117
6	■ Grawitacja jako geometria	119
6.1	Doświadczalna weryfikacja równości masy grawitacyjnej i masy bezwładnej	119
6.2	Zasada równoważności	123
6.3	Zegary w polu grawitacyjnym	127
6.4	Globalny System Wyznaczania Pozycji (GPS)	135
6.5	Czasoprzestrzeń jest zakrzywiona	139
6.6	Newtonowska teoria grawitacji w języku geometrii czasoprzestrzeni	140
7	■ Opis zakrzywionej czasoprzestrzeni	150
7.1	Współrzędne	150
7.2	Metryka	153
7.3	Konwencja sumacyjna	154
7.4	Lokalne układy inercjalne	156
7.5	Stożki świetlne i linie świata	158
7.6	Długość, pole, objętość i objętość czterowymiarowa w przypadku metryki diagonalnej	162
7.7	Zanurzenie czasoprzestrzeni i tunele czasoprzestrzenne	165
7.8	Wektory w zakrzywionej czasoprzestrzeni	169
7.9	Trójwymiarowe powierzchnie w czterowymiarowej czasoprzestrzeni	176

- 8 ■ Linie geodezyjne 188**
- 8.1 Równanie linii geodezyjnych 188
 - 8.2 Rozwiązywanie równania linii geodezyjnej – symetrie i zasady zachowania 195
 - 8.3 Zerowe linie geodezyjne 199
 - 8.4 Lokalne układy inercjalne i układy swobodnie spadające 200
- 9 ■ Czasoprzestrzeń w otoczeniu sferycznej gwiazdy 208**
- 9.1 Czasoprzestrzeń Schwarzschilda 208
 - 9.2 Grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni 212
 - 9.3 Orbity cząstek – precesja peryhelium 214
 - 9.4 Trajektorie promieni świetlnych – ugięcie promieni i opóźnienie sygnałów 228
- 10 ■ Testy ogólnej teorii względności w Układzie Słonecznym 245**
- 10.1 Grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni 245
 - 10.2 Parametry PPN 248
 - 10.3 Pomiar parametru γ w przybliżeniu PPN 250
 - 10.4 Pomiar parametru β – precesja peryhelium Merkurego w przybliżeniu PPN 257
- 11 ■ Relatywistyczne efekty grawitacyjne 262**
- 11.1 Soczewki grawitacyjne 262
 - 11.2 Dyski akrecyjne wokół zwartych obiektów 272
 - 11.3 Podwójne pulsary 279
- 12 ■ Grawitacyjne zapadanie się ciał i czarne dziury 285**
- 12.1 Czarna dziura Schwarzschilda 288
 - 12.2 Powstanie czarnej dziury wskutek grawitacyjnego zapadania 293
 - 12.3 Współrzędne Kruskala–Szekeresa 301
 - 12.4 Niesferyczne grawitacyjne zapadanie się gwiazdy 307
- 13 ■ Astrofizyka czarnych dziur 314**
- 13.1 Czarne dziury w rentgenowskich układach podwójnych 315
 - 13.2 Czarne dziury w jądrach galaktyk 318
 - 13.3 Kwantowe parowanie czarnych dziur – promieniowanie Hawkinga 323

14 ■ Powolna rotacja	332
14.1 Rotacyjne wleczenie inercjalnych układów odniesienia	333
14.2 Żyroskopy w zakrzywionej czasoprzestrzeni	334
14.3 Precesja geodezyjna	336
14.4 Czasoprzestrzeń w otoczeniu powoli wirującego sferycznego ciała	339
14.5 Żyroskopy w czasoprzestrzeni wokół powoli wirującego sferycznego ciała	340
14.6 Żyroskopy i swobodnie spadające układy	345
15 ■ Wirujące czarne dziury	348
15.1 Kosmiczna cenzura	348
15.2 Czasoprzestrzeń Kerra	349
15.3 Horyzont wirującej czarnej dziury	352
15.4 Orbity w płaszczyźnie równikowej	355
15.5 Ergosfera	362
16 ■ Fale grawitacyjne	372
16.1 Zlinearyzowana fala grawitacyjna	373
16.2 Detekcja fal grawitacyjnych	374
16.3 Polaryzacja fal grawitacyjnych	378
16.4 Interferometryczne detektory fal grawitacyjnych	381
16.5 Energia fal grawitacyjnych	384
17 ■ Obserwacje Wszechświata	390
17.1 Budowa Wszechświata	391
17.2 Ekspansja Wszechświata	395
17.3 Mapy Wszechświata	404
18 ■ Modele kosmologiczne	410
18.1 Jednorodne i izotropowe czasoprzestrzenie	410
18.2 Kosmologiczne przesunięcie ku czerwieni	413
18.3 Materia, promieniowanie i próżnia	416
18.4 Ewolucja płaskich modeli FRW	422
18.5 Wielki Wybuch, wiek i rozmiary Wszechświata	426
18.6 Metryki Robertsona–Walkera z niezerową krzywizną przestrzeni	431
18.7 Dynamika Wszechświata	435

- 19 ■ Jaki model opisuje rzeczywisty Wszechświat? 449**
- 19.1 Obmierzanie Wszechświata 451
 - 19.2 Jak wyjaśnić budowę Wszechświata 460
- III ■ RÓWNANIE EINSTEINA 467**
- 20 ■ Jeszcze trochę matematyki 469**
- 20.1 Wektory 469
 - 20.2 Wektory dualne 471
 - 20.3 Tensory 478
 - 20.4 Pochodna kowariantna 482
 - 20.5 Swobodnie spadające układy odniesienia raz jeszcze 493
- 21 ■ Krzywizna czasoprzestrzeni i równanie Einsteina 499**
- 21.1 Siły pływowe 499
 - 21.2 Równanie dewiacji linii geodezyjnych 504
 - 21.3 Tensor krzywizny Riemanna 509
 - 21.4 Równanie Einsteina w próżni 511
 - 21.5 Zlinearyzowana teoria grawitacji 515
- 22 ■ Źródła krzywizny 528**
- 22.1 Gęstości 528
 - 22.2 Zasada zachowania energii i pędu 536
 - 22.3 Równanie Einsteina 540
 - 22.4 Granica newtonowska 544
- 23 ■ Emisja fal grawitacyjnych 551**
- 23.1 Zlinearyzowane równanie Einsteina ze źródłami 551
 - 23.2 Rozwiązanie równania falowego ze źródłem 553
 - 23.3 Ogólne rozwiązanie zlinearyzowanego równania Einsteina 556
 - 23.4 Emisja słabych fal grawitacyjnych 559
 - 23.5 Promieniowanie grawitacyjne układów podwójnych 563
 - 23.6 Wzór kwadrupolowy na utratę energii wskutek emisji fal grawitacyjnych 567
 - 23.7 Wpływ emisji promieniowania grawitacyjnego na ruch podwójnego pulsara 569
 - 23.8 Silne źródła 572

24 ■ Relatywistyczne gwiazdy	577
24.1 Zasada Pauliego	578
24.2 Równowaga hydrostatyczna w przypadku relatywistycznym	582
24.3 Modele gwiazd	585
24.4 Stan podstawowy materii	589
24.5 Stabilność	591
24.6 Maksymalna masa gwiazd neutronowych	597
A ■ Jednostki	604
A.1 Problem jednostek	604
A.2 Jednostki używane w tej książce	605
B ■ Wielkości opisujące krzywiznę	608
C ■ Krzywizna i równanie Einsteina	613
D ■ Strategia dydaktyczna	618
D.1 Zasady dydaktyczne	618
D.2 Organizacja	620
D.3 Planowanie wykładu	622
Załączniki	624
Bibliografia	629
Źródła ilustracji	635
Indeks	637