

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 Rozwiązanie 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