

# Spis treści

<b>Przedmowa</b>	<b>xi</b>
<b>I ■ PRZESTRZEŃ I CZAS W FIZYCE NEWTONOWSKIEJ ORAZ SZCZEGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI</b>	<b>1</b>
<b>1 ■ Grawitacja</b>	<b>3</b>
<b>2 ■ Geometria jako fizyka</b>	<b>14</b>
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
<b>3 ■ Przestrzeń, czas i grawitacja w fizyce newtonowskiej</b>	<b>34</b>
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
<b>4 ■ Zasady szczególnej teorii względności</b>	<b>52</b>
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
<b>5</b>	<b>■ Mechanika relatywistyczna</b>	<b>86</b>
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
<b>II</b>	<b>■ ZAKRZYWIONA CZASOPRZESTRZEŃ W OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI</b>	<b>117</b>
<b>6</b>	<b>■ Grawitacja jako geometria</b>	<b>119</b>
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
<b>7</b>	<b>■ Opis zakrzywionej czasoprzestrzeni</b>	<b>150</b>
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

<b>8 ■ Linie geodezyjne</b>	<b>188</b>
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
<b>9 ■ Czasoprzestrzeń w otoczeniu sferycznej gwiazdy</b>	<b>208</b>
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
<b>10 ■ Testy ogólnej teorii względności w Układzie Słonecznym</b>	<b>245</b>
10.1 Grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni	245
10.2 Parametry PPN	248
10.3 Pomiar parametru $\gamma$ w przybliżeniu PPN	250
10.4 Pomiar parametru $\beta$ – precesja peryhelium Merkurego w przybliżeniu PPN	257
<b>11 ■ Relatywistyczne efekty grawitacyjne</b>	<b>262</b>
11.1 Soczewki grawitacyjne	262
11.2 Dyski akrecyjne wokół zwartych obiektów	272
11.3 Podwójne pulsary	279
<b>12 ■ Grawitacyjne zapadanie się ciał i czarne dziury</b>	<b>285</b>
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
<b>13 ■ Astrofizyka czarnych dziur</b>	<b>314</b>
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

<b>14 ■ Powolna rotacja</b>	<b>332</b>
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
<b>15 ■ Wirujące czarne dziury</b>	<b>348</b>
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
<b>16 ■ Fale grawitacyjne</b>	<b>372</b>
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
<b>17 ■ Obserwacje Wszechświata</b>	<b>390</b>
17.1 Budowa Wszechświata	391
17.2 Ekspansja Wszechświata	395
17.3 Mapy Wszechświata	404
<b>18 ■ Modele kosmologiczne</b>	<b>410</b>
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

---

<b>19 ■ Jaki model opisuje rzeczywisty Wszechświat?</b>	<b>449</b>
19.1 Obmierzanie Wszechświata	451
19.2 Jak wyjaśnić budowę Wszechświata	460
<b>III ■ RÓWNANIE EINSTEINA</b>	<b>467</b>
<b>20 ■ Jeszcze trochę matematyki</b>	<b>469</b>
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
<b>21 ■ Krzywizna czasoprzestrzeni i równanie Einsteina</b>	<b>499</b>
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
<b>22 ■ Źródła krzywizny</b>	<b>528</b>
22.1 Gęstości	528
22.2 Zasada zachowania energii i pędu	536
22.3 Równanie Einsteina	540
22.4 Granica newtonowska	544
<b>23 ■ Emisja fal grawitacyjnych</b>	<b>551</b>
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

<b>24 ■ Relatywistyczne gwiazdy</b>	<b>577</b>
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
<b>A ■ Jednostki</b>	<b>604</b>
A.1 Problem jednostek	604
A.2 Jednostki używane w tej książce	605
<b>B ■ Wielkości opisujące krzywiznę</b>	<b>608</b>
<b>C ■ Krzywizna i równanie Einsteina</b>	<b>613</b>
<b>D ■ Strategia dydaktyczna</b>	<b>618</b>
D.1 Zasady dydaktyczne	618
D.2 Organizacja	620
D.3 Planowanie wykładu	622
<b>Załączniki</b>	<b>624</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>629</b>
<b>Źródła ilustracji</b>	<b>635</b>
<b>Indeks</b>	<b>637</b>